



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

**MEJORA EN HARDWARE Y SOFTWARE DE UN
SISTEMA DE MEDIDA DE CORRIENTES INDUCIDAS
POR HAZ DE LUZ (LBIC)**

Autor:

González Francés, Diego

Tutor(es):

**Serrano Gutierrez, Jorge
Departamento de física**

Valladolid, Junio 2021.



RESUMEN

En el presente trabajo se explica detalladamente el proceso llevado a cabo en la mejora y actualización de un sistema de medida LBIC (*“light beam induced current”*). Dicha actualización la realizaremos tanto en la parte software que controla el sistema utilizando para ello el entorno de programación LabVIEW, optimizando el programa utilizado hasta ahora, como en lo relacionado al hardware, realizando los cambios oportunos sobre los dispositivos que conforman el sistema, además se acoplará a este un espectrómetro dotado de un detector para realizar medidas de emisión de fotoluminiscencia de manera síncrona o alternada con las medidas LBIC.

PALABRAS CLAVE

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

ABSTRACT

This document explains in detail the process carried out to improve and update a LBIC (light beam induced current) measurement system. This update will be carried out in the software part that controls the system using LabVIEW programming environment, optimizing the program used so far. As well as in relation to the hardware, making the appropriate changes to the devices that make up the system a spectrometer will also be added to it to perform photoluminescence emission measurements synchronously or alternately with the LBIC measurements.

KEYWORDS

- LBIC
- Hardware
- Software
- LabVIEW
- Solar cells
- Photoluminescence



Agradecimientos

A mis tutores Dr. Miguel Ángel González Rebollo y Dy. Jorge Serrano Gutiérrez por ofrecerme este trabajo y sus conocimientos durante la realización de este.

A mis compañeros de laboratorio Cristian, Juan y Ángel por ayudarme durante toda la realización de las prácticas y por ello de este trabajo.

A mis padres Juanjo y Cris, a mi hermana Paula, a Alicia y todos mis amigos por el apoyo durante todo este tiempo para hacerlo todo más fácil.



INDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	12
1.1. CONCEPTOS TEÓRICOS	13
1.1.1. MEDIDA LBIC.....	13
1.1.2. PROGRAMACIÓN EN LABVIEW	15
2. PLANIFICACIÓN Y COSTES	19
3. DESARROLLO.....	21
3.1. ANÁLISIS DEL SISTEMA	21
3.1.1. MICROSCOPIO.....	22
3.1.2. EQUIPOS LASER.....	23
3.1.3. MESA POSICIONADORA.....	24
3.1.4. ELECTROMETRO	26
3.1.5. CÁMARA Y CAPTURADORA	28
3.1.6. CAMBIOS EN EL SISTEMA	29
3.2. DESARROLLO DEL SOFTWARE.....	30
3.2.1. PANTALLA INICIAL O MENÚ INICIAL.....	31
3.2.2. INICIALIZACIÓN	32
3.2.3. CONFIGURACIÓN.....	35
3.2.4. MEDIDA LBIC.....	39
3.2.5. RESULTADOS	49
3.3. INSTALACIÓN DEL ESPECTRÓMETRO.....	53
3.3.1. INSTALACIÓN HARDWARE.....	55
3.3.2. INSTALACIÓN SOFTWARE.....	56
3.4. CAMBIOS FINALES	64
3.4.1. GUARDAR Y CARGAR SESIÓN	64
3.4.2. BARRIDO CONTINUO.....	66
3.5. FINALIZACIÓN DEL SOFTWARE	69
4. RESULTADOS.....	70
4.1. MEDIDA LBIC CON BARRIDO CONTINUO	70
4.2. MEDIDA LBIC CON BARRIDO DISCRETO.....	72
4.3. MEDIDA DE FOTOLUMINISCENCIA.....	73
4.4. COMPARATIVA ENTRE SOFTWARES.....	74
5. CONCLUSIONES.....	76



6. LINEAS DE TRABAJO FUTURAS	78
7. BIBLIOGRAFÍA	82

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la técnica de medida y caracterización LBIC.	14
Figura 2 Ejemplo (d) mapa de foto-corriente de la (i) imagen real correspondiente con un objetivo x5.....	14
Figura 3. Ejemplo de un panel frontal en LabVIEW.....	16
Figura 4. Ejemplo de un diagrama de bloques en LabVIEW.	16
Figura 5. Estructuras lógicas básicas del entorno de programación LabVIEW.....	17
Figura 6. Diagrama GANT del proceso de actualización.....	19
Figura 7. Esquema del sistema de medida LBIC.	21
Figura 8. Microscopio óptico utilizado en el sistema.....	22
Figura 9. Emisor láser dual del sistema con (d) las fuentes de alimentación de cada láser.....	23
Figura 10. Mesa motorizada para el posicionamiento de las muestras.....	25
Figura 11. Electrómetro del sistema.....	26
Figura 12. Cámara de video y (ab) capturadora USB.	28
Figura 13. PF del menú principal del software.....	31
Figura 14. DB del subVI SALTO.....	32
Figura 15. PF de la ventana de inicialización.....	32
Figura 16. DB de la inicialización del electrómetro.	33
Figura 17. DB de la inicialización de la cámara.....	34
Figura 18. DB de la inicialización de la mesa posicionadora.....	35
Figura 19. PF de la ventana de configuración.....	36
Figura 20. Colocación del joystick para el movimiento correcto de la mesa.	36
Figura 21. DB de la captura de imagen en el panel de configuración.	37
Figura 22. DB de la actualización de posición de la mesa mediante el joystick.	37
Figura 23. DB del movimiento y actualización de posición de la mesa mediante los controles del interfaz.....	38
Figura 24. DB del reseteo de la posición de la mesa.	38
Figura 25. DB de la captura de la imagen visualizada en el panel de configuración.	39
Figura 26. PF de la ventana de medida LBIC.	39
Figura 27. Esquema relación óptima entre la distancia entre puntos y el diámetro del spot.....	40
Figura 28. DB del bucle inicial del panel de medida LBIC.....	41
Figura 29. Esquema de las direcciones en cada eje durante el barrido.....	41
Figura 30. Comparación de la imagen referencia con el resultado. Variación (-400,-400).....	42
Figura 31. Comparación de la imagen referencia con el resultado. Variación (-900,-900).....	42
Figura 33. Superposición de la referencia y el resultado (-900,-900) con distancias.	43
Figura 32. Superposición de la referencia y el resultado (-400,-400) con distancias.	43
Figura 34. Comparación entre la imagen referencia y el resultado. Variación (-720,-621).....	44
Figura 35. DB de la primera configuración del electrómetro previa al barrido.....	45
Figura 36. DB de la configuración del visualizador en tiempo real de los mapas....	45

Figura 37. Disposición de los datos en una matriz en LabVIEW.....	46
Figura 38. DB del proceso de medida de la luz reflejada en un punto del barrido..	47
Figura 39. DB del proceso de medida de intensidad en un punto del barrido.....	47
Figura 40. DB del movimiento de la mesa de un punto a otro en X y (d) de uno a otro en Y.....	48
Figura 41. DB de la actualización de los puntos del barrido mostrada en el interfaz.	48
Figura 42. PF de la ventana de resultados LBIC y luz reflejada.....	49
Figura 43. Ejemplo de un mapa de foto-corriente resultado en 2D y (d) 3D.	50
Figura 44. DB del proceso para visualizar el valor y posición de un punto en un mapa 2D.	51
Figura 45. DB del proceso para obtener el perfil horizontal en un mapa 2D.	51
Figura 46. DB del proceso para obtener el perfil vertical en un mapa 2D.....	52
Figura 47. DB del proceso para obtener el perfil libre en un mapa 2D.	52
Figura 48. DB del guardado de mapas y perfiles en diferentes formatos.	53
Figura 49. Espectrómetro utilizado en el sistema.	54
Figura 50. Disposición de la cámara y fibra del espectrómetro en el microscopio..	55
Figura 51. Espectro medido con 30 segundos, 1 media y 5 puntos de media.	57
Figura 52. PF de la ventana de inicialización incluyendo el espectrómetro.	58
Figura 53. DB del proceso de inicialización del espectrómetro.....	58
Figura 54. PF de la ventana de la medida de fotoluminiscencia.....	59
Figura 55. Ejemplo de un intervalo de 2 en cada eje sobre una matriz 10x10 quedando una matriz resultado 5x5.....	60
Figura 56. Ejemplo de un intervalo de 4 general sobre una matriz 10x10 quedando una matriz resultado irregular.	60
Figura 57. DB del proceso de medida del "espectro oscuro" previo a la medida de fotoluminiscencia.	61
Figura 58. DB de las diferentes matrices con datos medidos por el espectrómetro.	62
Figura 59. PF de la ventana del tratado de resultados de una medida de fotoluminiscencia.	63
Figura 60. PF del menú principal final.	64
Figura 61. PF de la ventana para cargar una sesión.....	65
Figura 62. DB de la creación y guardado de sesiones de medida LBIC y (d) fotoluminiscencia.	65
Figura 63. DB de la carga de sesiones de resultados de medida LBIC y (ab) de fotoluminiscencia.	66
Figura 64. PF de la ventana de medida LBIC final con la opción de barrido continuo.	67
Figura 65. DB del proceso de medición en el barrido continuo.....	68
Figura 66. Primera medida LBIC en barrido continuo de ejemplo.....	70
Figura 67. Segunda medida LBIC en barrido continuo de ejemplo.	71
Figura 68. Primera medida LBIC con barrido discreto y (d) una visión cenital del mismo mapa pero en 3D.....	72
Figura 69. Segunda medida LBIC con barrido discreto y (d) un perfil vertical obtenido del mapa.	72



Figura 70. Medida de fotoluminiscencia con (d) el mismo mapa pero con una representación 3D.....73



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución estimada del tiempo con la duración en días para cada tarea de actualización.....	19
Tabla 2. Desglose de los costes asociados a la actualización.....	20
Tabla 3. 2	23
Tabla 4. Aumentos disponibles en el microscopio y sus AN correspondientes.	23
Tabla 5. Características de los láseres disponibles en nuestro sistema, siendo la longitud de onda, potencia máxima y diámetros del spot para objetivos de x5, x20 y x50 cada fila de arriba a abajo.....	24
Tabla 6. <i>Características del conjunto de la mesa posicionadora</i>	25
Tabla 7. Características del electrómetro.....	27
Tabla 8. Características de la cámara del sistema.....	29
Tabla 9. Tamaño de imágenes según el objetivo del microscopio.	29
Tabla 10. Correcciones necesarias del punto 0 de la mesa antes de comenzar el barrido para cada objetivo.	44
Tabla 11. Características del espectrómetro.	54
Tabla 12. Parámetros recomendados para las medidas de fotoluminiscencia con el espectrómetro.....	56
Tabla 13. Parámetros primera medida LBIC en barrido continuo.	70
Tabla 14. Parámetros segunda medida LBIC en barrido continuo.....	71
Tabla 15. Primera medida LBIC en barrido discreto de ejemplo.	72
Tabla 16. Segunda medida LBIC en barrido discreto de ejemplo.	72
Tabla 17. Parámetros de la medida de fotoluminiscencia de ejemplo.....	73



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El sistema de medida LBIC (“light beam induced current” o, traducido al castellano, “corriente inducida mediante luz laser”) objeto de este trabajo está ubicado en el laboratorio de caracterización de semiconductores del grupo de investigación reconocido GdS-Optronlab del departamento de física de la materia condensada, cristalografía y mineralogía en el edificio LUCIA dentro del campus Miguel Delibes.

Este equipamiento que se emplea actualmente en el estudio de placas fotovoltaicas y muestras de silicio lo componen distintos dispositivos hardware. Los elementos más importantes y necesarios son un microscopio óptico, una mesa posicionadora, una cámara de video con su respectiva capturadora y un electrómetro, los cuales se detallarán en puntos posteriores. Los diferentes dispositivos trabajan conjuntamente y se relacionan entre ellos y con el usuario mediante un software programado en el entorno LabVIEW desde un ordenador para realizar correctamente los procesos pertinentes.

Partiendo de esta situación, se pretende llevar a cabo una actualización y mejora de dicho sistema, tanto en su parte hardware como en el software con el fin de:

- i. Mejorar el rendimiento global del equipo en conjunto.
- ii. Optimizar el programa que lo gobierna en cuestión.
- iii. Acelerar, en la medida de lo posible, el proceso de medición manteniendo la calidad en los resultados.
- iv. Además, se pretende añadir un dispositivo dotado con un espectrómetro y un detector integrado con el fin de complementar las medidas de LBIC con la capacidad de analizar la emisión por fotoluminiscencia de las muestras estudiadas.

Para ello se hará un análisis de todos los posibles factores que puedan intervenir en estas mejoras para modificar los que sean convenientes.

- En lo referente a la parte hardware:
 - Inicialmente se estudiarán los dispositivos presentes actualmente para confirmar que sus características son suficientes para aumentar la velocidad global del sistema y sustituir aquellos que sean necesario.
 - También se analizará el beneficio de variar su disposición o interconexión con el mismo fin.
 - Además, posteriormente se añadirá un espectrómetro al sistema para analizar el espectro de la luz emitida por las muestras. Esto implica la necesidad de adaptar dicho espectrómetro al sistema en general y al microscopio en particular ya que es el encargado de recoger la luz con la que trabajará.

- Por otra parte, y en lo referente al software, partiendo del programa utilizado actualmente en lenguaje LabVIEW que solo es válido para el ordenador en el que se programó inicialmente, y:
 - Se realizará uno nuevo, reciclando las partes o funcionalidades útiles del anterior y eliminando u optimizando las que no se utilizan o son claramente mejorables.
 - Se analizarán los actuales drivers controladores de cada dispositivo y se incluirán los del nuevo espectrómetro para incluirlo en el programa en cuestión.
 - Además, se buscará que el nuevo software se pueda utilizar en cualquier equipo que se desee, intentando además que sea en forma de instalable o ejecutable y no copiando todos los archivos involucrados para así poder cambiar el ordenador que dirige al sistema en un futuro o de manera eventual sin necesidad de realizar ningún cambio en lo que al programa se refiere.

Por último, como parte del TFG de documentación se realizará un manual de usuario donde se detallará la forma de trabajar con el equipo, tanto a nivel físico como informático, con el fin de que cualquier persona pueda tomar medidas fácilmente sin necesidad de conocer de antemano ni el sistema ni el programa que lo gobierna. Este manual se anexará al presente trabajo.

1.1. CONCEPTOS TEÓRICOS

1.1.1. MEDIDA LBIC

El sistema a actualizar en cuestión es un instrumento dedicado a realizar una técnica de caracterización no destructiva denominada LBIC sobre materiales de aplicaciones fotovoltaicas. En nuestro caso, se utiliza principalmente en paneles fotovoltaicos monofaciales y bifaciales o en obleas de silicio policristalino del que están formados ayudando en todos los casos al estudio y desarrollo de esta fuente de energía. Esta técnica se documentó por primera vez en un artículo de la revista “*Crystal Growth*” en 1990 escrito por los científicos Bajaj y Tennant[1].

Esta técnica se basa en realizar un barrido mediante un haz laser focalizado sobre el panel o muestra de estudio que está conectado mediante contacto eléctrico a un amperímetro[2].

Todo el sistema se encuentra en un ambiente de oscuridad y se mide la intensidad de corriente eléctrica que genera la muestra por efecto fotoeléctrico. Esta corriente surge al absorber los fotones y generar pares electrón-hueco que se desplazan hasta que se recombinan con un portador de signo opuesto. El barrido se puede hacer de

forma continua o punto a punto para después conseguir un resultado global. En la Figura 1 se puede ver un esquema básico del proceso LBIC.

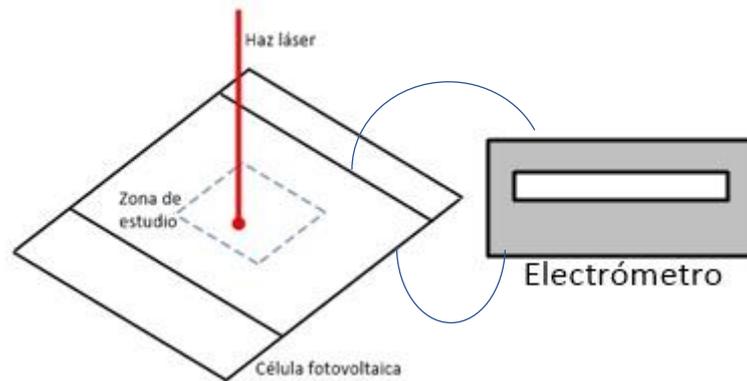


Figura 1. Esquema de la técnica de medida y caracterización LBIC.

Como resultado se obtiene un mapa de foto-corriente donde se puede apreciar y conocer la intensidad según la posición en la que nos encontremos de la muestra y estudiar los defectos o fallos del semiconductor que puedan ser perjudiciales para su aplicación, así como los efectos que pueden tener distintas fallas físicas sobre los paneles como rayones, roturas o efectos de frontera de grano en materiales policristalinos [3][4].

Con el sistema del laboratorio, del que se analizarán detalladamente posteriormente sus elementos, este mapa se puede obtener tanto en forma numérica (un documento con los valores de intensidad de cada punto en forma de matriz) para poder trabajar posteriormente con estos datos, como una representación gráfica en forma de imagen en escala de grises como se puede ver en la Figura 2, donde cada pixel se corresponde con un punto medido.

Además, existe la posibilidad de elegir intercambiando el objetivo empleado entre 4 valores de aumento de la muestra (x5, x20, x50 y x100) según el nivel de detalle que busquemos y focalizar el estudio en una zona concreta.

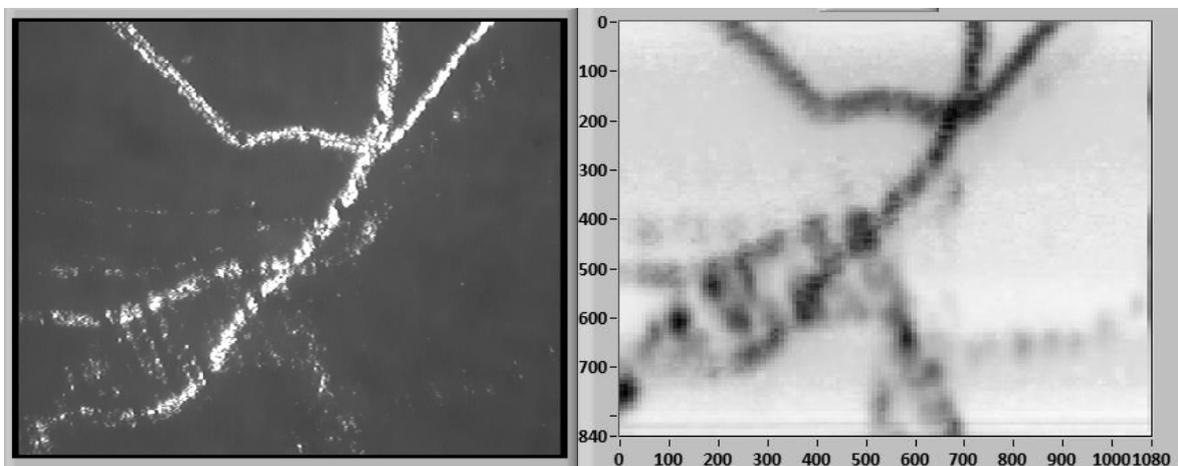


Figura 2 Ejemplo (d) mapa de foto-corriente de la (i) imagen real correspondiente con un objetivo x5.

El resultado del proceso de medida dependerá, tanto de las propiedades naturales o provocadas del material estudiado, como de las condiciones de medida y, en particular, las referentes al haz laser, pudiendo estudiar el comportamiento para haces de diferentes longitudes de onda, potencia de excitación o diámetro del spot que incide sobre la muestra. La precisión de la medida en conjunto dependerá a su vez del número de puntos que se midan sobre la muestra que estará limitado por la mínima distancia entre dos puntos consecutivos que permita resolver el equipo debido a fenómenos de difracción.

En el sistema de medida del laboratorio existe además la posibilidad de medir también la intensidad de luz reflejada por la muestra. Esta medida la realiza la misma cámara que nos sirve inicialmente para seleccionar el área de interés. Con ella se puede generar otro mapa con el cual correlacionar variaciones en la generación de fotocorriente con cambios en la superficie del material, como fracturas u otro tipo de defectos estructurales microscópicos, detectados a partir de los cambios en reflectividad del haz de luz láser.

Uno de los objetivos de este TFG es ampliar esta capacidad de análisis de la reflectividad mediante la instalación y el manejo a través de LabVIEW de un espectrómetro dotado con un detector integrado que permita obtener información de la emisión de foto-luminiscencia en cada punto del área de interés estudiado en la muestra. Esto hará posible obtener mapas de foto-luminiscencia con los cuales comprender mejor de qué manera están correlacionados los cambios estructurales y de foto-corriente con los cambios en los procesos de emisión de luminiscencia.

1.1.2. PROGRAMACIÓN EN LABVIEW

El lenguaje utilizado para programar el software que gobernará el sistema de medida LBIC es el utilizado por la plataforma de desarrollo y diseño de sistemas LabVIEW desarrollado por la empresa National Instruments. Más concretamente en este trabajo se trabajará con la versión LabVIEW 2020.

Se trata de un lenguaje gráfico de alto nivel totalmente modular denominado lenguaje G, que presenta las siguientes ventajas [5]:

- Mucho más simple y comprensible que uno basado en comandos de tipo texto aún sin tener conocimientos previos.
- Gran facilidad de crear, modificar o ampliar subprogramas o módulos sin necesidad de modificar el resto o el programa principal.
- Posibilidad de reutilizar módulos en distintos programas sin necesidad de programarlos desde el principio y pudiéndolos obtener de fabricantes electrónicos o foros de internet.

- Está enfocado a tareas de instrumentación, control y simulación de elementos en la industria por lo que es una buena opción para el sistema LBIC.
- Posee muchas herramientas para interactuar directamente con el usuario, tanto de control como de visualización y permite la comunicación con distintos dispositivos electrónicos.

Cualquier programa en LabVIEW se encuentra en dos secciones, el panel frontal “front panel” y el diagrama de bloques “block diagram”.

- El **panel frontal** es el interfaz con el usuario y en él se sitúan las entradas, salidas, controles, gráficos, señaladores y demás elementos relacionados con la comunicación entre el programa y la persona que lo utiliza. Un ejemplo de panel frontal se muestra en la Figura 3.

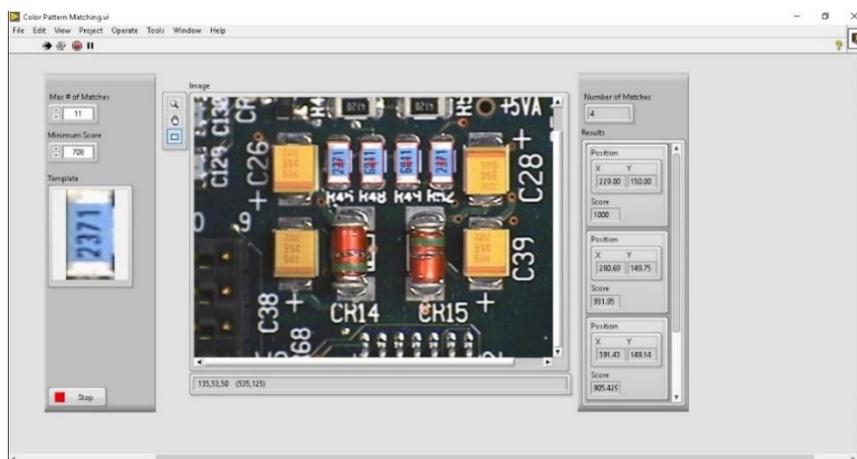


Figura 3. Ejemplo de un panel frontal en LabVIEW.

- El **diagrama de bloques** es la parte donde se sitúa realmente la estructura y los algoritmos necesarios para que la aplicación funcione. Se ubican las funciones lógicas, se realiza la conversión, tratado y almacenamiento de datos o la lectura y escritura de dispositivos conectados. Cuando nuestro programa esté finalizado no habrá necesidad de abrir el diagrama de bloques a menos que se quiera editar alguna funcionalidad y el sistema se controlará

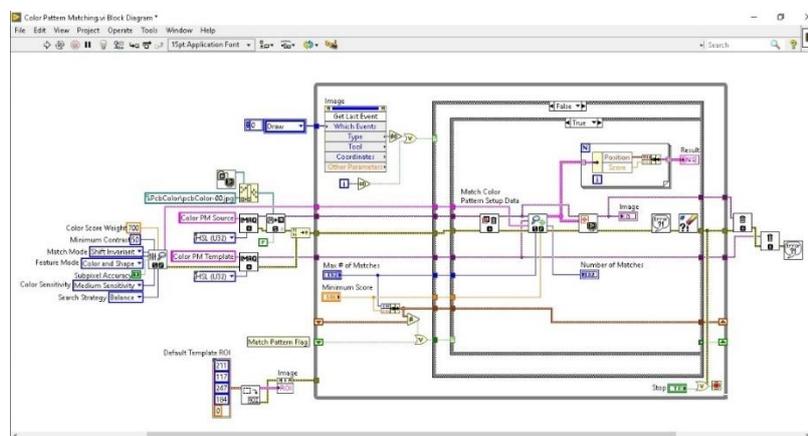


Figura 4. Ejemplo de un diagrama de bloques en LabVIEW.

enteramente desde el panel frontal sin necesidad de comprender como está programado internamente. Un ejemplo se puede ver en la Figura 4.

Un aspecto clave a tener en cuenta, es el hecho de que la ejecución de los distintos bloques no sigue un orden lineal fijo como ocurre en otros lenguajes de programación. Un bloque se ejecuta siempre que todas sus entradas estén disponibles. Además, LabVIEW cuenta con varias herramientas lógicas para ejecutar de cierta forma dichos bloques que merece la pena comentar ya que se hará referencia a ellas continuamente en la descripción del software. Su representación en el diagrama de bloques se muestra en la Figura 5:

- **Bucle *While*:** una vez comienza el bucle *while*, los bloques que haya dentro se ejecutaran de forma cíclica hasta que se cumpla una condición determinada. El tiempo entre ejecuciones se puede establecer mediante bloques pensados para ello.
- **Bucle *For*:** Actúa como el bucle *while* pero un número determinado de veces o iteraciones que se deben indicar. En este caso no es estrictamente necesario establecer un tiempo entre iteraciones. Al cumplir todos los ciclos el bucle termina y el programa continúa.
- **Estructura *Case*:** Si se cumple cierta condición booleana se ejecutarán los bloques estén en el interior de esta estructura, si por el contrario no se cumple se ejecutarán otros. También se puede trabajar con valores no booleanos estableciendo los bloques a ejecutar para cada valor de los posibles en la entrada.
- **Estructura *Event*:** Similar a la estructura *case*, pero ahora la entrada no son solo los valores que pueda tomar cierta variable sino distintos “eventos” que pueden suceder a través de los elementos que tengamos en el panel frontal, como movimientos o clicks del ratón, tiempos transcurridos, interacciones con elementos de control...etc.
- **Estructura *Flat Sequence*:** Esta estructura se divide en diferentes apartados, teniendo la certeza que en este caso si se ejecutaran secuencialmente de izquierda a derecha cuando apartado previo se haya cumplido (todas las salidas activas). Este efecto se puede conseguir parcialmente mediante el

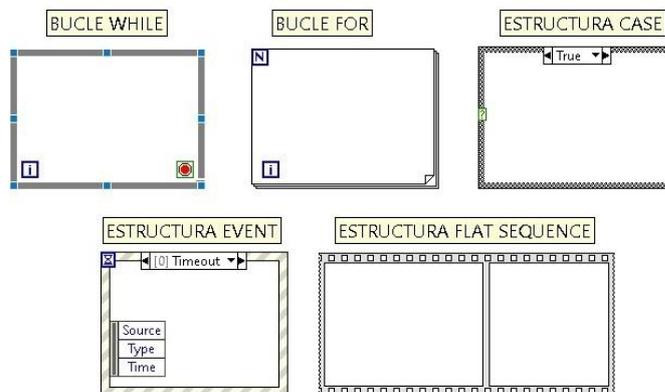


Figura 5. Estructuras lógicas básicas del entorno de programación LabVIEW.

control de errores, pero con esta estructura se logra un mayor orden visual y libertad en la ubicación de los bloques.

Dado que el uso de LabVIEW está muy extendido en la ingeniería, la comunicación entre los distintos dispositivos que conforman el sistema y el entorno de programación se hará mediante *drivers* suministrados por sus respectivos fabricantes. Estos drivers permiten controlar y activar las distintas funciones de cada dispositivo mediante subprogramas ya realizados en el diagrama de bloques, evitando de esta forma programarlos nosotros desde cero mediante bloques genéricos con la dificultad que ello supondría. Para poder utilizar estos drivers será necesario instalar previamente en el ordenador que vaya a ejecutarlos un software propio de cada dispositivo que permita su correcto funcionamiento.

LabVIEW dispone de unos bloques estándar que se incluyen en su versión principal y que se distribuyen en distintas librerías temáticas para facilitar el trabajo, también existe la posibilidad de añadir librerías y bloques, ya sea el propio usuario con *Vis (Virtual Instruments)*, denominación que se le da a los bloques) creados o adquirirlas De terceros incluyendo la propia empresa National Instruments. Para este proyecto se requiere adquirir la librería “*Vision Acquisition Software*” que permite trabajar correctamente cámaras de videos y configurar las mismas y las imágenes que se pueden obtener.

LabVIEW permite agrupar los subprogramas o bloques que intervienen en el programa final en lo que se denomina proyecto, pero aun así puede ser algo tedioso copiar todos los archivos que intervienen en un proyecto de un ordenador a otro, por lo que es muy útil la opción que permite generar un ejecutable y posteriormente un instalable que facilita el uso de la aplicación en cuestión en distintos ordenadores, así se ahorra la necesidad de copiar todo el proyecto ni tener instalado LabVIEW en el ordenador en cuestión.

2. PLANIFICACIÓN Y COSTES

El proceso de actualización completo del sistema, tanto hardware como software, con la instalación del espectrómetro incluida se realizará durante un tiempo total de 300 horas repartidas en 4 meses y 11 días. El tiempo estimado para cada proceso de la actualización se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Distribución estimada del tiempo con la duración en días para cada tarea de

Tarea	Fecha inicio	Duración	Fecha fin
Estudio de los dispositivos que conforman el equipo	01/02/2021	14	14/02/2021
Prueba y toma de datos con el equipo (comprobar rendimiento)	15/02/2021	1,00	15/02/2021
Análisis del programa en LabView	16/02/2021	20,00	07/03/2021
Optimización y actualización de dicho software	08/03/2021	14,00	21/03/2021
Análisis del espectómetro y su implementación	22/03/2021	14,00	04/04/2021
Implementación hardware de los nuevos dispositivos	05/04/2021	7,00	11/04/2021
Implementación software de los nuevos dispositivos	12/04/2021	14	25/04/2021
Toma de datos y pruebas y comparación con las iniciales	26/04/2021	1,00	26/04/2021
Análisis de los resultados y posibles mejoras o cambios	27/04/2021	7	09/05/2021
Finalizar trabajo TFG y posibles temas que queden en el aire o vayan surgiendo	10/05/2021	28	06/06/2021

Como se puede ver, se dejará cierto margen de tiempo para posibles problemas o cuestiones que puedan surgir a lo largo del proceso, pero se respetará el orden de las tareas principales que se han preestablecido, siendo la de mayor duración el análisis y creación del software siendo la tarea principal de dicha actualización.

Si se grafican estos datos para verlos de una manera más visual en un diagrama GANT, nos queda el mostrado en la Figura 6.



Figura 6. Diagrama GANT del proceso de actualización.

En cuanto a los costes asociados a este proceso de actualización, estos se pueden dividir entre:

- Costes materiales: debidos sobre todo a la adquisición de todos los elementos relativos al nuevo espectrómetro.
- Costes de programación.
- Costes indirectos.

Con el presupuesto del espectrómetro conocido, estimando los costes indirectos y suponiendo un sueldo por las tareas de programación, en la Tabla 2 se muestra como quedarían estos costes obteniendo uno total.

Tabla 2. Desglose de los costes asociados a la actualización.

Concepto	Coste unidad	Coste total
Espectrómetro NIRQUEST+1,7	1.411.800 €	14.118,00 €
Software específico para el espectrómetro	415 €	415 €
Adaptador de montura C	154 €	154 €
Fibra óptica de 1000um y 2m	361 €	361 €
Transporte de materiales OceanOptics	100 €	100 €
Horas de trabajo del programador	10€/h	3.000 €
Consumo eléctrico del ordenador y los dispositivos	0,10€/kW	30 €
Material de oficina en general	10 €	10 €
	TOTAL	18.188 €

3. DESARROLLO

3.1. ANÁLISIS DEL SISTEMA

El sistema de medida LBIC está compuesto de varios dispositivos electrónicos con la finalidad de lograr realizar las acciones descritas en el MEDIDA LBIC con la mayor precisión y velocidad posible. A continuación, se describen estos dispositivos y su función particular en sistema para posteriormente analizar si sus prestaciones son suficientes para poder acelerar la toma de medidas y que parámetros podemos modificar para este aumento de velocidad, se puede ver además un esquema de este en la Figura 7.

- El elemento central es un microscopio óptico que interconecta al resto de dispositivos. Su misión principal es focalizar el haz láser sobre la muestra. Este proviene de dos equipos láser duales, dejando la posibilidad de cuatro haces de diferentes longitudes de onda que se alinean hasta el microscopio mediante un conjunto de espejos.
- La muestra se coloca sobre una mesa posicionadora anclada al microscopio, esta permite el movimiento en los tres ejes para seleccionar y enfocar la zona de la muestra que se desea estudiar y posteriormente posicionarse en cada punto del barrido.
- Para medir la corriente eléctrica en cada punto se hace uso de un electrómetro. Los cables encargados de la medición se conectan por un lado al propio electrómetro y por el otro a una regleta de dos terminales que permite hacer las conexiones necesarias dependiendo del tipo de muestra que se utilice.
- Por último, para posicionarnos en la zona de la muestra que queremos estudiar, se hace uso de una cámara de video CCD conectada mecánicamente al microscopio y electrónicamente a una capturadora para poder comunicarse con un ordenador. Además, esta cámara es también la encargada de medir la intensidad de luz reflejada.

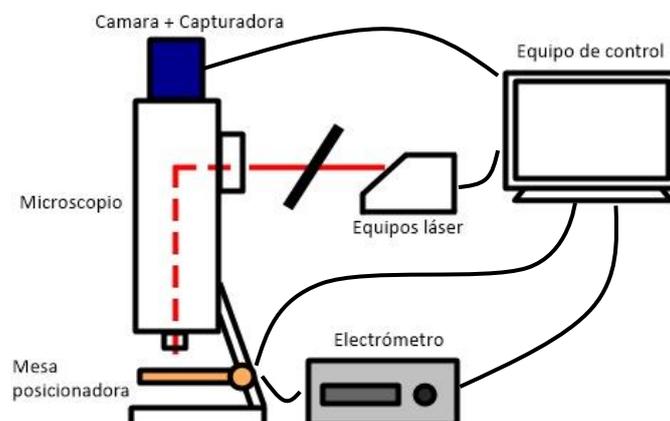


Figura 7. Esquema del sistema de medida

Todos los elementos se sitúan dentro de una estructura que actúa como cámara negra evitando que entre cualquier tipo de luz e interfiera con las medidas. En el exterior de la estructura se encuentra un ordenador equipado con Sistema Operativo Windows 10 al que están conectados todos los dispositivos a excepción del microscopio.

3.1.1. MICROSCOPIO

El elemento central del sistema y que actúa como nexo de unión entre el resto de dispositivos es un microscopio óptico de metal mostrado en la Figura 8.

En nuestro caso se trata de un microscopio de marca Olympus, de la serie BHL con dos módulos BH2-UMA destinados a la iluminación vertical además del tubo de observación con dos oculares y otro MTV-3 para colocar un adaptador de montura tipo C.

La primera misión del microscopio es permitir al usuario visualizar la zona de la muestra de la que se va a realizar la medida gracias a una cámara de video unida mecánicamente a este, Para ello se utiliza una fuente de luz blanca conectada a uno de los módulos y que iluminará la muestra a través de los distintos objetivos para que la cámara pueda captar la luz reflejada de la muestra. El microscopio posee un adaptador manual para seleccionar el lugar por el que se puede observar la luz reflejada (parte superior, oculares o ambos).

Una vez seleccionada la zona, se realizará la misma función con los haces láser que también incidirán a través de los objetivos mientras la mesa posicionadora, unida al microscopio, permite el barrido en la muestra para que se realicen las medidas de luminiscencia e intensidad. Los haces se introducen en el microscopio por un orificio en la parte trasera de uno de los módulos y se alinean hasta el objetivo seleccionado mediante un sistema óptico interno.



Figura 8. Microscopio óptico utilizado en el sistema.

Existe la posibilidad de utilizar tres objetivos distintos con su aumento y apertura numérica (AN) correspondiente, cuya relación se muestra en la Tabla 4, la AN es un valor adimensional que mide la capacidad del microscopio para colectar la luz y que influirá en el tamaño del spot del haz láser.

Tabla 4. Aumentos disponibles en el microscopio y sus AN correspondientes.

Tabla 3. 2	Apertura numérica (AN)
x5	0.13
x20	0.4
x50	0.55
x100	0.95

3.1.2. EQUIPOS LASER

Son los dispositivos encargados de generar el haz láser que, tras pasar por el microscopio, impactarán sobre las muestras estudiadas. En nuestro sistema tenemos la posibilidad de utilizar cuatro haces diferentes con distinta longitud de onda, gracias a que los equipos son duales cada uno genera dos haces diferentes desde el mismo punto reduciendo así las posibles pérdidas de potencia.

Estos equipos se dividen en dos partes:

- **Emisores del haz:** ambos se encuentran dentro de la caja negra y de ellos surge el haz que llegará hasta la muestra. Los modelos son LDM635/830 que permite longitudes de onda de 635nm y 830nm y LDM850/980 con longitudes de 850nm y 975nm.
- **Fuentes de alimentación:** una por cada emisor, está conectada a la tensión de la red, al ordenador mediante los puertos serie y a los propios emisores. Se encargan de gobernar los emisores mediante un software propio instalado en el ordenador de control.



Figura 9. Emisor láser dual del sistema con (d) las fuentes de alimentación de cada láser.

Los haces se alinean hasta una entrada en la parte trasera del microscopio ópticamente mediante unos espejos de los que se puede cambiar su posición para realizar este alineamiento si en algún momento se perdiera el haz. Internamente el microscopio orienta el haz hasta el objetivo que se esté utilizando en un momento dado. Tanto los emisores como las fuentes se muestran en la Figura 9.

Conocida la longitud de onda (λ) de un haz, se puede calcular el diámetro del spot que incide sobre las muestras. Este diámetro depende además del valor de la apertura numérica del objetivo que se utilice.

$$\varnothing_{\text{SPOT}} = \frac{1.22\lambda}{AN}$$

Haciendo un resumen, nos queda Tabla 5 con las características más importantes de cada haz láser.

Tabla 5. Características de los láseres disponibles en nuestro sistema, siendo la longitud de onda, potencia máxima y diámetros del spot para objetivos de x5, x20 y x50 cada fila de arriba a abajo.

LDM635/830		LDM850/980	
639nm	830nm	853nm	975nm
20mW	33mW	50mW	100mW
5.99 μ m	7.78 μ m	8 μ m	9.15 μ m
1.95 μ m	2.53 μ m	2.6 μ m	2.97 μ m
1.417 μ m	1.84 μ m	1.89 μ m	2.16 μ m
0.82 μ m	1.065 μ m	1.095 μ m	1.252 μ m

3.1.3. MESA POSICIONADORA

Dado que el haz láser sale en última instancia por el objetivo del microscopio y este se mantiene fijo en todo momento, para realizar el barrido punto a punto sobre la muestra estudiada se utiliza un equipo de mesa motorizada posicionadora. Es la encargada de posicionar cada punto en el barrido bajo el haz con precisión y rapidez.

Este componente del equipo se divide en tres elementos del fabricante *Prior Scientific*:

- **Mesa motorizada:** modelo H101, ubicada bajo los objetivos del microscopio y unida a este permite el movimiento en los tres ejes cartesianos (X, Y para ubicar el punto y Z para enfocar) gracias a tres motores paso a paso.

En ella se coloca una pletina de cobre, sobre la que se sitúan las muestras, conectada al negativo de la tableta de bornes que estarán conectados al electrómetro. Dependiendo de si se trata de una oblea de silicio o una célula fotovoltaica, esta pletina actuará como masa o negativo respectivamente.

- **Caja controladora:** modelo ProScan II. Es la encargada de recibir las ordenes desde el ordenador y transmitírselas a la mesa motorizada.

La conexión al ordenador se realiza mediante un adaptador a un *hub* USB unido al puerto serie de salida con protocolo RS-232 de la caja. Estará conectada a la tensión de red y a los motores de la mesa.

- **Joystick:** modelo CS152DP, conectado también a la caja controladora permite mover la mesa en los tres ejes si lo habilitamos desde el software del ordenador.

De forma general, se ubicará y enfocará la zona de interés de la muestra mediante el joystick que posteriormente se deshabilitará para que sea el software por medio de la coja controladora el que determine los movimientos de la mesa a lo largo de la medición. En la Figura 10 se muestra la mesa unida al microscopio.

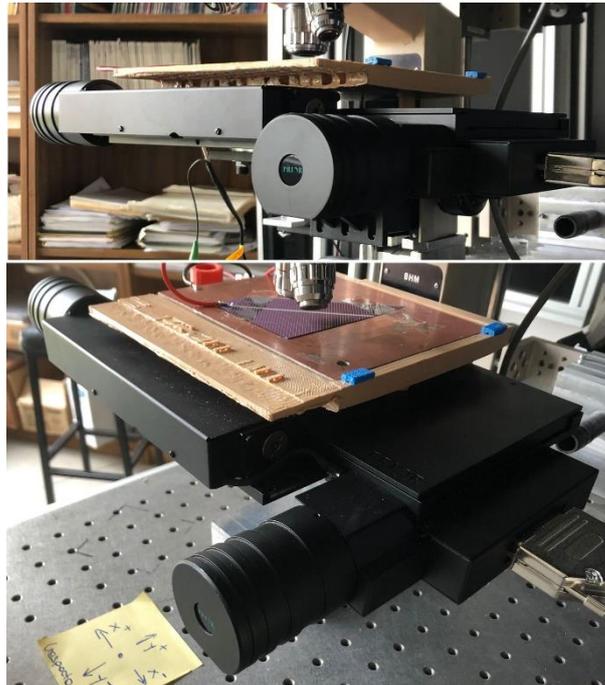


Figura 10. Mesa motorizada para el posicionamiento de las muestras.

A continuación, en la Tabla 6 se analizan y tabulan las características más importantes del dispositivo que afectan a la naturaleza de nuestras medidas, todas ellas obtenidas de la hoja de características del fabricante [6].

Tabla 6. Características del conjunto de la mesa posicionadora

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)

Todas estas características hacen que este conjunto de mesa posicionadora sea suficiente para las prestaciones que nos exige nuestro sistema de medida.

Nunca colocaremos encima muestras de más de algunos gramos de peso, solo deberemos verificar que el microscopio aguante correctamente el peso de la propia mesa para que esta se mantenga firme en todo momento.

En cuanto a los desplazamientos máximos, si es cierto que no se pueden hacer mapeos de muestras muy grandes en una sola medida, pero dado que el tiempo en ese caso sería extremadamente largo y que el objetivo de las medidas es estudiar pequeñas zonas y defectos concretos esta limitación no supone un problema.

Por último, la mesa proporciona una buena resolución para nuestros estudios ya que, además, como se ha visto en EQUIPOS LASER, el diámetro mínimo del spot de los haces será siempre mayor que el mínimo paso de la mesa haciendo que la medida en un punto no sería exacta para un paso tan pequeño.

3.1.4. ELECTROMETRO

Es el elemento encargado de medir la intensidad de corriente en cada punto del barrido sobre la muestra y enviarle el valor de dicha medición al ordenador que controla el sistema.

Se trata del modelo 6516 de la marca Keithley, un electrómetro de alta precisión diseñado para medir bajas intensidades en cortocircuito como ocurre en una medida LBIC. El electrómetro en cuestión se puede ver en la Figura 11.

En nuestro sistema el electrómetro consta de tres conexiones:

- Se conecta a la tensión de la red mediante su módulo habilitado para ello.
- La conexión con la tableta de bornes se hace desde el conector hembra triaxial estándar del electrómetro para así proteger la señal leída de posibles interferencias o ruido.
- La conexión con el ordenador de control se hace mediante el puerto serie de salida con protocolo RS-232 (también tenemos la opción de hacerlo mediante Bus de propósito general GPIB, aunque no en nuestro caso) unido a un adaptador USB que irá conectado a un hub comunicado con el propio ordenador.



Figura 11. Electrómetro del sistema.

Aunque se pueden configurar sus distintos parámetros de medida mediante los pulsadores del panel frontal y leer los resultados en su pantalla, en este caso se realizará enteramente de forma informática con el software de control desde el ordenador.

Se analizan a continuación como en el caso de la mesa posicionadora las características relevantes de este electrómetro relacionadas con las mediciones que tendrá que hacer, todas ellas obtenidas de la hoja de características del fabricante [7], se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Características del electrómetro.

Tensión de alimentación	90/125 Vca o 210/250 Vca a 50 o 60HZ
Temperatura y humedad en operación	0/50 °C y menos de un 70% relativa
Tiempo de calentamiento	1h para precisión nominal
Rango de intensidades	De 100aA a 21mA Rangos de 20pA, 200pA, 2nA, 20nA, 200nA, 2uA, 20uA, 200uA, 2mA y 20mA 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 entr 2 y 100 lecturas

Todas estas características hacen que este modelo de electrómetro sea suficiente para las prestaciones que se requieren en nuestro sistema.

Se localiza en el interior de la caja negra donde ni la temperatura ni la humedad será mayor a la indicada, las medidas de intensidad se encuentran entre los mA y los μ A entrando en el rango y la velocidad de lectura en cualquier caso será mayor que la del movimiento de la mesa para ubicarse en cada punto del barrido.

3.1.5. CÁMARA Y CAPTURADORA

El último dispositivo clave del sistema es una cámara de video. Su misión es, inicialmente, permitir al usuario ubicar la zona de la muestra de más interés visualizándola en la pantalla del ordenador y de la que se va a realizar la medida. Por otra parte, es la encargada de medir la intensidad de luz que refleja cada punto del barrido al recibir el haz láser para generar el mapa de foto-reflectividad.

La cámara de video en cuestión que utilizamos en nuestro sistema es el modelo XC-EI50 de la marca SONY. Se trata de una cámara compacta y de pequeño tamaño con sensor CCD (*Charge Coupled Device*) que genera una señal analógica que posteriormente se digitalizará en la cámara. Las imágenes se capturan en blanco y negro.

Se encuentra situada verticalmente en la parte superior del microscopio gracias a un adaptador para tipo C y conectada a la tensión de alimentación. En cuanto a la comunicación con el ordenador, se conecta a una capturadora USB unida al hub antes mencionado a través del multiconector de doce pines situado en su parte trasera. La capturadora es la VG0001A de la marca LogiLink. Tanto la cámara como la capturadora se muestran en la Figura 12.



Figura 12. Cámara de video y (ab) capturadora USB.

Como para los dispositivos anteriores, analizamos las principales características para comprobar si son suficientes para nuestro sistema en la Tabla 8 [8].

Tabla 8. Características de la cámara del sistema.

Resolución (HxX)	752x582px
Montura de la lente	Montura tipo C
Velocidad normal del obturador	1/120 seg a 1/8 seg
Iluminación mínima	0.1lx
MTBF (tiempo medio entre fallos)	14.4 años aprox
Temperatura y humedad en operación	-5/45 °C y entre 20% y 80% relativa
Tensión de alimentación	12V Vcc
Peso de la cámara	50g

Al utilizar la cámara con los distintos objetivos, se consiguen imágenes que representan distintas áreas reales de la muestra y que se recogen en la Tabla 9.

Tabla 9. Tamaño de imágenes según el objetivo del microscopio.

Objetivo	Tamaño zona de la medida
x5	1025x820µm
x20	250x200µm
x50	106x85µm
X100	53x42µm

Se podrán hacer medidas de áreas más grandes, pero no se podrá previsualizar completamente esta área.

Tras probar otros dos modelos de cámaras accesibles en el laboratorio, se llega a la conclusión de que la descrita es la mejor opción ya que ofrece la mejor calidad de imagen. La resolución de la cámara es suficiente para apreciar correctamente la zona en la que nos encontramos de la muestra. El bajo peso y el hecho de tener una montura tipo C integrada en la carcasa hace que la instalación en el microscopio sea muy fácil y estable durante toda la medida. Además, su tiempo de vida es suficientemente largo como para amortizar el dispositivo utilizándolo en largas medidas de larga duración.

3.1.6. CAMBIOS EN EL SISTEMA

Después de los anteriores análisis se puede llegar a la conclusión de que, en lo que a hardware se refiere, no parece necesaria la sustitución de ningún dispositivo del sistema, ya que los que lo componen actualmente tienen las suficientes prestaciones como para poder acelerar el proceso de medidas y no se sacaría el máximo partido a otros con características mejores.

Por ello, se puede llegar a la conclusión que la limitación inicial del tiempo que se tarda en realizar una medida está en el software y no en el hardware, debiendo centrar la búsqueda de cambios y mejoras para su aceleración en el nuevo programa y no en los dispositivos, que se mantendrán todos en el sistema.

Cuando posteriormente se añada el espectrómetro, sí serán necesarios algunos cambios en la distribución de los dispositivos para optimizar el funcionamiento de estos, en especial de la cámara, que pasará de ubicarse en la parte superior del microscopio a hacerlo en uno de los oculares de este para conectar la fibra óptica, necesaria para medir los espectros, en el adaptador C, ya que la luz reflejada de la muestra llega de forma más directa con esta distribución.

Otro elemento importante en el sistema es el ordenador encargado de ejecutar el software y comunicarse con los dispositivos hasta ahora descrito. Actualmente se trabaja con un equipo cuya torre es de marca NOX con SO Windows 10 de 64 bits, con procesador Intel Core i3-7100 y 8 GB de RAM, siendo este suficiente para soportar correctamente el software y aparentemente no siendo necesario un cambio por otro más potente. Si bien es cierto que en la creación se ha utilizado un ordenador portátil de marca HP con un procesador i7-7500U también con Windows 10 de 64 bits y 8 GB de RAM, durante el proceso de programación se ha estado constantemente utilizando uno y otro equipo para probar los subprogramas que se iban realizando, así como las versiones finales de estos sin observar ningún problema causado por alguna posible limitación de los equipos, por lo que cualquier equipo con características similares o superiores podrá ejecutar el software en cuestión.

3.2. DESARROLLO DEL SOFTWARE

Una vez analizados todos los dispositivos, es necesario que todos trabajen conjuntamente y se sincronicen para poder llevar a cabo el proceso de medida. Esto se consigue mediante un software ubicado en el ordenador del equipo.

Como ya se ha visto, además de relacionar dichos dispositivos, la creación de un nuevo software es la clave para acelerar la toma de medidas, ya que con el actual se trabajan con tiempos de entre 3 horas y varios días, según la medida, que aparentemente se pueden reducir. Por ello, se ha optado por crear uno nuevo tomando como referencia el existente. Se buscará optimizar las partes útiles y se eliminarán las innecesarias además de generar desde cero las requeridas.

Como ya se ha indicado, para la creación se utilizará el lenguaje gráfico de la plataforma LabVIEW, para lo que será necesario tener dicha plataforma instalada en el equipo con el que se programe, los drivers de cada dispositivo y la extensión "Vision Acquisition" que permite trabajar con la cámara de video.

A continuación, se irán detallando las diferentes partes en las que se puede dividir el software y las distintas decisiones que se han tomado en relación a estas para llegar al resultado final.

3.2.1. PANTALLA INICIAL O MENÚ INICIAL

Una de las principales características que se ha buscado a la hora de programar, es la simplicidad y uso intuitivo para el usuario, por lo que se ha intentado que los diferentes paneles frontales que actúan como interfaz e irán apareciendo durante la realización de una medida sean lo más fácil de comprender posible. Esta simplicidad también se ha buscado en los diagramas de bloques. Sin embargo, en algunas ocasiones se hace inevitable que estos entrañen cierta complejidad, priorizando siempre la funcionalidad.

El primer panel que aparece al ejecutar el programa actúa como menú principal para seleccionar entre las tres acciones necesarias para realizar una medición y que se deberán ejecutar secuencialmente.

Se puede seleccionar:

- **INICIALIZACIÓN:** Inicializar los dispositivos necesarios para asegurar que estos se encuentran operativos para realizar el proceso de medida.
- **CONFIGURACIÓN:** Seleccionar el área de la muestra de la que se quiere hacer el estudio con el objetivo correspondiente.
- **MEDIDA LBIC:** Establecer las características de la medida LBIC propiamente dicha y la realización de esta pudiendo visualizar el resultado y efectuar distintas acciones con este.
- **FINALIZAR Y CERRAR:** Para finalizar todos los procesos activos del sistema y cerrar las ventanas (paneles frontales) que estén abiertas.

La idea es que este panel frontal esté activo en todo momento para pasar de una opción a otra, mientras los paneles de las distintas opciones se irán sucediendo a medida que avanzamos en el proceso de medida. Esta dinámica se buscará durante toda la creación del programa. Este panel frontal inicial se muestra en la Figura 13.



Figura 13. PF del menú principal del software.

Al hacer click en los botones correspondientes a cada opción, se abrirá en primer plano su ventana correspondiente, esto se consigue gracias al bloque SALTO creado para ello, sin cerrar la ventana del menú inicial a la que podremos acceder en todo momento. En la Figura 14 se muestra el diagrama de bloques de este bloque.

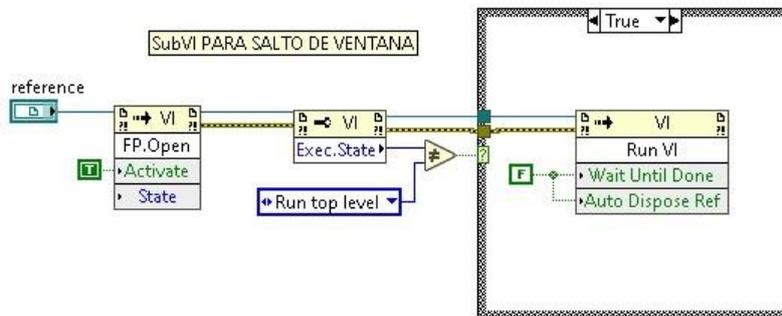


Figura 14. DB del subVI SALTO.

3.2.2. INICIALIZACIÓN

Es la primera opción que se debe seleccionar del menú principal. Su finalidad es que el ordenador que está ejecutando el software establezca la comunicación con los dispositivos que componen el sistema y que va a controlar, en particular, con la mesa posicionadora, el electrómetro y la capturadora conectada a la cámara. Por su parte los dispositivos también realizarán las acciones necesarias para prepararse de cara a realizar las acciones que les ordene dicho ordenador. Su panel frontal se muestra en la Figura 15.

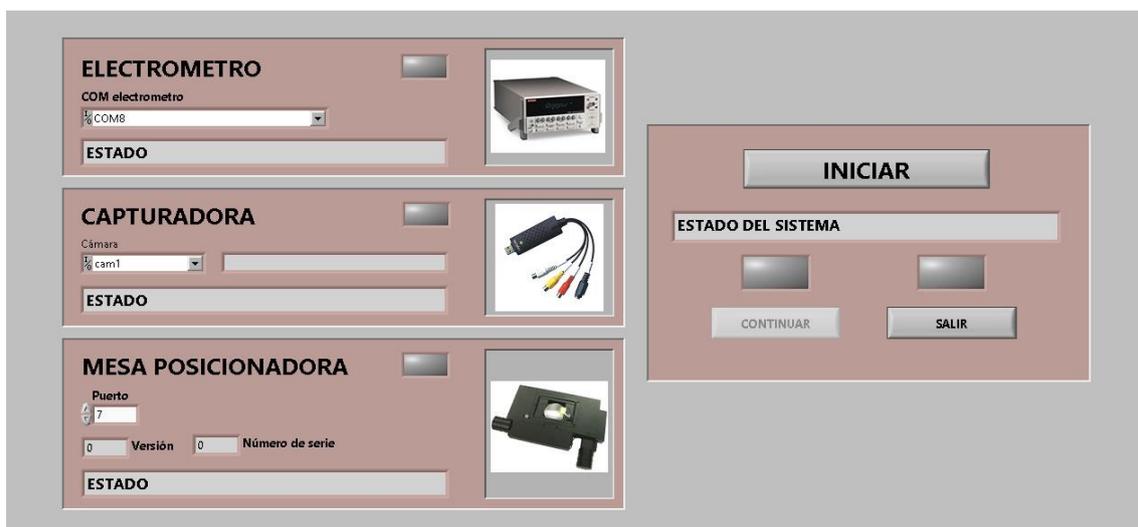


Figura 15. PF de la ventana de inicialización.

El establecimiento de esta comunicación es necesario para que posteriormente los dispositivos trabajen como está establecido mediante sus bloques correspondientes.

Tanto la mesa como el electrómetro se conectan al ordenador mediante un adaptador de la interfaz RS-232 a USB, conectado este a un Hub de puertos USB conectado al ordenador. Por lo que a la hora de seleccionar en el interfaz del panel frontal el puerto en el equipo correspondiente a cada dispositivo, este dependerá del puerto en el hub al que está conectado, y en el caso de estos dos dispositivos aparecerá como puerto serial COM.

El primer problema surge del hecho de que el software utilizado hasta ahora trabaja con bloques del electrómetro para versiones de LabVIEW anteriores a la 8.0 sin posibilidad de convertirlos a versiones posteriores. Supone un inconveniente ya que el software se está generando en la versión 2020 y cuando se cambie el ordenador ya no se podrá adquirir una de esas versiones impidiendo que se ejecute el programa. La solución más drástica es la adquisición de un electrómetro más actual. Otra opción sería la creación desde cero de dichos bloques con la dificultad que esto conlleva ya que el dispositivo trabaja con un tipo de datos específico. Finalmente se encontró una librería de bloques utilizables en versiones posteriores a la 8.0 y por tanto en la 2020 con las mismas utilidades que los anteriores.

Por su parte, la cámara se comunica con el ordenador mediante la capturadora USB conectada también al hub. En este caso se deberá seleccionar la cámara de entre todas las disponibles o conectadas al ordenador directamente y no a un puerto COM como ocurría con la mesa y el electrómetro, por lo que es indiferente en que puerto esté conectada la capturadora ya que aparecerá de la misma forma en el interfaz.

Una vez seleccionados los puertos correspondientes de cada dispositivo (pudiendo dejarlos predeterminados en el panel frontal), se hará click en el botón "INICIAR" para establecer la comunicación.

A nivel programación, esto se consigue en el diagrama de bloques con un bucle *while* para poder cambiar los puertos en tiempo real con un *flat sequence* en su interior para inicializar cada dispositivo secuencialmente:

- **Electrómetro:** se hace uso de un bloque que inicia la comunicación y posteriormente otro que hace un test en el dispositivo para comprobar si dicha conexión es correcta. Si lo es, se dará como inicializado el electrómetro. Ambas acciones se pueden ver en la Figura 16.

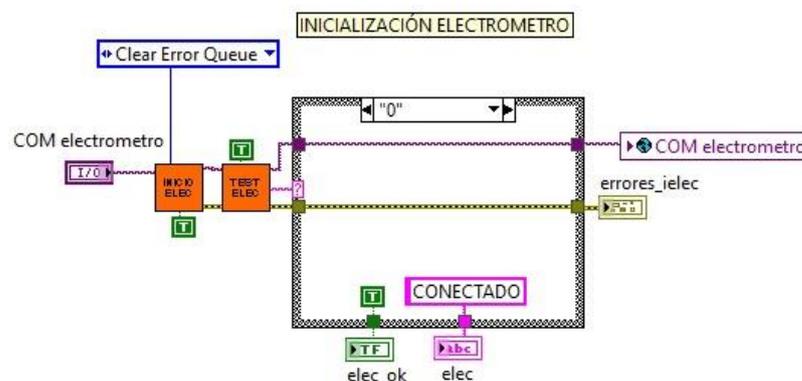


Figura 16. DB de la inicialización del electrómetro.

Para unir bloques relacionados con el electrómetro se hace uso de un tipo de dato estandarizado por varios fabricantes para la lectura y escritura en el ámbito de instrumentación, este tipo es el **VISA** (*Virtual Instrument Software Architecture*).

- **Cámara:** en este caso se utilizan bloques de la librería **IMAQ** para la adquisición de imágenes. Se comprueba si existe alguna cámara conectada a nuestro ordenador y si es así se considerará como inicializada.

Al hacerlo de esta forma hay que asegurarse que estamos seleccionando la cámara correcta si hubiera más de una. Se muestra la inicialización en la Figura 17.

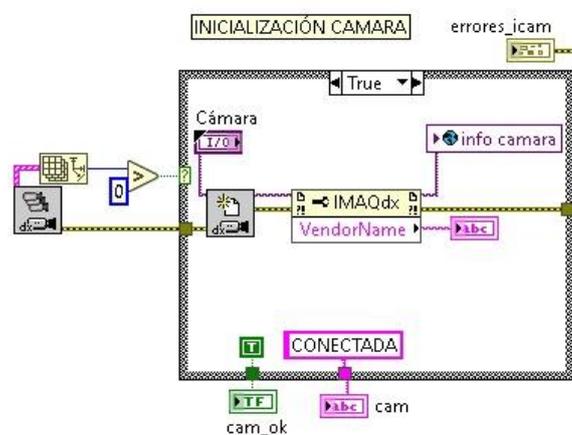


Figura 17. DB de la inicialización de la cámara.

En este caso la variable utilizada entre bloques de la librería IMAQ es una que alberga toda la información necesaria para la adquisición y tratado de estas imágenes.

- **Mesa posicionadora:** en primer lugar, se hará uso de un bloque que inicia la comunicación con el controlador de la mesa. Si se realiza con éxito el bloque devolverá un cero lógico como también lo hace en el caso del electrómetro y la mesa se dará como iniciada. Una vez se ha iniciado la mesa, se genera un tipo de datos para saber el estado de la mesa en todo momento. Además, se generan otros dos tipos de datos, uno para lo referente a los movimientos planos en los ejes X e Y cartesianos y otro para los movimientos en el Z. Los tres tipos de datos se agrupan en una única variable que se puede desglosar en cualquier momento (denominada cluster en LabVIEW). Todo este proceso se muestra en la Figura 18.

Otro problema surge debido a que, una vez se ha inicializado la mesa, si se ejecuta de nuevo el bloque inicial, este indicará que la mesa no ha sido inicializada. Por ello se debe tener en cuenta todas las posibles combinaciones en cuanto a los dispositivos inicializados o no para asegurar que la mesa, si esta correctamente conectada, se inicialice con éxito.

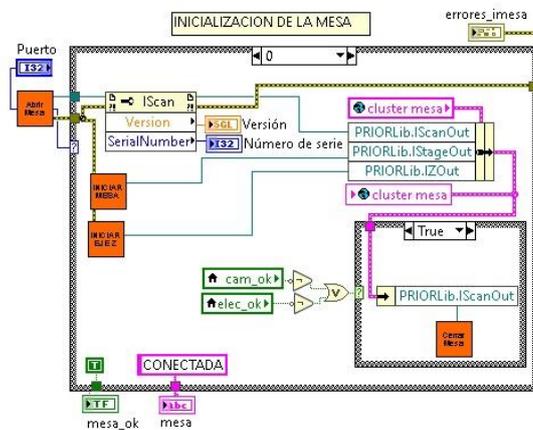


Figura 18. DB de la inicialización de la mesa posicionadora.

Otro concepto que aparece por primera vez en la programación del software es la de las variables globales. Estas variables se crean como un VI más que contiene las herramientas necesarias para almacenar información, en especial cualquier tipo de variable, y que se puede utilizar en cualquier VI que pertenezca al mismo proyecto que la variable global. En este caso, se crean tres variables globales utilizadas desde la ventana de inicialización, una para almacenar la variable creada de la mesa, otra para la del electrómetro y la última para la de la cámara. En relación con esto, cabe destacar que no se puede cerrar esta ventana de inicialización ya que la mesa no funciona correctamente y esta ventana quedará ejecutándose en segundo plano sin posibilidad de abrirla una vez se pulse el botón de “CONTINUAR”.

3.2.3. CONFIGURACIÓN

Es la segunda opción que se debe seleccionar una vez todos los dispositivos han sido inicializados correctamente. Su función es ubicar el objetivo del microscopio que se vaya a utilizar sobre la zona de la muestra que será fruto de estudio y enfocar dicha zona para que la medida se realice correctamente, todo esto se consigue mediante la mesa posicionadora. El panel frontal es el mostrado en la Figura 19.

Al abrirse esta ventana a aparecerá a la izquierda la imagen en tiempo real que está captando la cámara y de la que se partirá para seleccionar el área de la muestra sobre la que se hará el barrido, será necesario encender una luz blanca auxiliar para poder ver la muestra claramente, también conectada ópticamente al microscopio. La relación entre altura y anchura en pixeles de la imagen mencionada, es la misma que la altura y anchura del rectángulo real que podemos obtener con cada objetivo (5:4) por lo que las proporciones en la imagen que vemos en pantalla son las mismas que en la muestra.

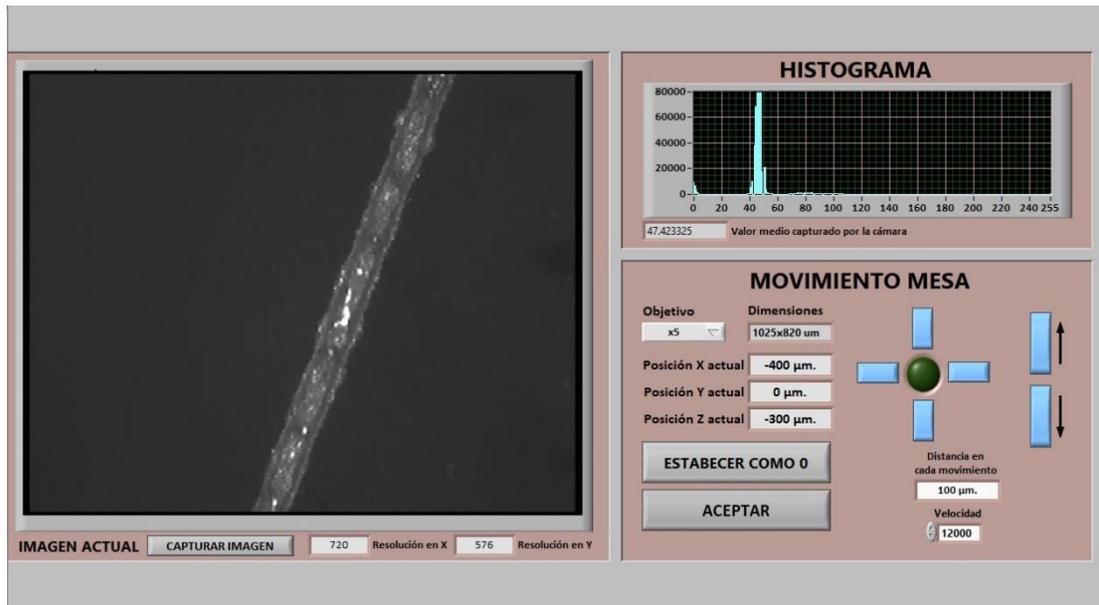


Figura 19. PF de la ventana de configuración.

Posteriormente en la opción de “MEDIDA LBIC” se podrá indicar si queremos realizar la medida sobre un área mayor o menor que la que vemos en pantalla, pero teniendo en cuenta que la visualizada en la ventana actual es la máxima que podremos hacer previsualizando la muestra.

Para realizar este posicionamiento, se puede utilizar el joystick del equipo o los botones de posición del panel frontal situados en el apartado inferior derecho del interfaz. Además, se podrá establecer la distancia que se moverá la mesa en cada movimiento en micrómetros, así como la velocidad de estos en micrómetros por segundo. Para que los movimientos sean en las direcciones esperadas, se deberá utilizar el joystick como se ve en la Figura 20.



Figura 20. Colocación del joystick para el movimiento correcto de la mesa.

En cuanto a la programación, su diagrama de bloques se basa en un bucle *while* en el que se ejecutan las acciones acordes con las peticiones del usuario.

Antes de este bucle *while* se insertan las variables globales de la mesa y cámara con los datos guardados de la inicialización para poder realizar dichas acciones correctamente. Diferenciando ambos dispositivos:

- **Cámara:** partiendo de su variable global y mediante el bloque pertinente, se prepara a la cámara y al software para adquirir imágenes. Una vez en dentro del bucle se van adquiriendo *frames* incondicional y secuencialmente cada vez que este se repite, en nuestro caso cada 100ms, y guardándolos en un espacio de memoria temporal que después se borrará.

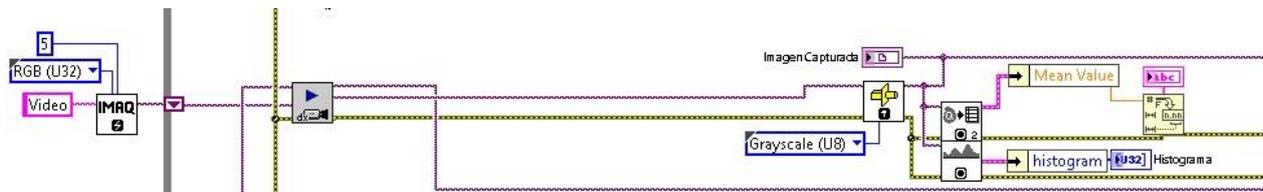


Figura 21. DB de la captura de imagen en el panel de configuración.

Con cada *frame*, la imagen se convierte a escala de grises de 8 bits sin signo, se calcula el valor medio de todos sus pixeles y se representa su histograma en tiempo real como se puede ver en la Figura 21.

- **Mesa posicionadora:** partiendo de su variable global, esta se desglosará en sus tres subvariables ya mencionadas para todo lo relacionado con el estrado de la mesa y los movimientos en los ejes X e Y y Z. Antes del bucle, se obtiene la posición actual y se habilita el movimiento de esta mediante el joystick. Una vez dentro, hay diferentes estructuras case que se ejecutarán cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- **Movimiento mediante joystick:** la mesa se moverá conforme el usuario desee a través del joystick y actualizará los indicadores de posición a la actual en cada momento. Se muestra en la Figura 22.

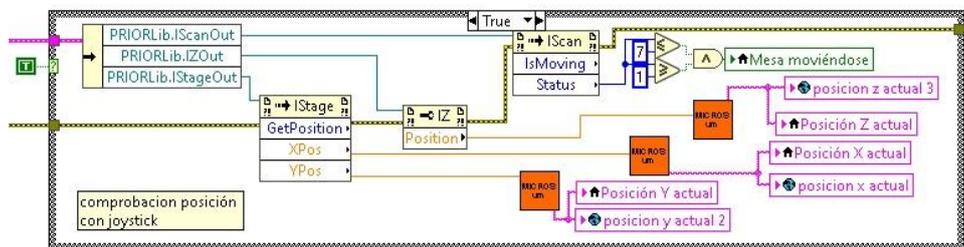


Figura 22. DB de la actualización de posición de la mesa mediante el joystick.

- **Movimiento mediante botones del interfaz:** la mesa se moverá la distancia indicada en el interfaz conforme el usuario haga click en los botones de posicionamiento del panel frontal.

Para ello se utilizan las variables destinadas al movimiento en los ejes X e Y y Z y los bloques que mueven los servomotores de la mesa en la dirección indicada. Para la optimización del espacio en el diagrama, los botones se unen a una puerta OR que servirá para activar la estructura case de cada movimiento de entre todas las disponibles. Se presenta en la Figura 23.

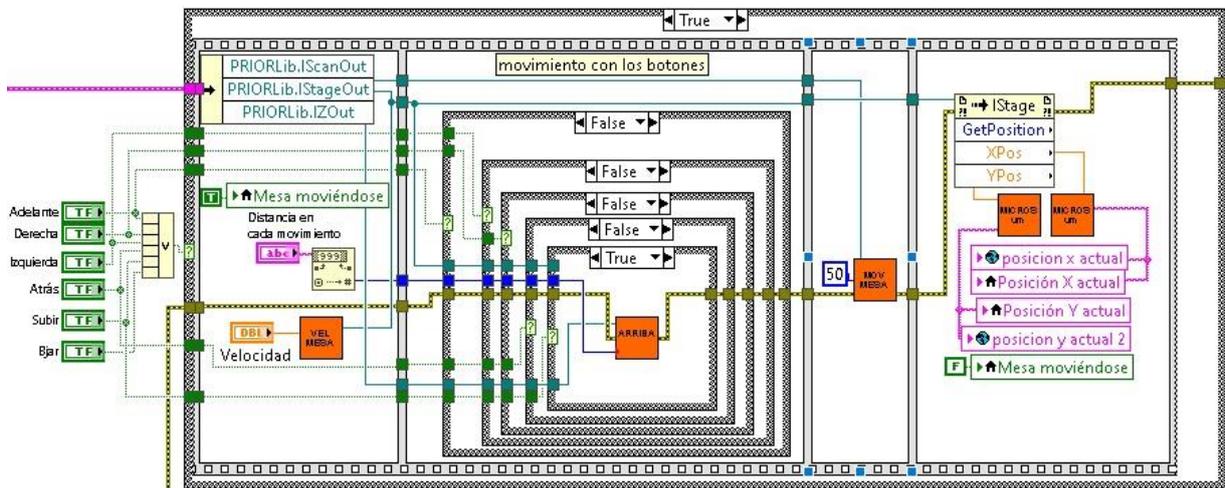


Figura 23. DB del movimiento y actualización de posición de la mesa mediante los controles del interfaz.

Después de cada movimiento se actualizarán los indicadores de posición y se comprobará que la mesa ha terminado de moverse.

- **Resetear la posición de la mesa:** cuando el usuario haga click en el botón “ESTABLECER COMO 0” se le indicará a la mesa que la posición actual corresponde a la posición cero de cada eje, necesario para poder realizar posteriormente la medida desde ese punto. Como se verá en el siguiente apartado, el punto cero de la mesa no corresponde con ningún vértice del cuadro de la imagen que se ve con la cámara, por lo que habrá que hacer una corrección de la posición antes de medir. Este reseteo se muestra en la Figura 24.

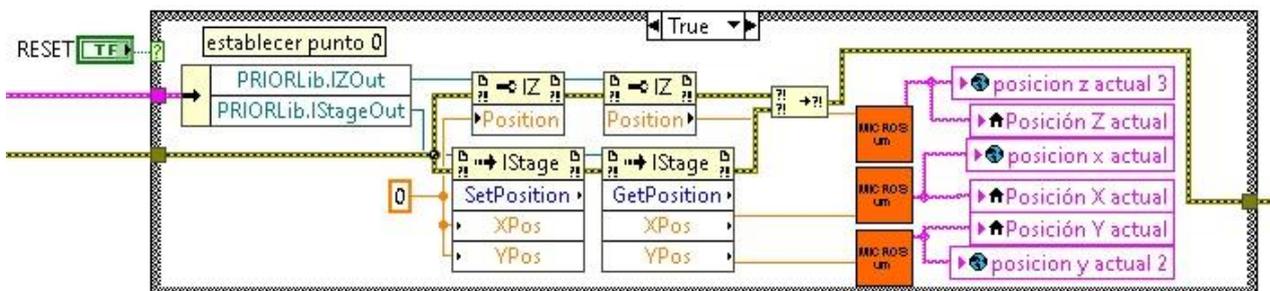


Figura 24. DB del reseteo de la posición de la mesa.

- **Capturar imagen:** el usuario tiene la opción de guardar la imagen que se ve en un momento dado, para ello deberá hacer click en “CAPTURAR IMAGEN” que habilitará un dialogo emergente para establecer el directorio y nombre de la imagen que se guardará en formato JPG. En la Figura 25 se muestra el proceso.

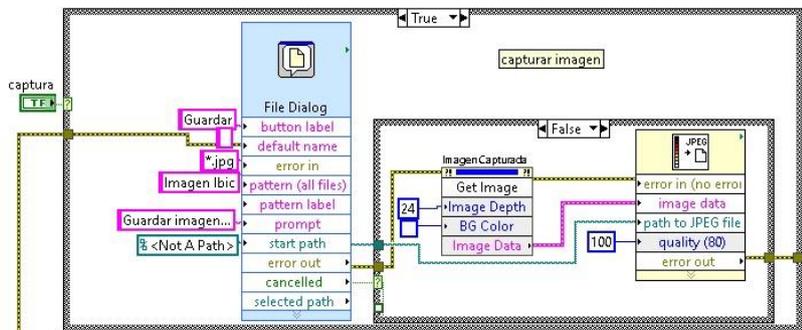


Figura 25. DB de la captura de la imagen visualizada en el panel de configuración.

Cuando se cambia de una célula a una oblea, hay que variar la distancia en Z para enfocar correctamente, esto es debido al grosor de la base en la que se encuentra la oblea. Otro aspecto en cuanto al enfoque, es el hecho de que no es la misma distancia la que enfoca totalmente la muestra con la luz blanca a la que enfoca el láser, la distancia es similar y simplemente cambiando la luz blanca por el haz láser se obtendrá un resultado aceptable, pero siendo también posible enfocar el láser.

Una vez seleccionado el área de interés y establecida a cero la posición de la mesa, se hará click en el botón “ACEPTAR” y el sistema estará listo para realizar la medida.

3.2.4. MEDIDA LBIC

Es la tercera opción en el proceso, una vez establecidos los parámetros necesarios realizará la medida de intensidad de fotocorriente y de luz reflejada para posteriormente poder adquirir y analizar los resultados. Esta medida inicialmente se plantea únicamente mediante un barrido punto a punto. El panel frontal es el que aparece en la Figura 26.

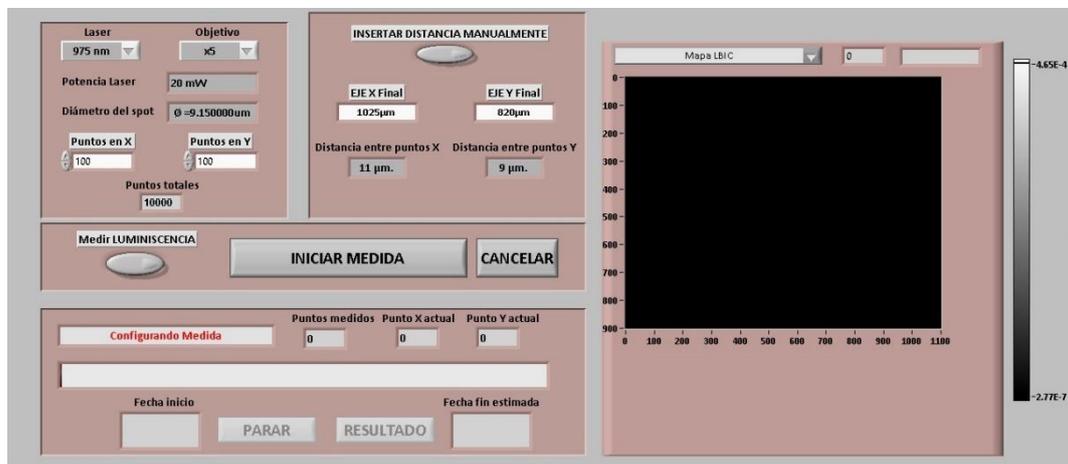


Figura 26. PF de la ventana de medida LBIC.

Los pasos a seguir para realizar la medida son, secuencialmente:

1. Se selecciona en el interfaz la longitud de onda del láser que se va a utilizar en la medición, así como el objetivo del microscopio, de esta forma se obtiene la información de la potencia del láser y el diámetro del spot de este.
2. Se introduce el número de puntos que se desean en el eje X y en el Y durante el barrido. Cuantos más puntos haya en cada eje mayor será el nivel de detalle en las medidas obtenidas, pero en contraposición también aumenta el tiempo que tardará el proceso.
3. Por defecto, el programa establece las distancias en el eje X e Y que conforman el área a medir como las máximas visualizadas en la ventana de “CONFIGURACIÓN” para cada objetivo, es decir, el tamaño real de la imagen previsualizada, pero se podrán cambiar para que el usuario introduzca dichas distancias manualmente con el valor deseado.

Como resultado al introducir las distancias en los ejes, se obtendrá la distancia entre dos puntos consecutivos de cada eje, es recomendable para obtener una medida correcta que estas distancias sean lo más cercanas posibles al diámetro del spot para que así se realice el barrido sobre toda la superficie sin dejar zonas fuera del estudio ni medidas más de una vez. En la Figura 27 se esquematiza este concepto.

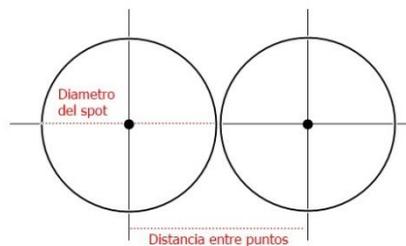


Figura 27. Esquema relación óptima entre la distancia entre puntos y el diámetro del spot.

4. Con todos los parámetros introducidos, se deberá elegir para terminar si se desea hacer la medida de la luz reflejada o tan solo de la intensidad, después de esto se procede a realizar la medida haciendo click sobre el botón “INICIAR MEDIDA” pudiéndose cancelar durante todo el proceso.

Mientras el sistema esté realizando el barrido, se puede visualizar la evolución de este gráficamente en el gráfico situado a la derecha de la ventana, y numéricamente, tanto con la visualización de los puntos que se van midiendo en tiempo real como con una barra y un porcentaje que también cambia conforme avanza el barrido. Por último, se muestra en pantalla la fecha y hora estimada de finalización.

En cuanto a la programación, el diagrama de bloques se puede dividir en:

- **Ajustes previos a la medida:** en primer lugar, mediante un bucle *while*, se permite al usuario variar los ajustes mencionados anteriormente en relación al láser, objetivo, puntos del barrido y tamaño del área con los que, mediante

los bloques pertinentes, se calcula tanto el spot del haz como dos matrices que contienen las posiciones a las que se deberá mover la mesa según la información anterior, una para el eje X y otra para el eje Y, para posicionarse sobre cada punto del barrido. Este bucle se puede ver en la Figura 28. El punto cero o de partida es la esquina inferior derecha del rectángulo que

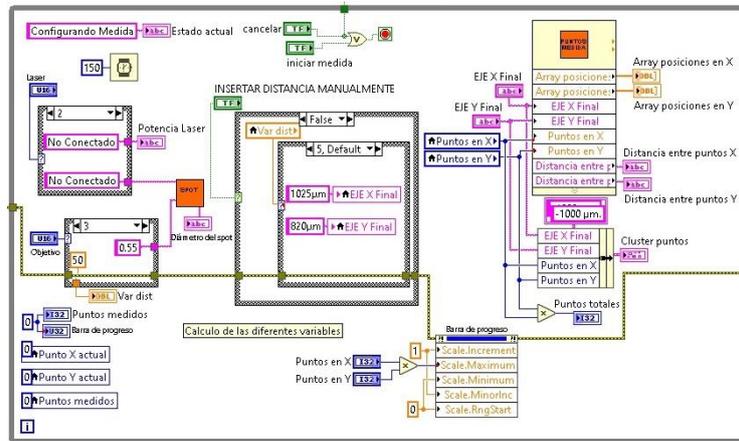


Figura 28. DB del bucle inicial del panel de medida LBIC.

se haya establecido como área de la medida, y el barrido se hace de derecha a izquierda y de abajo a arriba como se esquematiza en la Figura 29. Esto se debe a que de esta forma la mesa se moverá en sus ejes cartesianos positivos haciendo que los valores de las posiciones sean mayores que cero y asegurando la precisión en la medida favoreciendo el movimiento de los servos que gobiernan la mesa posicionadora.

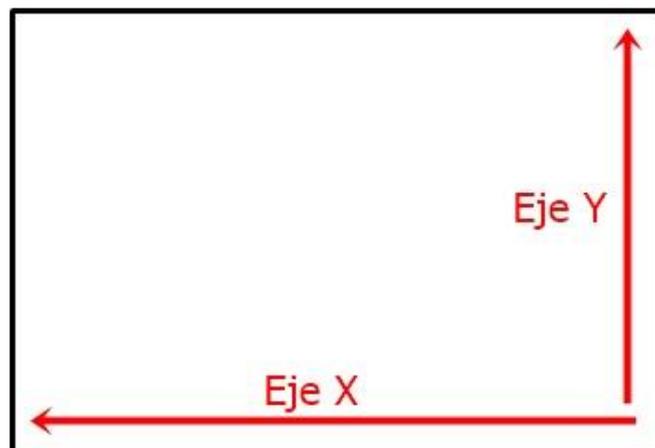


Figura 29. Esquema de las direcciones en cada eje durante el barrido.

De esta forma, se iniciará el barrido en la primera fila del eje X hacia la izquierda y al terminarla se hará lo mismo en la siguiente subiendo a la segunda columna del eje Y y así sucesivamente.

Se valoró la posibilidad de hacer el barrido en otras direcciones o implementar la posibilidad de elegir estas antes de realizar la medida, pero a la hora de la

verdad no supone ningún beneficio variar la forma de hacer el barrido por lo que se optó por establecer esta forma fija.

El bucle termina al pulsar “INICIAR MEDIDA” y antes de realizar la medida propiamente dicha se ejecutan dos acciones necesarias previas:

- **Movimiento de la mesa:** es necesario reposicionar la mesa antes de empezar con el barrido para que este comience en el punto cero establecido por el usuario, esto se debe a que dicho punto no se ubica en la esquina inferior derecha sino en otro punto del área previsualizada.

Para realizar este ajuste se toma como referencia una cruz formada por dos *fingers* de una célula con un rayón en uno de sus cuadrantes para asegurar así la buena orientación a la hora de hacer las medidas y se varía este punto inicial de medida diferentes valores para ver el efecto que tiene sobre el resultado.

Primero, se varía el punto cero $400\mu\text{m}$ en las direcciones negativas de ambos ejes $(-400, -400)$ viendo el resultado en la Figura 30.

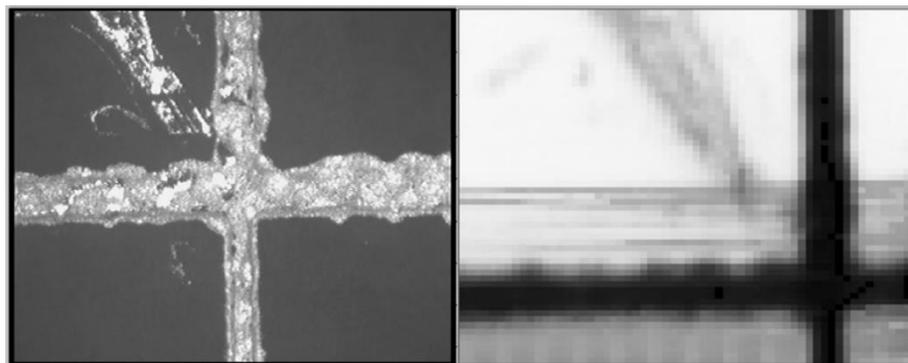


Figura 30. Comparación de la imagen referencia con el resultado. Variación $(-400, -400)$.

En segundo lugar, se realiza el mismo procedimiento, pero variando en este caso $900\mu\text{m}$ $(-900, -900)$. El resultado se puede observar en la Figura 31.

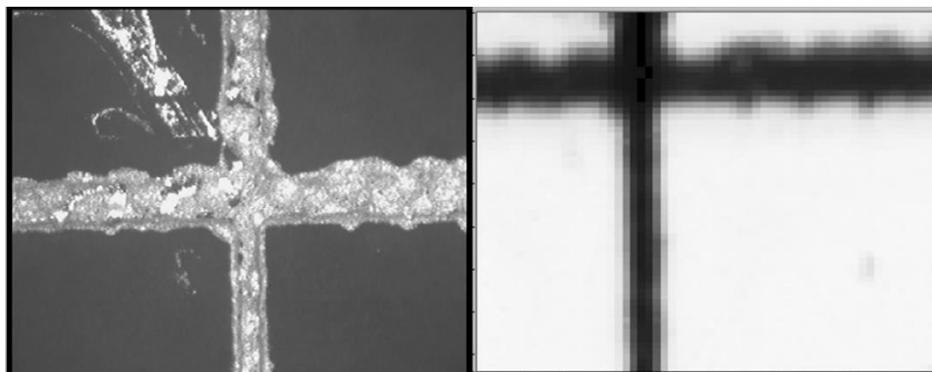


Figura 31. Comparación de la imagen referencia con el resultado. Variación $(-900, -900)$.

Como resultado se puede observar que los valores de reajuste están entre 400 y 900 μm y que no es el mismo valor para el eje X como para el Y.

Para corregirlo se superponen ambas imágenes para ver la distancia que existe entre ambas imágenes. Se toma el valor de la altura de la imagen real como una unidad siendo su medida real 820 μm , se realiza para el caso de 400 μm mostrado en la Figura 33 y para el de 900 μm mostrado en la Figura 32 para comprobar si se obtiene el mismo valor.

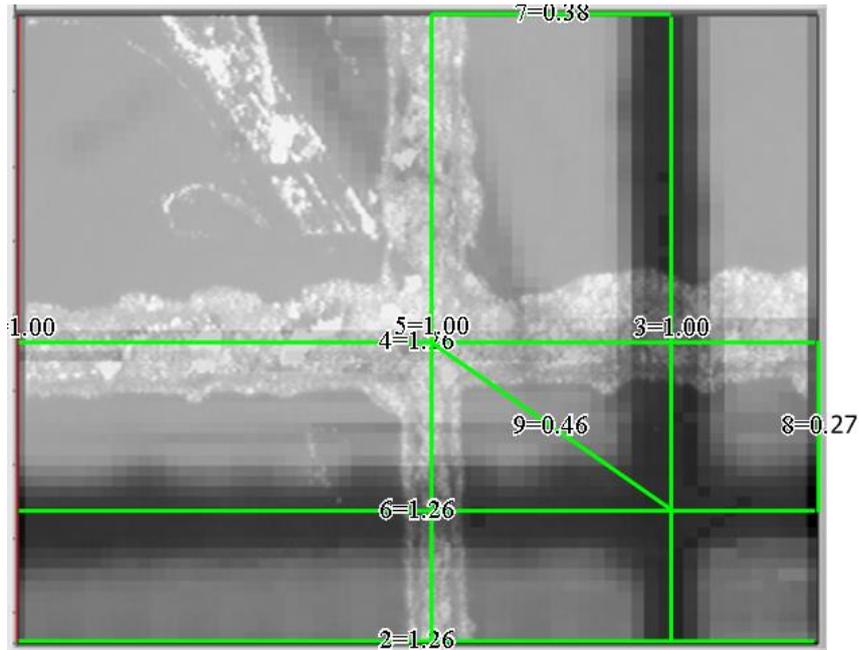


Figura 33. Superposición de la referencia y el resultado (-400,-400) con distancias.

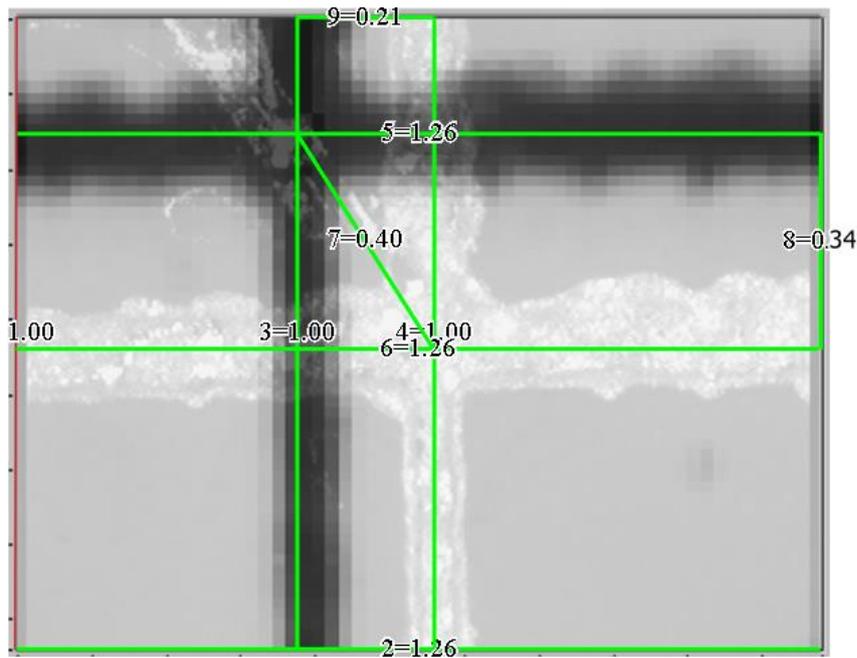


Figura 32. Superposición de la referencia y el resultado (-900,-900) con distancias.

Partiendo de (-400,-400)

$$400 + 820 \times 0.27 = 621 \mu\text{m} \text{ en el eje Y (-621) con objetivo x5.}$$

$$400 + 820 \times 0.38 = 712 \mu\text{m} \text{ en el eje X (-712) con objetivo x5.}$$

Partiendo de (-900,-900)

$$900 - 820 \times 0.34 = 621 \mu\text{m} \text{ en el eje Y (-621) con objetivo x5.}$$

$$900 - 820 \times 0.21 = 728 \mu\text{m} \text{ en el eje X (-728) con objetivo x5.}$$

Estudiando los dos casos, se establece la corrección del punto cero moviendo 621 μm en la dirección negativa del eje Y y 720 μm en la dirección negativa del eje X, tomando en este último caso el valor central entre los dos obtenidos, sin provocar este posible error un gran problema ya que se tratan de pocos μm en relación al tamaño de las zonas que se van a medir y la naturaleza de estas medidas, donde lo interesante es ver una zona concreta y la que la rodea.

Con esta corrección de (-720,-621) con el objetivo x5 conseguimos un resultado como el de la Figura 34.

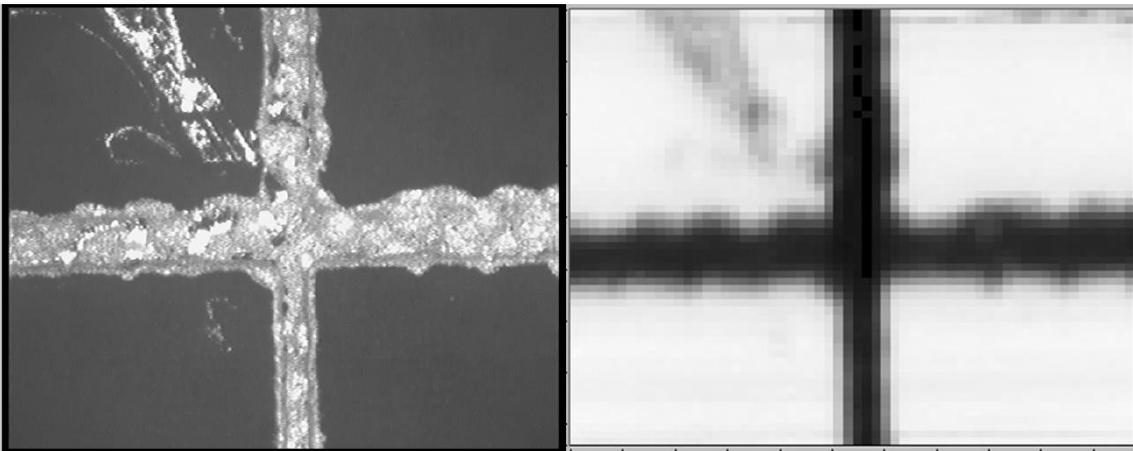


Figura 34. Comparación entre la imagen referencia y el resultado. Variación (-720,-621).

Haciendo los cálculos correspondientes nos queda para los otros dos objetivos una corrección mostrada en la Tabla 10.

Tabla 10. Correcciones necesarias del punto 0 de la mesa antes de comenzar el barrido para cada objetivo.

Objetivo	x5	x20	x50	x100
Corrección	(-720,-621) μm	(-176,-151) μm	(-74,-64) μm	(-37,-32) μm

- **Configuración electrómetro:** se realiza la primera configuración del electrómetro a partir de su variable global para indicarle, entre otras cosas, que las medidas que va a realizar son de intensidad y que el rango de estas se establece de forma automática además de su formato de salida. Los dos bloques que conforman esta configuración aparecen en la Figura 35.

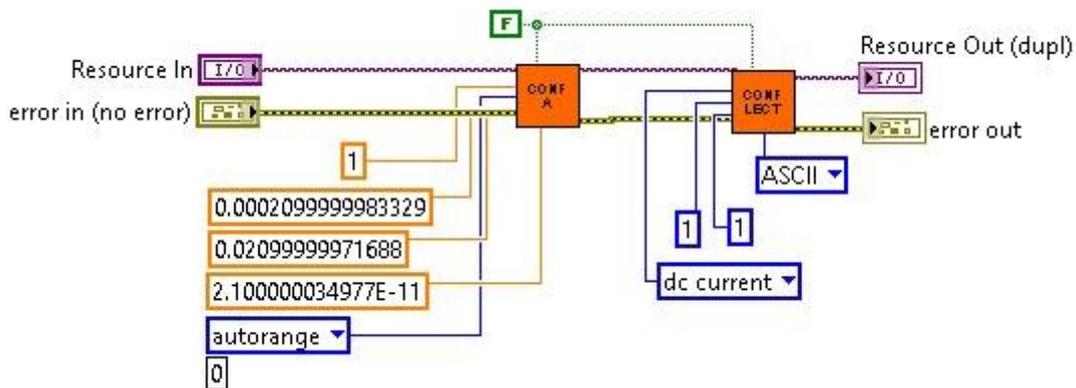


Figura 35. DB de la primera configuración del electrómetro previa al barrido.

Para finalizar con estos ajustes previos, se ajusta el tamaño y se configuran las escalas del visualizador en tiempo real de la evolución de la medida haciendo uso de sus propiedades, también se deshabilitan los controles del interfaz destinados al usuario antes comentados. Se puede ver este fragmento en la Figura 36.

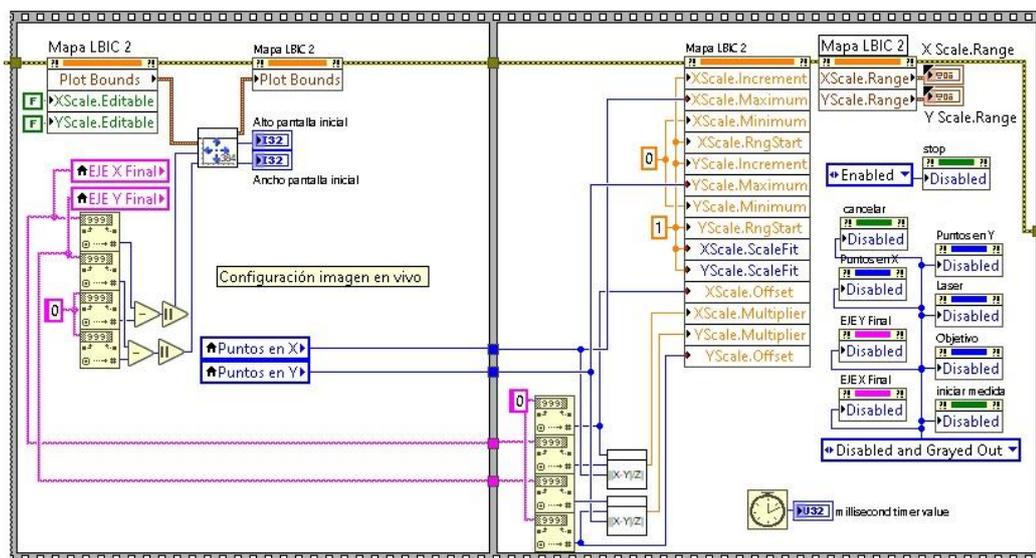


Figura 36. DB de la configuración del visualizador en tiempo real de los mapas.

- **Realización de las medidas:** una vez se han hecho las configuraciones previas necesarias, se procede a la toma de datos propiamente dicho. Esta toma de datos se basa en dos bucles *for*, uno dentro de otro,

siendo el número de iteraciones totales el número de puntos en X para el bucle externo y el de Y para el interno.

De esta forma se irán generando dos matrices, una que almacenará la intensidad de fotocorriente en cada punto y otra la media de intensidad de luz reflejada. En LabVIEW los datos en las matrices se guardan siguiendo los índices como se muestra en la Figura 37.

0x0	0x1	...	0xm
1x0
...
nx0	nxm

Matriz nxm

Figura 37. Disposición de los datos en una matriz en LabVIEW.

Esto exige que, a la hora de medir, se tenga que ir indicando el lugar de la matriz que debe tomar cada valor medido dado que se busca una matriz que represente el barrido realizado.

El primer dato medido deberá almacenarse en la posición nxm de acuerdo a la imagen anterior, en este caso en la posición “puntos totales Y x puntos totales X” y así sucesivamente restando de los puntos totales el punto actual en el que se encuentre el barrido. De esta forma, al terminar el barrido se obtendrán dos matrices que representan el mapa de la intensidad en cada punto y la luz reflejada en cada uno de ellos.

El proceso de medida se divide en diferentes acciones, separadas en un *flat sequence*, estas son:

- **Medida de la luz reflejada si se ha seleccionado:** de la misma forma que se obtenía este valor en la ventana de CONFIGURACIÓN, se almacena el valor medio de la luz captada por la cámara haciendo uso de bloques de la librería IMAQ. Se puede ver en la Figura 38.

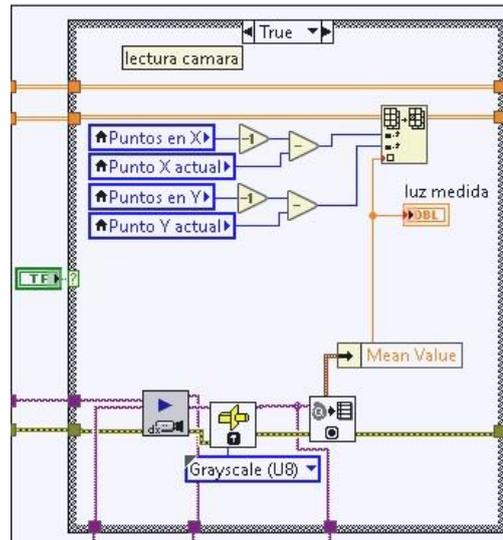


Figura 38. DB del proceso de medida de la luz reflejada en un punto del barrido.

Como entradas tendremos la matriz correspondiente a la luz reflejada, la variable global de la cámara y la ubicación temporal en la memoria para cada frame.

- **Medida de la intensidad de fotocorriente:** haciendo uso del bloque correspondiente de la librería del electrómetro, se lee la intensidad en ese instante y se almacena en la matriz destinada a las intensidades. Se puede ver en la Figura 39, donde tan solo necesitamos como entradas la matriz en cuestión y la variable global del electrómetro.

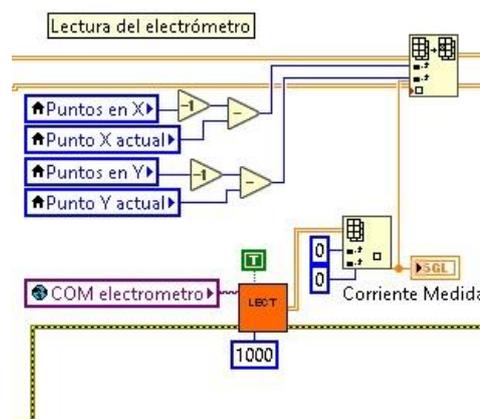


Figura 39. DB del proceso de medida de intensidad en un punto del barrido.

- **Movimiento de la mesa:** una vez se han tomado los valores de luz reflejada e intensidad en un punto, la mesa se debe mover al punto siguiente. Este movimiento se realiza con el bloque de movimiento absoluto y las matrices de posiciones calculadas al inicio del subprograma, debiendo diferenciar si se trata de un

movimiento en la misma fila (de una columna a otra) o si hay que cambiar de fila.

Al terminar las medidas de la primera fila y pasar a la segunda se calcula el tiempo estimado de todo el proceso de medida. Todas estas acciones se pueden ver en la Figura 40.

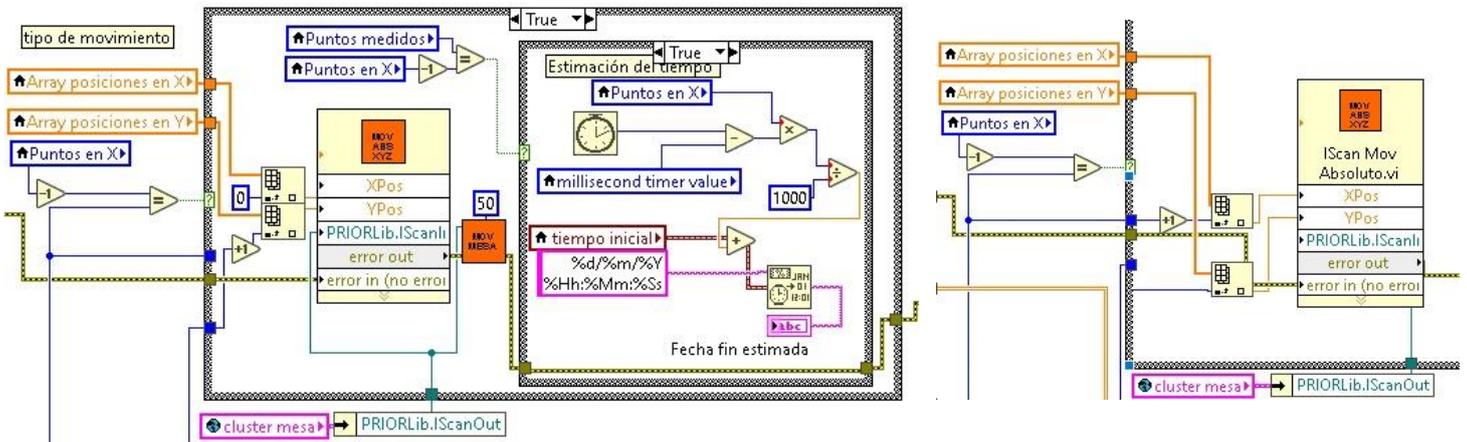


Figura 40. DB del movimiento de la mesa de un pinto a otro en X y (d) de uno a otro en Y.

- Actualización de la medida:** a medida que se van midiendo puntos estos se van mostrando en tiempo real en el rectángulo situado a la derecha de la pantalla. Para lograr esto, cada punto se muestra en una escala de grises donde se compara con el punto más oscuro y más claro para mostrarlo como corresponde dentro de ese rango. La programación de esta parte se muestra en la Figura 41.

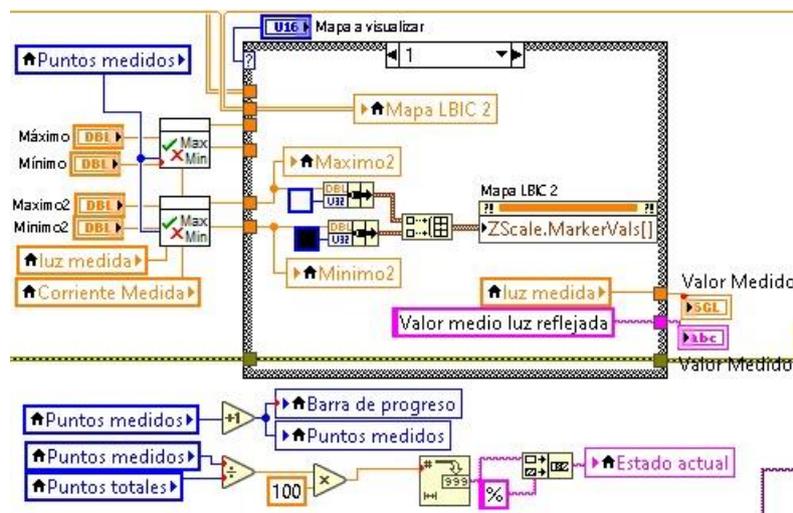


Figura 41. DB de la actualización de los puntos del barrido mostrada en el interfaz

Una vez que se ha completado la medida y se han obtenido las dos matrices, se moverá la mesa al punto de partida y se esperará a que se haga click en el botón “RESULTADO” para tratar los datos obtenidos.

3.2.5. RESULTADOS

Dado que la programación del tratado de los datos obtenidos es muy extensa, se ha optado por incluirla en un subprograma que se ejecutará cuando el usuario lo desee una vez haya terminado el proceso de medida.

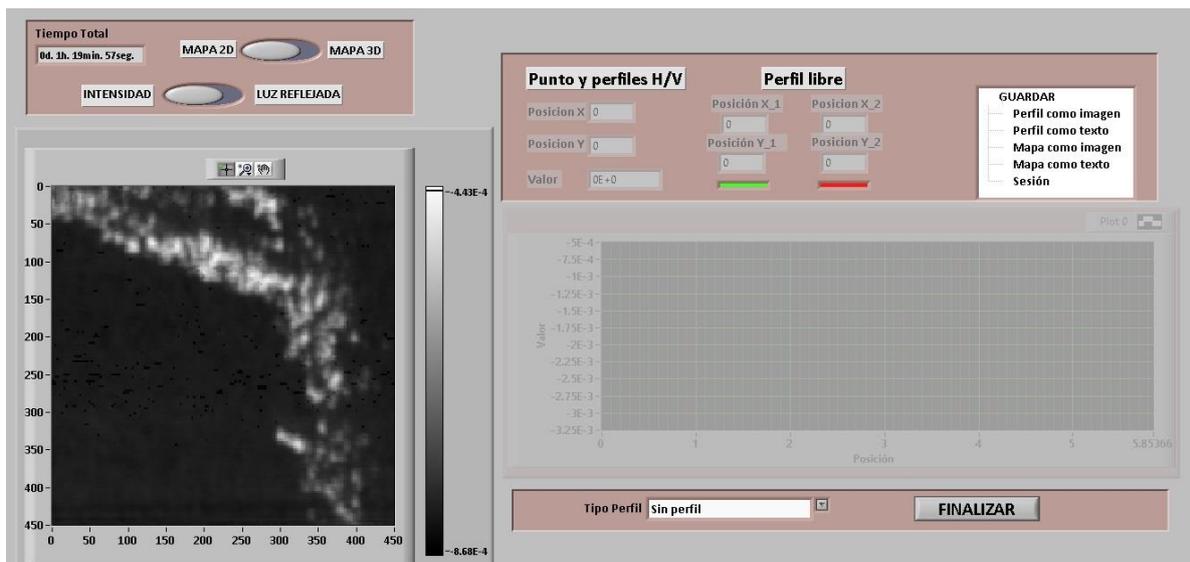


Figura 42. PF de la ventana de resultados LBIC y luz reflejada.

El objetivo de esta ventana que se muestra en la Figura 42 es observar los mapas de la luz reflejada e intensidad obtenidos con posibilidad de guardarlos en el ordenador y permitir al usuario visualizar distintos perfiles sobre el mapa elegido pudiéndolos guardar también.

Una vez iniciada esta ventana, de forma predeterminada aparece el mapa de intensidad en 2D sobre el que se pueden hacer las siguientes acciones:

- Conocer el valor de la medida en un punto dado que se puede elegir libremente sobre el mapa.
- Obtener el perfil horizontal sobre el mapa el 2D de la altura en Y que el usuario elija.
- Obtener el perfil vertical de la misma forma que el horizontal, pero en el eje X.
- Obtener el perfil libre entre dos puntos establecidos por el usuario.

Todas estas acciones se pueden hacer tanto en el mapa de intensidad como en el de luz reflejada cambiando uno por otro a voluntad. Además, cada perfil se puede guardar al igual que los mapas, tanto en una imagen en formato TIF, como en un documento de texto con extensión TXT.

El usuario también podrá cambiar y observar los mapas en 3D de cada tipo de medida que podrá guardar en una imagen JPG, pero sobre este no podrá obtener ningún perfil. En la Figura 43 se muestra la imagen de la zona fruto de estudio junto con los mapas de intensidad en 2D y 3D.

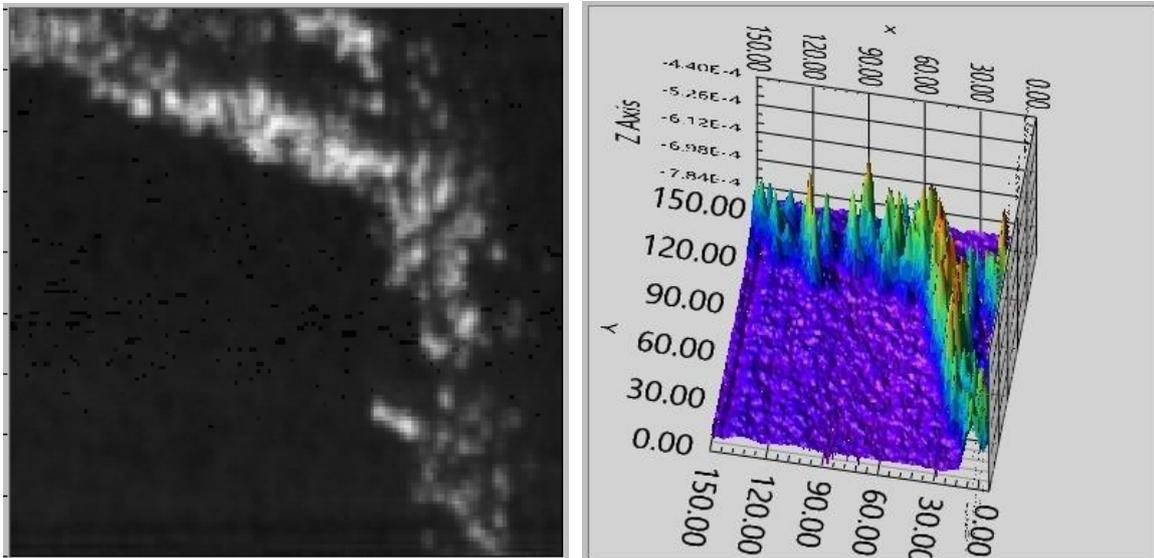


Figura 43. Ejemplo de un mapa de foto-corriente resultado en 2D y (d) 3D.

En cuanto a la programación, en primer lugar, se realizarán como ocurría en “MEDIDA LBIC”, una serie de ajustes y configuraciones necesarias para el correcto funcionamiento del subprograma. En particular estos ajustes se centran en la habilitación e inhabilitación de elementos del interfaz para las distintas opciones que este brinda, así como el tamaño y las escalas del visualizador de los mapas resultado.

Una vez realizada esta primera configuración, se inicia un bucle *while* que terminará cuando decida el usuario y, dentro de este, se ubica una estructura *event*. Se opta por esta estructura debido al alto número de interacciones disponibles tanto de selección como sobre el mapa en 2D.

Los eventos que se tienen en cuenta y que generan una acción al respecto son:

- **Acción predeterminada:** su misión es hacer que nada más ejecutarse el subprograma aparezca por defecto el mapa de intensidad en 2D, dado que es el más importante y la base de una medida LBIC.
- **Cambio entre mapas:** tenemos dos eventos de cambio entre mapas, uno entre el mapa de intensidad y el de la luz reflejada y otro cambio entre los mapas en 2D y 3D. El evento es el cambio de estado de los interruptores de selección.

Al cambiar el estado del interruptor de selección entre intensidad y luz reflejada, se hará uso de una matriz de resultados u otra para conformar la imagen, en caso del mapa en 2D con cada punto en escala de grises como

ocurría en la previsualización de la medida mientras que en los mapas 3D se construyen con un bloque pensado para ello.

- **Selección de un tipo de perfil y movimiento del cursor sobre el mapa en 2D:** En primer lugar y mediante un menú desplegable el usuario puede seleccionar el tipo de perfil que dese.

Si se selecciona la opción “Punto”, se deshabilitan los dos gráficos disponibles para visualizar perfiles ya que no se utilizará ninguno de los dos, en cambio se habilitará un puntero sobre el mapa en 2D y unos visualizadores de la posición y valor de este. Mediante las propiedades del mapa se obtienen las posiciones y valores del punto en cuestión cuando se sitúa el cursor sobre él. Este procedimiento se muestra en la Figura 44.

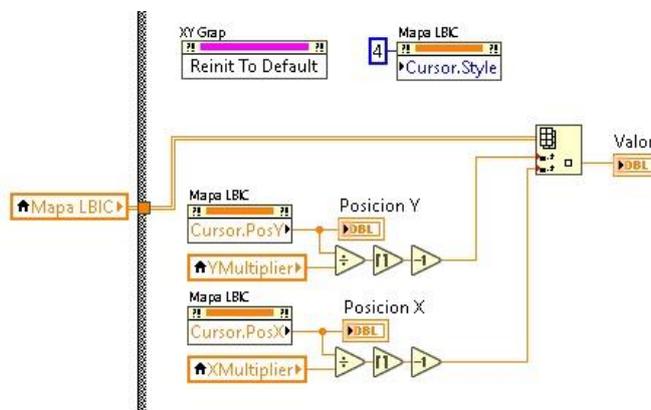


Figura 44. DB del proceso para visualizar el valor y posición de un punto en un mapa 2D.

Al seleccionar “Perfil horizontal” o “Perfil vertical” en el menú, se deshabilitan los visualizadores que no son necesarios y se habilita el gráfico que muestra los perfiles en cuestión. La apariencia del cursor se cambia a una en forma de línea a lo largo de todo el ancho o alto del mapa dependiendo del tipo de perfil. Los pasos que sigue el programa en cada caso son:

- **Horizontal:** Se obtiene la posición en el eje Y del cursor y posteriormente a que punto del barrido en ese eje, con este valor se obtiene la fila que se encuentra en esa posición y se muestra en el gráfico. El proceso se muestra en la 45.

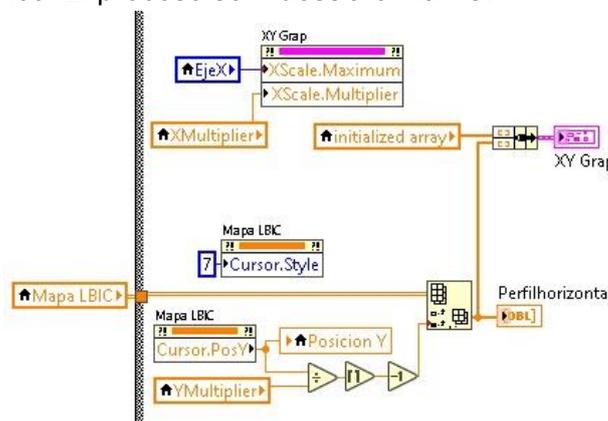


Figura 45. DB del proceso para obtener el perfil horizontal en un mapa 2D.

- **Vertical:** Se obtiene la posición en el eje X del cursor y posteriormente a que punto del barrido corresponde en ese eje, con este valor se obtiene la columna que se encuentra en esa posición y se muestra en el gráfico. En la Figura 46 se muestra el proceso.

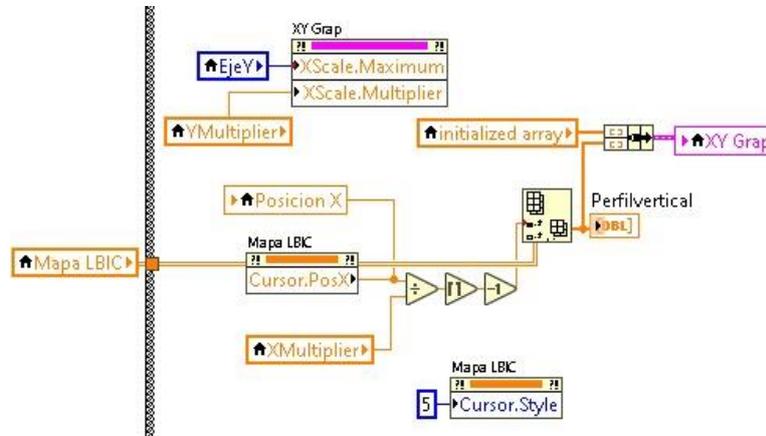


Figura 46. DB del proceso para obtener el perfil vertical en un mapa 2D.

Cuando se selecciona el “Perfil libre” aparecen sobre el mapa 2D dos cursores con la misma apariencia que en el caso de “Punto” y una línea entre ellos, se habilita además el gráfico que muestra este tipo de perfil, así como la posición de estos dos cursores.

En este caso, una vez ubicados ambos cursores sobre los dos puntos que forman la recta de la que se quiere obtener el perfil, se interpola para obtener puntos que conforman la recta y posteriormente se representa el perfil en su gráfico correspondiente. Este proceso se muestra en la Figura 47.

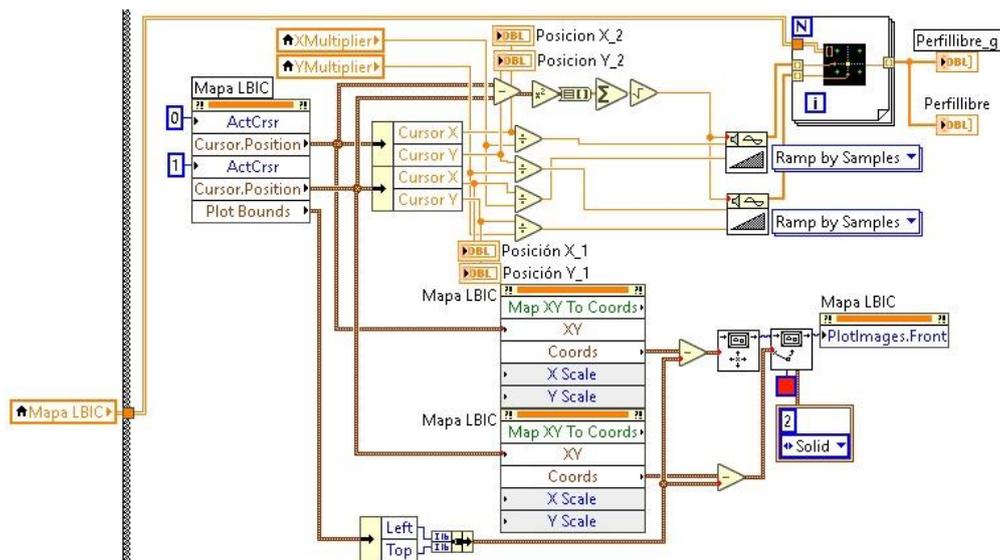


Figura 47. DB del proceso para obtener el perfil libre en un mapa 2D.

- **Selección de entre las opciones de guardado:** por último, el usuario puede guardar en el ordenador todos los mapas posibles y los perfiles en el caso del mapa 2D. Al seleccionar una opción para guardar de entre las listas de opciones aparecerá un dialogo emergente como ocurría en la captura de la imagen en la ventana de configuración para seleccionar el nombre y directorio del archivo final. Una vez seleccionado dicho directorio y dependiendo la opción elegida se creará la imagen en formato TIF para los mapas en 2D, en JPG para los mapas en 3D y los perfiles o el archivo TXT para todos los anteriores, pero en formato texto. En la Figura 48 se muestran los bloques encargados de generar el archivo final.

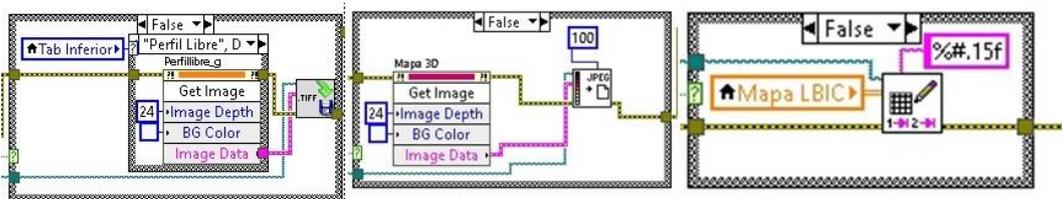


Figura 48. DB del guardado de mapas y perfiles en diferentes formatos.

Una vez que se pulse “FINALIZAR” la ventana se cerrará y se dará por terminado el proceso de medida pudiendo comenzar de nuevo desde el panel principal.

3.3. INSTALACIÓN DEL ESPECTRÓMETRO

Como ya se ha comentado en el apartado de INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS, para finalizar la mejora y actualización del sistema de medida LBIC se instala un espectrómetro en el sistema.

La finalidad de añadir este dispositivo es mejorar las prestaciones del sistema y ampliar la capacidad de análisis de este. Una vez esté instalado y se haya programado en nuestro software un método de trabajo con él, se podrán hacer estudios de fotoluminiscencia en las mismas muestras de semiconductores y células fotovoltaicas que antes, ayudando así a comprender mejor la relación entre los cambios estructurales de estas y los cambios de emisión de fotoluminiscencia.

Como se detallará a continuación, el sistema permitirá a usuario realizar mapas de fotoluminiscencia de forma individualizada o conjuntamente con una LBIC estándar, permitiendo así ver directamente la correlación entre ambas. Incluir este dispositivo requerirá una nueva disposición de los elementos del sistema, así como cambios en el software descrito hasta ahora para añadir las nuevas funcionalidades.

El espectrómetro elegido es el que se muestra en la Figura 49, se trata del modelo NIRQuest512+1.7 de la marca Ocean Insight, modelo pensado para su uso en laboratorios y en especial para la caracterización de materiales.



Figura 49. Espectrómetro utilizado en el sistema.

En la Tabla 11 se resumen las principales características del dispositivo [9][10].

Tabla 11. Características del espectrómetro.

Rango de longitudes de onda	[897.54nm, 17090.26nm]
Apertura de entrada	25µm
Alimentación	Entrada de tensión continua a 5V y 3A
Tiempo de integración	1ms-120s
Reducción de ruido y suavizado	Posibilidad de media global y en cada punto.
Píxeles del detector	512

Con estas características, este modelo es idóneo para la naturaleza de las medidas que se realizarán con este sistema, en el caso del láser de 975nm se podrá ver el espectro completo ya que entra en el rango, los de 853nm y 830nm no se verán completamente, pero si su cola de caída y el primer armónico, esto permitirá comprobar el buen funcionamiento del espectrómetro y las posibilidades de este.

La luz generada por el fenómeno de la fotoluminiscencia en el silicio tiene una longitud de onda de alrededor de 1080nm, por lo que entra también dentro del rango, también se puede estudiar el efecto de los cambios de cristales o defectos que se muestran en longitudes cercanas a esta.

En cuanto a la programación, el fabricante posee un software propio para poder ver los espectros y realizar distintos procesos además de controladores y una librería para LabVIEW, lo que nos facilita mucho la inclusión del espectrómetro en el sistema.

3.3.1. INSTALACIÓN HARDWARE

El espectrómetro se ubicará en el interior de la caja negra junto al resto de dispositivos y la luz generada por las muestras le llegará a través de un cable de fibra óptica desde el microscopio también en el interior.

Para que el espectrómetro pueda leer el espectro de cada punto correctamente conviene que la luz llegue de la forma más directa posible a la fibra óptica conectada al dispositivo.

Para ello se opta por colocar la cámara en uno de los oculares del microscopio mediante un adaptador para montura C y la fibra óptica a través de otro adaptador en la parte superior del microscopio donde antes se ubicaba la cámara, debiendo cambiar la posición del selector mecánico del camino de la luz del interior del microscopio según vayamos a medir la luz reflejada, la fotoluminiscencia o ambas. En la Figura 50 se puede ver la nueva disposición.

Como añadido, el espectrómetro no cuenta con ningún tipo de interruptor de encendido y apagado y solo se puede desconectar de la corriente desenchufando el transformador del enchufe o el conector del dispositivo, haciendo esta tarea algo incomoda, por lo que se insertó un interruptor entre el transformador y el conector exterior a la caja negra para poder apagar y encender el dispositivo cómodamente, se realizó el mismo procedimiento con la cámara de video ya que presentaba el mismo problema y, aunque la capturadora no esté activa cuando el ordenador se encuentra apagado, es mejor mantener la cámara también apagada para no dañar la vida útil de esta.



Figura 50. Disposición de la cámara y fibra del espectrómetro en el microscopio.

3.3.2. INSTALACIÓN SOFTWARE

El espectrómetro también se gobernará desde el mismo software que se ha detallado en puntos anteriores, por lo que LabVIEW continuará siendo el espacio donde se programará el funcionamiento de este dispositivo.

Antes de programar directamente a partir de nuestro software, es interesante analizar diferentes espectros variando distintos parámetros mediante el software oficial del fabricante OceanVIEW, mediante el cual se puede ver fácilmente el espectro medido bajo dichos parámetros.

Los tres parámetros principales que afectan al espectro medido y que se pueden modificar son:

- **Tiempo de integración** (*Integration time*): tiempo durante el cual el espectrómetro adquiere la señal de entrada.
- **Media global** (*Scans to average*): espectros totales medidos de los que se hace una media que será el espectro final.
- **Media de cada punto** (*Boxcard width*): puntos anteriores y posteriores a un punto del espectro de los que se hace la media para establecer la intensidad en el punto en cuestión.

El primer parámetro afecta a la precisión de la medida, cuanto más tiempo dure el proceso de adquisición más preciso será el resultado, mientras que las otras dos al suavizado y eliminación de ruido de la señal de salida, cuantas más medias hagamos tanto generales como de puntos más suavizada será la señal, aunque un exceso en estos valores puede falsear el resultado y eliminar información relevante.

Tras varias pruebas, se llega a la conclusión de que el tiempo de integración ideal es de 30 segundos, sin ser necesario realizar más de una media global para realizar obtener un buen resultado, pero si son convenientes en torno a 5 puntos a la izquierda y derecha de cada uno para hacer la media y obtener un suavizado aceptable.

Aunque estas sean las condiciones óptimas, y con intención de acelerar el proceso de medida, bajar el tiempo de integración a 20 segundos nos da como resultado medidas aceptables, si se baja a 10 segundos ya se puede apreciar como el espectro resultante pierde precisión en comparación con los otros dos. En la Tabla 12 se resumen los parámetros recomendados.

Tabla 12. Parámetros recomendados para las medidas de fotoluminiscencia con el espectrómetro.

Parámetros	Tiempo integración	Medias globales	Medias de cada punto
Óptimos	30s	1	5
Aceptables	30s	1	<5
	20s	1	5
Poco aceptables	10s	1	5
Nada aceptables	<10s	-	-

En la Figura 51 se puede ver el espectro recortado para las longitudes de onda de interés, medido con los parámetros óptimos.

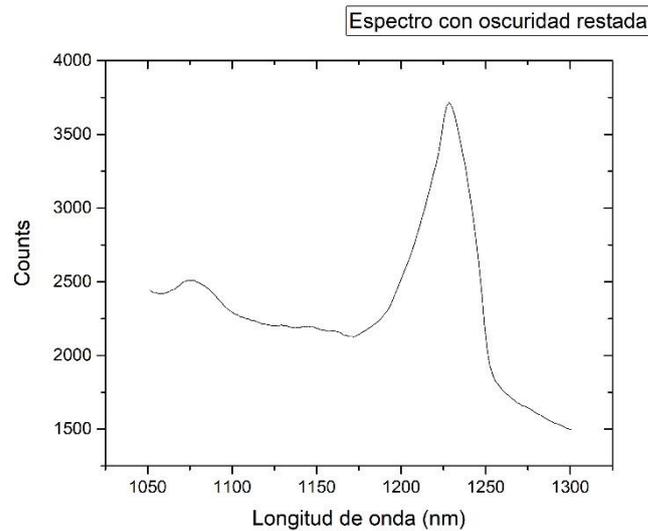


Figura 51. Espectro medido con 30 segundos, 1 media y 5 puntos de media.

Debido a este tiempo necesario para medir cada punto, es inviable hacer conjuntamente la medida LBIC y la de fotoluminiscencia con los mismos puntos en el barrido, o al menos de una forma relativamente rápida ya que la duración de estos procesos de medida se alargaría a varios días. Por ello existen dos posibilidades a la hora de realizar dichas medidas:

- **Realización conjunta:** Se realiza el barrido para la medida LBIC y de fotoluminiscencia, pero esta última cada cierto número de puntos en el eje X y en el eje Y de la LBIC, este intervalo de puntos será elegidos por el usuario antes de iniciar el proceso.
- **Realización individual:** Se realiza un barrido solo para medir la fotoluminiscencia en una zona formada por unos puntos introducidos por el usuario, pudiendo ser diferentes a los de la medida LBIC. Con ello se busca centrar el estudio en un área de mayor interés necesitando un número menor de puntos.

En el software se contemplarán las dos posibilidades, añadiendo controles para la medida conjunta en la ventana de “MEDIDA LBIC” y añadiendo una ventana propia en el menú principal denominada “FOTOLUMINISCENCIA”.

A continuación, se detallarán las diferentes acciones y procesos necesarios para llevar a cabo la programación relativa a estas medidas.

- **Inicialización:** como ocurría en el resto de dispositivos, es necesario inicializar el espectrómetro con el fin de confirmar una conexión entre este y el ordenador que asegure una buena comunicación entre ambos. Dado que una opción para el usuario será la de una medida conjunta, es necesario dar la opción de inicializar el espectrómetro junto al resto de

dispositivos en la ventana de “INICIALIZACIÓN” para su posterior utilización junto a la medida LBIC. En la Figura 52 se muestra dicha opción.

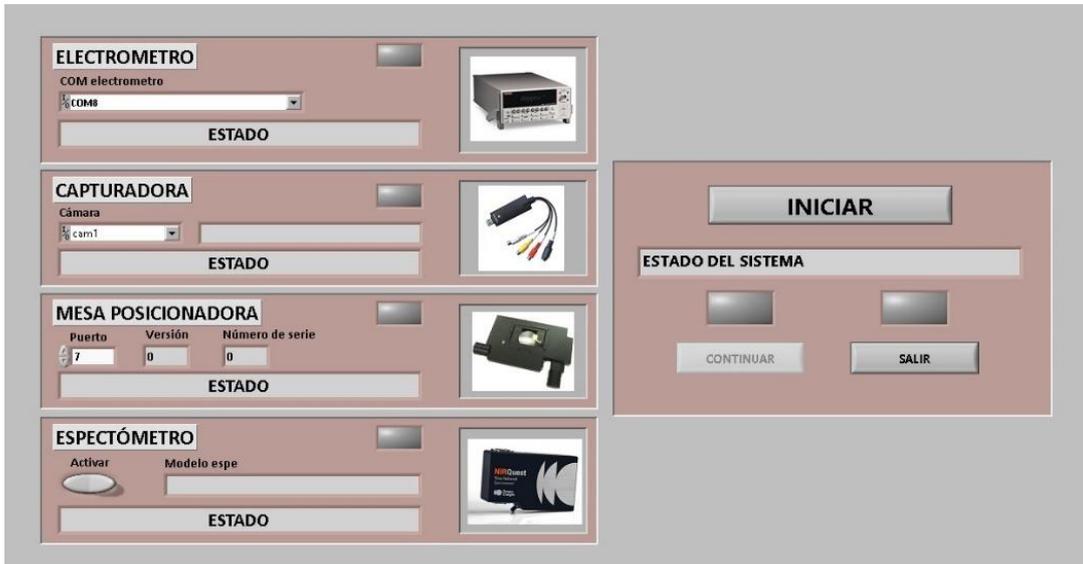


Figura 52. PF de la ventana de inicialización incluyendo el espectrómetro.

Para inicializarlo es necesario crear una variable denominada *Wrapper* que permitirá utilizar los bloques destinados al espectrómetro facilitados por el fabricante. Una vez se ha creado esta variable y haciendo uso de ella se comprueba que el espectrómetro está conectado y listo para utilizarse. En la Figura 53 se muestra esta parte de código.

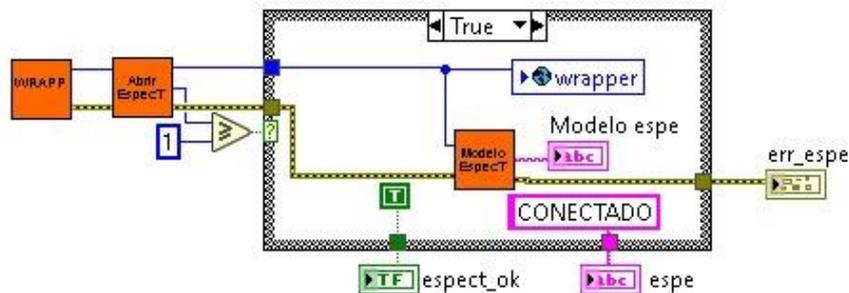


Figura 53. DB del proceso de inicialización del espectrómetro.

Esta variable *Wrapper* es necesaria en ciertos dispositivos para realizar aplicaciones que los gobierne. Se creará una variable global que la almacene para poder utilizarla el resto de bloques posteriormente, todas las acciones que se realizan utilizando esta variable quedarán guardadas para las posteriores.

En el caso de la medida individual, si bien es cierto que solo se necesita el espectrómetro y la mesa posicionadora, la mayor parte de las veces se realizará tras una medida LBIC, y en caso contrario será necesario activar la cámara para ubicar el objetivo sobre el área que nos interese. Por ello siempre se utilizará la ventana de “INICIALIZACIÓN” antes de cualquier tipo de medida,

haciendo que en la ventana de “LUMINISCENCIA” solo se deba inicializar el espectrómetro si no se ha hecho en la primera inicialización. Para comprobar si el espectrómetro está inicializado se mira la variable *wrapper* global para ver si es mayor que cero, si es así el espectrómetro ya se ha inicializado, de lo contrario se inicializa. En la Figura 54 se muestra el panel frontal de la opción de medida de fotoluminiscencia individual.

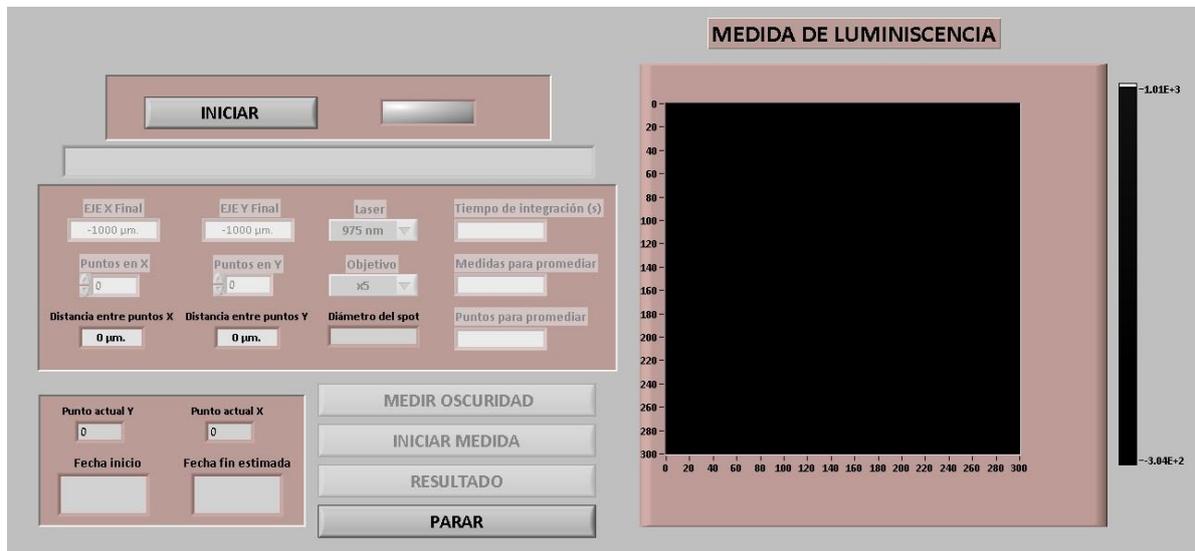


Figura 54. PF de la ventana de la medida de fotoluminiscencia.

- **Configuración:** en el caso de la medida conjunta, el tamaño del área del barrido será la misma que el de la medida LBIC y habrá que seleccionar el intervalo de puntos del barrido LBIC en cada eje para realizar una medida de luminiscencia, el interfaz indicará el número de puntos totales en cada eje que tendrá el barrido de luminiscencia tras seleccionar este intervalo.

El intervalo se aplica tanto a los puntos de cada fila y de cada columna, si se aplicase a los puntos en general sin tener en cuenta en que fila y columna están, en algunas líneas y columnas de las matrices correspondientes a las medidas del espectrómetro habría un número diferente de celdas no pudiendo por tanto construir correctamente estas matrices. Por esta misma razón y para que estas matrices tengan una forma más simétrica se aplica el intervalo tanto a las filas como a las columnas.

En la Figura 55 se muestra el ejemplo de un barrido LBIC con 10 puntos en el eje X y 10 puntos en el eje Y, si se selecciona un intervalo de 2, se hará una medida de luminiscencia cada dos columnas y cada dos filas, generando una matriz de 5x5 representada en la imagen con las celdas en color azul.

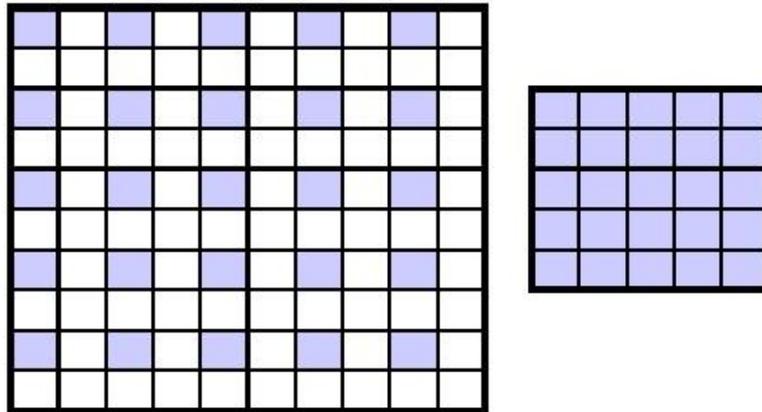


Figura 55. Ejemplo de un intervalo de 2 en cada eje sobre una matriz 10x10 quedando una matriz resultado 5x5.

Si por el contrario o se tiene en cuenta el intervalo en las filas y columnas individualmente y se aplica el intervalo en los puntos en general no puede quedar una matriz como la representada en la Figura 56 al aplicar un intervalo de 4 a una matriz 10x10.

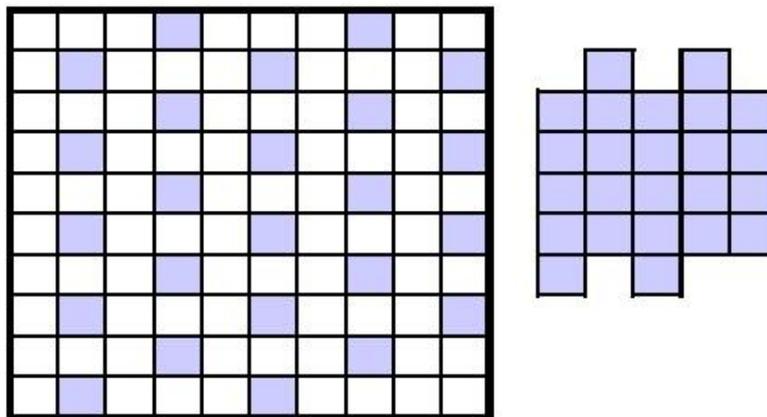


Figura 56. Ejemplo de un intervalo de 4 general sobre una matriz 10x10 quedando una matriz resultado irregular.

Para llevar esto a cabo, es necesario utilizar variables auxiliares con diferentes funciones:

- 2 variables que vayan contando los puntos de cada fila y columna (una variable para los puntos de las filas y otro para el de las columnas) para aplicar el intervalo
- 2 variables (una para el eje X y otra para el Y) que actualicen la posición de la siguiente celda de las matrices resultantes del tamaño correspondiente al valor absoluto de dividir los puntos de las filas y columnas entre el valor del intervalo seleccionado.
- Una última variable necesaria para seleccionar correctamente la posición de la siguiente celda de acuerdo a las direcciones establecidas de derecha a izquierda y de abajo a arriba.

Estas variables trabajan en el interior de los bucles *for* anidados comentados anteriormente que dirigen los procesos de medida en cada punto del barrido LBIC.

En el caso de la medida individual no existe este problema ya que se seleccionan directamente los puntos en cada eje deseados para realizar el barrido siguiendo la misma dinámica que la medida LBIC.

Antes de comenzar la medida, ya sea conjunta o individual se deben establecer también los parámetros de tiempo de integración, número de medidas para promediar y número de puntos para promediar. Previo a la medida y con el láser apagado se hará una medición del espectro cuando no hay ningún tipo de luz para obtener una matriz que contiene el posible ruido para posteriormente eliminarlo. En la Figura 57 se muestra esta medición del “espectro oscuro” estableciendo en este punto los parámetros de medida utilizando los bloques de la librería facilitada por el fabricante del espectrómetro.

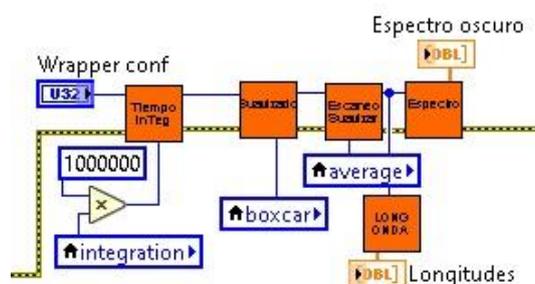


Figura 57. DB del proceso de medida del "espectro oscuro" previo a la medida de fotoluminiscencia.

- **Realización de las medidas:** en cuanto a las medidas obtenidas en relación a la utilización del espectrómetro, se adquirirán dos tipos de resultados:
 - **Matriz de integrales:** en primer lugar, se obtendrá una matriz de dos dimensiones como en el caso LBIC, donde cada celda corresponde a un punto del barrido y donde su valor es la integral del área bajo el espectro entre las dos longitudes de onda de interés antes mencionada.
 - **Matriz completa:** por otro lado, se obtendrá otra matriz de tres dimensiones, dos de ellas corresponden a los ejes X e Y formando el área del barrido, mientras que la tercera son los distintos valores de intensidad para las diferentes longitudes de onda disponibles del electrómetro, 512 en total.

Para generar estas matrices el proceso a seguir es el siguiente

1. Una vez se ha obtenido el espectro oscuro y una matriz con los valores de las longitudes de onda de las que se va a medir la intensidad que se utilizará en el tratado de resultados, se procede a la creación de las

matrices que albergarán los datos obtenidos por el espectrómetro. El tamaño de estas matrices viene dado por los puntos seleccionados o el intervalo correspondiente.

2. Con las matrices creadas, comienzan los dos bucles *for* anidados, uno propio para la fotoluminiscencia en la medida individual y otro el de la medida LBIC con una sección destinada a la luminiscencia.

En dichos bucles se obtiene el espectro completo de cada punto del barrido, del que se resta el espectro oscuro, y se almacena en cada celda de la matriz 3D creada, generando así la matriz 3D de espectros completos. Esta es la información más general y completa que podemos obtener.

3. De cada espectro completo se obtiene un fragmento de este que corresponde con las intensidades de las longitudes de onda entre 1000 y 1300. Estos intervalos se almacenan en otra matriz 3D de fragmentos de espectros o espectros cortados al igual que la de espectros completos.
4. Por último, a partir de la matriz 3D de fragmentos de espectros, se integra mediante un bloque de integración el fragmento de espectro de cada punto para obtener el área bajo este para generar la matriz 2D de las integrales de los fragmentos de los espectros. Esta es la matriz de la que se va haciendo la previsualización tanto en la ventana de medida LBIC general como en la de fotoluminiscencia.

Una vez se han obtenido los valores de una celda de cada matriz, la mesa se mueve al siguiente punto para realizar de forma continua este proceso hasta completar todo el barrido sobre el área de estudio.

En la Figura 58 se muestra el proceso de obtención de todas estas matrices resultado.

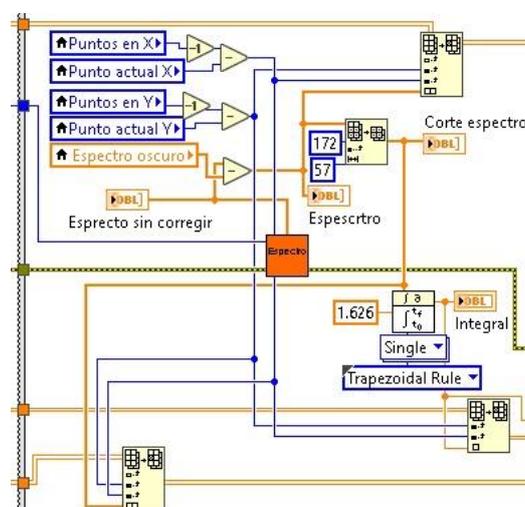


Figura 58. DB de las diferentes matrices con datos medidos por el espectrómetro.

Todas estas matrices son a su vez la entrada del subprograma destinado al tratado y muestra de datos.

- **Tratamiento de datos:** como ocurre con la medida LBIC, debido a la complejidad de la programación destinada a tratar los datos obtenidos, se opta por crear un subprograma con todos los procesos relacionados con estas acciones.

Una vez iniciada este interfaz, se mostrará en pantalla por defecto el mapa 2D en escala de grises correspondiente a la matriz 2D de las integrales de los intervalos de los espectros de cada punto. En la Figura 59 se muestra esta ventana inicial.

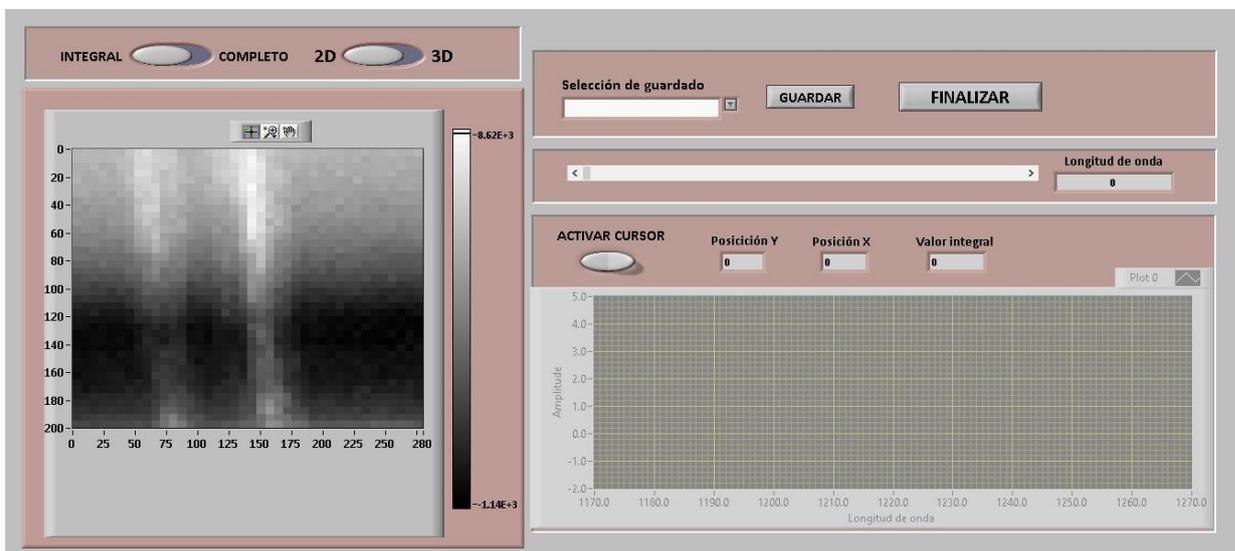


Figura 59. PF de la ventana del tratado de resultados de una medida de fotoluminiscencia.

Existe la posibilidad de activar un cursor sobre este mapa 2D inicial, que al colocarse sobre cada punto de este se mostrará en el gráfico ubicado a la derecha de la ventana el intervalo del espectro correspondiente a ese punto.

Mediante un selector ubicado encima del mapa se puede cambiar la matriz resultado a la matriz completa donde, mediante una barra deslizante, se selecciona la longitud de onda de la que mostrar, de nuevo en escala de grises, el mapa correspondiente, donde cada celda corresponde al valor en ese punto de la intensidad para la longitud de onda seleccionada.

Para ambas matrices de resultados se puede cambiar la visualización para que en vez de 2D se muestre en 3D con una escala a colores en este caso. Este mapa en 3D sigue las mismas pautas que el 2D salvo que no se puede seleccionar ningún punto para ver su espectro en el otro gráfico.

De cada mapa comentado se puede guardar un archivo de imagen o texto al igual que del intervalo de perfil de un punto dado de manera análoga al tratado de resultados de la medida LBIC.

En cuanto a la programación, de manera también similar a los resultados de la medida LBIC, se utiliza una estructura *Event* que recoge todos los eventos relacionados con los selectores de mapa, barra deslizante, cursor, opciones de guardado y las acciones correspondientes a cada uno de estos procesos. En el anexo 1 se pueden ver con detalle todos estos procesos que nos dan como resultado las operaciones comentadas en este apartado.

3.4. CAMBIOS FINALES

Al probar el software generado hasta ahora como se ha descrito, se comprueba que se funcionamiento es correcto, pero se pueden añadir funcionalidades a este.

La primera es la opción de realizar el barrido de forma continua, sin establecer el número de puntos de cada eje y sí estableciendo la velocidad del barrido y de adquisición del electrómetro. La segunda es la opción de guardar los resultados de una medida en un formato que guarde todos los elementos necesarios para posteriormente cargar este archivo directamente en la ventana de resultados.

3.4.1. GUARDAR Y CARGAR SESIÓN

Es interesante que el usuario tenga la posibilidad de guardar un archivo con los datos necesarios para, posteriormente, y sin necesidad de hacer ninguna medida, se carguen directamente en la ventana de resultados de datos LBIC o de luminiscencia. Estos archivos o sesiones tienen extensión .LBC y albergan los datos que actúan como entrada de los bloques de resultados LBIC y de fotoluminiscencia.

Se añadirá una opción en el menú principal llamada “CARGAR SESIÓN” quedando un panel frontal como el que se muestra en la Figura 60.

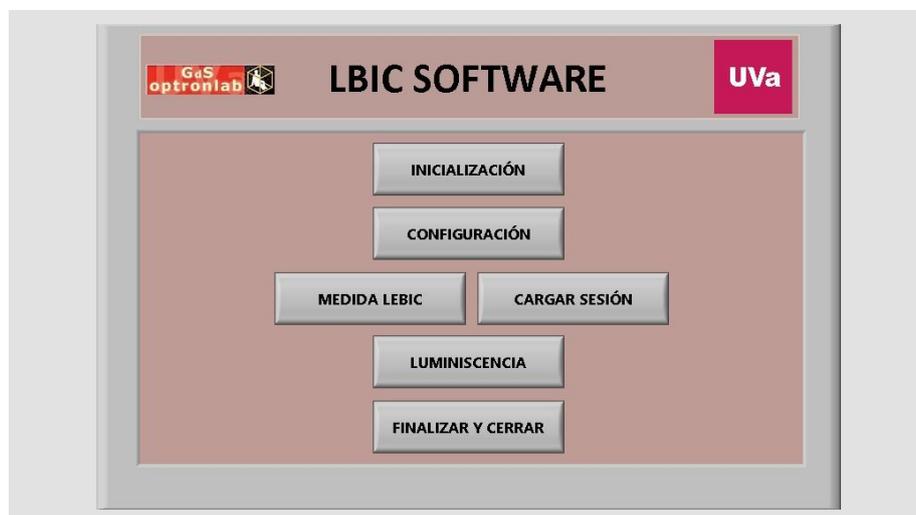


Figura 60. PF del menú principal final.

Al hacer click sobre esta opción se abrirá otra ventana mostrada en la Figura 61 para elegir si se desea cargar una sesión de medida LBIC o de fotoluminiscencia, una vez se seleccione una de estas dos opciones se abrirá la ventana correspondiente a tipo de resultados elegido.

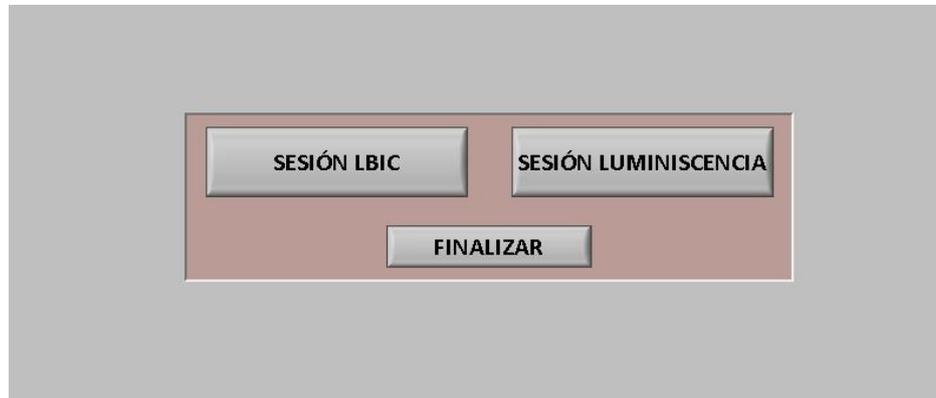


Figura 61. PF de la ventana para cargar una sesión.

Una vez se hayan realizado las operaciones deseadas, pulsando “FINALIZAR” se cerrará esta ventana volviendo al menú principal para continuar con otra opción de dicho menú o cerrar el programa.

En cuanto a la programación, será necesario guardar estas sesiones, para ello se incluirá en las ventanas de resultados una opción de guardado de estas. En la Figura 62 se muestra la creación y guardado de las sesiones.

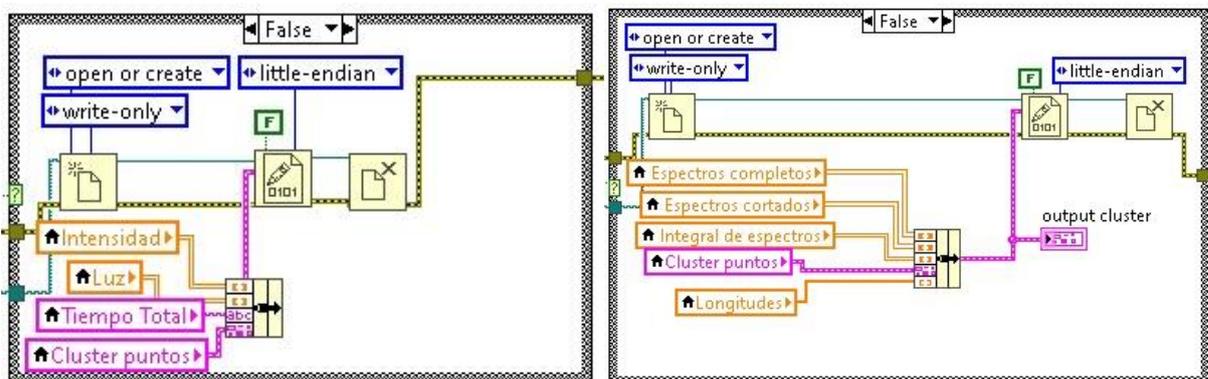


Figura 62. DB de la creación y guardado de sesiones de medida LBIC y (d) fotoluminiscencia.

Para crear las sesiones es necesario generar un *cluster* (contenedor de datos de diferente tipo) con los datos de entrada correspondientes a los programas de tratamiento de resultados, estos datos son las matrices resultado de cada tipo de medida y los puntos y distancias de cada eje para poder crear los mapas correspondientes.

Para leer los archivos de sesión se realiza el proceso contrario en el panel de bloques del subprograma de cargar sesión, cargando el archivo tipo LBC y desglosando el cluster en las diferentes entradas de los subprogramas resultados que se abrirán

una vez se haya seleccionado el archivo en cuestión desde un directorio del ordenador. En la Figura 63 se muestra este proceso de carga.

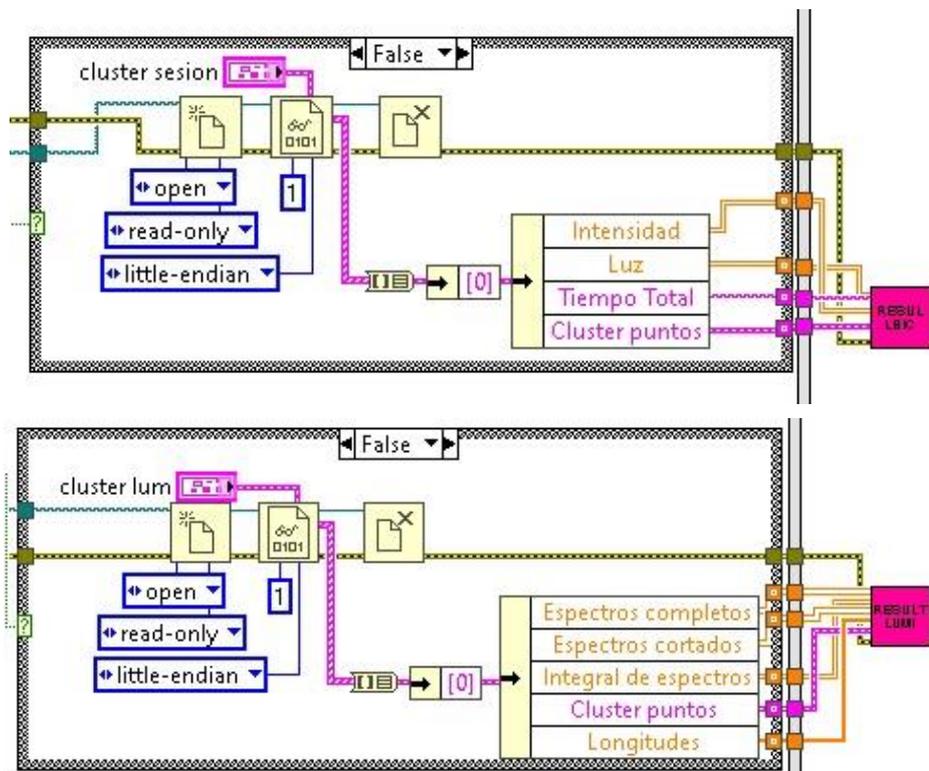


Figura 63. DB de la carga de sesiones de resultados de medida LBIC y (ab) de fotoluminiscencia.

Cabe mencionar el hecho que se establece el formato de almacenamiento y lectura de datos *Little-endian* para asegurar que los resultados se guardan y cargan correctamente en cualquier equipo y sistema operativo.

3.4.2. BARRIDO CONTINUO

Toda la programación expuesta y explicada hasta ahora se basaba en un barrido discreto punto a punto, es decir, la mesa se mueve hasta un punto concreto del que se conocía la posición a partir de la longitud de los ejes y de los puntos establecidos por el usuario, como ya se ha explicado este tipo de medida es muy eficaz cuando la distancia entre dos puntos consecutivos es igual o lo más cercana posible al diámetro del spot láser que incide sobre la muestra.

Este método es muy bueno cuando el tamaño del área del barrido es relativamente pequeño, si aumentamos el tamaño de los ejes X e Y se necesita un número muy elevado de puntos en cada uno para cumplir la condición del diámetro si se desea un mapa resultado preciso, lo que implica un tiempo elevado en la realización del proceso de medida.

Una solución consiste en realizar el barrido de forma continua, establecido el tamaño de cada eje, la velocidad de movimiento de la mesa y la velocidad de toma de datos del electrómetro se realiza el barrido en las mismas direcciones que en el caso

continuo pero las medidas se intensidades se realizan mientras la mesa se mueve sobre el eje X. Con ello se consiguen medidas de un área mayor en menor tiempo.

Para llevar esto a cabo, en la ventana de medida LBIC se habilitará la opción de esta medida continua, habilitando a su vez los controles correspondientes a las velocidades comentadas. La nueva ventana de medida LBIC quedará finalmente como se muestra en la figura 64.

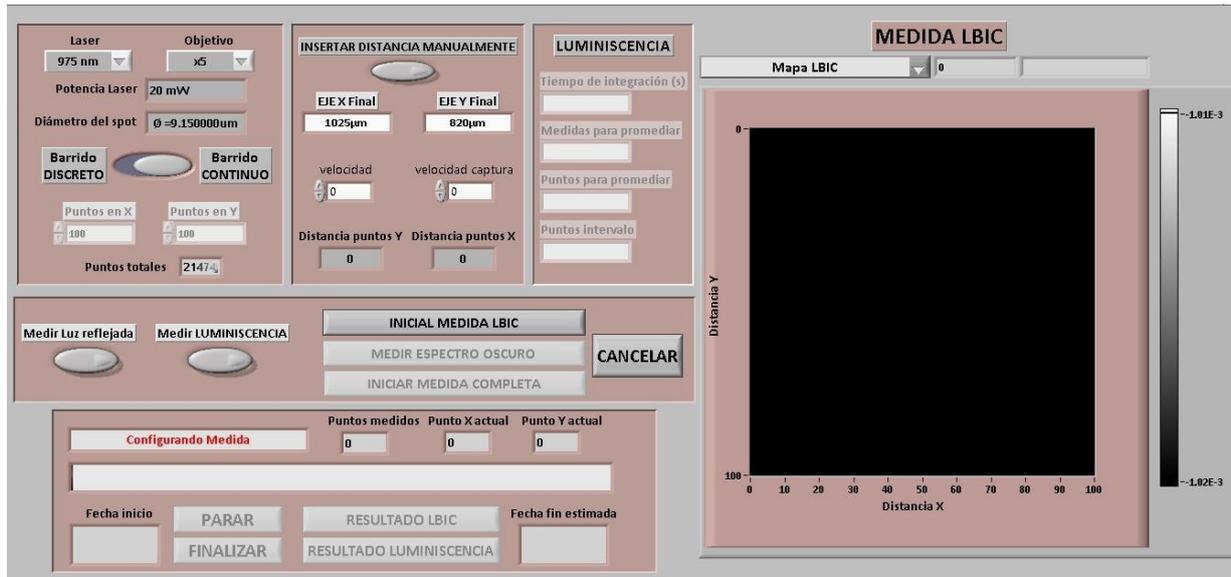


Figura 64. PF de la ventana de medida LBIC final con la opción de barrido continuo.

Para este proceso continuo de medida, el usuario deberá establecer el tamaño del eje X e Y, la velocidad a la que se moverá la mesa en micrómetros por segundo y la velocidad de toma de datos del electrómetro milisegundos entre capturas. Con estos parámetros se calculan los puntos totales que se realizarán, así como la distancia entre dos puntos consecutivos como se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$\frac{\text{Tamaño eje X } (\mu\text{m})}{\text{Velocidad mesa } (\mu\text{m/s})} = \text{tiempo en relaizar una línea (s)}$$

$$\frac{\text{tiempo línea (s)}}{\text{velocidad captua(s/captura)}} = \text{número de capturas por línea}$$

*El usuario introducirá la velocidad de captura en milisegundos, pero en programación se convertirán a segundos.

Se ha decidido por simplicidad, y para obtener mapas de proporciones aceptables, que el número de medidas en el eje X sea el mismo que en el eje Y, debiendo calcular antes de realizar el barrido la distancia que se deberá mover la mesa de una fila a otra consecutiva.

En cuanto a la programación, el primer paso será el cálculo de los puntos en cada eje con los parámetros correspondientes que haya introducido el usuario. Una vez se

ha seleccionado el inicio de la medida, se crea una matriz con el número de filas y columnas igual al número de puntos en cada eje que será el mismo como ya se ha comentado, creando así la matriz que representa a los puntos del barrido.

El siguiente paso es iniciar un bucle *for* que contiene otro bucle *for* como en el caso de la medida discreta para ir completando las celdas de esta matriz con los valores de intensidad medidos. Al inicio del bucle externo se inicia el movimiento de la mesa para realizar el barrido sobre la primera fila, la toma de datos se lleva a cabo en el bucle interno con un tiempo entre iteraciones igual a la velocidad que se ha establecido para las capturas del electrómetro. Una vez que se ha terminado la primera fila se ubica el objetivo sobre el primer punto de la segunda a una velocidad fija y en la mayoría de los casos mayor a la de barrido.

Cada vez que se realiza una medida, esta se guarda en la celda correspondiente de la matriz como en el caso de la medida discreta, este proceso se puede observar en la Figura 65.

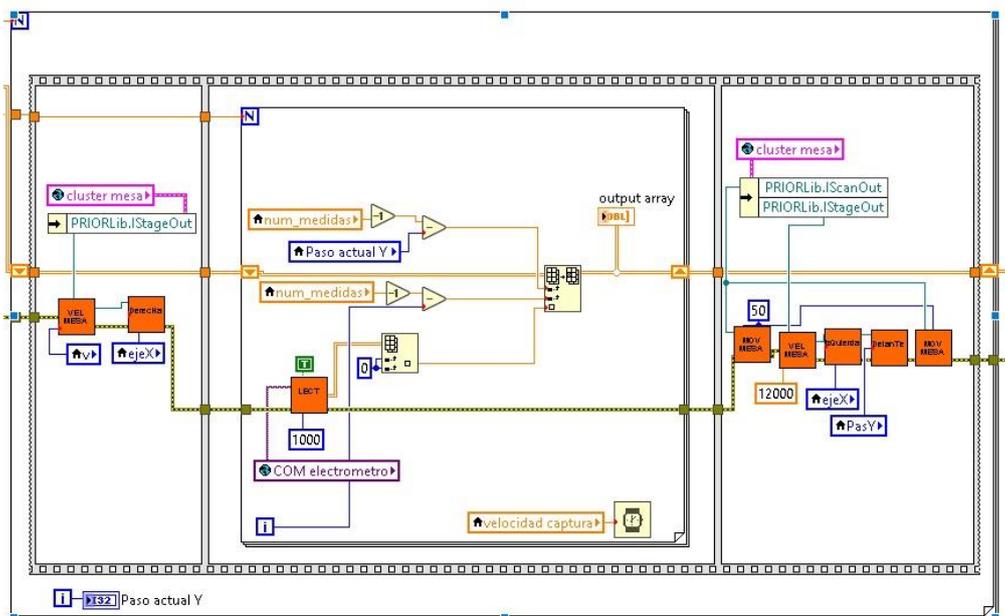


Figura 65. DB del proceso de medición en el barrido continuo.

Para que este proceso de medida continua sea perfecto, la mesa se deberá mover exactamente a la velocidad establecida y las iteraciones deben durar también exactamente el valor elegido, en la realidad esto no es así y existe un pequeño error lógico por los dispositivos, por ello y para reducir al máximo el error, en el barrido continuo no se visualizará en tiempo real el mapa que se va obteniendo ni será posible medir la luz reflejada y la fotoluminiscencia, siendo medidas solo permitidas en el caso de medidas discretas.

3.5. FINALIZACIÓN DEL SOFTWARE

Una vez queda finalizado el programa habiendo completado la programación de todos los programas o vi y subprogramas secundarios es necesario establecer la forma de ejecutarlo desde el ordenador que gobierna el sistema.

A lo largo del proceso de programación, los bloques correspondientes a los dispositivos obtenidos a través de los fabricantes se han extraído de sus librerías y duplicado para facilitar su uso y edición, estas copias renombradas se guardan en la misma carpeta que los programas principales y secundarios del software.

Dichos bloques junto con todos los programas, subprogramas y variables globales creados se incluyen en la librería denominada “Programa LBIC” permitiendo crear un ejecutable y un instalable que incluya todos estos elementos para facilitar la utilización del software en cualquier equipo que se desee.

Para ejecutar el programa desde el principio es suficiente con abrir el programa “MENÚ PRINCIPAL” y comenzar su ejecución, pero para poder hacer esto es necesario tener instalada alguna versión de LabVIEW posterior a la 8.0 en el ordenador en cuestión y este procedimiento no es el más intuitivo de entre los posibles.

Otro procedimiento más interesante para ejecutar el software consiste en generar en primer lugar un ejecutable con extensión EXE que contiene todos los VIs y subVIs que intervienen en el programa, estableciendo el menú principal como la primera ventana en ejecutarse. Este ejecutable funcionará en el ordenador en el que se ha creado, para que funcione en otro ordenador con sistema operativo Windows se generará un instalable a partir de dicho ejecutable y que instalará además todas las herramientas necesarias para poder ejecutar dicho software en cualquier equipo, aunque no tenga instalada ninguna versión de LabVIEW.

4. RESULTADOS

Un objetivo principal y por el que se realizaba la actualización del sistema era el aumento de la velocidad a la hora de realizar medidas LBIC y especialmente cuando también se medía la luz reflejada sin perder calidad en los resultados por ello.

Se analizan a continuación distintas medidas realizadas mediante el software terminado para comprobar la calidad de los resultados y posteriormente analizar las posibles mejoras.

4.1. MEDIDA LBIC CON BARRIDO CONTINUO

En primer lugar, se realizan dos medidas LBIC con barrido continuo de prueba. La primera se muestra en la Figura 66 y sus parámetros en la Tabla 13.

Tabla 13. Parámetros primera medida LBIC en barrido continuo.

Área barrido	1,6x1,6cm
Objetivo	X50
Velocidad de la mesa	70 μ m/s
Velocidad de captura	800ms/medida
Paso (distancia puntos consecutivos)	56 μ m
Puntos barrido	285x285 (obtenido a partir del resto)

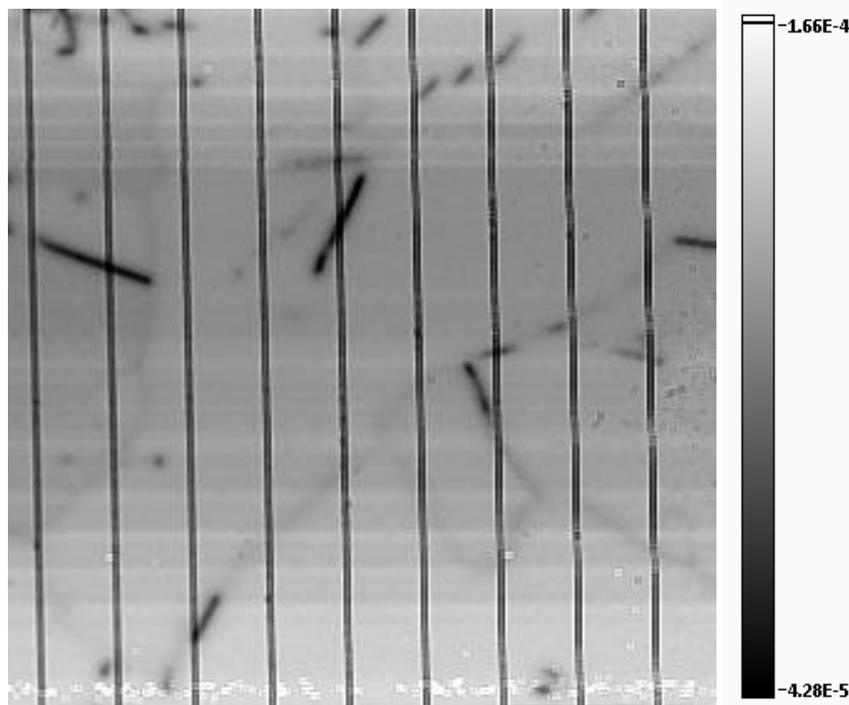


Figura 66. Primera medida LBIC en barrido continuo de ejemplo.

La segunda se muestra en la Figura 67 con sus parámetros en la Tabla 14.

Tabla 14. Parámetros segunda medida LBIC en barrido continuo.

Área barrido	1,8x1,8cm
Objetivo	X20
Velocidad de la mesa	60µm/s
Velocidad de captura	600ms/medida
Paso (distancia puntos consecutivos)	36µm
Puntos barrido	500x500 (obtenido a partir del resto)

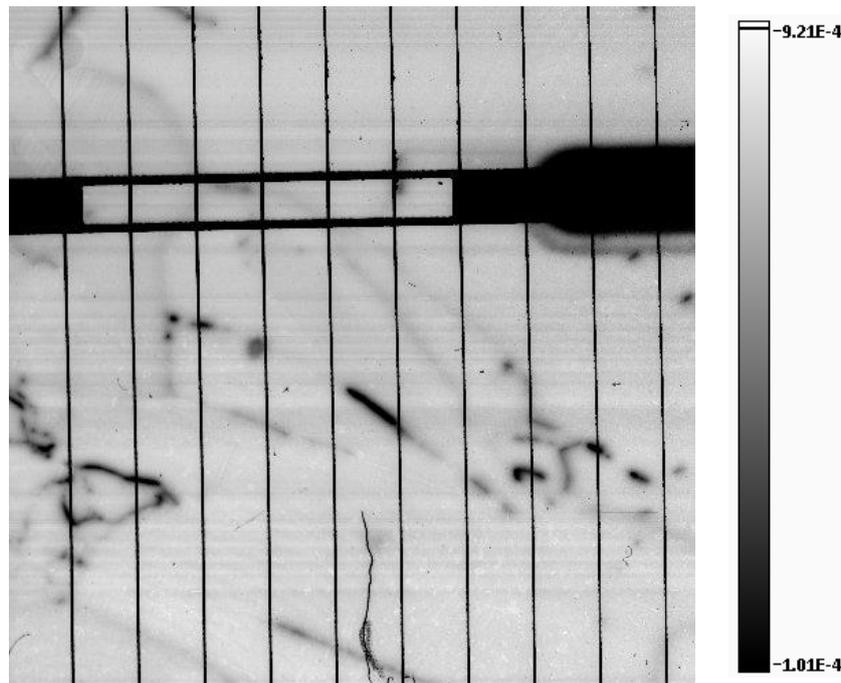


Figura 67. Segunda medida LBIC en barrido continuo de ejemplo.

Queda demostrado con estos dos ejemplos que, utilizando un barrido continuo, se pueden realizar medidas de áreas relativamente grandes.

En el primer caso, la duración del proceso de medida es de entorno 20 horas, mientras que en el segundo esta aumenta a 46 horas debido a que se trata de un área más grande a menor velocidad, suponiendo 46225 puntos más permitiendo con ello una mayor resolución en el mapa, dado que la distancia entre puntos es menor, aunque en ambos casos el resultado es aceptable y no se aprecia ninguna discontinuidad.

Si los parámetros que afectan a la distancia entre puntos se establecieran de tal forma que dicha distancia sea igual al diámetro del spot, se conseguiría la mayor resolución ya que no habría ninguna zona del área de medida sin estudiar.

4.2. MEDIDA LBIC CON BARRIDO DISCRETO

El primer ejemplo se muestra en la Figura 68 con sus parámetros en la Tabla 15.

Tabla 15. Primera medida LBIC en barrido discreto de ejemplo.

Área barrido	800x800 μ m
Objetivo	X5
Puntos barrido	100x100
Paso (distancia puntos consecutivos)	8 μ m (obtenido a partir del resto)

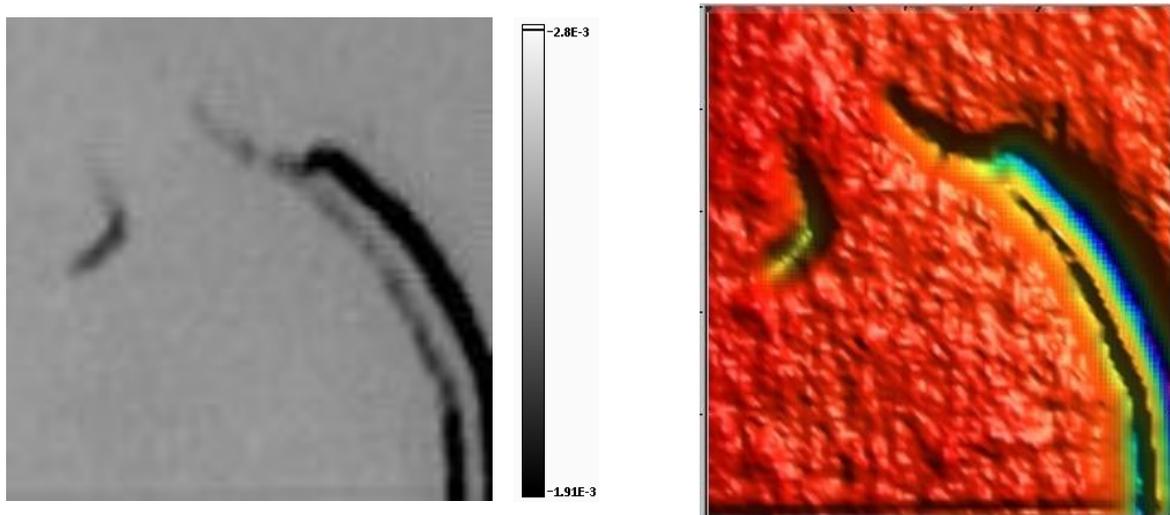


Figura 68. Primera medida LBIC con barrido discreto y (d) una visión cenital del mismo mapa pero en 3D.

El segundo ejemplo se muestra en la Figura 69 con sus parámetros en la Tabla 16.

Tabla 16. Segunda medida LBIC en barrido discreto de ejemplo.

Área barrido	1000x1000 μ m
Objetivo	X20
Puntos barrido	500x500
Paso (distancia puntos consecutivos)	3 μ m (obtenido a partir del resto)

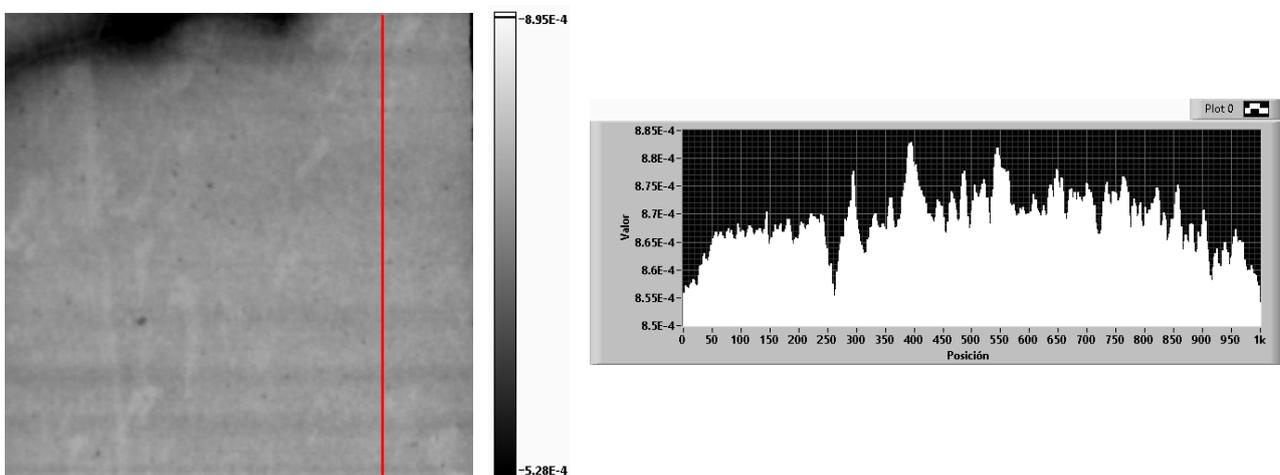


Figura 69. Segunda medida LBIC con barrido discreto y (d) un perfil vertical obtenido del mapa.

En ambos casos el tamaño del paso o distancia entre dos puntos consecutivos es prácticamente el mismo que el tamaño del spot, en el primer caso el spot tiene un diámetro de $9,15\mu\text{m}$ mientras que en el segundo de $2,9\mu\text{m}$, siendo prácticamente los valores de paso mostrados en las dos tablas anteriores, dejando claro que, aunque en el segundo ejemplo el mapa no tenga gran valor científico, cumpliendo esta condición los mapas obtenidos tienen una buena resolución.

4.3. MEDIDA DE FOTOLUMINISCENCIA

Como se ha descrito en apartados anteriores, el software junto con el espectrómetro y sus recursos correspondientes permiten realizar mapas de fotoluminiscencia, debido al tiempo de integración elevado en comparación con el tiempo de toma de datos en la medida LBIC de un punto, este tipo de medida se debe hacer necesariamente con un barrido discreto punto a punto.

En el ejemplo mostrado en la Figura 70 con sus parámetros en la Tabla 17, se muestra una medida de fotoluminiscencia, concretamente el mapa correspondiente a las integrales de las intensidades de las longitudes de onda de interés.

Tabla 17. Parámetros de la medida de fotoluminiscencia de ejemplo.

Área barrido	250x200 μm
Objetivo	X20
Puntos barrido	40x40
Paso (distancia puntos consecutivos)	6 μm (obtenido a partir del resto)
Tiempo de integración	30s
Medias globales	1
Medias en cada punto	5

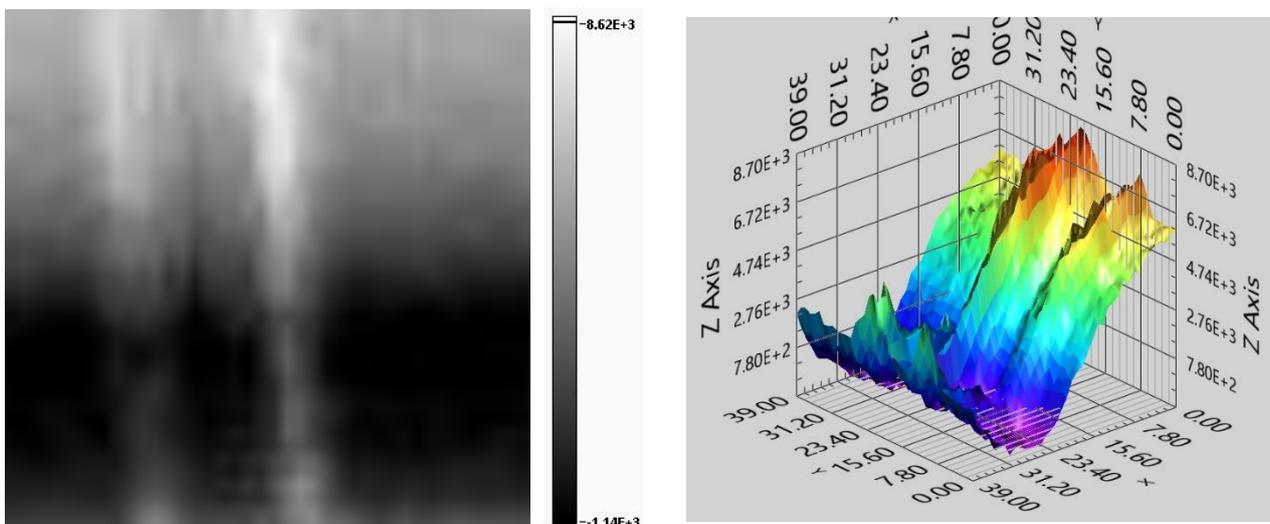


Figura 70. Medida de fotoluminiscencia con (d) el mismo mapa pero con una representación 3D.

4.4. COMPARATIVA ENTRE SOFTWARES

Al haber instalado la versión 2020 de LabVIEW en el ordenador que albergaba el antiguo software, los bloques pertenecientes a este se han actualizado a esta última versión, no permitiendo su ejecución por el desfase de los bloques referentes al electrómetro como ya se ha comentado, es por ello que no se ha podido realizar una medida con el software antiguo una vez se ha terminado el nuevo, pero durante este proceso de actualización se ha trabajado con una referencia de 23 horas aproximadamente para un barrido discreto de 200x200 puntos midiendo también la luz reflejada.

En el caso de la medida mostrada en la figura 69, el sistema ha necesitado un tiempo de 17 horas para realizar esta medida discreta de 500x500 puntos con la medida de luz reflejada incluida. Queda demostrado con esto que el tiempo se ha reducido considerablemente, ya que en una medida con 90000 puntos más se ha reducido el tiempo en 6h. Si se comparan dos barridos del mismo tamaño, un barrido de 100x100 con el software antiguo tardaba en torno a 11h mientras que una medida con el software actual con el mismo número de puntos tarda 55min reduciendo el tiempo un 1200%.

Como ya se ha visto, este aumento de velocidad en la realización de medidas se debe a la optimización del software, reduciendo la carga computacional a la necesaria para poder realizar correctamente las acciones correspondientes al proceso de medida y para una buena comunicación con el usuario por medio del interfaz. Otro punto clave en relación a la disminución del tiempo es el proceso de toma y guardado de medidas en las correspondientes matrices, así como la opción de un barrido continuo que permite controlar directamente las velocidades de movimiento y captura que afectan directamente al tiempo que tarda el sistema en realizar el barrido y tomar datos.



5. CONCLUSIONES

Como se ha podido ver en el apartado RESULTADOS, el software desarrollado y detallado en este trabajo consigue gobernar el sistema de medida LBIC para obtener los resultados deseados, es por ello que se puede considerar que los objetivos propuestos al inicio de la actualización de dicho sistema han sido cumplidos dentro del tiempo estimado y sin ningún coste añadido a los ya barajados.

En lo referente al hardware, se ha podido confirmar que los dispositivos que conformaban en un inicio el sistema presentan unas características y prestaciones suficientes para la naturaleza de las medidas y para trabajar conjuntamente a una mayor velocidad, no teniendo que sustituir ninguno a corto plazo. Además, se ha conseguido añadir correctamente el espectrómetro descrito en el apartado INSTALACIÓN DEL ESPECTRÓMETRO habilitando la posibilidad de realizar estudios de fotoluminiscencia que complementen a los de luz reflejada y en especial a los de corriente, fundamental en un estudio y caracterización LBIC.

Por su parte, se ha logrado generar un software mucho más intuitivo para el usuario mejorando el interfaz de este, pero respetando las funciones principales del anterior y añadiendo otras nuevas, además se ha aumentado considerablemente la velocidad del proceso de toma de medidas, tanto para áreas más pequeñas mediante el barrido discreto como para áreas extensas con el barrido continuo. También se ha mejorada la compatibilidad del software, pudiendo utilizarse en cualquier equipo sin ningún tipo de restricción por desfase de versiones dejando de ser un elemento crítico el actual ordenador que gobierna el sistema.

Por último, aunque el software se ha programado para el sistema particular del laboratorio con los dispositivos específicos descritos, este trabajo y el propio programa puede servir como modelo para realizar un sistema de medida LBIC basado en los mismos procedimientos o en unos muy similares, facilitando enormemente la dificultad que supondría comenzar desde cero.



6. LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

Con el nuevo software generado y descrito en este trabajo, queda claro que se ha conseguido mejorar enormemente en rendimiento del sistema de medida LBIC y, como también se ha visto en COMPARATIVA ENTRE SOFTWARES, se ha reducido notablemente la duración de la toma de medidas a la vez que se ha simplificado mucho el interfaz con el usuario. Si bien el resultado de esta actualización es muy bueno, en un futuro se pueden llevar a cabo diferentes mejoras tanto en el hardware como en el software para continuar con la evolución del sistema.

- **Mejoras en el hardware:** en lo referente a los dispositivos que componen el sistema de medida, las posibles mejoras podrían ser:

- Aunque ya se ha visto que los dispositivos cumplen con las especificaciones, la continua actualización en la industria de la instrumentación hace que en un futuro se puedan mejorar las prestaciones del sistema a nivel hardware con dispositivos nuevos más potentes.
- Una de las actualizaciones más relevantes que se ha llevado a cabo es la adición al sistema de un espectrómetro para realizar medidas de fotoluminiscencia, el proceso de medida de fotoluminiscencia es mucho más lento que el LBIC necesitando un mínimo de 20 segundos por cada punto para obtener un resultado aceptable.

Se necesita por tanto buscar soluciones para acelerar la toma de estas medidas y una de ellas sería cambiar los dispositivos láser por unos que aporten haces de más potencia.

- La corrección del punto cero de mesa que se ha descrito anteriormente es necesaria cada cierto tiempo. Esto se debe a que sobre la mesa se coloca una tabla de madera sobre la que se coloca a su vez la placa de cobre encima de la que se sitúan las muestras. Tanto la tabla de madera con respecto a la mesa como la placa de cobre con respecto a la tabla tienen cierto movimiento que hace que la posición del haz sobre la muestra cambie ligeramente siendo notable al tratarse de micrómetros.

Para evitar esta corrección cada cierto tiempo una solución sería fijar tanto la tabla de madera a la mesa como la placa de cobre a la tabla, pero esto entorpecería la colocación y retiro de las diferentes muestras, por lo que lo ideal sería sustituir esta tabla y placa por un soporte para las muestras de fácil colocación pero que quedase fijo una vez colocado.

- Cada vez que se quiere hacer una medida nueva o se quiere cambiar de tipo de medida entre luz reflejada y fotoluminiscencia es necesario

abrir la puerta frontal de la caja negra que alberga los dispositivos del sistema. Cuando se abre y cierra esta puerta la caja en cuestión vibra demasiado y hace que la muestra se pueda desenfocar por el movimiento de la mesa y poco a poco los espejos que hacen que los haces lleguen al microscopio se descoloquen debiendo recolocarlos de forma regular.

Convendría por tanto buscar otra forma de abrir y cerrar esta puerta o hacer otra que sea menos perjudicial para la medida.

- **Mejoras en el software:** aunque como se ha comentado el nuevo software es mucho más fácil de utilizar y permite realizar medidas de una forma mucho más rápida, hay puntos que se pueden mejorar y funciones que se pueden añadir.

- Actualmente una de las acciones más tediosas es enfocar una muestra cuando se ha variado la distancia al objetivo, ya sea porque se ha cambiado el tipo de muestra como porque se ha tenido que bajar la mesa para facilitar la colocación de esta.

Es por esto que una función de autoenfoco en la ventana de configuración sería muy beneficiosa para el usuario ya que actualmente es un proceso que se debe hacer mediante prueba y error subiendo y bajando la mesa.

- Aunque la velocidad de medida es un factor deseado en el sistema y uno de los objetivos principales del nuevo software, puede llegar a ser interesante que el usuario seleccione el tiempo de adquisición de los diferentes datos y los rangos de medida de los diferentes dispositivos.
- En relación al tratado de datos, sería beneficioso añadir más funcionalidades de acción sobre los gráficos de cada mapa, permitiendo dibujar líneas sobre ellos, medidas de distancia, comentarios y demás información de ayuda para el análisis futuro de los resultados.
- En cuanto a la optimización de este software, en la ventana de medida LBIC han surgido problemas por el desbordamiento de la memoria que LabVIEW otorga a un programa dado y se ha tenido que cambiar la representación de algunos tipos de datos de *double* a *unsigned* de 8 bits para necesitar menos recursos. Para evitar problemas de desbordamiento futuros es aconsejable cambiar la representación de los datos a la mínima que dé buenos resultados, así como buscar otras herramientas para optimizar cada subprograma.
- En relación a lo anterior, y para mejorar la legibilidad de los diagramas de bloques de todos los programas y subprogramas, conviene crear nuevos subVI, agrupando los bloques y la lógica que realice una



función común y que permitirá que sea fácilmente repetible en otros puntos del programa.



7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Bajaj, W. E. Tennant, and P. R. Newman, "Laser beam induced current imaging of surface nonuniformity at the HgCdTe/ZnS interface," *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, vol. 6, no. 4, 1988, doi: 10.1116/1.575501.
- [2] B. M. Ochoa, "TESIS DOCTORAL: Desarrollo y optimización de sistemas de corrientes inducidas ópticamente y de imágenes de luminiscencia para la caracterización de células fotovoltaicas."
- [3] A. P. Pacho and M. Rinio, "A Method to Quantify the Collective Impact of Grain Boundaries on the Internal Quantum Efficiency of Multicrystalline Silicon Solar Cells," *Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci.*, vol. 217, no. 18, pp. 1–7, 2020, doi: 10.1002/pssa.202000229.
- [4] A. Casado Bregón Directores Rocío Barrio Martín José Javier Gandía Alabau, "Contactos en Células de Heterounión de Silicio," 2017.
- [5] Masterhacks.net, "Manual Básico De Programación En," 2013, [Online]. Available: <https://masterhacks.net/>.
- [6] M. Stepper, S. For, and U. Microscopes, "H101F ProScan ® Flat Top Stage."
- [7] Keithley, "K6514 Hoja Técnica," pp. 1–4.
- [8] T. X. Series, "B / W Video Camera Module XC-E Series XC-E Series," vol. 29, no. D, pp. 2–5.
- [9] N. Spectrometers, O. Optics, T. Nirquest, and U. S. Bus, "NIRQuest NIR Spectrometers Data Sheet," vol. 7, pp. 1–46.
- [10] S. Spectrometer, "NIRQuest Hoja Técnica."