



Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C.

Posgrado en Ciencias en Energía Renovable

**LA SHEAROGRAFIA CON LUZ
ELECTROLUMINISCENTE PARA LA ESTIMACION
DE ESFUERZOS Y LOCALIZACION DE FALLAS: UN
ESTUDIO DE VIABILIDAD EN CELDAS SOLARES
DE SILICIO**

Tesis que presenta

Diana López López

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE

Mérida Yucatán, Enero de 2020

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por otorgarme la beca No. 634841, para la realización de mis estudios de maestría.

Al Laboratorio de Energía Renovable del Sureste (LENERSE), por la beca otorgada en el proyecto No. 254667 "Consolidación del Laboratorio de Energía Renovable del Sureste (LENERSE)", subproyecto SP2.

Al Doctor Luis David Patiño López, por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto, su guía, comprensión, inspiración y apoyo durante la dirección de este.

Al Doctor Emmanuel Alejandro Flores Johnson, como codirector de esta tesis, por el aporte de sus revisiones y facilidades otorgadas en la Unidad de Materiales de CICY.

Al CICY y la Unidad de Energía Renovable por las instalaciones, equipos y materiales prestados durante el proyecto.

Al Dr. Juan Luis Peña Chapa y Dr. Iván Rimmaudo de CINVESTAV unidad Mérida, por el apoyo con el préstamo de cámara CCD para aplicaciones de EL.

Al comité tutorial Dr. Pedro Jesús Herrera Franco, M.C. María José Icaza Leyva, Dr. Luis Carlos Ordoñez López por las aportaciones realizadas

Al técnico académico M.C. Enrique Escobedo Hernández por la asistencia otorgada para el uso de máquinas y herramientas.

A mis padres por apoyarme en todas las etapas de este posgrado y hermanita Karito por su amor y apoyo incondicional.

A mis compañeros de trabajo Alan y M.C. Rosario por brindarme su amistad y crítica.

Índice

LISTA DE TABLAS.....	iii
LISTA DE FIGURAS	iii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES.....	3
1.1 Tecnología fotovoltaica	3
1.1.1 Silicio.....	3
1.1.2 Silicio monocristalino.....	4
1.1.3 Silicio Policristalino.....	5
1.2 Fallas comunes en celdas solares	6
1.2.1 Grietas en celdas solares	7
1.2.2 Formación de grietas.....	11
1.2.3 Propagación de grietas	13
1.3 Métodos de inspección estructural.....	14
1.3.1 Electroluminiscencia.....	17
1.3.2 Termografía.....	19
1.3.3 Visualización por shearografía.....	23
1.3.4 El principio de interferometría de moteado (shearografía de speckle).....	24
JUSTIFICACIÓN	27
OBJETIVOS	29
Objetivo general:.....	29
Objetivos específicos:.....	29
HIPÓTESIS:	29
CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA.....	30
CAPÍTULO 3 RESULTADOS	35
3.1 Shearografía láser	35
3.1.1 Propiedades ópticas de la celda de Si	35
3.1.1.1 Índices de refracción	35
3.1.1.2 Microestructura de superficie.....	36
3.1.1.3 Selección de la muestra	36
3.1.2 Selección de diodo láser.....	37

3.1.3 Diseño del instrumento	38
3.1.3.1 Arreglo típico de shearografía.....	39
3.1.3.2 Diseño de software para adquisición y procesamiento de imágenes..	41
3.1.3.4 Arreglo óptico de shearografía láser con prisma de Wollaston.....	43
3.1.4 Optimización de instrumento	47
3.1.5 Pruebas de factibilidad.....	61
3.2 Shearografía con electroluminiscencia	63
3.2.1 Caracterización espectral de la luz emitida por la celda solar.....	63
3.2.2 Diseño del instrumento	64
3.2.3 Optimización de parámetros	68
3.2.4 Pruebas de factibilidad.....	73
CAPÍTULO 4 PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN	74
4.1 Análisis de electroluminiscencia por análisis de armónicos.....	74
4.2 Electroluminiscencia con variación de temperatura.....	93
4.3 Análisis de longitudes de onda emitidas por EL	98
4.4 Análisis del método de los elementos finitos en una celda solar	105
CONCLUSIONES.....	110
BIBLIOGRAFÍA.....	111
ANEXOS	116
Anexo 1 Aplicación de cargas en celdas solares.....	116
Anexo 2. Hoja de datos de la celda solar.....	120
Anexo 3. Hoja de datos de diodo láser	121
Anexo 4 Características de cámara GS3-U3-23S6M-C.....	123
Anexo 5. Características de cámara Blackfly S BFS-U3-32S4	124
Anexo 6. Diagrama esquemático de circuito de alta corriente.	125

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Indicadores de desempeño para grietas diagonales obtenidos de Dhimish [6].	9
Tabla 1.2	Indicadores de desempeño para grietas paralelas obtenidos de Dhimish [6].	10
Tabla 1.3	Técnicas de inspección para celdas solares.	21
Tabla 3.1	Parámetros de cámara para adquisición de imágenes.	53
Tabla 4.1	Configuración de parámetros CCD.	78
Tabla 4.2	Niveles de armónicos	83
Tabla 4.3	Niveles de armónicos	84
Tabla 4.4	Niveles de armónicos	85
Tabla 4.5	Niveles de armónicos para ROI en zona 4.	86
Tabla 4.6	Niveles de armónicos	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Clasificación de celdas solares.	3
Figura 1.2	Tipos de celdas solares[4].	5
Figura 1.3	Celda solar rota. [56].	7
Figura 1.4	Mantenimiento de paneles solares. [55].	7
Figura 1.5	Tipos de grietas. a) Grieta diagonal (+45°), b) Grieta diagonal (-45°), c) Grieta paralelo a la barra de bus, d) perpendicular a la barra de bus, e) Grieta de dirección múltiple. Obtenido de Dhimish [7].	8
Figura 1.6	Eficiencia de potencia de salida para grietas diagonales que afectan en 1,2,3,4 y 5 celdas en PV, Dhimish [6].	9
Figura 1.7	Eficiencia de potencia de salida para grietas paralelas que afectan en 1,2,3,4 y 5 celdas en PV, obtenido de Dhimish [6].	11
Figura 1.8	Proporción de tipos de soldaduras deficientes obtenido de Xiong [5].	12
Figura 1.9	Proporción de tipos de soldaduras deficientes obtenido de Xiong [5].	12
Figura 1.10	Tipo de soldaduras deficientes en celdas PV f) borde g) centro h) a lo largo de la barra bus obtenido de Xiong [6].	13
Figura 1.11	Modelo de propagación de cracks.	13
Figura 1.12	Curva de Bañera en teoría de fallas [57].	15
Figura 1.13	Crecimiento de grietas con procesos cíclicos de inspección/ reparación para alargar la vida de un componente estructural mecánico, Carrión [8].	16
Figura 1.14	Obtención de imágenes por electroluminiscencia en polarización directa, Frazão [9].	18
Figura 1.15	Obtención de imágenes por electroluminiscencia en polarización indirecta, Frazão [9].	19
Figura 1.16	Técnica de Termografía obtenido de Garma [11].	20
Figura 1.17	Interferómetro de Michelson [26].	25
Figura 2.1	Diseño metodológico general.	30
Figura 2.2	Proceso de adquisición de superficie deformada implementando shearografía a) con luz EL b) con luz láser.	32
Figura 2.3	Generación de franjas de correlación, Aristizabal [31].	33

Figura 3.1 Características de reflexión de la luz en una superficie de Si en función de la longitud de onda, Matsumoto [32].	35
Figura 3.2 Izquierda: Superficie de silicio texturizado tomada con microcopia electrónica de barrido. Derecha: efecto de la textura sobre la radiación solar incidente. Fuente: https://www.pveducation.org/ [33].	36
Figura 3.3 Muestra de celda con zonas dañadas.	37
Figura 3.4 Respuesta de absorción de celdas solares de silicio frente a longitudes de onda [34].	38
Figura 3.5 Espectro de reflectividad del celdas de silicio [35].	38
Figura 3.6 Arreglo típico de shearografía, Sanchez [37].	40
Figura 3.7 Diagrama de bloques para promedio de imágenes, fuente propia.	42
Figura 3.8 Programación a bloques de resta en tiempo real.	43
Figura 3.9 Configuración óptica con Wollaston.	44
Figura 3.10 Imagen de la celda del arreglo con Wollaston.	44
Figura 3.11 Aplicación de corriente en celda solar.	46
Figura 3.12 Aplicación instantánea de corriente de 0 a 5 A.	46
Figura 3.13 Aislamiento de instrumento y ambiente de trabajo modificado para experimentación.	47
Figura 3.14 Desfase de imagen.	48
Figura 3.15 Arreglo con Wollaston.	48
Figura 3.16 Arreglo montado con Wollaston.	49
Figura 3.17 Celda iluminada con motas.	49
Figura 3.18 Desfase de imagen.	50
Figura 3.19 Arreglo para shearografía láser.	51
Figura 3.20 Observación de desfase de imágenes y reducción.	51
Figura 3.21 Franjas de interferencia.	52
Figura 3.22 Visualización de tamaño de granos (speckle) modificando la abertura de iris.	52
Figura 3.23 a) imagen promedio, b) imagen en vivo, c) resta.	54
Figura 3.24 Resta para carga de 1A.	55
Figura 3.25 Pico de inyección de corriente de 1 A.	55
Figura 3.26 Señal de estado estable en la celda.	56
Figura 3.27 Resta con carga de 2 A.	56
Figura 3.28 Estado transitorio para carga de 2 A.	56
Figura 3.29 Señal de estado estable posterior a inyección de 2 A.	57
Figura 3.30 Resta con cara de 3 A.	57
Figura 3.31 Estado transitorio para 3 A.	57
Figura 3.32 Señal de estabilización del material posterior a 3A.	58
Figura 3.33 Resta para carga de 4A.	58
Figura 3.34 Señal pico mostrada al inyectar 4 A.	58
Figura 3.35 Señal de estado estable posterior a 4 A.	59
Figura 3.36 Resta para carga de 5 A.	59
Figura 3.37 Estado transitorio para 5 A.	59
Figura 3.38 Señal de estado en reposo posterior a la inyección a 5 A.	60
Figura 3.39 Retorno a estado de reposo.	60

Figura 3.40	Gráfica 3D en estado de reposo.....	61
Figura 3.41	Gráfica 3D en estado de carga.....	61
Figura 3.42	Señal de luminiscencia del silicio [41].	63
Figura 3.43	Espectro de sensibilidad de sensor pco.1300	64
Figura 3.44	Arreglo óptico de electroluminiscencia.	64
Figura 3.45	Imágenes de electroluminiscencia de 1 a 6 A.	65
Figura 3.46	Visualización de electroluminiscencia en celda solar.	66
Figura 3.47	Arreglo de shearografía para electroluminiscencia.	67
Figura 3.48	Arreglo montado para shearografía con electroluminiscencia.	67
Figura 3.49	Zona de interés magnificada de arreglo shearográfico.....	68
Figura 3.50	Arreglo shearográfico con objetivo 4x.	69
Figura 3.51	Electroluminiscencia a 6 A a 27 °C.....	70
Figura 3.52	Electroluminiscencia a 6 A, con calor a 65 °C.....	70
Figura 3.53	Arreglo de electroluminiscencia con celda de CdTe.	70
Figura 3.54	Inyección de corriente en celda CdTe.	71
Figura 3.55	Transmitancia por ángulos en filtro FB 1100-10.	72
Figura 4.1	Circuito regulador de alta corriente.....	75
Figura 4.2	Prototipo de circuito de alta corriente.	76
Figura 4.3	Modulación de salida de voltaje.....	76
Figura 4.4	Inyección de corriente de 0 a 5 A.	77
Figura 4.5	Arreglo para adquisición de electroluminiscencia.	77
Figura 4.6	Diagrama de bloques para el programa adquisición de imágenes.....	78
Figura 4.7	Diagrama de bloques para el programa abrir imágenes.	79
Figura 4.8	Reconstrucción de señal a 0.05 Hz sin filtrar.	79
Figura 4.9	Diagrama de bloques de la aplicación de filtro en imágenes.....	80
Figura 4.10	Histograma de imagen sin filtrar.	81
Figura 4.11	Histograma de imagen filtrada.	81
Figura 4.12	Reconstrucción de la señal de un píxel en imágenes filtradas	82
Figura 4.13	Espectro armónico de un píxel.	82
Figura 4.14	Selección de región de interés en una imagen de electroluminiscencia activa en zona 1.....	83
Figura 4.15	Señal reconstruida de un píxel en ROI 1.....	83
Figura 4.16	Espectro de armónicos para ROI zona 1.....	83
Figura 4.17	Señal reconstruida en un píxel en zona 2.	84
Figura 4.18	Selección de región de interés en una imagen de electroluminiscencia, en zona 2.	84
Figura 4.19	Espectro de armónicos para ROI para zona 2.	84
Figura 4.20	Señal reconstruida de un píxel de zona 3.	85
Figura 4.21	Selección de región de interés en una imagen de electroluminiscencia en zona 3 poco activa.....	85
Figura 4.22	Espectro de armónicos para ROI para zona 3.....	85
Figura 4.23	Señal reconstruida de un píxel, para zona 4.	86
Figura 4.24	Selección de región de interés en una imagen de electroluminiscencia, zona 4.	86
Figura 4.25	Espectro de armónicos para ROI, para zona 4.	86

Figura 4.27 Señal reconstruida de un píxel, para zona 5.....	87
Figura 4.26 Selección de región de interés en una imagen de electroluminiscencia, sobre una fisura para zona 5.....	87
Figura 4.28 Espectro de amónicos para zona 5.....	87
Figura 4.29 Selección de zona de interés.....	88
Figura 4.30 DAT en zona de interés.....	88
Figura 4.32 DAT en eje Y de zona de interés.....	89
Figura 4.31 DAT en eje X de zona de interés.....	89
Figura 4.34 Zona de interés con fisura. DAT de superficie de zona de interés.....	90
Figura 4.33 Zona de interés con fisura.....	90
Figura 4.35 Datos de DAT en eje X.....	90
Figura 4.36 Datos de DAT en eje Y.....	90
Figura 4.37 Zona de interés en pin de voltaje.....	91
Figura 4.38 DAT de superficie de zona de interés.....	91
Figura 4.39 Datos de DAT en eje X.....	91
Figura 4.40 Datos de DAT en eje Y.....	91
Figura 4.42 DAT de superficie en zona de interés.....	92
Figura 4.41 Zona de interés. DAT de superficie en zona de interés.....	92
Figura 4.44 Datos de DAT en eje X.....	92
Figura 4.43 Datos de DAT en eje Y.....	92
Figura 4.45 Esquema de la una estructura de celda multiunión y sus bandgaps fundamentales a 298 K, obtenido de Karcher [45].....	94
Figura 4.46 Emisión espectral de una celda de triple unión a una inyección de corriente de 11 A/cm ² variando la temperatura, obtenido de Karcher [45].....	94
Figura 4.47 Imágenes de EL: a) 22°C, b) 90°C, c) resultado de la sustracción, obtenido de Frazão [9].....	95
Figura 4.48 Variación de la señal de EL de una celda multicristalina, las líneas de tendencia son ajustes lineales por el método de mínimos cuadrados, obtenido de Frazão [9].....	95
Figura 4.49 Arreglo de electroluminiscencia aplicando calor.....	97
Figura 4.50 Imagen a) celda a 31.4 °C, b) celda a 50.6 °C.....	97
Figura 4.51 Almohadilla térmica.....	98
Figura 4.52 Arreglo con aplicación de calor usando almohadilla térmica.....	98
Figura 4.53 a) EL de un panel solar, b) crack en un punto de presión (falla debida a la soldadura de conexiones metálicas) obtenida de Fuyuki [47].....	100
Figura 4.54 Procesamiento por sustracción de diferencia de temperatura en imágenes de EL entre 100°C y 25°C, obtenida de Fuyuki [47].....	101
Figura 4.55 Perfiles de intensidad de EL, correspondiente a la figura anterior, obtenida de Fuyuki [47].....	101
Figura 4.56 Emisión de luminiscencia registrada en una CCD de silicio con diferentes pasa bajas y sin filtro, obtenida de Würfel [48].....	103
Figura 4.57 Imagen de electroluminiscencia de celda multicristalina, con filtro pasa bajas de 1000 nm y tiempo de adquisición de 1s, obtenida de Würfel [48].....	103
Figura 4.58 Relación de intensidad de dos imágenes de electroluminiscencia tomadas con filtros pasabajas de 900 y 1000 nm, obtenida de Würfel [48].....	104

Figura 4.59 Distribución de longitud de distribución calculada desde la relación de intensidad, obtenida de Würfel [48].....	104
Figura 4.60 Dibujo de un módulo fotovoltaico semiflexible.	108
Figura 4.61 Elementos de un módulo fotovoltaico.....	108
Figura 5.1 Aplicación de tensión a la capa activa de un módulo fotovoltaico a través de cables en cortocircuito. La corriente de fuga es monitoreada por un voltímetro a través de una resistencia R1 conectada a tierra. El voltímetro puede estar protegido contra la sobretensión por una segunda resistencia R2	118
Figura 5.2 Circuito de alta corriente para alimentar celda solar.	125

RESUMEN

La penetración de la tecnología fotovoltaica en México lleva varios años con una tendencia creciente, que se manifiesta tanto con la proliferación de instalaciones residenciales, como en la cantidad de proyectos de parques solares en todo el país. Esto es todavía más importante en Yucatán, dadas las condiciones del sistema eléctrico peninsular, que tiene los costos de generación más caros del país, sólo por debajo de Baja California Sur. Este contexto favorable a la tecnología fotovoltaica ha atraído inversiones: las dos únicas fábricas de paneles solares del sureste del país están en Mérida, Yucatán.

Las celdas y paneles solares son objeto de una batería de pruebas a lo largo de su proceso de producción. La más importante de todas, utilizada tanto en investigación como en la industria, es la electroluminiscencia (EL), capaz de detectar defectos y microfisuras (microcracks). Hoy es obligatoria la inspección humana para una correcta interpretación de las imágenes de EL, en las que los defectos se manifiestan como zonas oscuras o de menor intensidad de luz electroluminiscente emitida.

En este contexto, el propósito de este trabajo es doble:

Por un lado, indagar la viabilidad de implementación de técnicas ópticas interferométricas, como la shearografía láser, para medir esfuerzos termomecánicos en las celdas, con el propósito de detectar zonas de fragilidad.

Por otro lado, revisar la electroluminiscencia para indagar si las características de esta luz permiten su uso en esquemas interferométricos como la shearografía.

Los resultados indican que la shearografía láser es viable. En contraste, la shearografía con EL no se pudo explotar dado que la débil emisión electroluminiscente, su amplio espectro, así como la baja sensibilidad en el infrarrojo cercano de las cámaras CCD, impidieron obtener resultados concluyentes. Varios esquemas alternativos se proponen y discuten en perspectiva.

ABSTRACT

The penetration of photovoltaic technology in Mexico has been growing for several years, which is manifested both by the proliferation of residential facilities, and by the growing number of solar parks projects throughout the country. Such trend is higher in Yucatan, given the conditions of the peninsular electric grid, which has the most expensive generation costs in the country, just below Baja California Sur. This favorable context for photovoltaic technology has attracted investments: the only two solar panel factories in the southeast are in Mérida, Yucatán.

Solar cells and panels are subject to a battery of tests throughout their production process. The most important, used in both research and industry, is electroluminescence (EL), capable of detecting defects and microcracks. Today, human inspection is mandatory for a correct interpretation of the EL images, in which defects appear as dark areas or less electroluminescent intense.

In this context, the purpose of this work is twofold:

On the one hand, investigate the feasibility of implementing interferometric optical techniques, such as laser shearography, to measure thermomechanical stresses in cells, with the purpose of detecting areas of fragility, if possible, prior to failure.

On the other hand, revisit the electroluminescence to inquire if the characteristics of this light allow its use in interferometric schemes such as shearography.

The results indicate that laser shearography is viable. In contrast, shearography with EL could not be exploited because the weak electroluminescent emission, its broad spectrum, as well as the low near-infrared sensitivity of CCD cameras, prevented conclusive results. Several alternative EL schemes are proposed and discussed in perspective.

INTRODUCCIÓN

El desgaste de las celdas solares en operación se debe a la combinación de diversos factores: variaciones de temperatura, humedad, defectos en producción por exposición a temperaturas altas, presiones ejercidas durante su trayecto logístico y en la instalación en sitio, como menciona el estudio de Demant [1]. Sobre esta problemática, se han realizado diversos estudios para analizar el desempeño de celdas solares con microgrietas así generadas y estos han revelado que las microgrietas representan un factor potencial en la pérdida de eficiencia del panel y el acortamiento de su vida útil.

Existe una gran variedad de técnicas que se utilizan para caracterizar celdas solares que permiten obtener datos confiables tales como: decaimiento por fotoconductividad, corriente inducida por rayo láser (LBIC), corriente inducida por haz de electrones (EBIC), electroluminiscencia (EL) y transmisión infrarroja que permiten obtener información acerca de las características electrónicas y morfológicas.

Sin embargo, la más utilizada en la industria FV es la electroluminiscencia, que está basada en la detección de contraste en la luz emitida por la celda en respuesta a un estímulo eléctrico. En efecto, en las zonas que presentan fallos o microfisuras, la luz electroluminiscente disminuye considerablemente o desaparece, permitiendo la localización del problema.

Es importante mencionar que la Electroluminiscencia revela defectos ya presentes, que pudieron haberse generado en cualquier punto del proceso de producción de celdas y paneles, durante su transporte, instalación y finalmente por la influencia combinada de las condiciones ambientales y de operación.

En este trabajo se revisita de forma original esta conocida técnica. En efecto, se plantea la utilización de la luz de EL en un esquema interferométrico, sensible a los esfuerzos mecánicos de la celda: la shearografía. Esto con el objeto de revelar zonas de esfuerzos máximos, que en principio deberían corresponder a emplazamientos **donde ocurrirán futuros fallas o futuras microfisuras.**

Una herramienta con esas características no existe en el mercado, ni está reportada en la literatura científica. Tal desarrollo podría ser útil para fabricantes, instaladores,

prestadores de servicios de mantenimiento de paneles solares y parques solares de mediana y gran escala, dónde una planificación y prospección dinámica de reemplazo de paneles permitiría evitar cortes energéticos y disminuir la incertidumbre de gastos inesperados por fallo. Para dar cuenta de ello, el trabajo se organizó en cuatro capítulos:

En el primer capítulo, en la sección de antecedentes se exponen primeramente las características de las celdas solares, sus propiedades ópticas y los tipos de fallos comunes haciendo énfasis en los daños producidos por microfisuras. Después, se hace una revisión del estado del arte de las técnicas de caracterización, incluyendo la electroluminiscencia. La sección termina con el recuento de los principios generales de la shearografía como alternativa de inspección. También, se agrega la sección de justificación donde se aborda la pertinencia de este tipo de análisis desde el panorama energético de tecnología fotovoltaica en México; así como objetivos e hipótesis de este estudio.

En el segundo capítulo, se explica la metodología a seguir para la experimentación de shearografía laser y shearografía con electroluminiscencia, se describen los pasos a seguir para llevar a cabo esta experimentación.

En el tercer capítulo, se presentan los resultados donde se desarrollan los arreglos ópticos para shearografía láser y shearografía con luz de electroluminiscencia, explicando los cambios generados para la optimización de estos.

En el cuarto capítulo se presenta la sección de perspectivas, donde se revisan y discuten los factores que podrían explicar porque no fue posible obtener señales relevantes en el esquema de shearografía con EL. Pero sobre todo se propone una metodología con nuevas estrategias para buscar favorecer el aprovechamiento de tal esquema. Se explora el análisis del aprovechamiento del contenido espectral, la dependencia de la temperatura en EL y la distorsión armónica total de la celda, se presentan resultados preliminares de estos esquemas alternativos que podrían complementar o mejorar el desempeño de la EL tradicional. Además, se propone acompañar estas herramientas de caracterización con el uso del análisis de elemento finito para conocer la evolución de una microfractura sometida a diferentes cargas físicas.

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

1.1 Tecnología fotovoltaica

Existen diferentes tecnologías de celdas fotovoltaicas en el mercado, las más comunes, de acuerdo a Green [2], se resumen en la Figura 1.1.

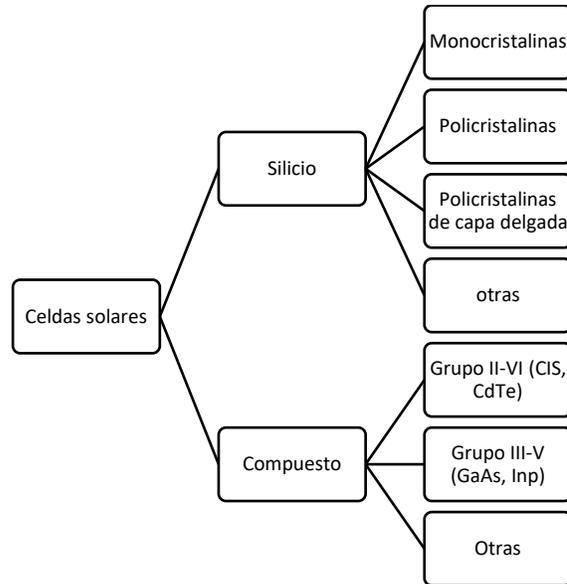


Figura 1.1 Clasificación de celdas solares.

En dónde destacan las celdas más empleadas hoy en día, y que dominan el mercado: la tecnología basada en silicio, muy por encima de las de capa fina en lo que a ventas se refiere.

1.1.1 Silicio

El silicio cristalizado tiene una eficiencia media a un costo medio. Una doble capa antirreflejo y una superficie frontal con una estructura microscópica de pirámides invertidas minimizan las pérdidas ópticas. La oblea de silicio tiene un espesor de 400 μm , ofreciendo una larga trayectoria óptica, y por lo tanto aumentando la absorción de fotones con una energía mayor que la amplitud de la banda prohibida (bandgap) del Si.

Una capa dieléctrica de SiO_2 se inserta entre la oblea del silicio y un conductor de aluminio con el fin de obtener una superficie altamente reflectante en la parte trasera de la celda. En el caso de las celdas industriales de silicio, se utilizan recubrimientos antirreflejantes de doble-capa. Además, las obleas de silicio monocristalino se sustituyen por obleas multicristalinas.

1.1.2 Silicio monocristalino

La mayoría de las celdas actualmente en el mercado son monocristalinas. El proceso de fabricación es el siguiente: el silicio se purifica, se funde y se cristaliza en lingotes. Los lingotes son cortados en finas obleas para hacer celdas individuales. Las celdas monocristalinas tienen un color uniforme, generalmente azul o negro.

Ventajas:

- Tienen las mayores tasas de eficiencia puesto que se fabrican con silicio de alta pureza. La eficiencia en estos paneles está por encima del 15% y en algunas marcas supera el 21%.
- La vida útil es más larga, algunos fabricantes ofrecen garantía de hasta 25 años.
- Suelen funcionar mejor que paneles policristalinos de similares características en condiciones de poca luz.

Desventajas:

- El rendimiento en todos los paneles se reduce con temperaturas altas.
- Se destaca un mayor precio de estas celdas por estar fabricadas con silicio de muy alta pureza.
- El proceso Czochralski [3] es el usado para la fabricación de silicio monocristalino y se pierde una gran cantidad de silicio en el proceso al ser cortadas secciones de los cuatro lados.
- Si el panel se cubre parcialmente por una sombra, suciedad o nieve, el circuito entero puede averiarse.

1.1.3 Silicio Policristalino.

Las celdas policristalinas se fabrican de forma similar a las monocristalinas. La principal diferencia es que utilizan un silicio de bajo coste. Generalmente redundan en una reducción en la eficiencia, pero los fabricantes defienden que el precio por kW es menor.

La superficie de las celdas policristalinas tiene un patrón aleatorio de cristalización que le confiere el aspecto vetado mostrado en la Figura 1.2 y que contrasta con el color homogéneo de las celdas monocristalinas.

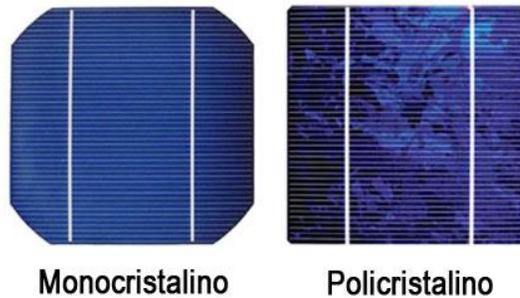


Figura 1.2 Tipos de celdas solares[4].

Ventajas:

- El proceso es más simple, lo que resulta en un menor precio.
- Lingote más barato de producir que el monocristalino.

Desventajas:

- Suelen tener menor resistencia al calor que los monocristalinos, el calor puede reducir la vida útil.
- La eficiencia se sitúa típicamente entre 13-16%.

1.2 Fallas comunes en celdas solares

Las fallas de las celdas solares ocasionan el decremento de su eficiencia. Las condiciones climáticas y la manipulación de las celdas son las principales causas de este deterioro:

- El rayo eléctrico puede dañar la celda y el equipo eléctrico asociado, normalmente se usa un pararrayos y descargadores de sobretensión.
- La radiación solar alta, crea la disminución de la eficiencia de la celda, causando un sobrecalentamiento en algunos casos.
- Rotura de un panel solar, generando grietas en la celda o pérdida total por mal manejo durante la fabricación y la instalación de paneles.

De acuerdo a la Guía de Inspección en campo para paneles solares por “Interstate Renewable Energy Council” [5] se detallan las fases de mantenimiento para el panel solar.

A continuación, se describe la primera inspección que debe hacerse.

Validación de Panel solar

El primer elemento para inspeccionar es el panel solar, este proceso es complicado ya que la matriz cuenta con varias celdas y en diferentes zonas, idealmente el técnico sube a la azotea de la casa (o en el lugar donde se encuentre) y lo primero que debe analizar es el número de módulos en el sistema. Es importante que este número concuerde con el diseño previo del proveedor. Si se llegara a presentar alguna alteración en el número de celdas esto afectará la energía entregada.

Posterior al análisis visual, si se presenta algún panel dañado severamente, se retira del arreglo fotovoltaico y es sustituido por otro panel. Es importante destacar que incluso durante la inspección se puede realizar un mal manejo como se observa en las Figura 1.3 y Figura 1.4 , ocasionando múltiples grietas.



Figura 1.4 Mantenimiento de paneles solares. [56]



Figura 1.3 Celda solar rota. [55]

1.2.1 Grietas en celdas solares

El Si es un material frágil y las altas temperaturas pueden ocasionar daños a la celda durante la etapa de producción. Xiong [6] indica que las grietas y la soldadura deficiente incrementan los costos. Por ejemplo, el material perdido causado por grietas puede ser de un 5-10% en una manufactura típica.

De acuerdo a Demant [1] se pueden generar microgrietas las cuales limitan la resistencia de la celda. Esta imperfección estructural puede aumentar sus dimensiones y ocasionar pérdidas en el voltaje de salida del panel. Por este motivo se requiere detectar las pequeñas fracturas que pueden resultar en daños potencialmente graves.

Las grietas se pueden dividir como macrogrietas y microgrietas, estas últimas tienen la característica de ser menor a 30 μm de anchura.

Asimismo, de acuerdo a Dhimish [7] se pueden observar diferentes tipos de grietas, a partir de la visualización por electroluminiscencia que se aprecian en la Figura 1.5 tales como:

- Diagonales (+45°).
- Diagonales (-45°).
- Paralelos a la barra del bus.
- Perpendiculares a la barra de bus.

- Direcciones múltiples como se observa en la siguiente imagen.

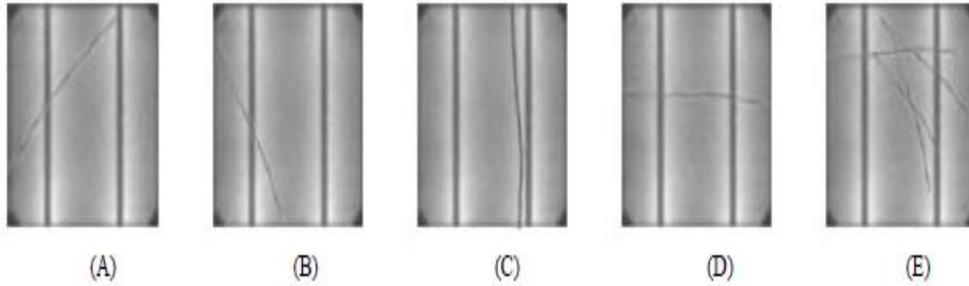


Figura 1.5 Tipos de grietas. a) Grieta diagonal (+45°), b) Grieta diagonal (-45°), c) Grieta paralelo a la barra de bus, d) perpendicular a la barra de bus, e) Grieta de dirección múltiple. Obtenido de Dhimish [7].

En estudios de Dhimish [7] se describe en sus resultados estadísticos que las grietas diagonales no muestran un daño. Implementando F-test y T- test, la prueba t , se usa para comparar la potencia teórica simulada con la potencia de salida fotovoltaica medida; evaluándose en la Ecuación 1.

$$t = \frac{(\bar{x} - \mu)\sqrt{n}}{SD} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde \bar{x} es la media de las muestras, μ es la media de la población de la potencia teórica simulada, n es el tamaño de la muestra y SD es la desviación estándar de la información completa. Estadísticamente, la grieta no tiene un impacto significativo en el rendimiento de potencia de salida si el valor de la prueba t es menor que o igual a 2.58 como se muestra en la Tabla 1.1 donde se muestra que solo las grietas de mayor longitud tiene una significancia en la potencia de salida fotovoltaica cuando la dirección de las fisuras son diagonales y el área afectada es mayor a 172.7 mm². En la Figura 1.6 se muestra el porcentaje de salida de voltaje en comparación al 100% teórico con referencia al número de celdas dañadas con fisuras diagonales.

Tabla 1.1 Indicadores de desempeño para grietas diagonales obtenidos de Dhimish [6].

Indicador de desempeño para grietas diagonales			
Número de celdas solares afectadas	Área rota aproximada (mm)	Valor de prueba T	Significante/ No significativo Efecto en la potencia PV.
1	1 mm ² – 83 mm ²	0.40- 0.66	No significativa, Desde t> 2.56
2	85.85 mm ² – 169.7 mm ²	1.22- 1.86	No significativa
3	172.7 mm ² - 256.6 mm ²	2.51- 2.71	Significante
4	257.5 mm ² -344.4 mm ²	2.65- 2.70	Significante
5	345.1 mm ² -424.3 mm ²	3.12- 3.35	Significante

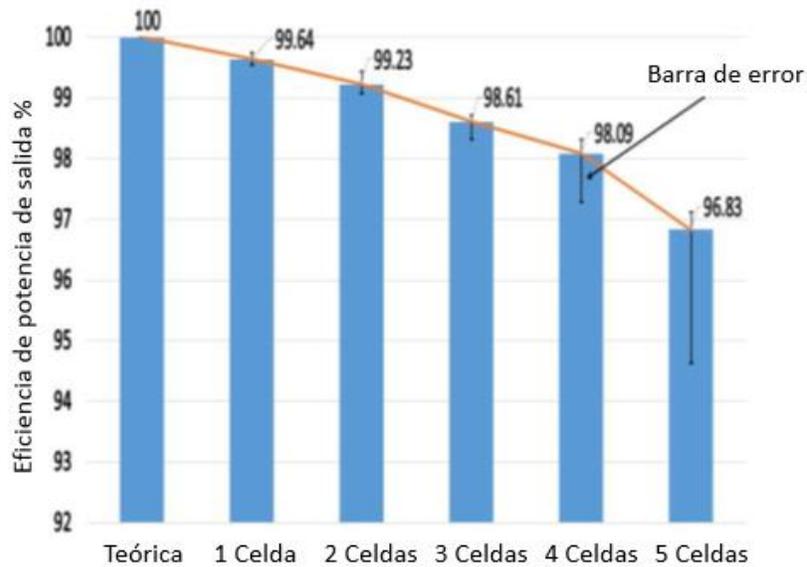


Figura 1.6 Eficiencia de potencia de salida para grietas diagonales que afectan en 1,2,3,4 y 5 celdas en PV, Dhimish [6].

También, para el caso de grietas paralelas no se presenta un impacto o reducción significativa del desempeño del panel, ya que se confirmó con el resultado de T-Test menor al valor límite de 2.58, para este caso se observó que una área de 82 mm² es significativa para producir un efecto en la potencia fotovoltaica generada como se observa en la Tabla 1.2 y el porcentaje de voltaje de salida de acuerdo al número de celdas dañadas, como se muestra en la Figura 1.7.

Tabla 1.2 Indicadores de desempeño para grietas paralelas obtenidos de Dhimish [6]

Tabla 1.2 Indicadores de desempeño para grietas paralelas obtenidos de Dhimish [6].

Indicadores de desempeño de grietas paralelas a la barra colectora (busbar).

Número de celdas solares afectadas	Área rota aproximada (mm)	Valor de prueba T	Significante/ No significativo Efecto en la potencia PV.
1	1-59.2	0.78-1.13	No significativo
2	63-81	1.42-1.87	No significativo
2	82-121	2.62-2.74	Significante
3	122-177	4.04-4.81	Significante
4	177.3-239.7	4.39-5.66	Significante

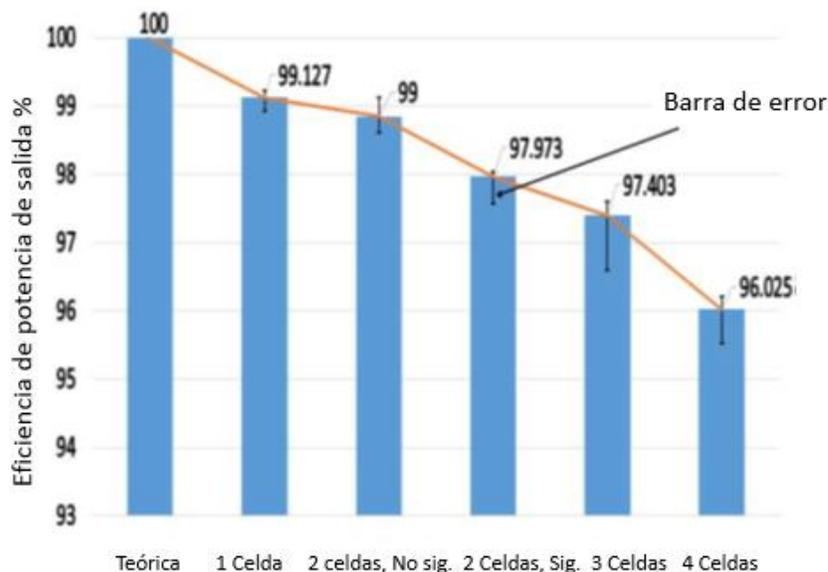


Figura 1.7 Eficiencia de potencia de salida para grietas paralelas que afectan en 1,2,3,4 y 5 celdas en PV, obtenido de Dhimish [6].

Estos resultados nos permiten observar la importancia de las grietas en las celdas solares y la afectación en el panel solar, se demuestra que se requieren pocas celdas dañadas del arreglo para que se muestre un decremento en la potencia generada. Consideremos que en el mantenimiento preventivo típico solo se realiza mediante una observación ocular del técnico y no se implementa este tipo de prueba no destructiva a los paneles, por lo que no se puede obtener un historial de eficiencia individual ni determinar con exactitud el panel que debe ser remplazado a partir de la anchura de la grieta.

1.2.2 Formación de grietas

Es común que las grietas se presenten después de la aplicación de soldadura. Las grietas pueden ser detectadas por diferentes técnicas comunes como: electroluminiscencia y fotoluminiscencia. La celda que es detectada con grietas es retirada de la línea de producción para no afectar la potencia entregada por el panel y desechada.

De acuerdo a Xiong [6], las grietas originales pudieron haber sido causadas por variaciones de fuerzas mecánicas o temperatura. Las fuerzas mecánicas mayormente se generan con el contacto físico tales como: daños en transporte, cortes de oblea de silicio y

cuando la celda tiene contacto con otros dispositivos. Las variaciones de temperatura causan contracciones en el material, especialmente en los cables de cobre.

En el estudio realizado con soldadura por inducción electromagnética por Xiong [6], se observó un mayor porcentaje de grietas diagonales en celdas monocristalinas, mientras que en las policristalinas se observó una mayor presencia de grietas cortas perpendiculares, como se muestra en la Figura 1.8 y Figura 1.9:

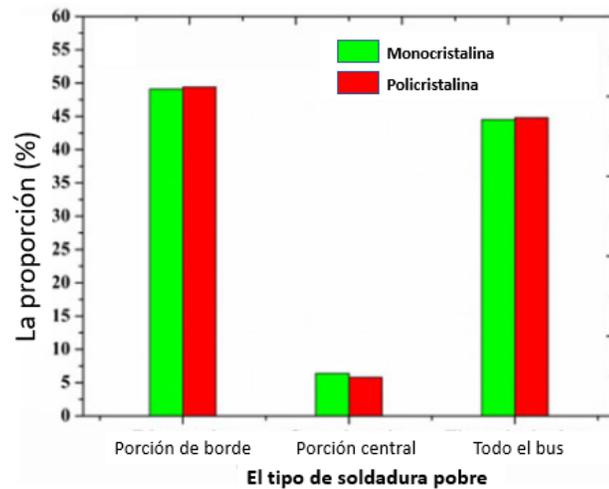


Figura 1.8 Proporción de tipos de soldaduras deficientes obtenido de Xiong [5].

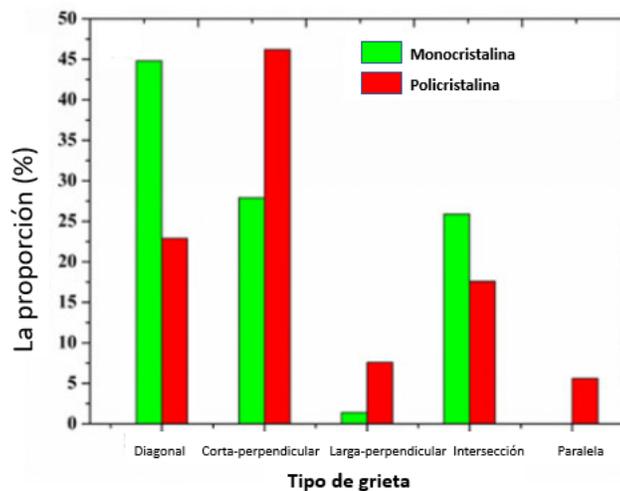


Figura 1.9 Proporción de tipos de soldaduras deficientes obtenido de Xiong [5].

En el análisis de deficiencia de soldadura se observan tres tipos: en el borde, centro y a lo largo de la barra colectora como se observa en Figura 1.10 por imágenes de electroluminiscencia. También se puede ver poca diferencia entre ambos tipos de celda, esta deficiencia de soldadura genera zonas oscuras en las imágenes.

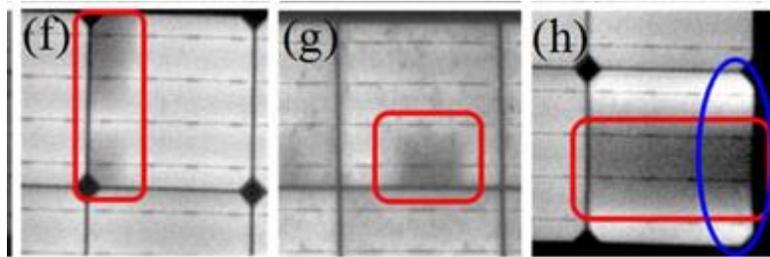


Figura 1.10 Tipo de soldaduras deficientes en celdas PV f) borde g) centro h) a lo largo de la barra bus obtenido de Xiong [6].

1.2.3 Propagación de grietas

Las grietas producen daños irreparables a la celda, por este motivo es importante detectar las fuentes y expansión de grietas. Xiong *et al* [6] propone el modelo de propagación de la Figura 1.11:

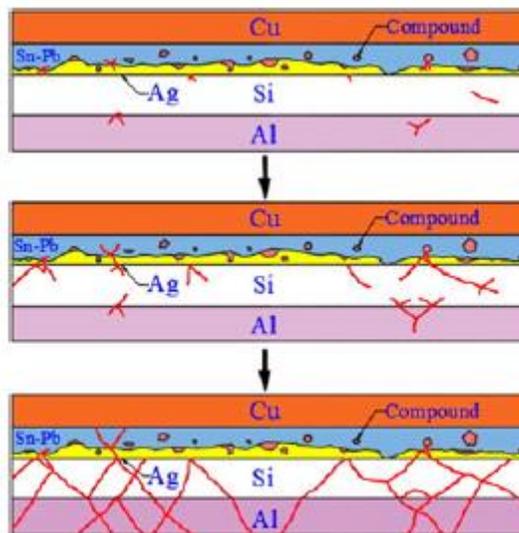


Figura 1.11 Modelo de propagación de cracks.

El modelo de Xiong *et al* [6] se describe de la siguiente forma:

- Algunas grietas originales e indetectables son causadas por fuerza mecánica y variaciones de temperatura antes de soldar.
- Después, en el proceso de soldadura se pueden generar grietas en la celda, incluidas las detectadas y no detectadas.
- La fuerza mecánica y el estrés interno inducido por variaciones de temperatura pueden acelerar la producción de grietas.
- Se observa que, en el electrodo de plata, la aleación Sn₃₇Pb y la capa de pasta de aluminio tienen poco impacto en la formación de grietas; se observan más en el área de silicio y se define como fuente de propagación de grietas.

1.3 Métodos de inspección estructural

Los métodos de inspección en celdas solares permiten obtener datos durante el proceso de producción y mantenimiento; la inspección visual es considerada un método de ensayo no destructivo, el más común y más básico. Se aplica a una gran variedad de tipo de materiales, las posibilidades de detección de esta técnica se limitan a aquellos defectos no visibles, tales como grietas, poros, desgaste, decoloraciones, corrosiones y control dimensional.

De acuerdo a Carrión *et al* [8] la evaluación no destructiva proporciona la información actualizada de la situación en que se encuentra un componente en determinado momento. Así se identifica la presencia de una o varias grietas, y se conoce la localización y el tamaño de estas.

A partir de esta información, de un análisis de las condiciones de operación, y de las propiedades del material y el diseño, se establece qué tan críticas son las grietas y se pueden fijar programas de mantenimiento.

Para un cierto lote de componente mecánico o estructural se tiene que el número de componentes fallados en función del tiempo presenta un comportamiento como el que se observa en la Figura 1.12:

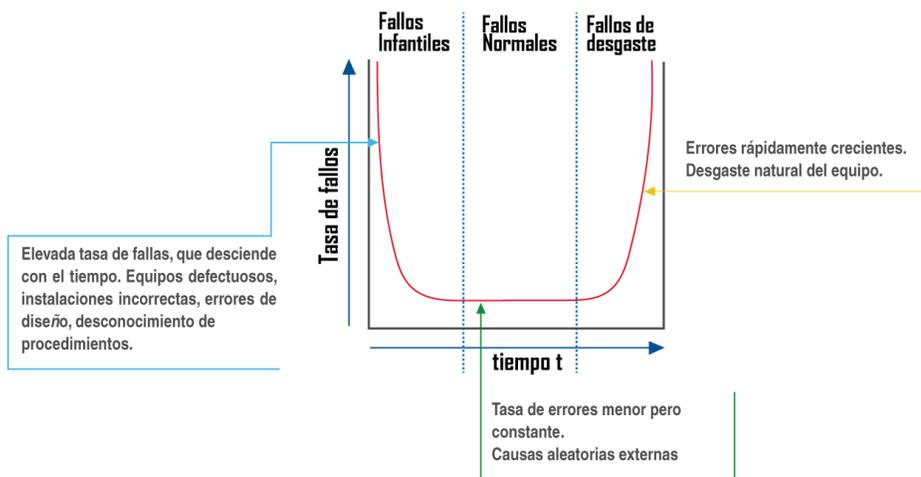


Figura 1.12 Curva de Bañera en teoría de fallas [57].

Se aprecia un gran número de fallas al inicio de la vida útil por los defectos latentes que resultan del proceso de la manufactura. Después se presenta la etapa estable en la que las fallas se reducen significativamente hasta que el componente llega al final de su vida útil, cuando el número de fallas se incrementa nuevamente como respuesta al desgaste, la fatiga y/o el deterioro por operación normal.

La evaluación no destructiva es un primer paso para asegurar la integridad estructural identificando componentes dañados que deben ser reparados o sustituidos. Es posible que exista un número de grietas o defectos que no se hayan detectado; el diseño con tolerancia al daño se convierte en la segunda línea de defensa contra las fallas catastróficas.

Como se mencionó anteriormente, esta investigación se va a centrar en fallas por grietas o fracturas. Una falla en una estructura ocurre cuando se presenta la ruptura de una o varias de sus partes debido a sobrecargas. Sin embargo, existen algunos casos en los que las fallas son por defectos o grietas preexistentes con niveles relativamente bajos de carga. La fractura puede ocurrir sin previo aviso y esto se debe a que el material presenta un comportamiento frágil, que se caracteriza por tener muy poca deformación plástica. El parámetro que mide la resistencia a la fractura de un material es el factor de tenacidad a la fractura, que es una medida de la capacidad de un material con una grieta para resistir una condición de carga sin que llegue a fracturarse totalmente.

Cuando se utiliza la evaluación no destructiva y el análisis de crecimiento de grietas en los materiales, es posible definir una estrategia para retirar del servicio un componente mecánico o estructural y predecir los daños que ocurrirán en un periodo de servicio.

La Figura 1.13 muestra cómo el tiempo de servicio de un elemento se prolonga mediante una secuencia adecuada de inspecciones no destructivas y reparaciones.

Los tiempos o periodos de inspección se pueden calcular considerando el tamaño más grande de las grietas que se pudieran dejar de detectar, y un factor de seguridad. Este proceso se puede repetir un número indeterminado de veces, pero en la práctica se suspende cuando el costo de inspección y reparación es más alto que el de reemplazo. Es importante la confiabilidad de la inspección no destructiva para conocer el tamaño de la grieta más grande, aun cuando no sea detectada y calcular la vida residual del componente.

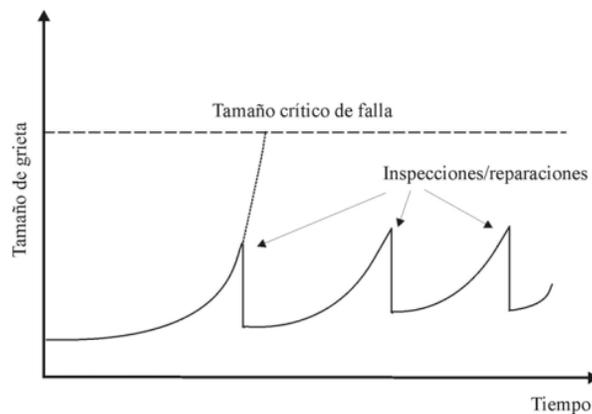


Figura 1.13 Crecimiento de grietas con procesos cíclicos de inspección/ reparación para alargar la vida de un componente estructural mecánico, Carrión [8].

Hay diferentes niveles de evaluación de acuerdo con el grado de detalle del análisis que se lleva a cabo, sin embargo, existe una diferencia entre lo que corresponde a una evaluación no destructiva (END) y una inspección no destructiva (IND). Esta última corresponde a la primera etapa de la END que considera una o varias técnicas no destructivas para identificar y localizar defectos superficiales o dentro del material constituido del componente que se analiza. La caracterización de los defectos, tanto superficiales como internos de un elemento, no determina por sí misma la capacidad de trabajo y operación del objeto; Carrión *et al* [8] afirma que es necesario una segunda

etapa de análisis que se basa en conceptos de mecánica del medio continuo y mecánica de la fractura con objeto de delimitar la acción de los defectos en el comportamiento estructural en determinadas condiciones.

Algunas aplicaciones de los ensayos no destructivos son:

- Detección y evaluación de grietas.
- Detección de fugas.
- Determinación de posición.
- Medidas dimensionales.
- Caracterización de estructura y microestructura.
- Estimación de propiedades mecánicas y físicas.
- Medidas de deformación.
- Determinación de composición química.

El ensayo se aplica a cualquier etapa del ciclo de vida, por ejemplo:

- Ayuda en la etapa de desarrollo.
- Control y medida en la recepción de materiales.
- Monitoreo y control durante la fabricación.
- Verificación de resultados de un proceso.
- Comprobación de montaje.
- Inspección de daños en servicio.

A continuación, se describen dos técnicas comunes de inspección visual especializadas para determinar zonas poco activas y puntos calientes de operación de la celda:

1.3.1 Electroluminiscencia

La electroluminiscencia (EL) es uno de los métodos de inspección visual para la caracterización de celdas y módulos solares de silicio. Las principales ventajas de EL son: su capacidad y simplicidad para reproducir mapas en alta resolución, utilizando tiempos

de adquisiciones cortos, que también permiten que se apliquen en entornos industriales como una herramienta de inspección en líneas de manufactura.

En este método, menciona Frazão [9], que se aplica una corriente a la celda en polarización inversa, cercana a la tensión de circuito abierto de esta y una corriente que se va ajustando por debajo de la corriente de corto circuito. Esta corriente que, por lo general está por debajo de los 10 mA/cm^2 , produce una señal suficiente de electroluminiscencia sin causar daños en el dispositivo.

La utilización de la electroluminiscencia se ha realizado desde los años 70 para obtener información de la respuesta de una celda solar. En los últimos años, la electroluminiscencia en polarización inversa se ha convertido en una herramienta común para la caracterización de celdas solares de silicio, como menciona Koshida [10], es posible la detección e identificación de fallas en el panel.

Frazão [9] ha mostrado como la EL puede detectar las regiones brillantes/oscuras lo cual es indicativo de la existencia de problemas llamados dedos rotos (broken finger) (Figura 1.14a), en la Figura 1.14 b (EL solar cell 2), se ve como se forma una cruz superior cerca de la barra colectora (busbar) y es una grieta.

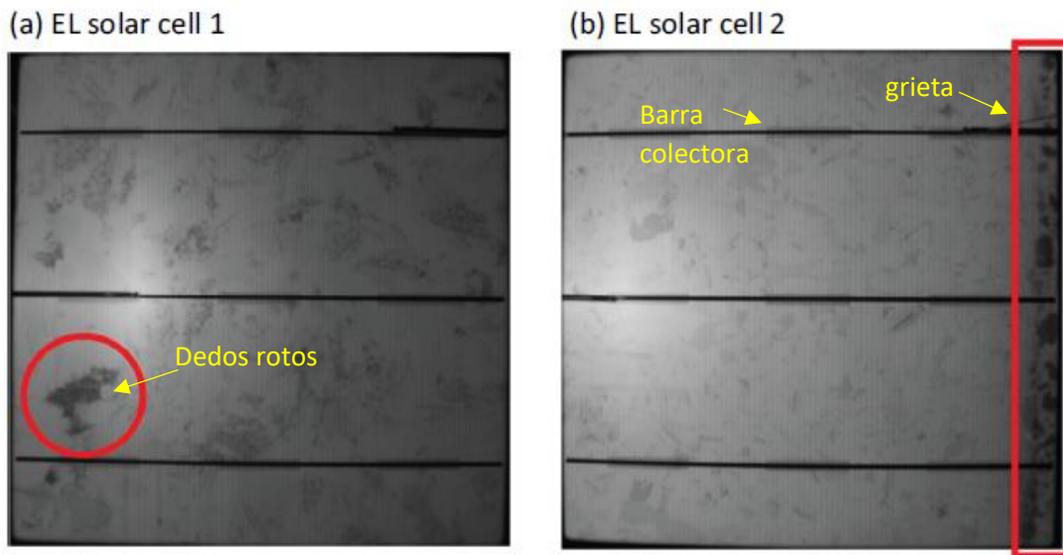


Figura 1.14 Obtención de imágenes por electroluminiscencia en polarización directa, Frazão [9].

Para la polarización indirecta, (Figura 1.15 c), se observa la misma área de recombinación alta previamente resaltada en la Figura 1.14 y también en la Figura 1.15 d puede estar correlacionada con varios límites de grano.

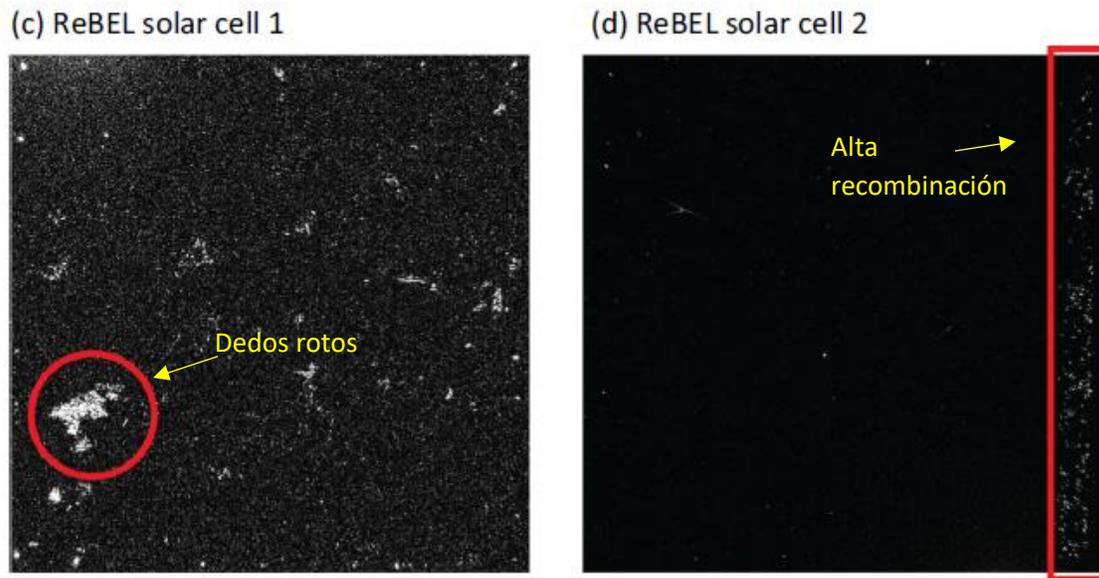


Figura 1.15 Obtención de imágenes por electroluminiscencia en polarización indirecta, Frazão [9].

1.3.2 Termografía

La termografía es una técnica que se utiliza como prueba no destructiva para paneles solares. En los estudios de Garma [11] se menciona que esta técnica permite determinar temperaturas a distancia y sin necesidad de contacto físico, y también permite captar la radiación infrarroja del espectro electromagnético, utilizando cámaras térmicas. En esta técnica se puede medir el calor disipado por defectos y comparar las temperaturas de un módulo sin defectos.

En la Figura 1.16 se observa la representación termográfica mostrando la diferencia de temperatura en un punto caliente de una celda sin fallas (43.8°C) y una con fallas (54.4°C), a una temperatura ambiente de 64.5°C .

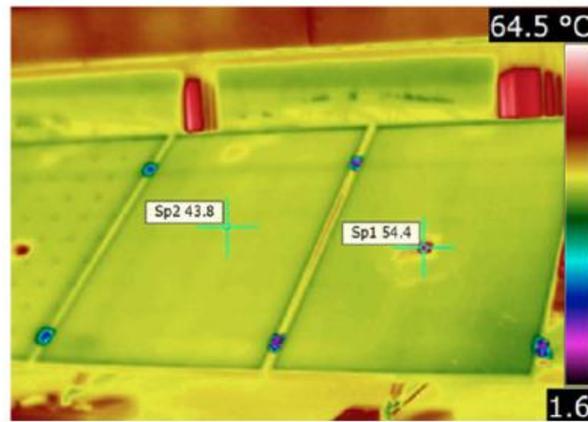


Figura 1.16 Técnica de Termografía obtenido de Garna [11].

De acuerdo a Chen [12] esta técnica se aplica para varias inspecciones de calidad superficial tales como calidad de recubrimiento. La ventaja de usarla es que la respuesta térmica del plano puede detectarse simplemente por la temperatura de patrones que indican imperfecciones locales como la presencia de grietas en la superficie.

En la Tabla 1.3 se observan algunas características de las técnicas de caracterización de celdas solares que se utilizan en la industria e investigación FV, de acuerdo a Fuyuki [13], Boostandoost [14], Rupnowski [15] y Waqar Akram [16].

Tabla 1.3 Técnicas de inspección para celdas solares.

	Rango de Longitud de onda	Información que recopila	Detección previa al fallo	Desventajas
Electroluminiscencia	400 a 1500 nm.	Pérdidas por resistencia en serie, longitud de difusión de portadores minoritarios.	No	<ul style="list-style-type: none"> • Alteraciones de mediciones por temperatura. • Requiere interpretación experta. • Costo.
Termografía	900 a 2500 nm.	Radiación y emisividad.	No	Limitación para identificar defectos internos, hasta que se manifiesta externamente por aumento de temperatura.
Fotoluminiscencia	Depende del material a evaluar	Emisiones en la cercanía del umbral en el espectro de FL permite evaluar el ancho de la banda prohibida del material y el ancho a media altura (HWFM) de estas bandas de FL da información sobre la calidad de cristales.	No	<ul style="list-style-type: none"> • Dependencia con la temperatura y potencia del láser. • Costo.
Inducción de corriente por haz de electrones EBIC	Depende del material a evaluar.	Detecta defectos como granos de frontera y dislocación del material.	No	Debido a su resolución solo se analizan pequeñas áreas de la celda solar.
Inducción de corriente por haz de luz. LBIC	Depende del material a evaluar	Mapas de corriente a diferentes longitudes de onda	No	Se pierde información en detalles fuera del orden de micrómetros.

Cada una de estas técnicas ofrece información relevante en el campo de la caracterización e inspección de celdas solares, sin embargo, tienen también limitaciones; en el caso de la electroluminiscencia se pueden obtener imágenes completas del panel solar, sin embargo resulta complicado el análisis a simple vista dado que la información es entregada en escala de grises; fácilmente se pueden observar zonas que se encuentran con baja resistencia y zonas con fisuras, pero no se realiza un análisis extensivo de las capas que contiene la celda. Asimismo, la termografía, altamente implementada en el ambiente industrial, depende mucho de la resolución de la cámara térmica y sobre todo muestra los puntos calientes de la celda una vez que se encuentra severamente dañada, además que la señal de IR puede ser modificada por condiciones ambientales, no se hace un análisis interno de las capas del material.

Las técnicas de fotoluminiscencia, EBIC, LBIC por otro lado, muestran información más específica sobre la morfología y su desempeño eléctrico y son importantes para realizar la caracterización para nuevos dopados de celdas solares, sin embargo, se ven limitadas por la zona que es analizada, la cual es reducida y requieren de un ambiente controlado. Estas técnicas son ampliamente utilizadas en el laboratorio, pero no en la industria, ni en campo.

Entre todas estas técnicas, solo la termografía IR ha dado el salto del laboratorio y la industria hacia la caracterización *in situ*, incluso para instalaciones de gran escala. Un ejemplo es la empresa Aerospec, con presencia en México [17], que combina la termografía infrarroja con drones para inspeccionar grandes instalaciones FV, de acuerdo a Guerrero [18] y López [19], la utilización de cámaras termográficas de los drones permiten detectar elementos defectuosos y anomalías en las plantas con el fin de calcular los costos derivados del mal funcionamiento de la instalación, así como obtener información para realizar mantenimiento correctivo y predictivo en plantas FV.

En ese contexto, el área de oportunidad que este trabajo busca evaluar es el de técnicas ópticas con potencial para evaluación de desempeño y detección de defectos en celdas solares, con la diferencia de que se buscaría un criterio que sea capaz de detectar zonas de fragilidad, antes de que el fallo ocurra.

La base de esta búsqueda es la relación que guarda el esfuerzo termomecánico continuado y periódico (como es el que sufren las celdas solares en condiciones de operación) con la aparición de fracturas, como menciona Kumar [20] y Santhakumari [21].

A partir de estas premisas, se propone evaluar la viabilidad de la técnica óptica interferométrica conocida como Shearografía, que es capaz de obtener mapas del gradiente de deformación en superficies sujetas a esfuerzos mecánicos. Los principios de esta técnica se describen en la sección siguiente.

1.3.3 Visualización por shearografía

La shearografía es una técnica de interferometría de moteado (speckle interferometry) en la cual la luz coherente reflejada por la estructura inspeccionada no interfiere con una referencia, sino con sí misma, gracias a un descalce óptico, obtenido por un sistema que puede ser, por ejemplo, un interferómetro de Michelson [22].

La shearografía puede visualizar claramente zonas de concentración de deformaciones. Este método puede detectar grietas de menos de 0.1 mm como se observó en el estudio de Peng [23] y es también conocido como interferometría diferencial o interferometría de corte del patrón moteado que implica trayectorias ópticas casi superpuestas.

De acuerdo a Muzet [24] el moteado es un fenómeno de aspecto aleatorio que resulta de la iluminación de una superficie áspera óptica por una fuente de luz coherente. Cuando se realizan interferencias con dos ondas, al menos una contiene motas; se emplea el término de interferometría de moteado (speckle o granos).

Durante el estudio de una deformación, se comparan dos estados: el estado inicial del objeto y el estado cargado (en el anexo 1 se describe la prueba de degradación por potencial inducido como aplicación de carga). La primera imagen de interferencia caracteriza al objeto en su estado inicial, la intensidad registrada en cada píxel se expresa en la Ecuación 2 como:

$$I_1(x,y) = I_0(x,y) \cdot (1 + m(x,y) \cdot \cos \varphi(x,y)), \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde I_0 es la iluminación promedio, m la modulación de franjas (también llamada contraste) y φ un término de fase aleatorio entre la onda de objeto y la onda de referencia.

Suponiendo que la deformación experimentada por el objeto es lo suficientemente pequeña como para que la figura moteada se mueva sin ser modificada, la nueva imagen de iluminación I_2 , corresponde al estado cargado, y puede escribirse de la siguiente forma para cada píxel en la Ecuación 3:

$$I_2 = I_0 \cdot (1 + m \cdot \cos(\varphi + \Delta)), \quad (\text{Ecuación 3})$$

En donde Δ , es la diferencia de fase entre los dos estados como el valor del término de fase φ es aleatorio, la sustracción de las dos imágenes genera pseudo líneas que representan la superficie de la deformación en Ecuación 4:

$$|I_1 - I_2| = 2I_0 \cdot m \cdot \underbrace{\left| \sin\left(\varphi + \frac{\Delta}{2}\right) \right|}_{\text{high frequency}} \cdot \underbrace{\left| \sin\left(\frac{\Delta}{2}\right) \right|}_{\text{low frequency}}. \quad (\text{Ecuación 4})$$

La iluminación de la imagen resultante es el producto de un factor de frecuencia espacial elevado multiplicado por un factor de baja frecuencia, que representa una modulación del primer factor con el segundo.

La diferencia entre las dos imágenes de intensidad genera franjas, denominadas pseudo franjas ya que provienen de una diferencia de iluminación y no de interferencias constructivas. Las pseudofranjas negras corresponden a ubicaciones donde la diferencia de fase relativa Δ , debida a la deformación, es igual a $2k\pi$.

1.3.4 El principio de interferometría de moteado (shearografía de speckle)

La Shearografía fue desarrollada inicialmente por Leendertz en 1973 para la observación de defectos superficiales. Un haz de láser ilumina el objeto que a su vez produce una figura moteada. A diferencia del moteado convencional de interferometría, que incluye un haz de referencia, la interferencia se crea antes del sensor de observación de acuerdo a Jacquot [25].

Un dispositivo de corte crea dos imágenes desplazadas superpuestas de la superficie del objeto. Estos dos haces, ligeramente cortados por una cantidad δ interfieren en el sensor CCD- Dispositivo de carga acoplado de una cámara-. El cambio puede ser generado por un interferómetro de Michelson o un doble prisma, como se observa en la Figura 1.17:

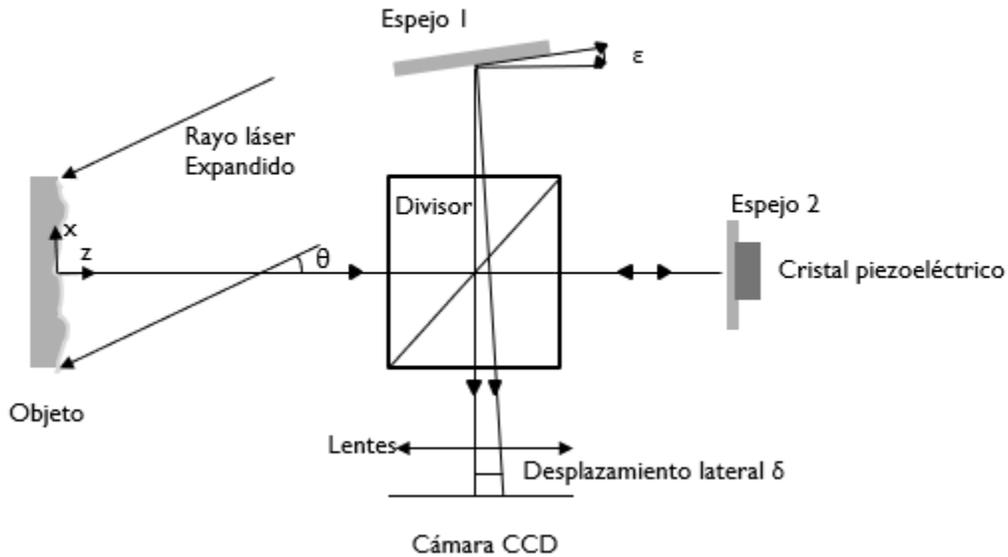


Figura 1.17 Interferómetro de Michelson [26]

La fase φ representa el desplazamiento de fase entre los dos puntos objeto cortado por la cantidad δ , mientras que Δ denota la variación de fase, antes y después de la deformación del objeto, entre los puntos objeto cortados por δ .

En el caso de desplazamiento $d = (u, v, w)$ la deformación del objeto genera una diferencia de fase entre dos puntos adyacentes. En el caso de una configuración de shearografía con un pequeño desplazamiento en δx se puede mostrar en la Ecuación 5:

$$\Delta = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left[(1 + \cos \theta) \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + \sin \theta \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right] \cdot \delta x, \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde λ es la longitud de onda del láser y θ el ángulo entre las direcciones de observación e iluminación.

Es de destacar que la shearografía puede implementarse para estudiar todos los componentes de un gradiente de deformación, tanto en el plano (extensión de la celda, dilatación en x e y) como perpendicular al plano (dilatación en z); mediante la manipulación de los ángulos de incidencia de la luz laser y la orientación del shift lateral de las imágenes interferométricas. Por cuestiones de disponibilidad de tiempo y recursos, este trabajo solo reporta resultados para el estudio de la componente de dilatación en z.

JUSTIFICACIÓN

El crecimiento de la capacidad instalada de energía solar en los primeros semestres de los años 2015 a 2016 aumentó en México un 137.73%. También se advierte que para al cierre del 2019 se adicionen 5,400 MW de capacidad. En la figura 1.18 se muestra la evolución histórica de la energía fotovoltaica en México de acuerdo al reporte de avances de la Secretaría de Energía (SENER) [27]:

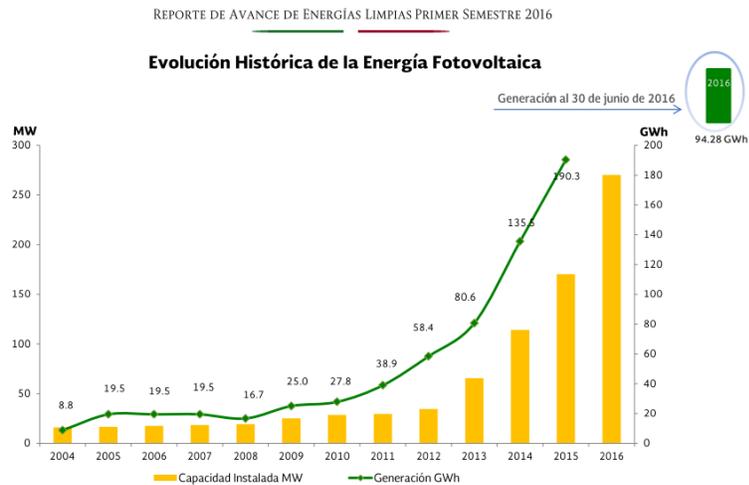


Figura 1.18 Evolución Histórica de la Energía Renovable Fotovoltaica en México, SENER [27].

El mercado de paneles solares también muestra tendencia ascendente en la Península de Yucatán, ya que se ha convertido en el tercer lugar a nivel nacional con una inversión comprometida por 844 MW para energía renovable [28]. Los proyectos solares para este Estado se resumen en la Tabla 1.4:

Tabla 1.4 Proyectos fotovoltaicos de Yucatán [29].

Nombre	Municipio	Generación en MW	Número de Paneles	Superficie total Hectáreas
Ticul A	Muna, Sacalum, Ticul	207	818,800	500.232
Ticul B	Muna, Sacalum	103.5	409,200	237.687
Parque de energía solar fotovoltaica	Peto	30	13,817	120
Parque fotovoltaico Yucatán Solar	Valladolid	97	313,140	255.4
PV Yucatán Sucilá	Sucilá	24.94	79,200	46.69

La vida útil de un panel solar promedio es de 20 a 25 años dependiendo del fabricante; después de este tiempo, el panel continúa funcionando, pero su degradación es notoria al disminuir su producción de acuerdo a Nema [30]. Para garantizar el buen funcionamiento desde la etapa de fabricación, se llevan a cabo técnicas de inspección de calidad para eliminar aquellas celdas con exceso de fallas, sin embargo, al llegar al proveedor es probable que debido a un mal manejo de material aparezcan fallas, mismas que se propagarán debido a variables que deforman el material tales como temperatura y fuerzas ejercidas.

El mantenimiento correctivo de las celdas sirve para detectar daños severos en la celda y reemplazarla para alargar el tiempo de vida y mantener la eficiencia deseada. El uso de algunas técnicas tales como electroluminiscencia y termografía han podido detectar zonas de puntos calientes y presencia de rayones o deformaciones superficiales.

El valor agregado que pretende aportar este trabajo es el uso de técnicas ópticas laser y variantes de la EL para interrogar el estado de las celdas, en concreto el esfuerzo termomecánico, que se podría asociar a zonas de fragilidad, donde habría mayor probabilidad de fallos.

OBJETIVOS

Objetivo general:

- Diseñar una herramienta para estimar los esfuerzos en celdas solares para determinar puntos de deformación máxima por métodos shearográficos.

Objetivos específicos:

- Construir un instrumento óptico de shearografía láser para la detección de gradientes de deformación en celdas solares.
- Construir un instrumento óptico de shearografía para luz electroluminiscente, realizar experimentación para adquisición de shearogramas y evaluar su factibilidad.
- Construir un prototipo de circuito de alta corriente para la alimentación modulada de celdas solares.
- Evaluar distintos esquemas basados en EL con potencial de aportar informaciones complementarias, al añadir variables de análisis como temperatura, distorsión armónica y selección espectral.
- Realizar pruebas de factibilidad de los distintos esquemas interferométricos y de EL.

HIPÓTESIS:

Mediante la técnica de shearografía implementada con la luz electroluminiscente de celdas solares se podrán obtener imágenes que revelen zonas de concentración de esfuerzos mecánicos.

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

Descripción de la metodología

Para el desarrollo experimental se proponen la metodología de la Figura 2.1, la cual permitirá realizar la técnica de shearografía con láser y electroluminiscencia.

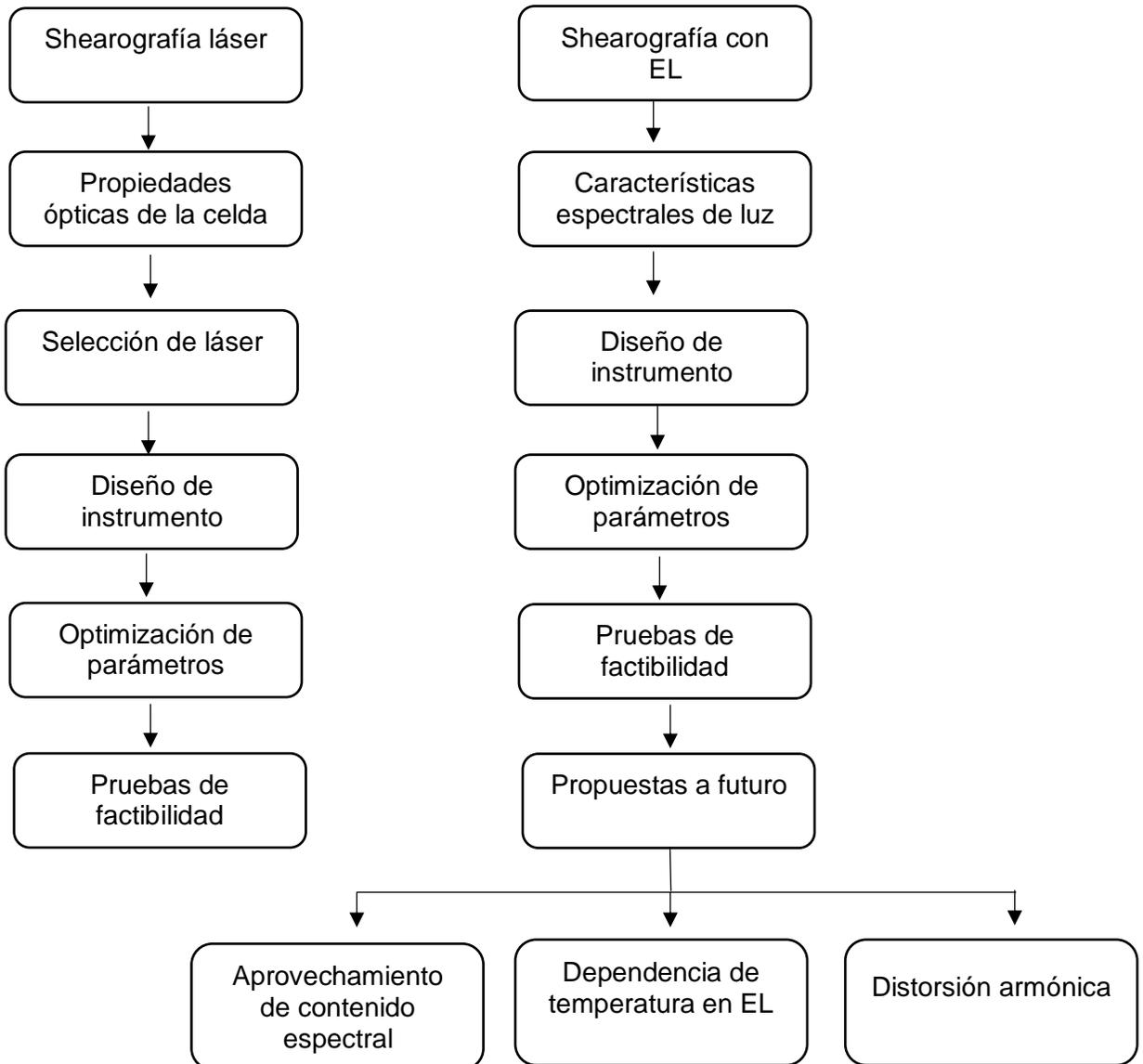


Figura 2.1 Diseño metodológico general.

En el primer proceso de implementación de la shearografía láser, se estudian:

- a) Propiedades ópticas de las celdas monocristalinas: esta información permitirá conocer la interacción de la luz con el material, sobre todo la propiedad de reflectividad.
- b) Selección de láser: se elige el tipo de láser adecuado disponible en el mercado para realizar la técnica.
- c) Diseño de instrumentación: se lleva a cabo una revisión bibliográfica sobre la técnica de shearografía y los diferentes tipos de arreglos, así como la programación del software para análisis de imágenes.

De manera general se proponen dos arreglos que se muestran en la Figura 2.2, que corresponden a shearografía con electroluminiscencia y shearografía con láser.

En primer lugar, el arreglo de shearografía con electroluminiscencia, el cual parte de la emisión de luz en respuesta a una corriente eléctrica que fluye a través de la celda, el espectro de la electroluminiscencia es 400 a 1500 nm, la intensidad de la señal de EL está relacionada con las propiedades del material como la velocidad de recombinación de la superficie y la recombinación debida a los defectos, así como a los defectos extrínsecos inducidos durante la fabricación.

La emisión de esta luz en la celda no es lineal debido al texturizado piramidal por lo que genera una emisión difusa, esta luz difusa es recolectada para formar una imagen de la celda la cual es enviada al arreglo óptico shearográfico que por medio de un dispositivo de corte divide la imagen en dos, posteriormente son recombinadas usando un polarizador, se adquiere una muestra de imágenes en el estado inicial sin carga y otra muestra con carga las cuales son capturadas por una cámara CCD, una vez obtenidos los dos estados se hace una resta de las imágenes en LabVIEW para localizar las zonas donde se observa un desplazamiento por efecto de variación de temperatura debido al aumento de corriente.

En segundo lugar, el arreglo de shearografía láser, el cual inicia con el análisis de luz coherente expandida y dirigida de forma frontal a la celda solar por un divisor de luz, la cual es reflectada también de forma no lineal como en el arreglo anterior, después es enviada al arreglo óptico shearográfico cambiando los componentes ópticos de acuerdo a la longitud de onda emitida por el láser, después se superponen las dos imágenes, en

este punto se ajusta el tamaño de grano y se lanza un muestreo de n imágenes para el estado inicial, después se inyecta una corriente para generar calentamiento en la celda y se toma una nueva muestra de imágenes que serán capturas por la cámara CCD.

Finalmente se hace la resta de imágenes para evidenciar la diferencia de iluminación, las franjas de correlación que recorren la superficie y proveen la información del contorno son obtenidas cuando se hace la resta digital entre la imagen de referencia y la imagen con carga como menciona Aristizabal [31] y que se muestra en la Figura 2.3.

En los dos modelos, la excitación común es la corriente que varía de 0 a 9 A de acuerdo con las especificaciones de operación de la celda. También influye el texturizado de la superficie ya que los rayos son dirigidos de forma aleatoria. Otra diferencia es la coherencia de luz, ya que es más estable en la shearografía láser y menos en la electroluminiscencia por la dependencia de las características del material intrínsecas, extrínsecas y temperatura. También la sensibilidad del sensor CCD cambia, pues en electroluminiscencia se requiere de uno más cercano al infrarrojo y la mayor reflectancia se encuentra en el ultravioleta. En las siguientes secciones se especifican estos modelos.

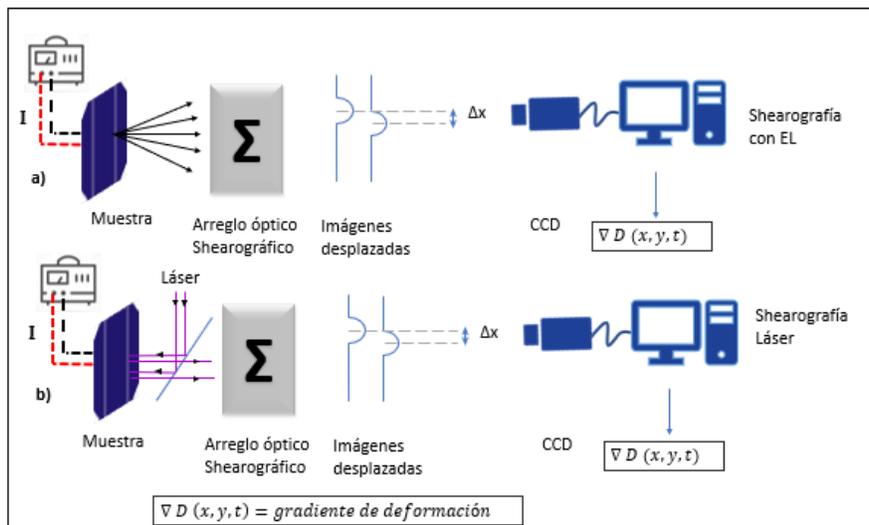


Figura 2.2 Proceso de adquisición de superficie deformada implementando shearografía a) con luz EL b) con luz láser.

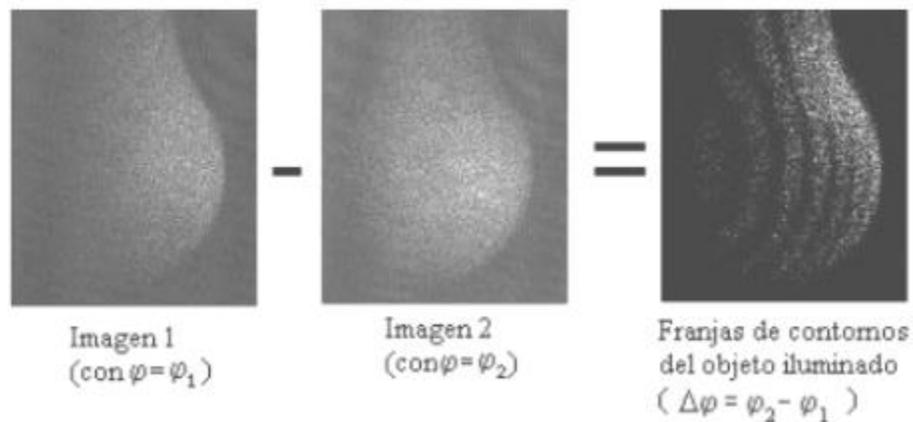


Figura 2.3 Generación de franjas de correlación, Aristizabal [31].

d) Optimización de parámetros: se realizan pruebas del diseño propuesto, se detectan errores y se realizan iteraciones para agregar ajustes al diseño.

e) Pruebas de factibilidad: se hace un análisis de los recursos necesarios para llevar a cabo los objetivos.

En este punto se utiliza una celda solar sometida a dos tipos de estímulos: por un lado, el autocalentamiento por efecto Joule aplicando una corriente, y por otro se induce una deformación mecánica. Ante ambos tipos de estímulos se recoge la señal shearográfica para evaluar su capacidad de detectar la deformación.

Asimismo, para el estudio de shearografía con EL se siguen los siguientes pasos:

a) Caracterización espectral de la luz: se obtiene información documental del espectro de luz electroluminiscente en celdas solares de silicio.

b) Diseño de instrumento: se realiza un arreglo óptico para la adquisición de señal electroluminiscente de la celda.

c) Optimización de parámetros: se realizan pruebas del diseño y se agregan ajustes al arreglo para mejorar la detección de la señal.

d) Pruebas de factibilidad: se realiza un análisis de los recursos necesarios para llevar a cabo los objetivos.

e) Propuestas a futuro: en esta sección se llevan a cabo propuestas para mejorar la técnica implementada; aquí se propone el estudio del contenido espectral de electroluminiscencia, la dependencia de la temperatura en la emisión de luz de la celda y la distorsión armónica de la celda solar.

CAPÍTULO 3 RESULTADOS

En una primera etapa se requiere del conocimiento de las propiedades ópticas de la celda, ya que se utilizará un láser como sonda, en un esquema de reflexión/dispersión de la luz. Para ello se requiere saber cómo será la interacción luz-superficie en la celda.

3.1 Shearografía láser

3.1.1 Propiedades ópticas de la celda de Si

3.1.1.1 Índices de refracción

El Silicio cristalino (Si-c) tiene un índice de refracción que varía entre 3.5 y 6.0 en el rango espectral de 400 – 1100 nm lo que implica una pérdida debido al reflejo espectral del 54% a cortas y 34% a largas longitudes de onda. Para reducir este reflejo se utiliza la capa antirreflejante, la cual es un acoplador óptico entre el aire y el Si-c. Los mejores valores del índice de refracción “n” y espesor “d” de la capa antirreflejante se obtienen de $\lambda = 4nd$, $n^2 = n_{Si} n_o$, donde λ es la longitud de onda de luz incidente, n_{Si} el índice de refracción del Si y n_o el índice de refracción del medio. En el caso del aire $n_o = 1$, por lo tanto es deseable una capa AR con $n = (n_{Si})^{1/2}$ y su espesor óptimo es de 70 ~80 nm.

En la Figura 3.1 se muestra el comportamiento de reflexión superficial típica con líneas punteadas de acuerdo a Matsumoto [32]:

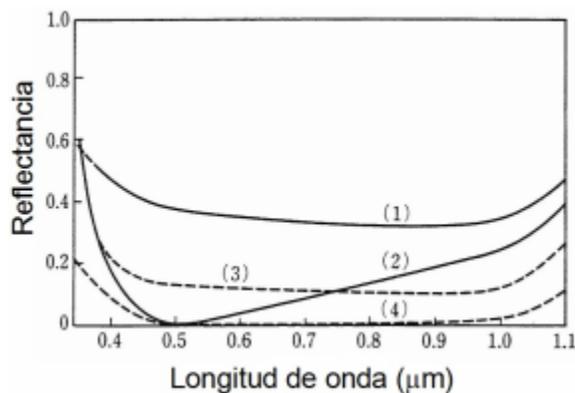


Figura 3.1 Características de reflexión de la luz en una superficie de Si en función de la longitud de onda, Matsumoto [32].

La línea (1) muestra la reflexión de Si pulido a espejo, (2) Si – pulido + capa antirreflejante, (3) luego de texturizar, (4) texturizado + capa AR.

3.1.1.2 Microestructura de superficie.

El diseño de celdas solares especifica los parámetros de la estructura para maximizar la eficiencia. El silicio puede actuar como espejo reflejando más del 35% de la luz que incide; para reducir la reflexión se texturiza la superficie del sustrato creando un patrón de conos y de pirámides irregulares, que contribuyen a aumentar una reflexión interna. La luz reflejada es reabsorbida por la celda como se muestra en la Figura 3.2, lo cual genera una reflexión difusa importante a considerar en el diseño del instrumento.

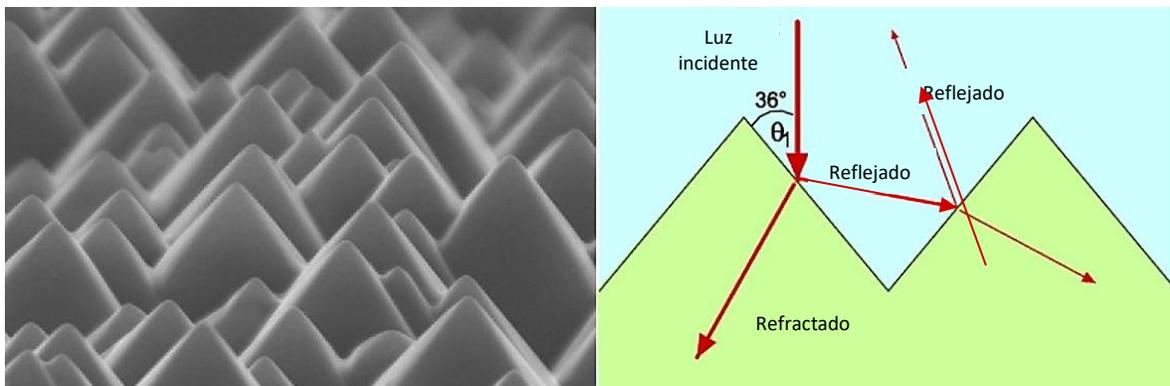


Figura 3.2 Izquierda: Superficie de silicio texturizado tomada con microcopia electrónica de barrido. Derecha: efecto de la textura sobre la radiación solar incidente. Fuente: <https://www.pveducation.org/> [33]

3.1.1.3 Selección de la muestra

Para este estudio, se tomaron los siguientes criterios para la selección de la muestra: la marca que se analiza es Big Sun, monocristalina, con dimensiones de 156.77 mm x 156.75 mm y un espesor de $200 \mu\text{m} \pm 30 \mu\text{m}$. Se soldaron las cintas de contacto y se seleccionó una celda que presentaba zonas dañadas con fisuras y zonas de baja actividad con el fin de evidenciar estas fallas y comportamiento en las técnicas de electroluminiscencia y shearografía que se muestra en la Figura 3.3, la hoja de datos se presenta en el Anexo 2.

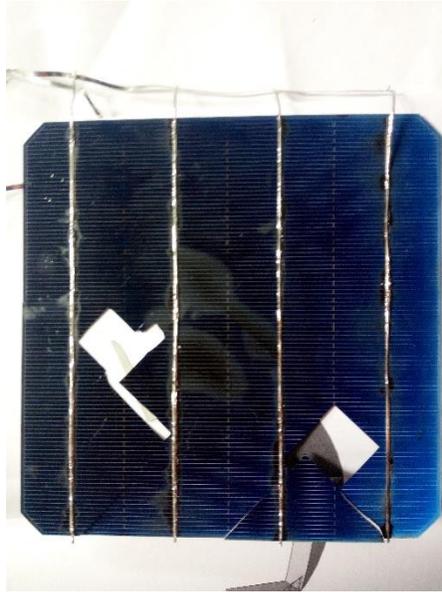


Figura 3.3 Muestra de celda con zonas dañadas.

3.1.2 Selección de diodo láser

La superficie de la celda será iluminada con una fuente de láser expandida; el diodo láser tiene la capacidad de ligeros ajustes en la longitud de onda mediante la variación de la corriente de inyección y la temperatura en la región activa. En la Figura 3.4 se muestra la respuesta de absorción en diferentes longitudes de onda de la celda de silicio monocristalino donde se puede observar que a longitudes de ondas cortas se reduce el flujo de electrones entrantes. También se observa en la Figura 3.5 el espectro de reflectividad del material, que presenta sendos picos (0.74, 0.59) alrededor de 270 y 370 nm respectivamente.

Tomando en cuenta estas características se seleccionó el diodo L405P20 de la marca Thorlabs a 405 nm, para el cual la celda tendrá una reflectividad de 0.47. La hoja de datos se encuentra en el Anexo 3. Si bien existen otros diodos con longitudes de onda más cercanos a los picos de reflectividad, estos son muy caros, por lo que el diodo utilizado en este trabajo se eligió con base en un compromiso entre reflectividad y costo.

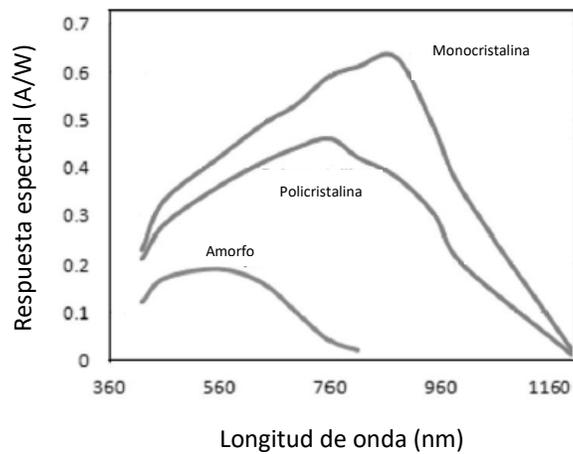


Figura 3.4 Respuesta de absorción de celdas solares de silicio frente a longitudes de onda [34].

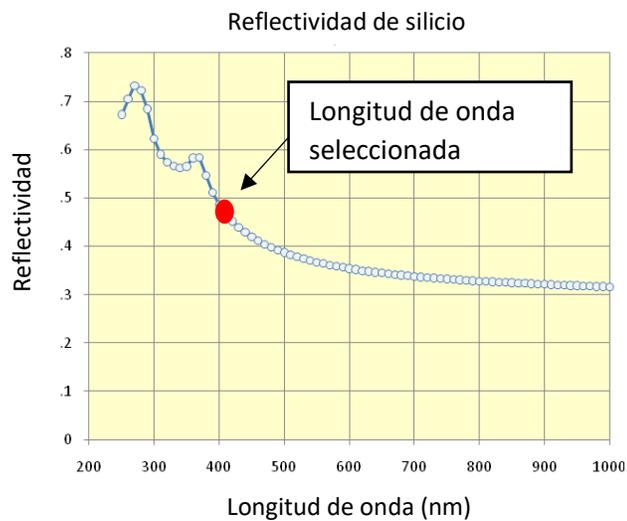


Figura 3.5 Espectro de reflectividad del celdas de silicio [35].

3.1.3 Diseño del instrumento

En esta sección se desarrollan las características del arreglo óptico y software para la implementación de shearografía, la cual implica la comparación de patrones de moteado registrados antes y después de aplicar una carga o desplazamiento en la celda durante la prueba. La correlación de los patrones produce un patrón de franjas que representa un

mapa de contorno. Posteriormente, se requiere un procesamiento de imágenes para determinar la fase de correlación de las franjas. Esto permite mejorar el contraste de las franjas y la calidad de la información.

3.1.3.1 Arreglo típico de shearografía

Los defectos se pueden encontrar a partir de la anomalía en el patrón marginal como se muestra en el estudio de Guo [36], en donde el shearograma se interpreta como gradiente de desplazamiento a lo largo de la dirección de corte. La interpretación clásica se puede expresar como:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{n\lambda}{2\delta x} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde w es el desplazamiento fuera del plano, x es la dirección de corte, n es el orden de las franjas, λ es la longitud de onda del láser de la fuente, y δx es la distancia de corte. La ecuación muestra que la sensibilidad de la shearografía es proporcional a la distancia de corte.

Para realizar el análisis de procesamiento de imágenes, se requiere de una fuente de láser que ilumine al objeto y una cámara conectada a la computadora que grabe la imagen que se procesará. Se coloca un dispositivo de corte, generalmente un interferómetro de Michelson modificado delante de la cámara para producir dos imágenes lateralmente desplazadas y superpuestas del objeto, como se muestra en la Figura 3.6:

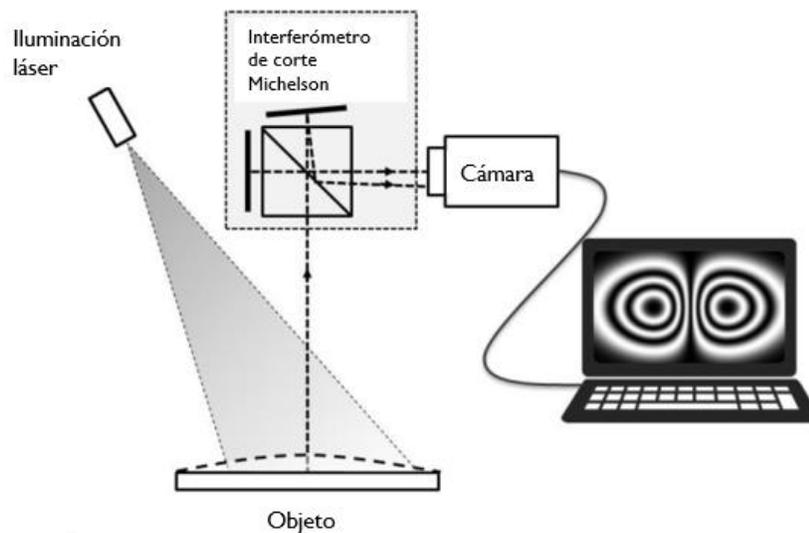


Figura 3.6 Arreglo típico de shearografía, Sanchez [37].

Generalmente, el patrón del interferograma es grabado por una cámara CCD y almacenado en la memoria de la computadora en formato digital. Esto significa que la intensidad grabada es digitalizada en un arreglo de $M \times N$ puntos de la imagen, llamados píxeles, y cuantizados en L valores discretos de gris. Cuando se adquieren cuadros de intensidad, la señal de video análoga es usualmente convertida en señal digital de niveles discretos por un convertidor analógico digital (ADC). En la práctica la cuantización dentro de 8 bits corresponde a 256 valores en escala de grises o usando 10 bits corresponde a 1024 valores. La experiencia ha demostrado que 8 bits son suficientemente confiables en la evaluación de patrones de interferencia.

La cámara está compuesta por sensores de imagen que, captan las características del objeto, y son componentes sensibles a la luz que modifican su señal eléctrica en función de la intensidad luminosa que perciben. Las cámaras CCD (Dispositivo de carga acoplada) tienen la característica de obtener una buena calidad de imagen debido al proceso de lectura simultánea separada.

La reconstrucción de la variación de la fase óptica de acuerdo con la deformación del objeto es un paso importante en el proceso para hacer las medidas cuantitativas. La correlación de dos patrones de moteado da como resultado un patrón de franjas basado

en la intensidad, pero estas no proporcionan la información de fase lo cual lleva a la necesidad del uso de procesamiento de imágenes para recuperar esta información.

Las franjas de patrones obtenidos con shearografía tienden a ser de bajo contraste debido a la combinación de campos de motas.

Posteriormente, se requiere analizar la imagen de la cámara. Para ello se procede a convertirla en una señal digital para manipularla usando el software LabVIEW NI el cual opera sobre una señal y extrae la información útil.

3.1.3.2 Diseño de software para adquisición y procesamiento de imágenes

Para realizar el análisis de las imágenes, se programó la adquisición en LabVIEW. De acuerdo a Klinger [38] es importante considerar el hardware a utilizar para establecer la configuración de comunicación. En esta experimentación se usó una cámara Grasshopper 3 GS3-U3-23S6M-C que cuenta con conectividad USB 3.0; las características de la cámara se encuentran en el Anexo 4. Con la paleta de funciones vision and motion se seleccionaron los bloques que permitieron la adquisición de imágenes.

Como primer proceso se requiere obtener un promedio de n imágenes. Esto permitió tener una mayor fidelidad de la imagen que servirá como referencia, como se muestra en la Figura 3.7, el proceso está compuesto por bloques de IMAQ visión que permite la obtención de la imagen. La configuración de la cámara se puede realizar desde NI MAX, que, en casos de poca luz, se pueden modificar las variables de ganancia, tiempo de exposición y los fotogramas tomados por segundo para obtener una mejor definición de imagen.

La secuencia de instrucciones permitió adquirir las imágenes de un archivo convirtiéndolas al tipo de imagen en escala de grises (grayscale single), después guardar la primera imagen, sumar la segunda imagen y dividirla entre dos: se guarda el resultado y se suma a la tercera imagen, se divide y se sigue el mismo ciclo hasta llegar a las n imágenes. Después se realiza una conversión del tipo de imagen en escala de grises I16 para ser guardada en formato PNG en una carpeta preseleccionada (en adelante llamado *programa promedio*).

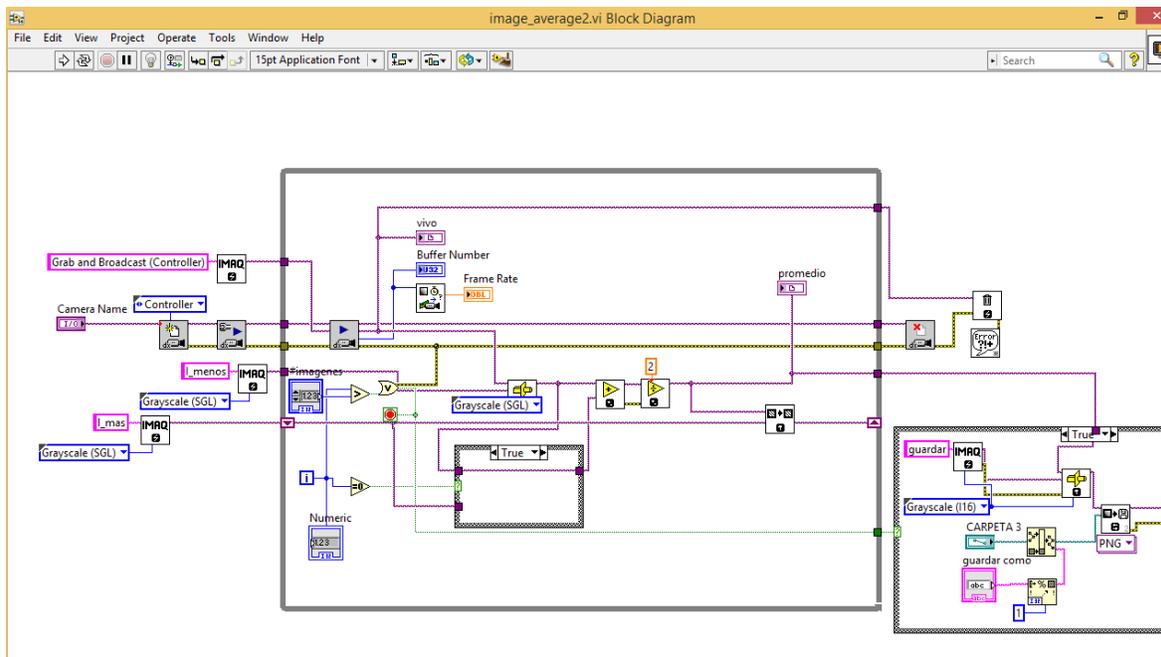


Figura 3.7 Diagrama de bloques para promedio de imágenes, fuente propia.

Una vez obtenido el promedio, se realiza otro programa para realizar la resta de las imágenes con operadores matemáticos de IMAQ Vision. En este proceso se puede obtener información de cada píxel. En la Figura 3.8 se muestra una resta en tiempo real, es decir, se obtiene la imagen de referencia promedio y se resta la imagen en vivo (en adelante llamado *programa resta*).

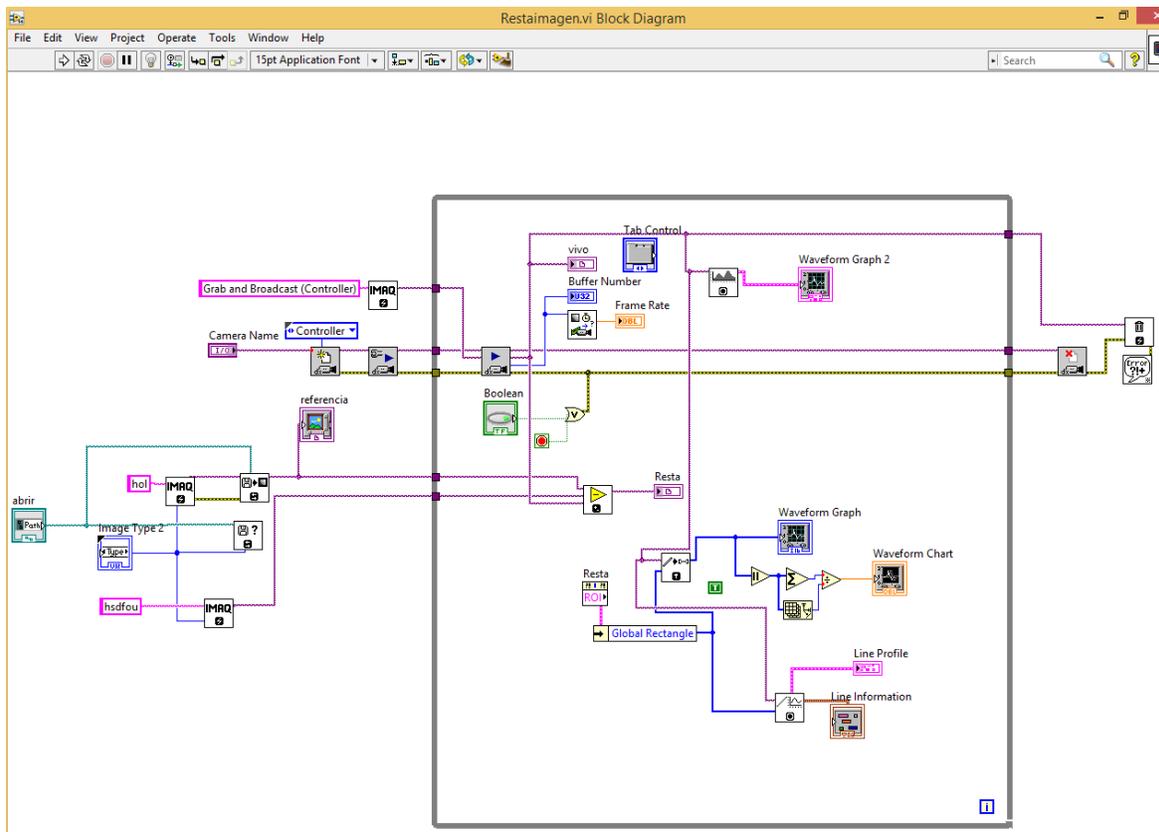


Figura 3.8 Programación a bloques de resta en tiempo real.

3.1.3.4 Arreglo óptico de shearografía láser con prisma de Wollaston

El prisma Wollaston permite dividir un rayo monocromático en dos rayos polarizados linealmente en direcciones ortogonales con un ángulo de divergencia. En este caso se probó el prisma WPQ10 con 1° de separación, con un rango de longitud de onda de 400 nanómetros a 2 micrómetros. Para cambiar el ángulo, el prisma se puede girar alrededor del eje z desde 0° a 90° . Así mismo, como señala Howard [39] es necesario un polarizador a la salida del prisma para proveer una salida lineal polarizada. Para ello se usa el polarizador LPVSE 100-A, con un rango de longitud de onda de 400 a 700 nanómetros.

En el arreglo que se muestra en la Figura 3.9, el cual utiliza el mismo controlador láser anteriormente mencionado, se utiliza un arreglo de lentes para expandir la luz, con un ángulo de incidencia de 45° . La reflexión resultante en la celda es mixta, se usa una lente biconvexa de 100 mm para concentrar la luz, la cual es dirigida al prisma Wollaston,

seguida del polarizador y una lente biconvexa de 35 mm para formar la imagen en la cámara.

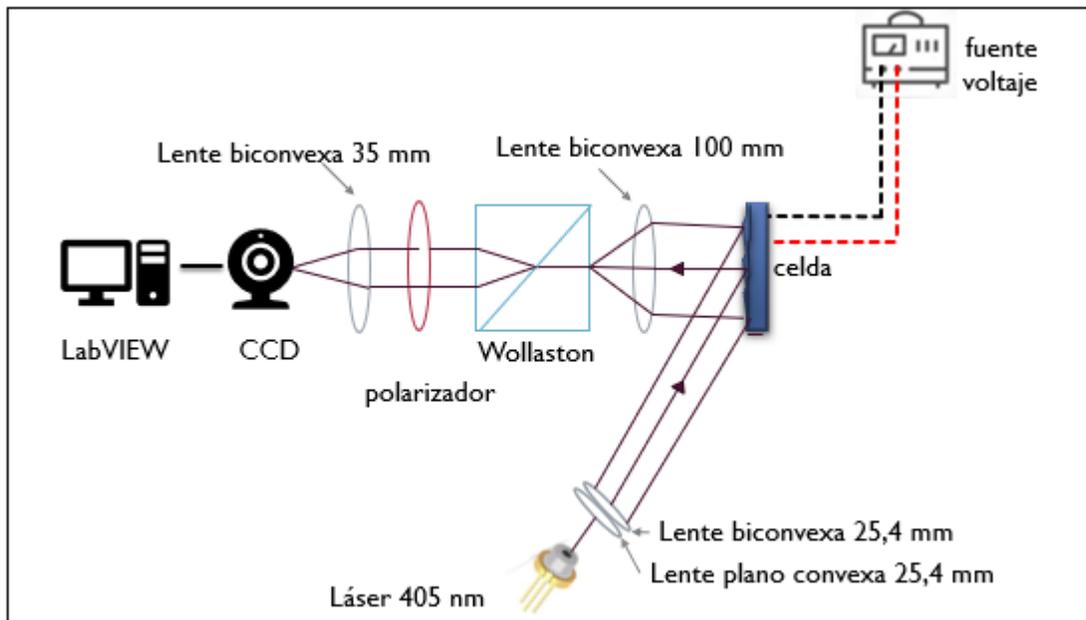


Figura 3.9 Configuración óptica con Wollaston.

La Figura 3.10 muestra una zona magnificada de la rejilla de contacto (dedos).

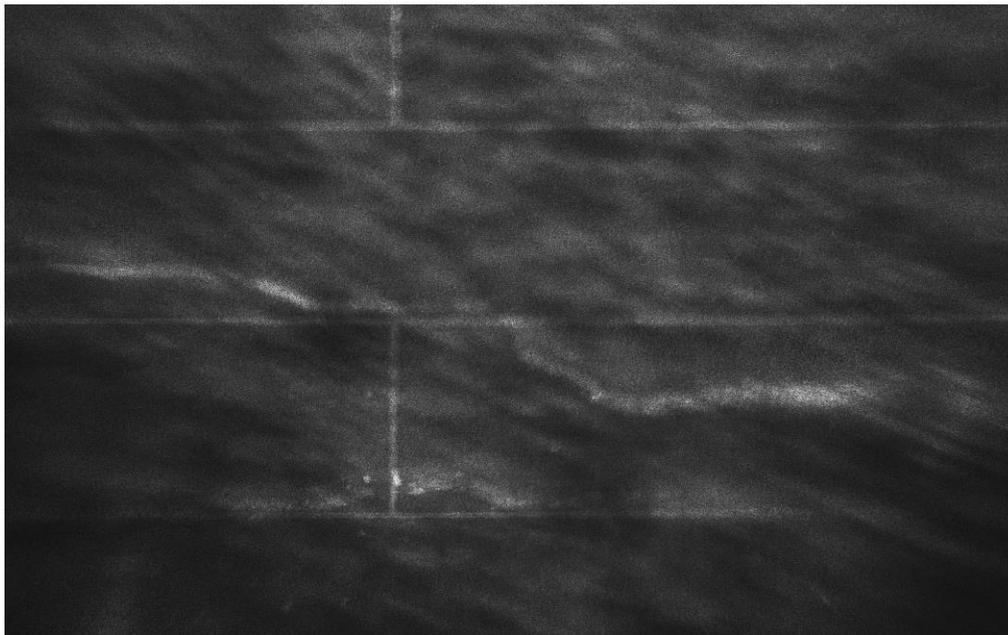
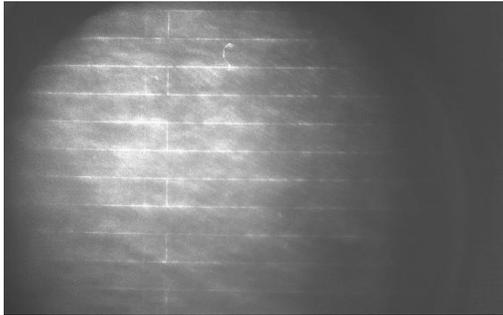


Figura 3.10 Imagen de la celda del arreglo con Wollaston.

Una vez obtenida esta imagen se procedió a aplicar cargas eléctricas a una celda monocristalina variando la corriente. Se obtuvieron 100 imágenes, la cuales son promediadas en el programa *promedio*, y como resultado se obtiene la Figura 3.11.



a) Imagen original, sin carga.



b) Resultado de resta, sin carga.



c) Resultado de resta, aplicando 0.5 A, se observa claramente los dedos de la celda.



d) Resultado de resta, aplicando 1 A



e) Resultado de la resta, aplicando 1.5 A.

f) Resultado de la resta, aplicando 2 A.

Figura 3.11 Aplicación de corriente en celda solar.

Al aplicar la corriente, la temperatura de la celda asciende y el resultado de la resta evidencia las zonas que sufren un cambio, en este caso los dedos y algunos defectos superficiales de la zona del silicio. En el programa resta se puede obtener una gráfica en números absolutos de un histograma de la zona de interés que al menos pasa por dos dedos de la celda. La amplitud aumenta cuando se aplica instantáneamente 5 A y decrece cuando hay ausencia de corriente como se muestra en la Figura 3.12.

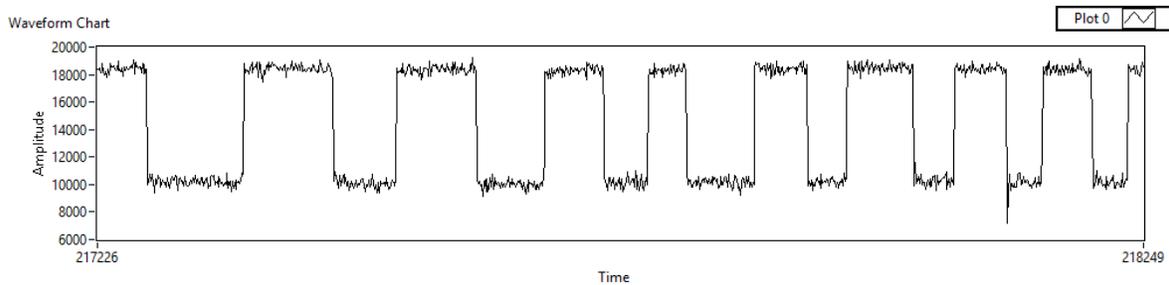


Figura 3.12 Aplicación instantánea de corriente de 0 a 5 A.

3.1.4 Optimización de instrumento

Debido a que la luz blanca del laboratorio no permitía la visibilidad del láser durante el proceso de alineación y adquisición de imágenes se dispuso de una cubierta rectangular que permite disminuir la luz cercana de la placa de pruebas para óptica, como se muestra en la Figura 3.13. Posteriormente, se instalaron cortinas y se cubrieron las ventanas con vinil negro con el fin de disminuir la luz blanca en la periferia de la mesa óptica.



Figura 3.13 Aislamiento de instrumento y ambiente de trabajo modificado para experimentación.

Durante el proceso de adquisición de la imagen se observó con el WPQ10 una distancia de separación de las dos imágenes pronunciada. Para disminuir la distancia entre las imágenes es necesario recorrer en el eje x el prisma Wollaston como explica Howard [39]. Se realizó esta operación, pero no fue posible obtener anillos, como se muestra en la Figura 3.14.

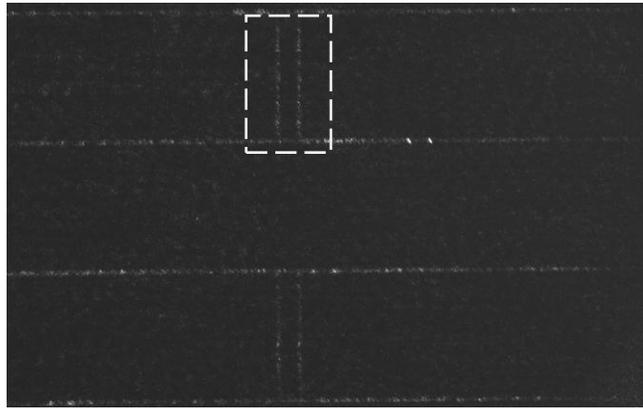


Figura 3.14 Desfase de imagen.

Derivado de esta observación se diseñó otro arreglo óptico para asegurar una zona de interés con iluminación uniforme y ángulo de incidencia del láser de 0° , como se muestra en la Figura 3.15.

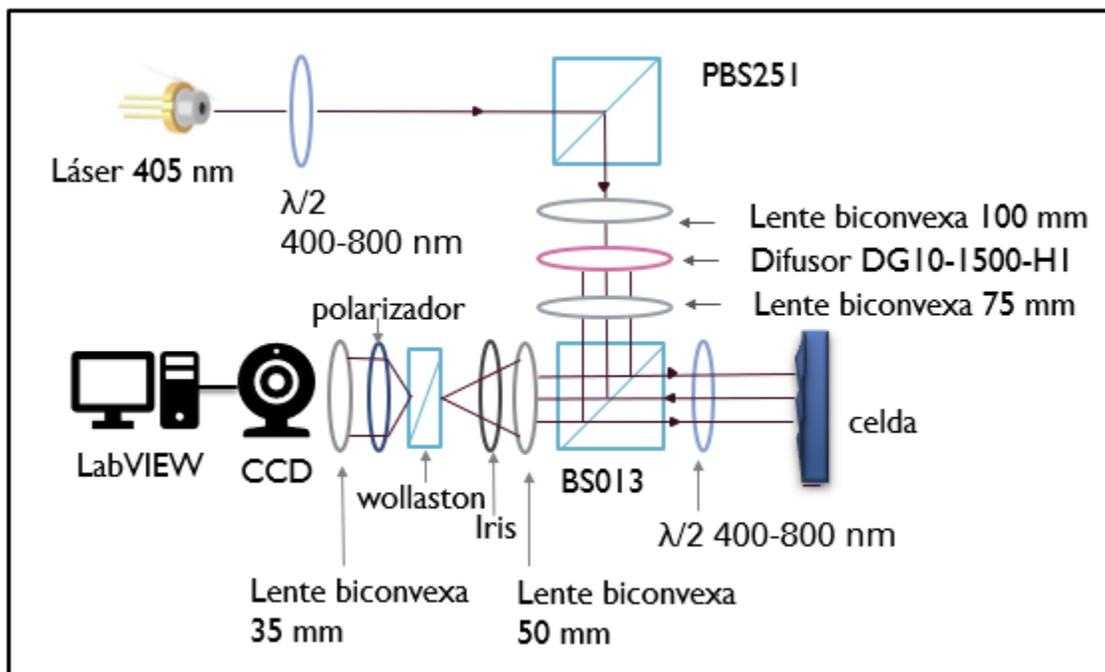


Figura 3.15 Arreglo con Wollaston.

Se agregaron algunos elementos como retardadores de media onda, el primero con el fin de obtener una mayor contribución del láser a la salida del primer prisma separador. El difusor nos permite distribuir el láser de manera uniforme, se coloca la lente biconvexa

seguida del difusor con el fin de converger los rayos y formar un cono de luz que impacte en un área seleccionada de la celda generando motas (speckle). El iris se coloca para modificar el tamaño de grano que observamos en la cámara, la señal es dividida en dos imágenes polarizadas, se coloca el polarizador para seleccionar el tipo de salida polarizada y un arreglo de lentes para formar la imagen. El arreglo montado se muestra en la Figura 3.16.



Figura 3.16 Arreglo montado con Wollaston.

El resultado de esta iluminación en la celda se observa en la Figura 3.17.

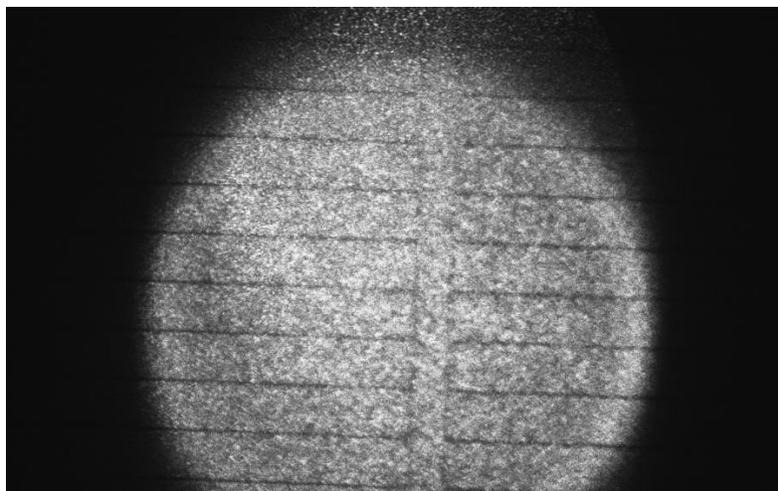


Figura 3.17 Celda iluminada con motas.

Sin embargo, el desfase de las dos imágenes no permite visualizar los anillos. Para ello tomamos como referencia una tarjeta con números para visualizar mejor el desfase de la Figura 3.18:



Figura 3.18 Desfase de imagen.

Con el fin de optimizar el arreglo óptico, un área mejor iluminada y granos más definidos, se propone otro arreglo donde podemos observar algunos elementos que se sumaron como los retardadores de onda de $\lambda/2$ y $\lambda/4$. El primer $\lambda/2$ se usó para dirigir la mayor intensidad hacia la muestra de la celda, el $\lambda/4$ dirige la mayor intensidad hacia el camino óptico de la cámara CCD, la cual fue reemplazada por la cámara FLIR Blackfly SBFS-U3-32S4M (la hoja de datos se encuentra en Anexo 5). La tercera $\lambda/2$ nos permite visualizar las dos imágenes que se forman después del prisma Wollaston, este fue cambiado por un ángulo de desfase menor, como se muestra en la Figura 3.19:

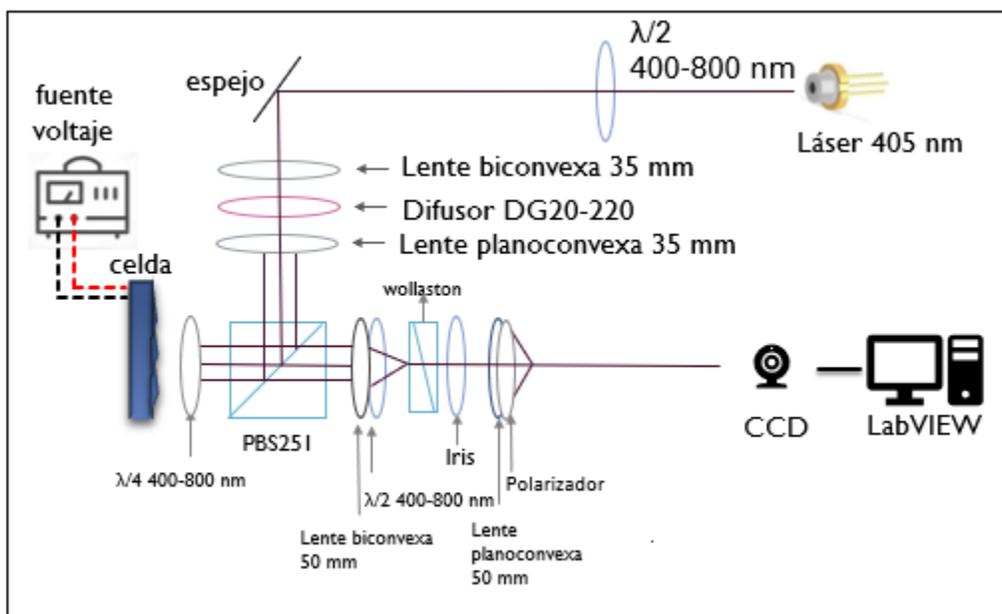


Figura 3.19 Arreglo para shearografía láser.

Una vez formada la imagen en NIMAX, se puede disminuir el desfase de las dos imágenes al recorrer el prisma Wollaston en el eje X. Este se posiciona antes de la primera imagen plano que forma la lente biconvexa de 50 mm. Para una mejor visibilidad de la imagen se ilumina con una luz blanca, en la Figura 3.20 se puede observar la distancia entre las dos imágenes; al recorrer en el eje X observamos que la distancia de separación se va reduciendo.

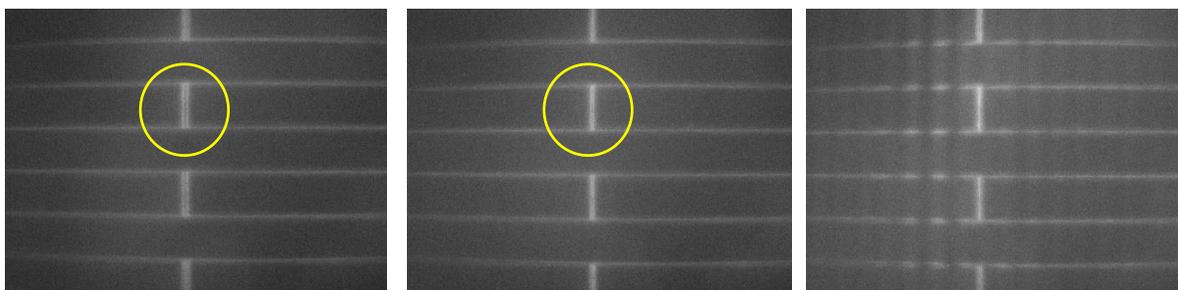


Figura 3.20 Observación de desfase de imágenes y reducción.

Al iluminarla con láser, podemos observar que al tener las imágenes lo más cercanas, se observan interferencias, el número de franjas disminuye en cuanto existe una menor diferencia en las dos imágenes, como se muestra en la Figura 3.21:

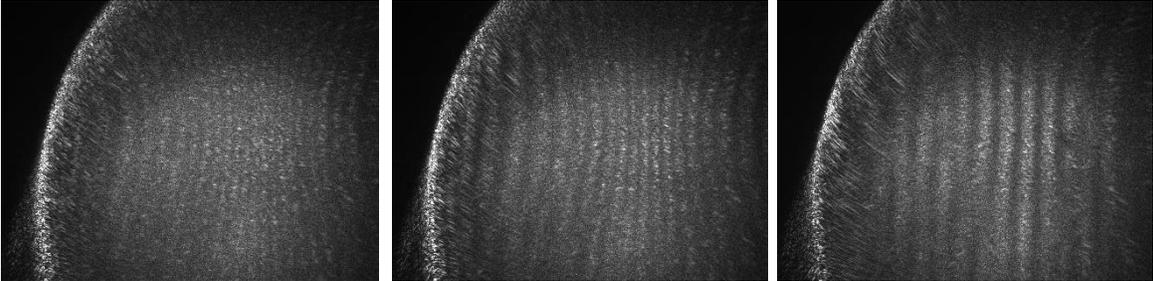


Figura 3.21 Franjas de interferencia.

Para detectar el grano (speckle) que se encuentra en la superficie de la muestra, uno de los requisitos de acuerdo a Vannoni [40] es que el tamaño de grano exceda al tamaño de los pixeles de la cámara, y para ello se puede ajustar con el iris que se encuentra antes del polarizador, así como la modificación de parámetros de la CCD descritos en la Tabla 3.1, para tener una mejor visibilidad de estos, como se muestra en la Figura 3.22:

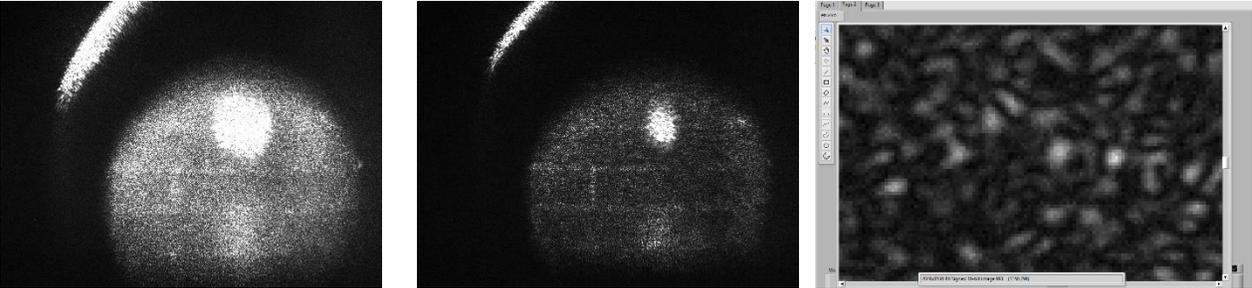


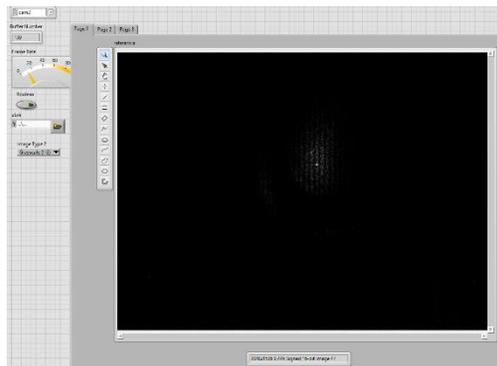
Figura 3.22 Visualización de tamaño de granos (speckle) modificando la abertura de iris.

Tabla 3.1 Parámetros de cámara para adquisición de imágenes.

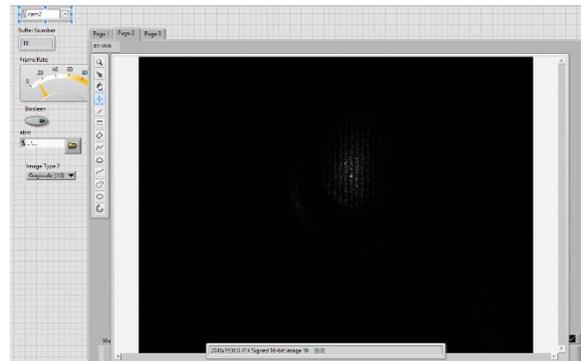
Parámetro	Valor
Formato de píxel	Mono12pack
Adquisición de imágenes	11.97Hz
Tiempo de exposición	69999.0 microsegundos
Ganancia	2.5998379 dB
Resolución	12 bits

Para evitar vibraciones se activa el sistema neumático de la mesa óptica. Una vez que se tiene alineado el sistema se procede a inducir una corriente directa para producir deformación en el material.

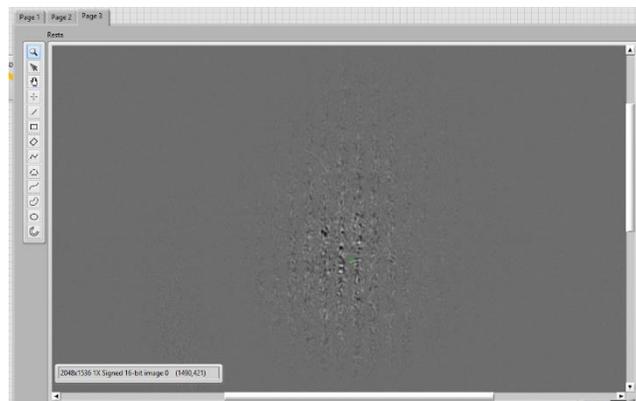
Para ello se corre el programa *promedio* y *resta* en LabVIEW, en el cual gradualmente se inyecta una corriente directa de 0 a 5 amperes. También podemos observar que al extraer la información de un píxel seleccionado obtendremos la amplitud del cambio de iluminación, el cual nos permitirá percibir los cambios que se generan al inyectar la corriente a la celda. En la Figura 3.23 podemos observar la ventana de la imagen promedio, en vivo y la resta de estas dos, donde se observa una baja amplitud.



a)



b)



c)

Figura 3.23 a) imagen promedio, b) imagen en vivo, c) resta.

Posteriormente, se aplica una carga de 1 A. El cambio se puede observar en la resta de la Figura 3.24 al cambiar la intensidad de los pixeles y en la gráfica de intensidad de la Figura 3.25, en la cual se detecta el pico de estado transitorio. Después la celda pasa a un estado estable como se muestra en la Figura 3.26.

Esto sucede porque la imagen de referencia presentaba un patrón de granos con un valor de intensidad. Al realizar la segunda imagen en donde se aplica la carga eléctrica, podemos detectar pequeñas deformaciones, las cuales se observan con los mismos granos pero que dependen de las nuevas condiciones de interferencia con nuevos valores

de iluminación. Así mismo, la sustracción de las imágenes permite cancelar los granos que no cambiaron posterior a la carga eléctrica.

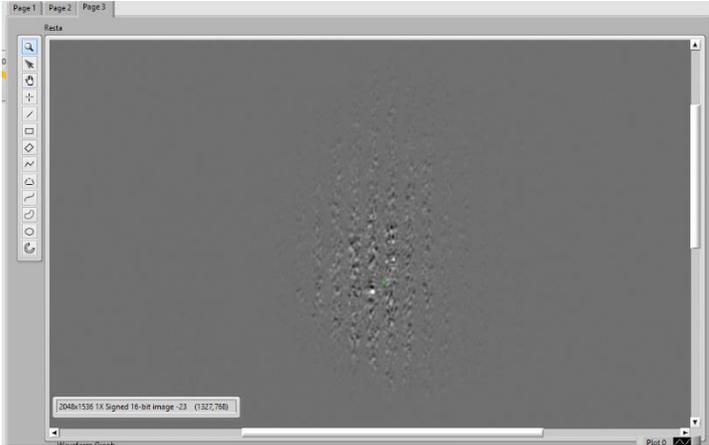


Figura 3.24 Resta para carga de 1A.

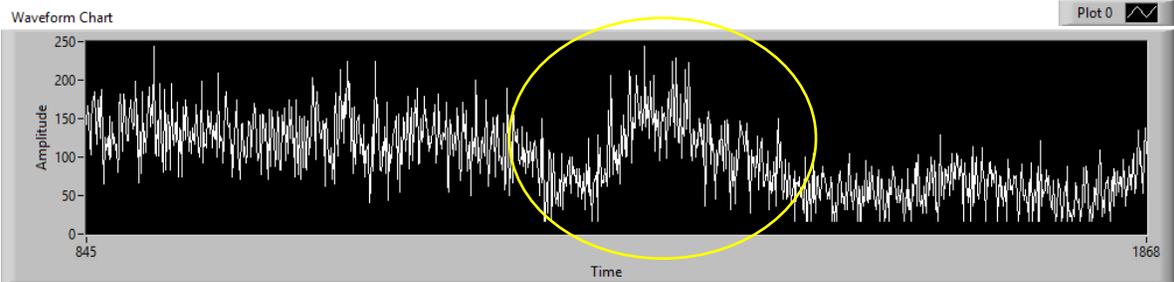


Figura 3.25 Pico de inyección de corriente de 1 A.

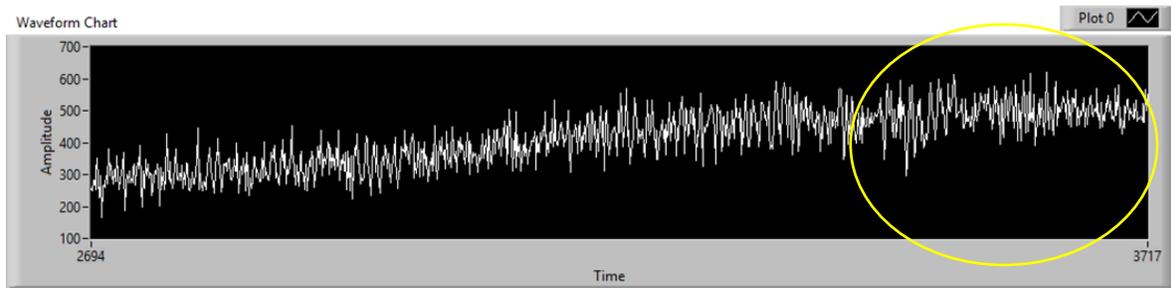


Figura 3.26 Señal de estado estable en la celda.

En el segundo estado, se inyectan 2 A en la muestra y se observa el cambio de intensidad en los pixeles en la Figura 3.27 y el pico en el estado transitorio de temperatura como se muestran en la Figura 3.28 y el estado estable posterior a la inyección en la Figura 3.29:

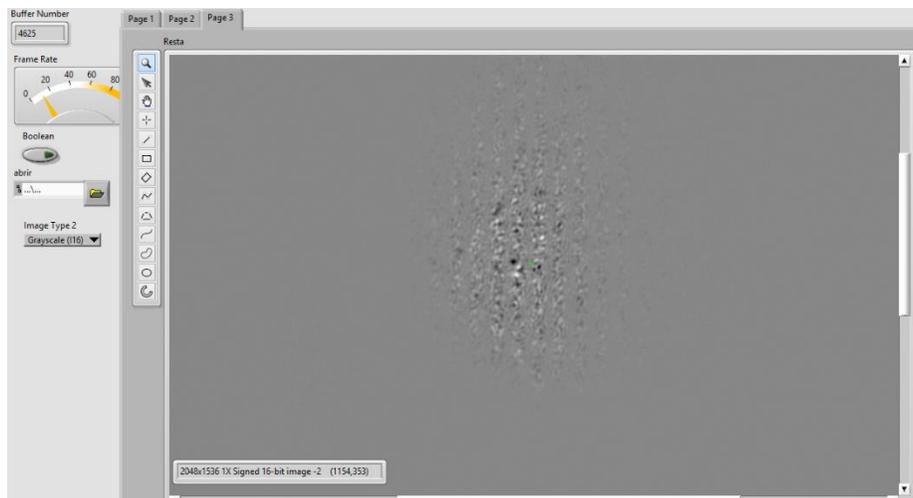


Figura 3.27 Resta con carga de 2 A.

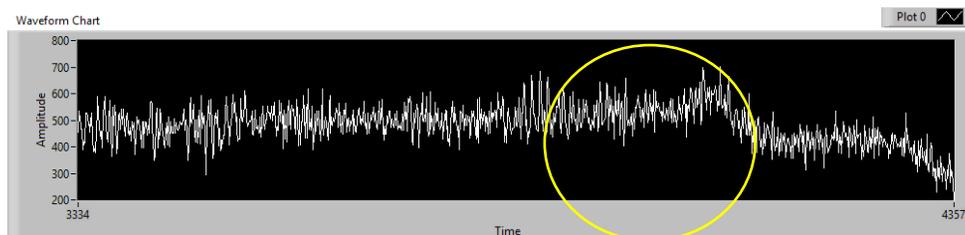


Figura 3.28 Estado transitorio para carga de 2 A.

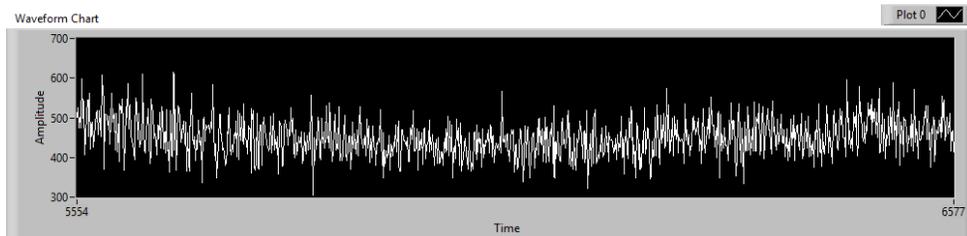


Figura 3.29 Señal de estado estable posterior a inyección de 2 A.

Para el tercer estado, se inyectan 3 A. La resta se visualiza en la Figura 3.30, el estado transitorio en la Figura 3.31 y la estabilización de la señal en la Figura 3.32:

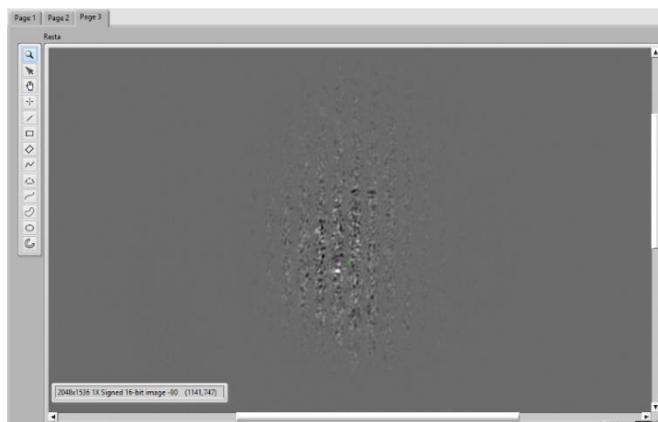


Figura 3.30 Resta con cara de 3 A.

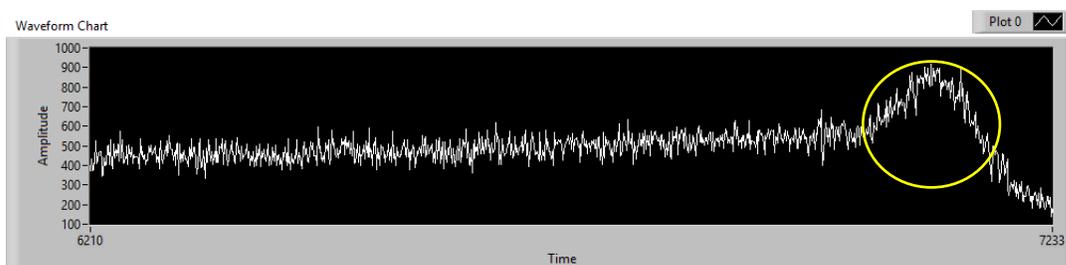


Figura 3.31 Estado transitorio para 3 A.

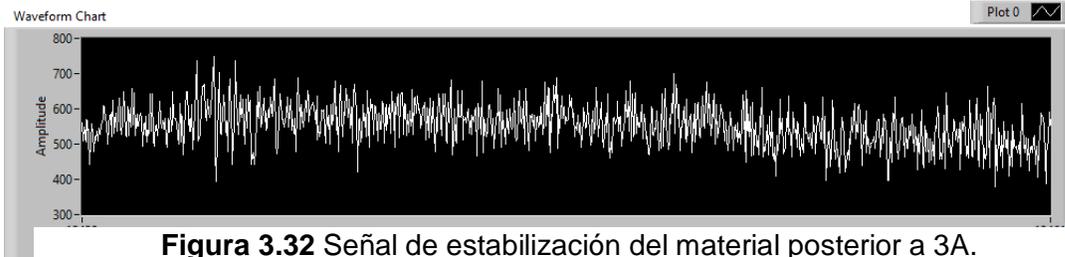


Figura 3.32 Señal de estabilización del material posterior a 3A.

Para el cuarto estado de inyección de 4 A, se observa la resta en la **Figura 3.33**, la señal al recibir el cambio de corriente en la **Figura 3.34** y señal estabilizada en la **Figura 3.35**.

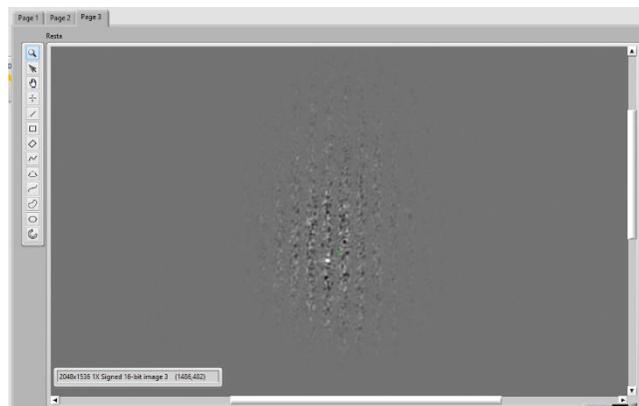


Figura 3.33 Resta para carga de 4A.

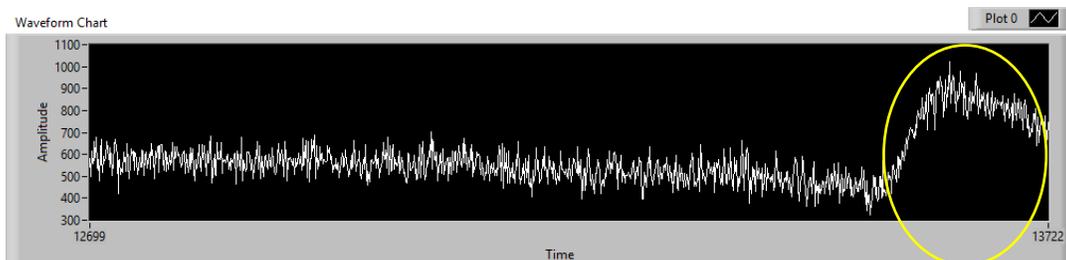


Figura 3.34 Señal pico mostrada al inyectar 4 A.

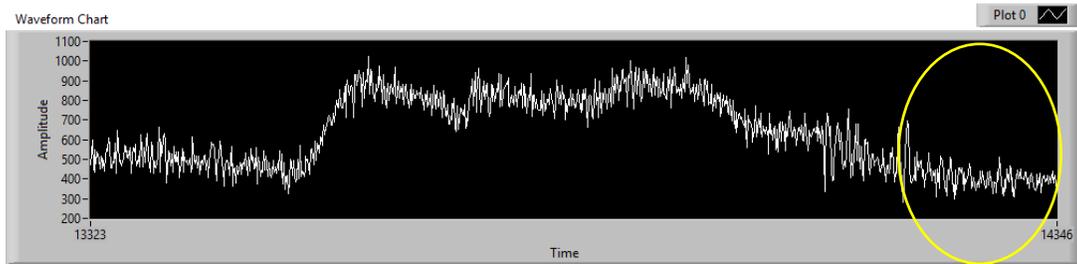


Figura 3.35 Señal de estado estable posterior a 4 A.

Si siguiendo el mismo proceso se inyectan 5 A. La diferencia se observa en la Figura 3.36, así como el aumento de la corriente detectada en la señal en la Figura 3.37 y la señal estabilizada manteniéndola en 5 A en Figura 3.38:

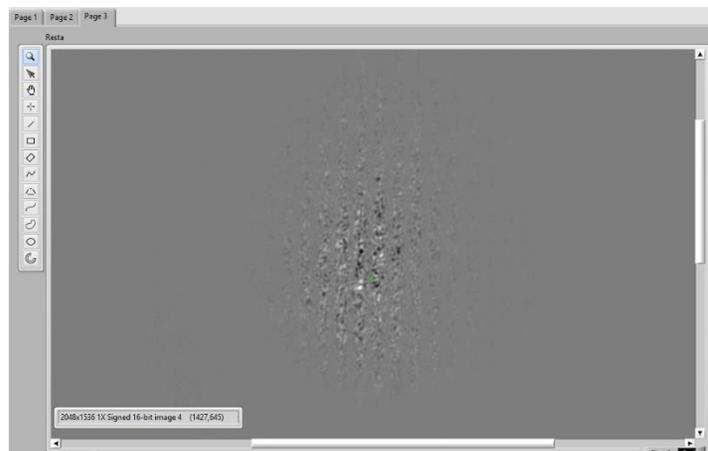


Figura 3.36 Resta para carga de 5 A.

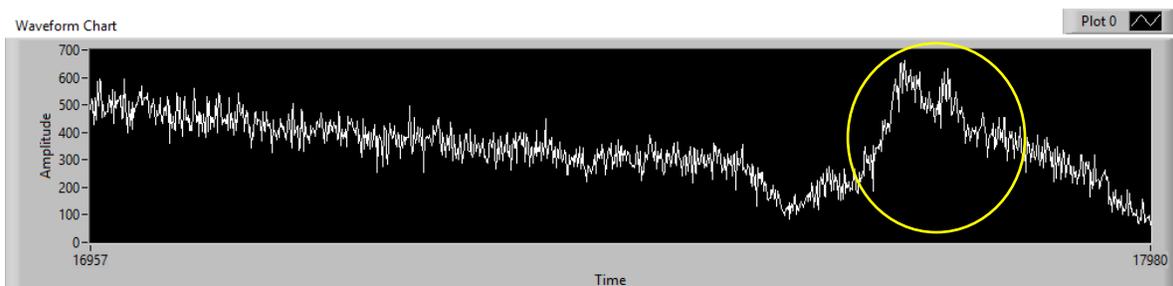


Figura 3.37 Estado transitorio para 5 A.

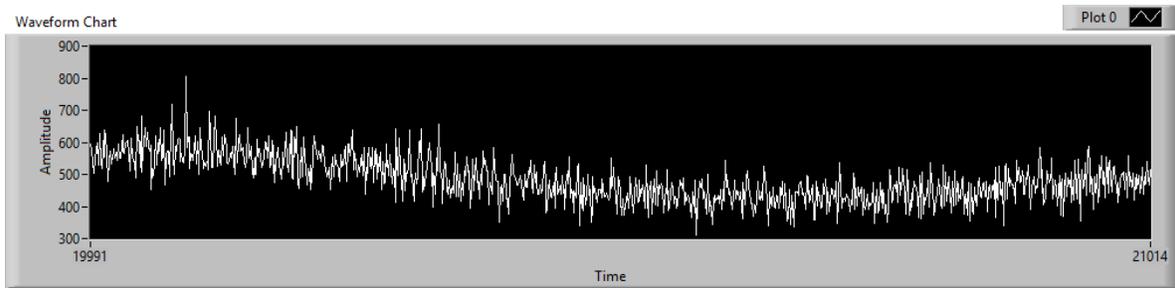


Figura 3.38 Señal de estado en reposo posterior a la inyección a 5 A.

Al eliminar la corriente se puede observar como esta regresa al estado de reposo puesto que su temperatura desciende como se observa en la Figura 3.39.

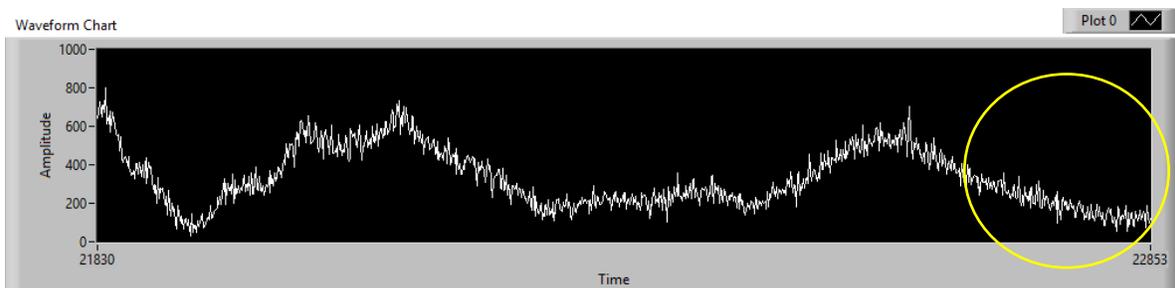


Figura 3.39 Retorno a estado de reposo.

Si se observa el cambio de la resta en la zona iluminada por un arreglo de pixeles en 3D, como se visualiza en la Figura 3.40, existe una conformidad en la superficie cuando se encuentra en estado de reposo. Al aplicar la máxima carga de 5 A, se puede ver como se cuenta con una irregularidad de la superficie como se observa en la Figura 3.41.

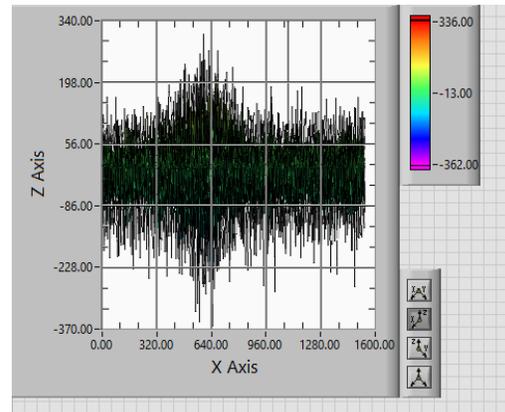
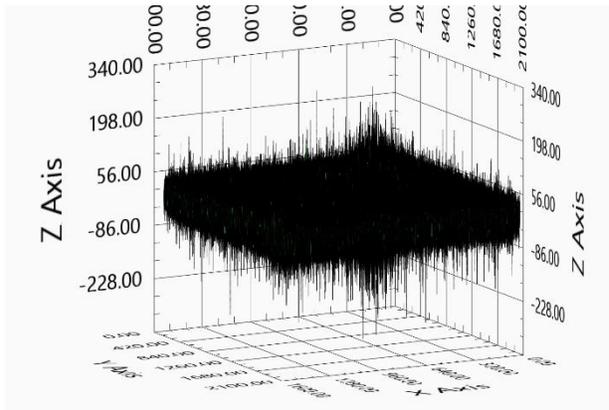


Figura 3.40 Gráfica 3D en estado de reposo.

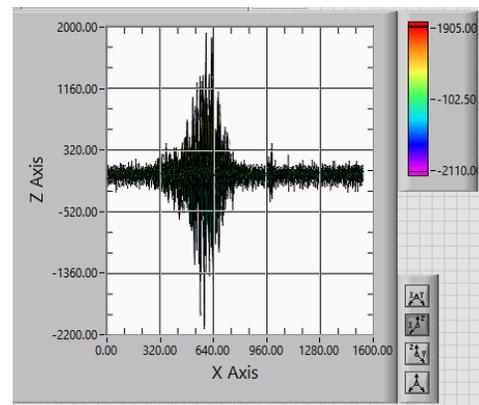
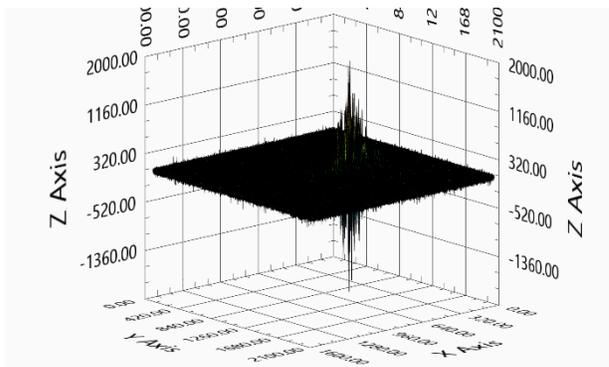


Figura 3.41 Gráfica 3D en estado de carga.

Con esta información cuantitativa podemos determinar las zonas que tienen irregularidad a causa de una carga eléctrica por efecto Joule, ya que parte de la energía eléctrica se transforma en calor.

3.1.5 Pruebas de factibilidad

Esta técnica de inspección puede ser relevante para adquirir información de la celda, sobre todo si se encuentra expuesta a diferentes tipos de cargas naturales como: temperatura, lluvia, viento entre otras. El beneficio de esta técnica es conocer los desplazamientos que tiene la celda, el material más importante del panel solar. Por otro

lado, las empresas que están incursionando en la industria fotovoltaica y que están ganando mercado en México podrían explorar I+D primero para analizar el ciclo de vida de sus productos y segundo, para diferenciarse de otras empresas ofreciendo servicios de inspección en línea de producción y en instalaciones de diferentes dimensiones.

De la optimización que se realizó, es factible llevar a cabo el análisis de inspección superficial a partir de la inyección de corriente como excitación en la celda solar y con ella obtener información relevante de las deformaciones y detectar de forma preventiva las zonas más vulnerables.

3.2 Shearografía con electroluminiscencia

En esta sección se abordarán las características del espectro de emisión de electroluminiscencia como fuente de luz para el arreglo de shearografía, su construcción y pruebas experimentales.

3.2.1 Caracterización espectral de la luz emitida por la celda solar

Como seguimiento de esta actividad, se experimentó la posibilidad de adquirir shearogramas por la luz que es emitida por la celda: electroluminiscencia. El silicio alcanza su máxima luminosidad en la longitud de onda centrada a 1150 nanómetros, como se observa en el perfil de luminiscencia de la Figura 3.42.

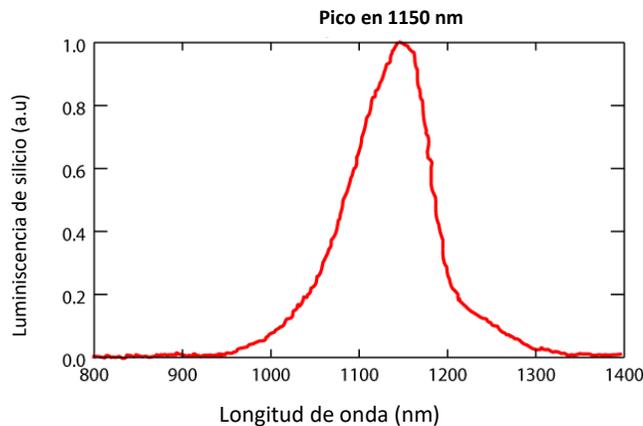


Figura 3.42 Señal de luminiscencia del silicio [41].

Para la adquisición de imágenes en esta longitud de onda, el laboratorio de celdas solares CINVESTAV- Mérida facilitó una cámara pco.1300 solar de 12 bits, con resolución de 1392 x 1040 píxeles, con una longitud de sensibilidad espectral de 300 a 1200 nanómetros, enfriada a 11 °C ; el software que se utiliza es Camware para controlar las características de la cámara, por ejemplo: permite mayor sensibilidad en el rango espectral del infrarrojo cercano, adicional cuenta con un lente Navitar SWIR-16, con pasa banda de 700-1900 nanómetros y transmisión mayor a 75% como se muestra en la

Figura 3.43.

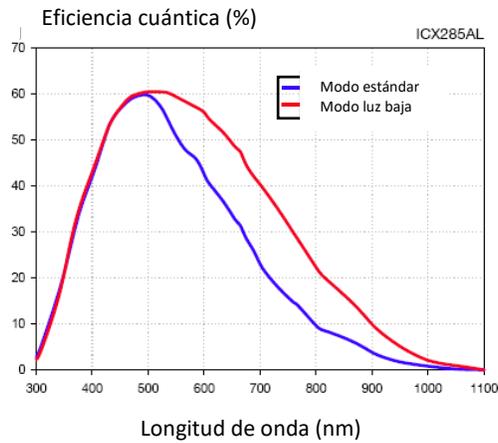


Figura 3.43 Espectro de sensibilidad de sensor pco.1300

3.2.2 Diseño del instrumento

El arreglo general que se diseñó y construyó se observa en la Figura 3.44. Se coloca la muestra enfrente de la cámara a una distancia de 40 cm, se aplica corriente de 0 a 6 A con la fuente de voltaje BK Precision 1743B en la celda monocristalina, lo cual permite visualizar el fenómeno de electroluminiscencia.

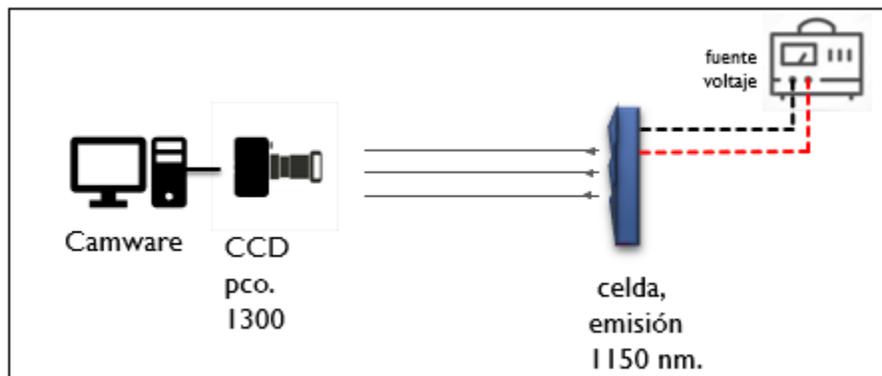
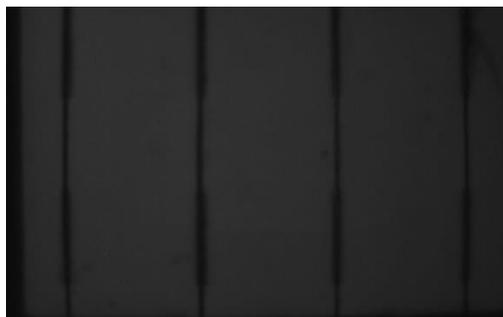


Figura 3.44 Arreglo óptico de electroluminiscencia.

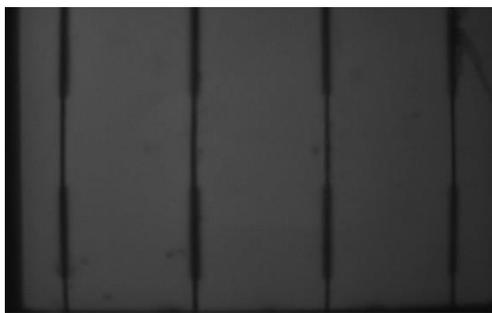
Los resultados se obtuvieron en la Figura 3.45 y Figura 3.46, configurando la cámara en el software Camware a 1.5 fotogramas por segundo (fps) y tiempo de exposición de 498 milisegundos.



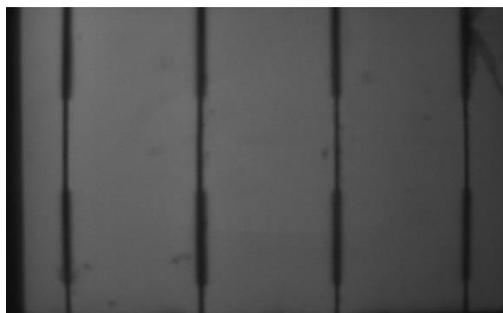
Aplicación de 1 A



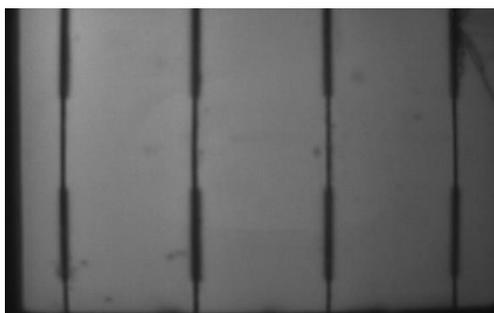
Aplicación de 2 A



Aplicación de 3 A

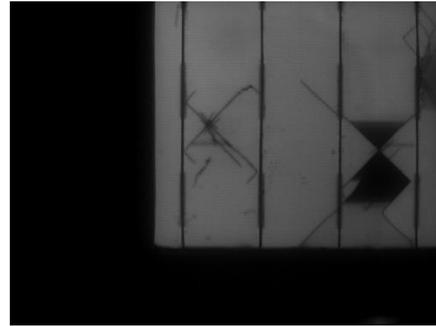
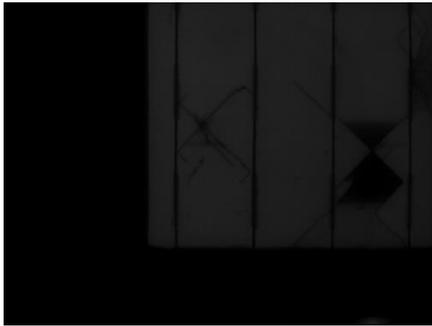


Aplicación de 4 A



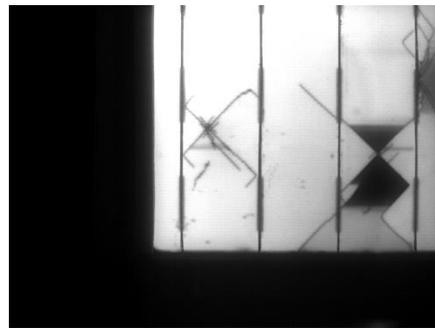
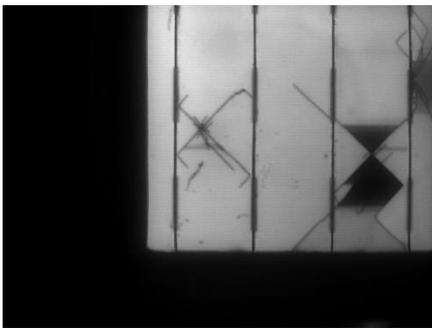
Aplicación de 5 A

Figura 3.45 Imágenes de electroluminiscencia de 1 a 6 A.



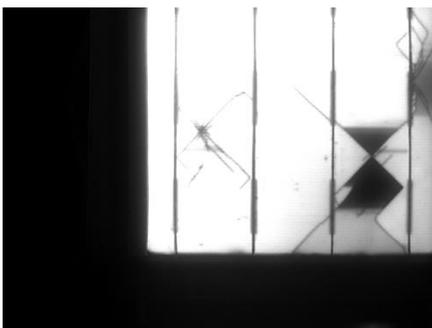
En otra zona de interés se observan áreas oscuras que evidencian la inactividad de la celda, así como fracturas a 1 A

Aplicación a 2 A



Aplicación a 3 A

Aplicación a 4 A



Aplicación a 5 A

Aplicación a 6 A., en este caso algunas zonas dañadas ya no son observadas por la saturación de luz

Figura 3.46 Visualización de electroluminiscencia en celda solar.

Una vez obtenidas las imágenes, se procedió a colocar el prisma Wollaston, el polarizador LPVIS050 y una lente para magnificar la zona de interés sin el lente Navitar como se muestra en la Figura 3.47 y Figura 3.48.

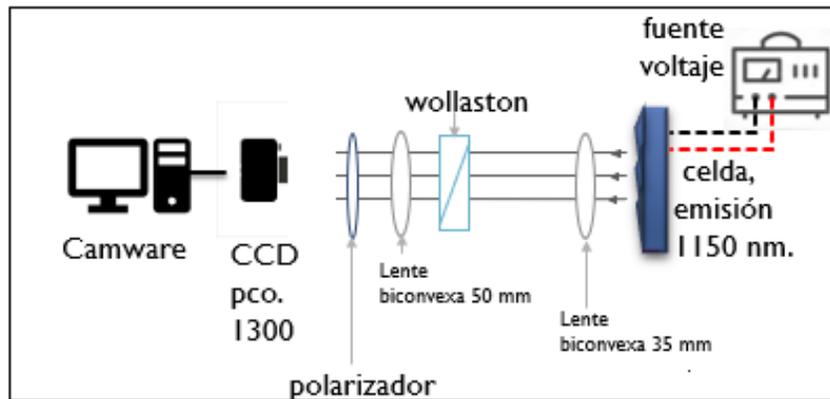


Figura 3.47 Arreglo de shearografía para electroluminiscencia.

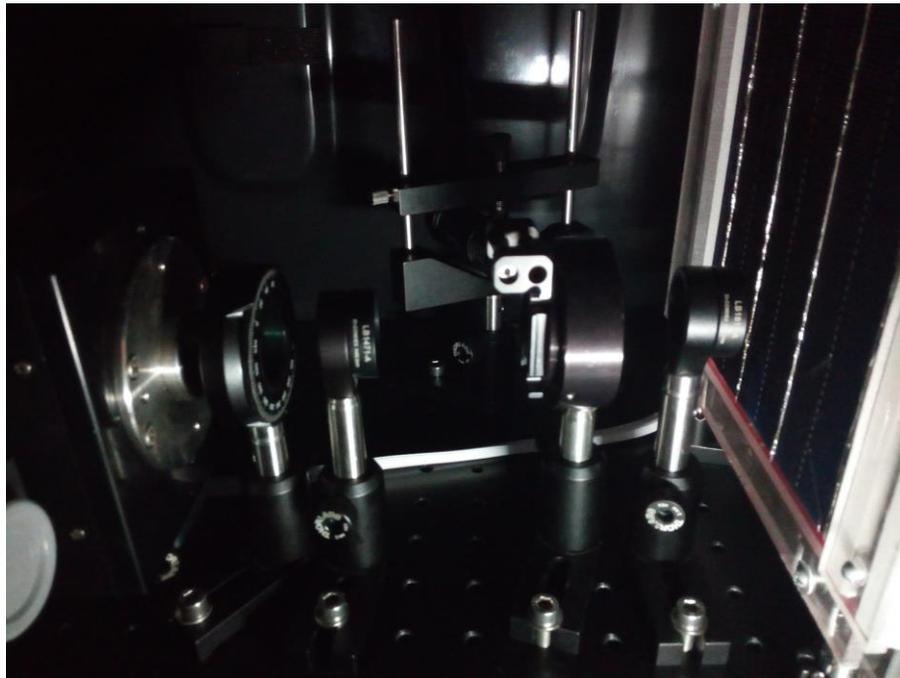


Figura 3.48 Arreglo montado para shearografía con electroluminiscencia.

De este arreglo se obtuvo la Figura 3.49. A pesar de existir un poco de diferencia entre las imágenes, se hicieron pruebas de aplicación de fuerza moderada, así como aplicación de corriente y no se pudieron obtener mapas de shearografía.



Figura 3.49 Zona de interés magnificada de arreglo shearográfico.

3.2.3 Optimización de parámetros

Tomando en cuenta el amplio espectro de la emisión de luz en diferentes puntos al aplicar corriente en la celda, no se observa una luz coherente lo cual nos imposibilita observar interferencia. Para corregir este problema se decidió filtrar a una longitud de onda de 1100 nanómetros en la cual obtenemos 0.7 de luminiscencia como se señala en la Figura 3.42. Se agregó un filtro FB1100-10 de la marca Thorlabs con longitud de onda de 1100 ± 10 nanómetros como se muestra en la Figura 3.50. Para asegurar la coherencia de luz, así mismo se agregó un objetivo 4x para magnificar y delimitar la zona de interés. Se ejecutó el procedimiento para obtener una imagen en reposo, e inyección de corriente para excitar la zona seguida de la resta de los dos estados, pero no se obtuvieron anillos de interferencia.

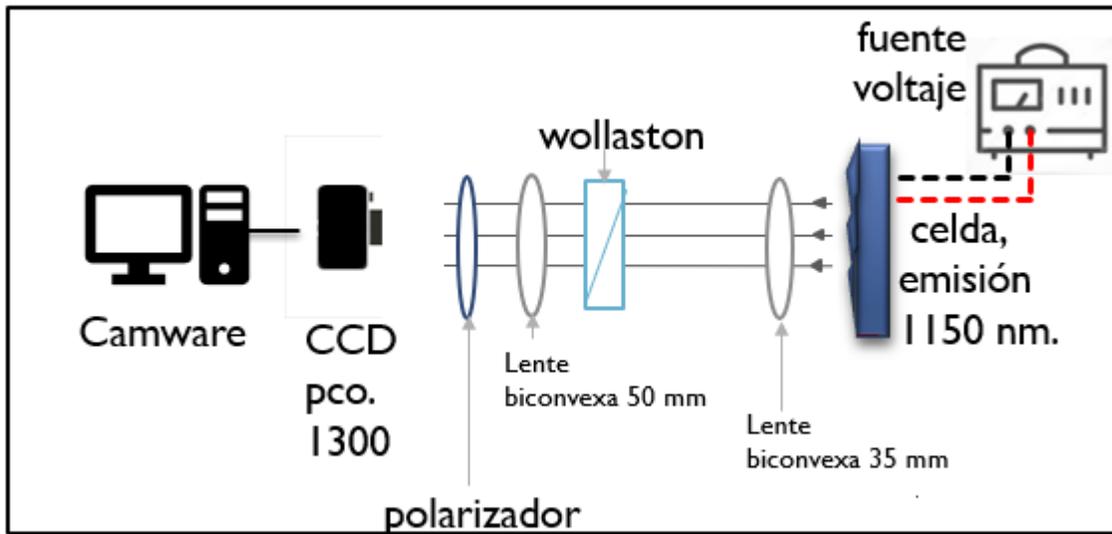


Figura 3.50 Arreglo shearográfico con objetivo 4x.

La colocación del filtro generó la atenuación de la intensidad de luz, por lo cual para aumentar la señal como menciona Boostandoost [14] se puede aumentar la temperatura en la celda ya que la banda prohibida del silicio se reduce y la señal de intensidad de electroluminiscencia se amplía. Por este motivo se aplicó calor a la celda con una pistola de aire, elevando la temperatura de 27 °C a 65 °C, como se muestra en la Figura 3.51 y Figura 3.52. A pesar del mejoramiento de señal luminiscente no se aprecian shearogramas.



Figura 3.51 Electroluminiscencia a 6 A a 27 °C.

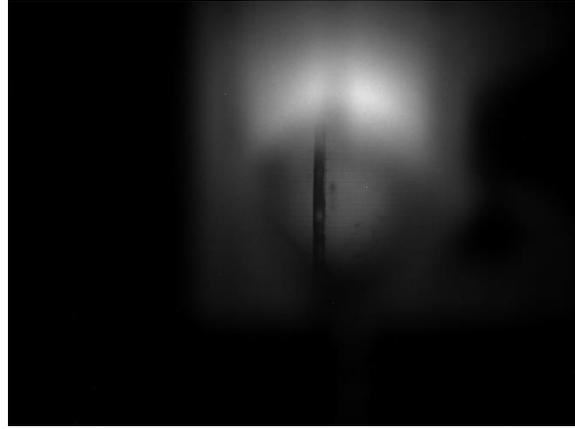


Figura 3.52 Electroluminiscencia a 6 A, con calor a 65 °C.

La electroluminiscencia también se probó en una celda de película delgada CdTe como se muestra en la siguiente Figura 3.53 colocando la lente Navitar y retirando el filtro, ya que el espectro de emisión de este tipo de celda esta entre los 460 y 540 nm. En la Figura 3.54 se observa la inyección de corriente en la celda, sin embargo, el shearograma no se pudo observar.

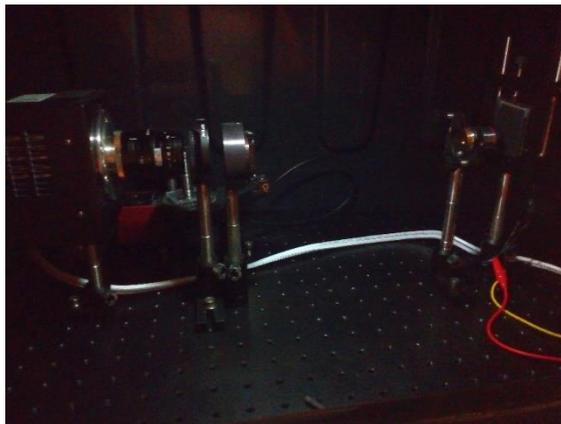


Figura 3.53 Arreglo de electroluminiscencia con celda de CdTe.

Se obtuvieron las siguientes imágenes a diferentes corrientes.



Celda CdTe a 12 V, 100mA



Celda CdTe a 12 V, 200 mA



Celda CdTe a 12 V, a 300 mA

Figura 3.54 Inyección de corriente en celda CdTe.

Uno de los problemas que se perciben en el análisis shearográfico con luz electroluminiscente, es que se debe contar con una luz coherente. La celda no emite este tipo de luz debido a que tiene un espectro de emisión amplio. Para ello es necesario tomar la longitud de onda de mayor luminiscencia emitida o seleccionar una longitud específica, el uso del filtro FB1100-10 puede ser implementado y cuando se cambian los ángulos de este filtro se puede seleccionar una longitud de onda cercana, sin embargo la transmitancia baja; para ello se caracterizó el filtro en el espectrofotómetro Cary 60 UV-VIS, con un muestreo de longitud de onda de 1099 a 988 nm, de 0 a 45 grados con muestreos de 5° como se observa en la Figura 3.55.

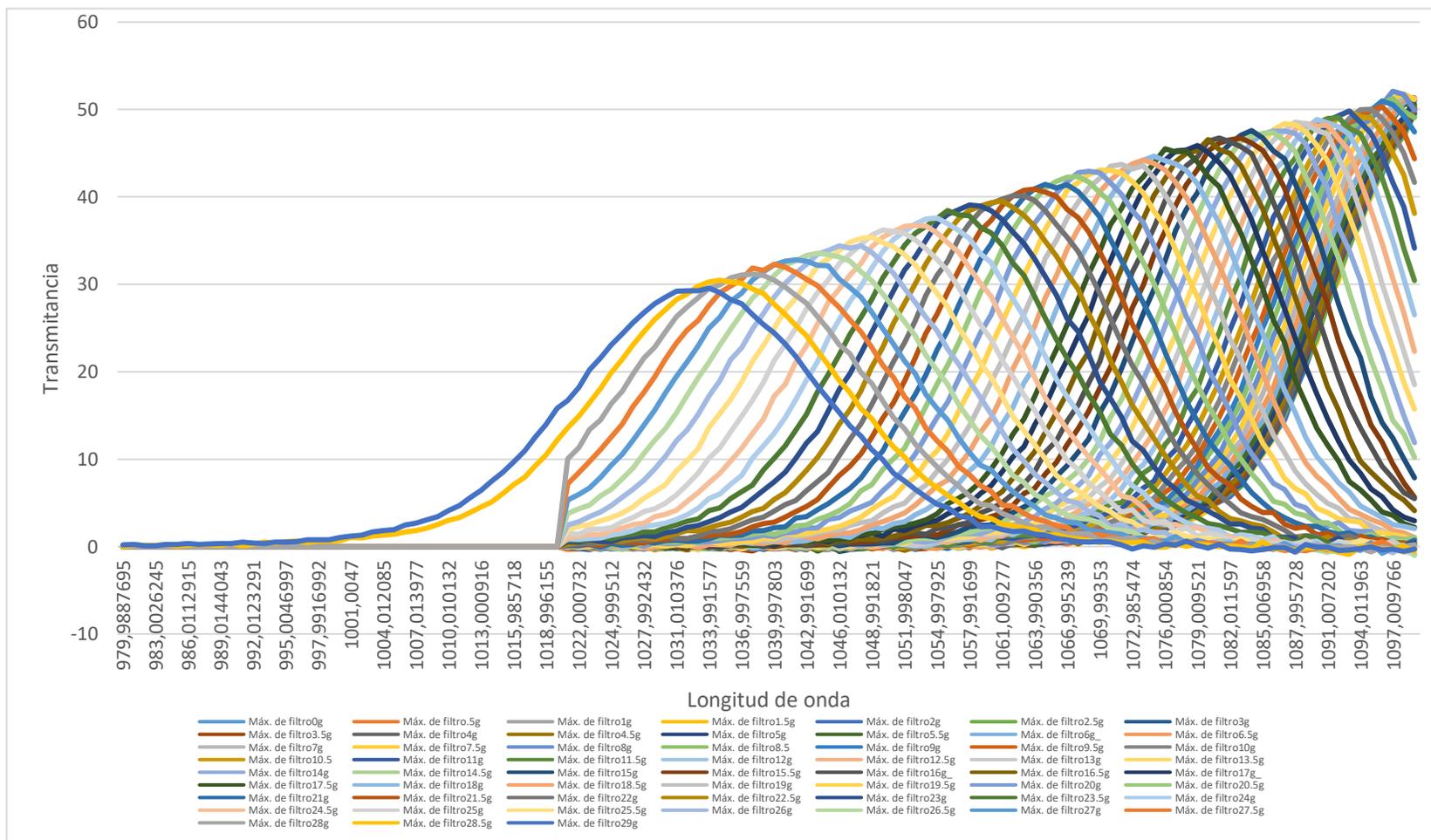


Figura 3.55 Transmitancia por ángulos en filtro FB 1100-10.

Otro problema que se presenta es que se observa una zona amplia de la celda con emisiones a varias longitudes de onda y dirección. Para ello se pretende solo analizar una zona puntual de esta a partir del uso de diferentes tipos de objetivos que logren la magnificación y coleccionar la luz difusa emitida por la celda, así como el uso de un pinhole que sirva para mantener los haces paralelos al eje de propagación, disminuyendo el ángulo de dispersión.

Para la adquisición de imágenes es necesario contar con una cámara lineal para el infrarrojo de onda corta (SWIR) ya que el sensor tiene un rango de longitud de onda de 950 nm a 1700 nm, y esto nos permitirá tener mayor sensibilidad. Muchas de estas cámaras cuentan con un sistema de enfriamiento, puesto que al manejar largos tiempos de uso de la cámara estas se llegan a calentar. Así mismo cuando se trabajan con tiempos de exposición bajos, este calor se traduce en forma de ruido en las imágenes.

3.2.4 Pruebas de factibilidad.

En la optimización de la shearografía con luz de electroluminiscencia, se pudo observar un amplio contenido espectral el cual se limitó colocando un filtro de 1100 nm. La señal se atenuó y esto se vio reflejado en la baja detección de señal en la cámara, por lo que se tuvo que cambiar los niveles de ganancia para recuperar la señal. El mejoramiento de esta se experimentó aumentando la temperatura de la celda, sin embargo, la señal de interferometría no fue detectada, y por este motivo no se considera factible con los arreglos experimentados, pero se propone el uso de una cámara con un rango de sensibilidad mayor como la SWIR para la colección de longitudes de onda cercanas a 1100 nm, así como el intercambio de filtros para analizar longitudes de onda específicas.

CAPÍTULO 4 PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN

Derivado de las pruebas que se realizaron en el prototipo óptico de shearografía con luz de electroluminiscencia se exploraron las perspectivas de aprovechamiento de contenido espectral, dependencia de temperatura en electroluminiscencia y distorsión armónica total.

4.1 Análisis de electroluminiscencia por análisis de armónicos.

Se puede demostrar que cualquier forma de onda periódica (repetitiva) puede ser representada como una serie de ondas senoidales de diferentes frecuencias y fases, constituyendo el llamado espectro armónicos de la onda. La frecuencia de la onda senoidal predominante se denomina fundamental y las frecuencias del resto de la onda (armónicos) son un múltiplo entero de esta.

En un sistema equilibrado, la onda está centrada en torno a cero, y los armónicos son múltiplos sobrantes del fundamental.

Las gráficas de los espectros de líneas nos permiten observar con facilidad, el valor de los armónicos de mayor influencia en la conformación de la onda y que en muchas ocasiones es deseable eliminar.

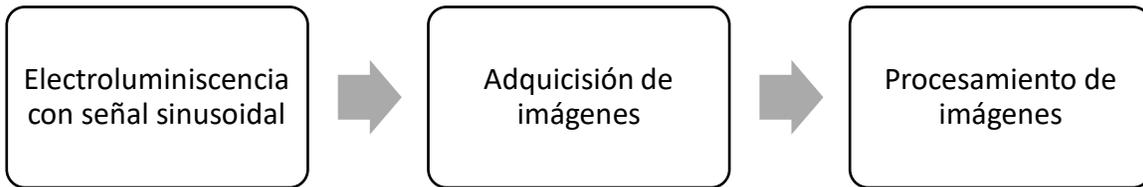
Distorsión de la forma de onda:

Las ondas de voltaje y de corriente en realidad no son perfectamente senoidales, sino que presentan una cierta distorsión debido a la existencia de armónicos. Así, la distorsión armónica de voltaje se define como la desviación permanente de la forma de onda caracterizada, a partir del desarrollo en serie de Fourier, para caracterizarla se define la distorsión armónica total (DAT), de una onda de voltaje alterna como la relación en tanto por ciento entre la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las amplitudes de los armónicos que los contiene (A_i) y la amplitud de la onda fundamental (A_1). La DAT es un parámetro que determina cuanto se aleja una onda dada respecto a una onda senoidal pura que, por definición, tiene una distorsión nula.

Partiendo de esta información, se propone realizar un estudio de imágenes de electroluminiscencia en celdas solares monocristalinas, para analizar las zonas que en el estudio de electroluminiscencia se muestran como dañadas o de poca actividad y conocer

cómo se comporta la señal senoidal inyectada en la celda que genera el fenómeno de electroluminiscencia.

Para ellos se siguen las siguientes fases:



En cuanto a la primera fase, la electroluminiscencia depende de la corriente que es inyectada. De acuerdo con las especificaciones del proveedor “Big sun” la I_{sc} es de 9.42 amperes, y para ello se implementa un circuito regulador de alta corriente (este se encuentra en Anexo 6), que permita el rango del suministro de corriente a una frecuencia determinada que será entregada a la celda, como se muestra en la siguiente Figura 4.1 y montado en la Figura 4.2.

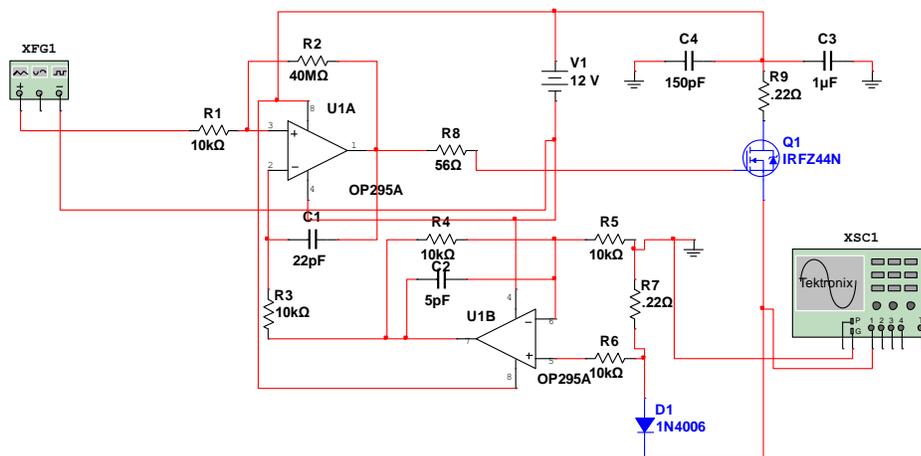


Figura 4.1 Circuito regulador de alta corriente.

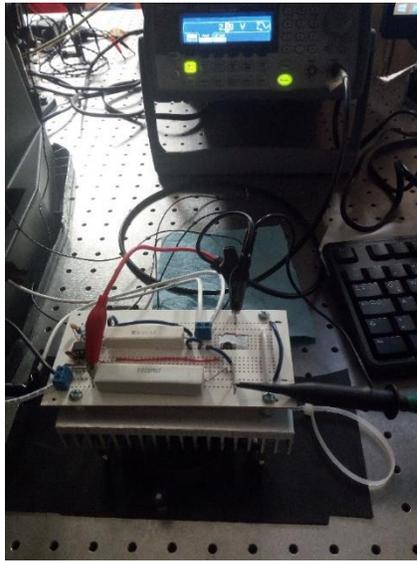


Figura 4.2 Prototipo de circuito de alta corriente.

Para regular la corriente de salida, esta es modulada por el voltaje que es aplicado a la entrada del op-amp, como se muestra en la siguiente Figura 4.3:

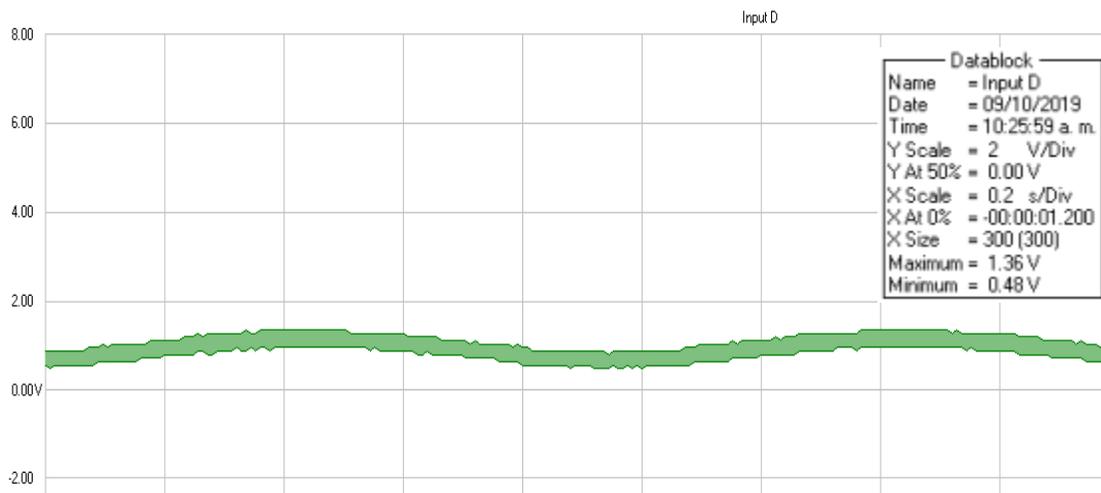


Figura 4.3 Modulaci3n de salida de voltaje.

De esta forma se puede regular la cantidad de corriente que se aplicará en la celda, como se observa en la Figura 4.4 con un barrido de 0 a 5 amperes.

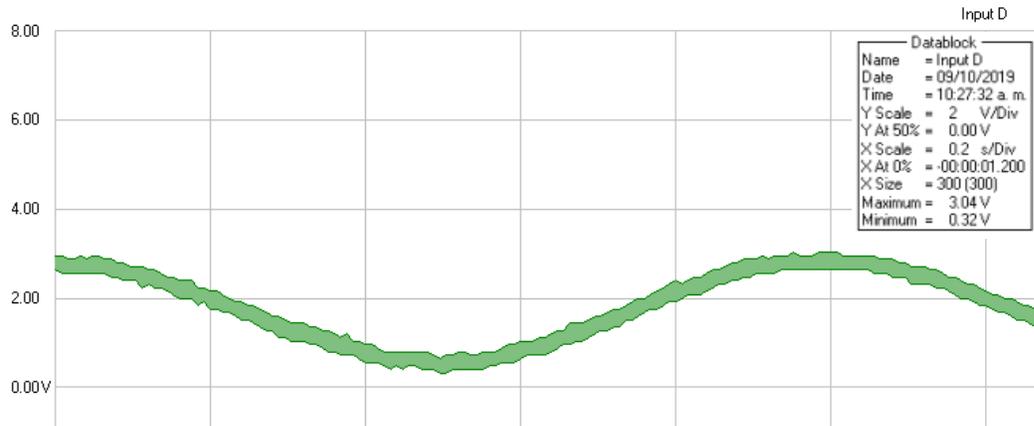


Figura 4.4 Inyección de corriente de 0 a 5 A.

La inyección de corriente fue realizada con una batería CTX14-BS LTH, la cual nos proporciona 12 V y 12 Ah, con el fin de mantener una señal con menor ruido y también se usó la fuente BK Precision 1901B.

Para la adquisición de imágenes se cuenta con una zona aislada de la luz ambiente y una cámara Flir Blackfly modelo BFS- U3-32S4M, monocromática, y una lente Navitar SWIR-16, con pasa banda de longitud de onda de 700-1900 nanómetros y transmisión mayor a 75%, como se muestra en la siguiente Figura 4.5:

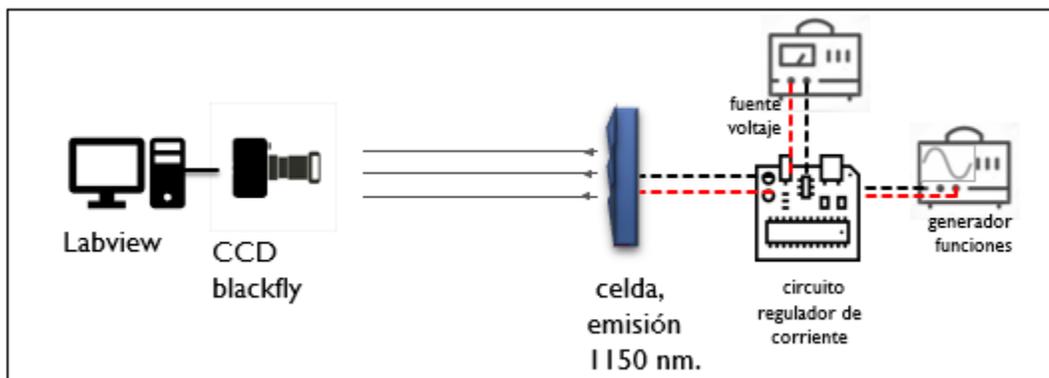


Figura 4.5 Arreglo para adquisición de electroluminiscencia.

En el programa LabVIEW, se configura la cámara en NIMAX con los parámetros de la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Configuración de parámetros CCD.

Parámetro	Valor
Formato de píxel.	Mono12pack
Adquisición de imágenes	1.0 Hz
Tiempo de exposición	1002002.0 microsegundos
Ganancia	5.79938 dB
Resolución	12 bits

La frecuencia de la señal sinusoidal inyectada es de 0.05 Hz y el rango de corriente suministrada fue de 4.3 A a 8 A. Para la adquisición de las imágenes se implementa el *programa adquisición de imágenes*, representado en la Figura 4.6. Para obtener un número de 15 ciclos se capturan 300 imágenes, y se guardan en formato PNG.

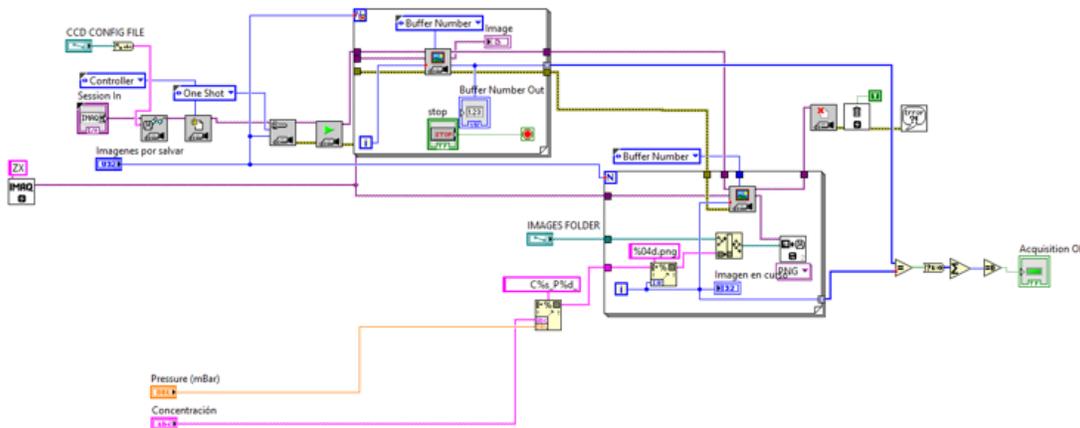


Figura 4.6 Diagrama de bloques para el programa adquisición de imágenes.

Una vez obtenidas las imágenes, se implementa el programa *abrir imágenes*, representado en la Figura 4.7, el cual analiza una zona específica de la celda. En este caso se selecciona un píxel cercano a una zona que la electroluminiscencia muestra como activa.

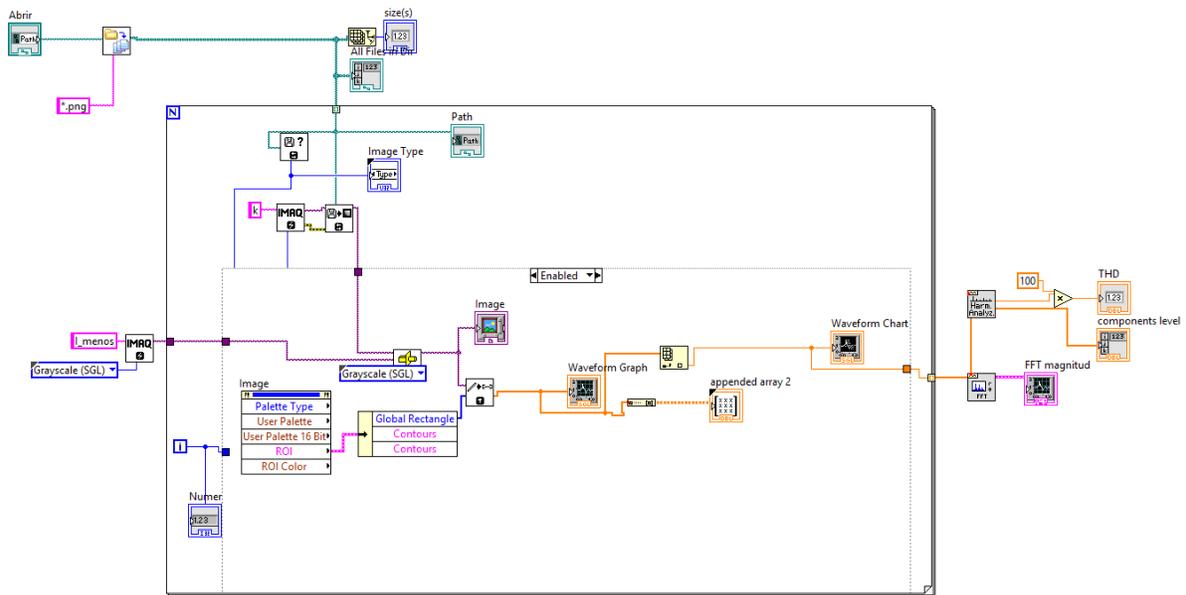


Figura 4.7 Diagrama de bloques para el programa abrir imágenes.

Al reconstruir la señal inyectada se observa ruido, como se muestra en la siguiente Figura 4.8:

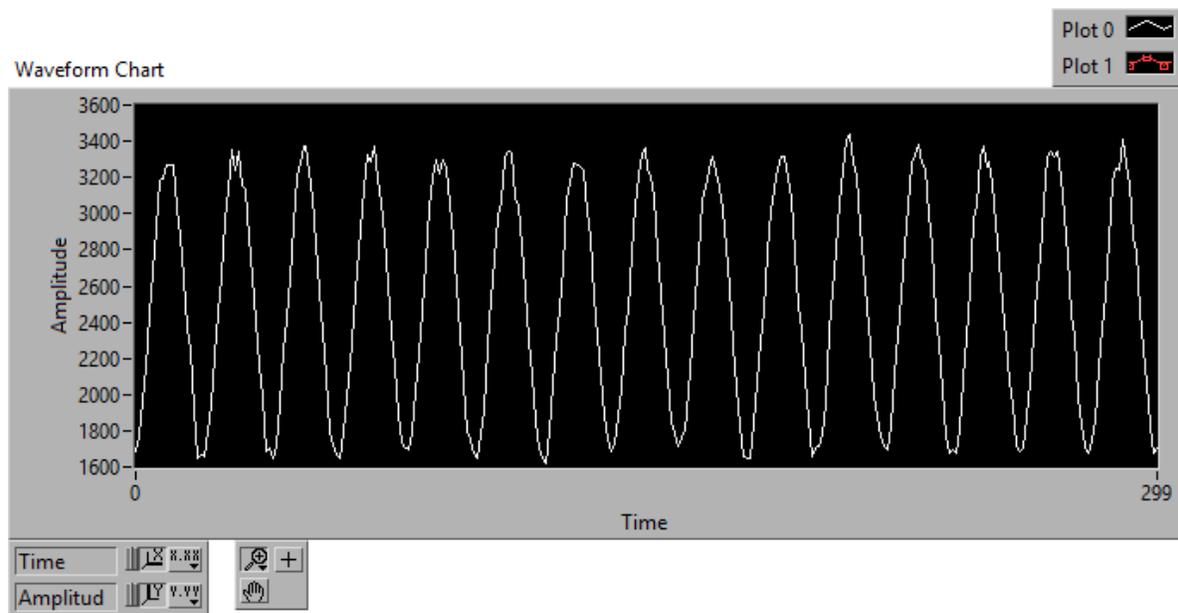


Figura 4.8 Reconstrucción de señal a 0.05 Hz sin filtrar.

Para disminuirlo se implementa un filtro spline, con un factor de suavizado de 0.8. El programa implementado realiza el filtro de imágenes de la carpeta en donde se alojan las imágenes adquiridas, como se muestra en la Figura 4.9:

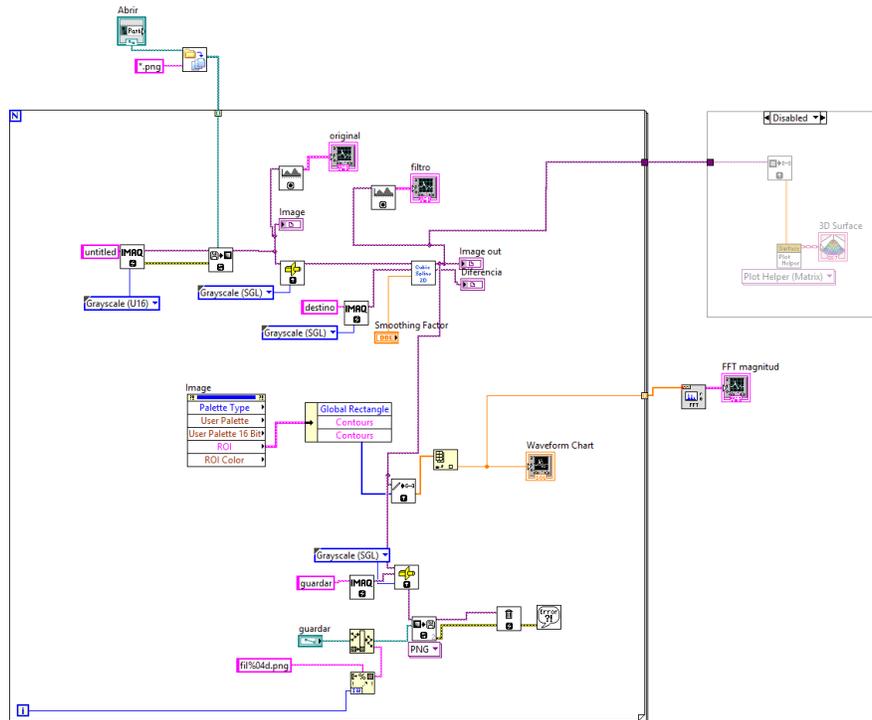


Figura 4.9 Diagrama de bloques de la aplicación de filtro en imágenes.

En la Figura 4.10 se puede observar el histograma de la imagen sin filtrar y en la Figura 4.11 cuando se aplica el filtro en una imagen.

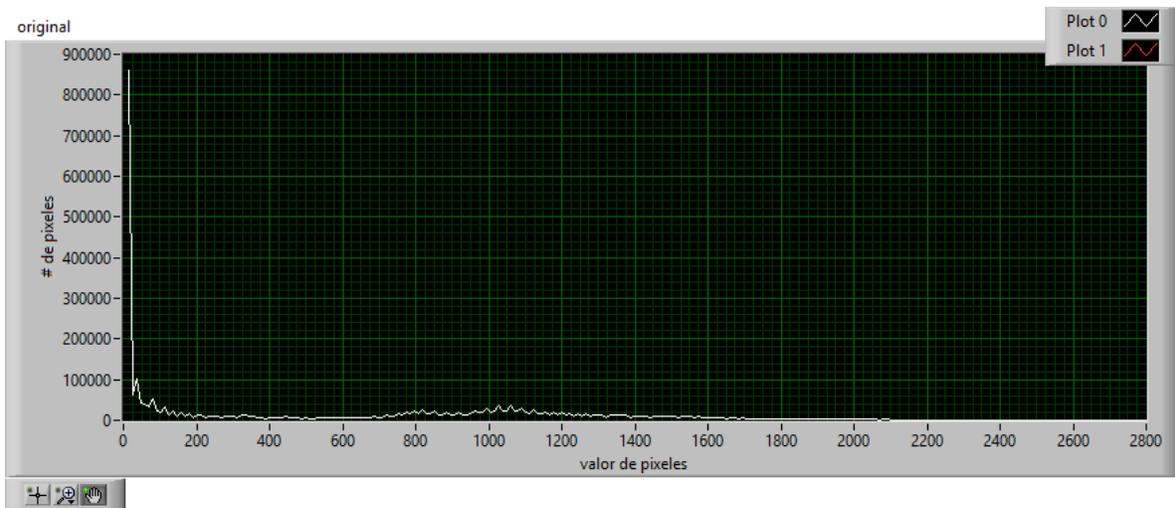


Figura 4.10 Histograma de imagen sin filtrar.

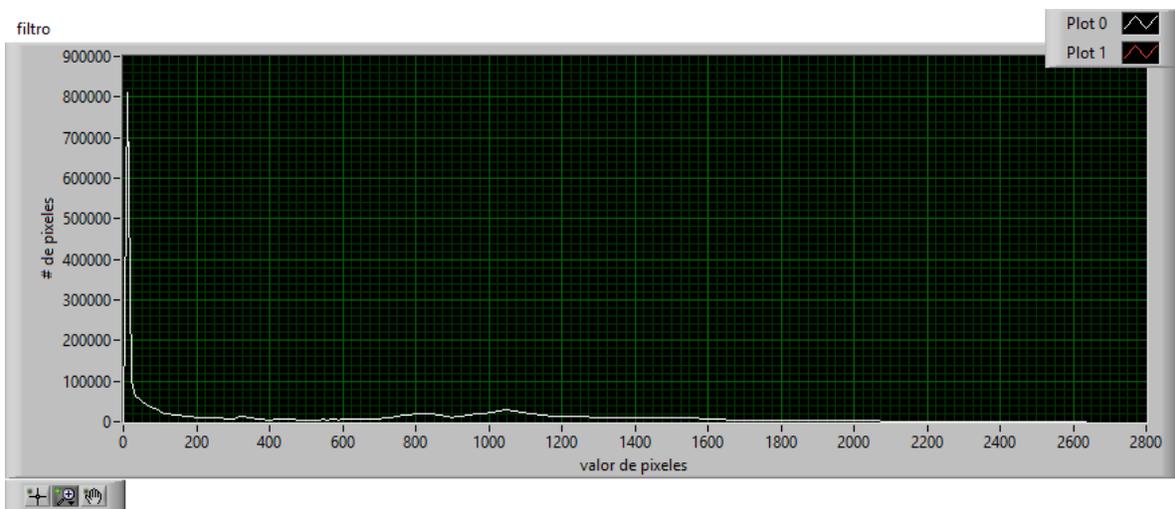


Figura 4.11 Histograma de imagen filtrada.

Al guardar las nuevas imágenes filtradas se vuelve a reconstruir un píxel y se observa en la Figura 4.12 menor ruido. De esta señal se aplica un análisis de Fourier para mostrar el espectro armónico de la onda en la Figura 4.13, y obtener algunos datos como la frecuencia fundamental detectada, la amplitud de los armónicos y el porcentaje de distorsión armónica total:

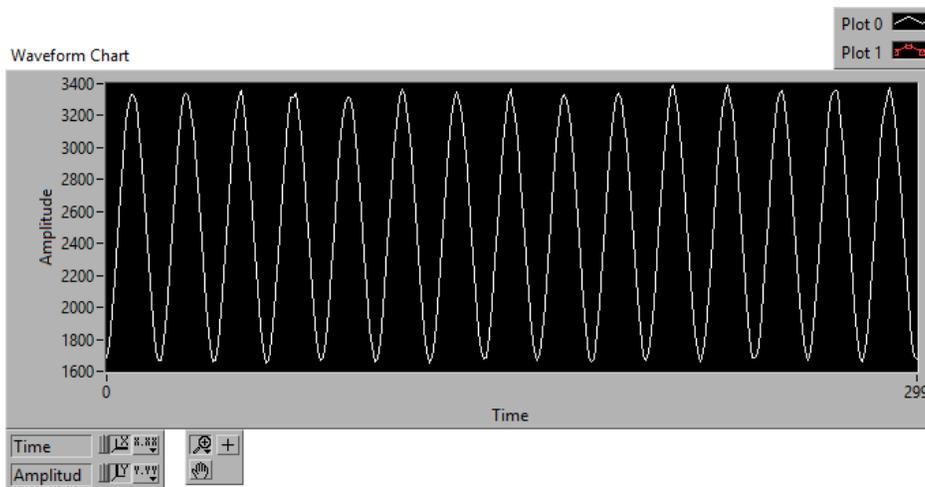


Figura 4.12 Reconstrucción de la señal de un píxel en imágenes filtradas

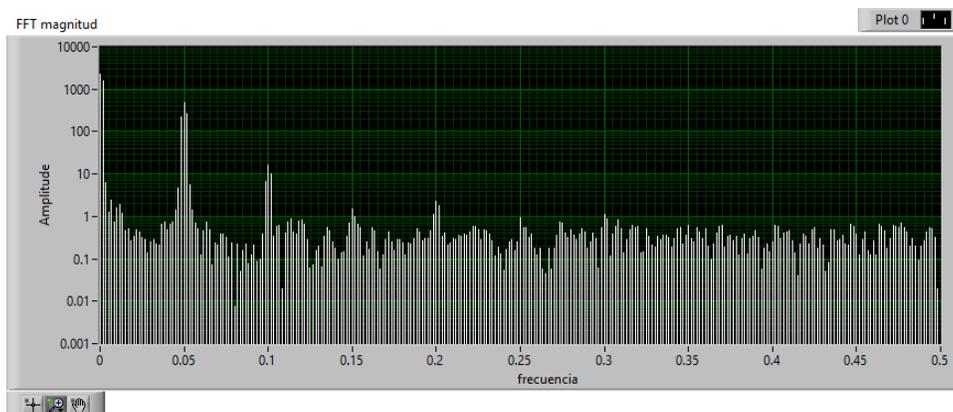


Figura 4.13 Espectro armónico de un píxel.

De este análisis, se puede observar que al seleccionar un píxel del área de la celda de la electroluminiscencia de la Figura 4.14, la señal reconstruida se observa en la Figura 4.15 en donde como región activa se observa una DAT de 3.51%, y una frecuencia detectada

de 0.05011Hz como se muestra en la Figura 4.16. Así mismo en la Tabla 4.2 se muestran los niveles de armónicos:



Figura 4.14 Selección de región de interés en una imagen de electroluminiscencia activa en zona 1.

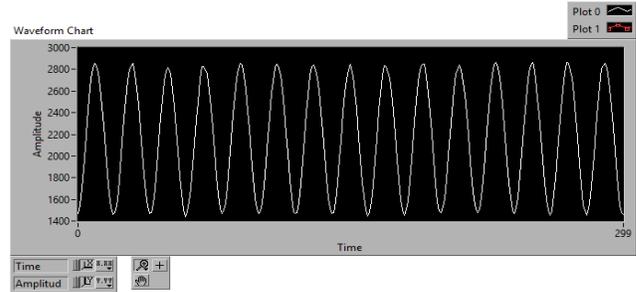


Figura 4.15 Señal reconstruida de un píxel en ROI 1.

Tabla 4.2 Niveles de armónicos para ROI de zona 1.

Armónico	Niveles
1	695.18
2	22.27
3	4.74

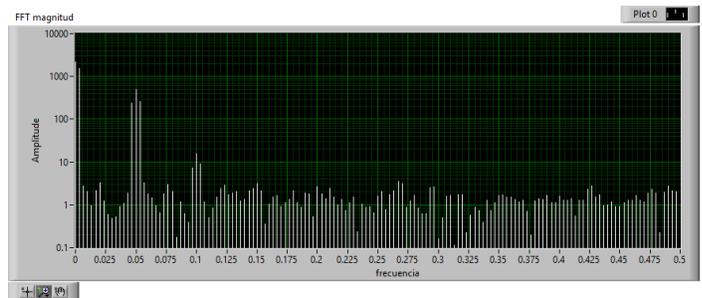


Figura 4.16 Espectro de armónicos para ROI zona 1.

Otra zona activa seleccionada de la celda se observa en Figura 4.18, que de acuerdo con la señal reconstruida de la Figura 4.18 se observa un DAT de 2.42%, y una frecuencia detectada 0.05012 Hz, con armónicos de la Tabla 4.3 y su espectro de frecuencias en la Figura 4.19:

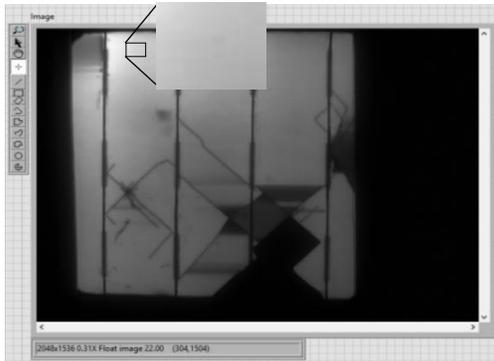


Figura 4.18 Selección de región de interés en una imagen de electroluminiscencia, en zona 2.

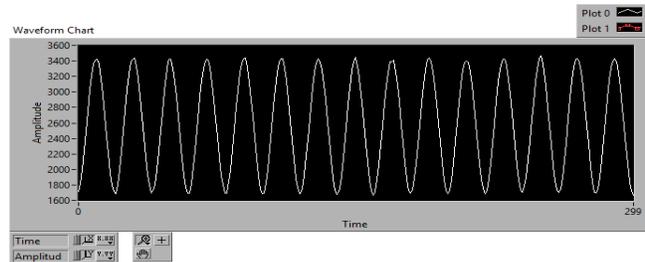


Figura 4.17 Señal reconstruida en un píxel en zona 2.

Tabla 4.3 Niveles de armónicos para zona 2.

Armónico	Niveles
1	870.06
2	18.26
3	7.01

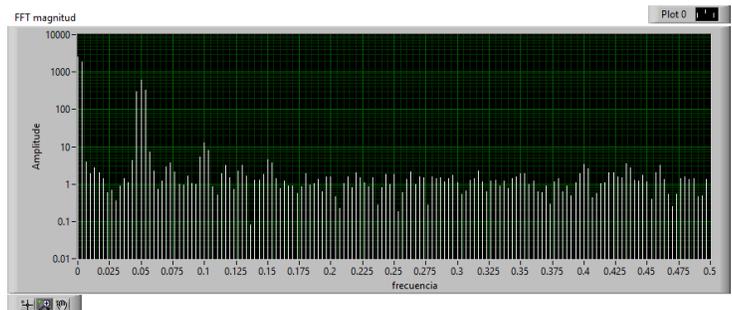


Figura 4.19 Espectro de armónicos para ROI para zona 2.

Para otra zona de interés observada en la Figura 4.20 muestra con poca actividad en electroluminiscencia se reconstruye la señal en la Figura 4.21 y se observa un DAT de 11.22%, frecuencia detectada 0.05013 Hz en la Tabla 4.4 y espectro en la Figura 4.22:

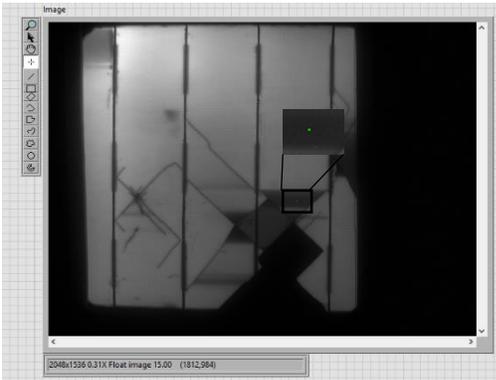


Figura 4.21 Selección de región de interés en una imagen de electroluminiscencia en zona 3 poco activa.

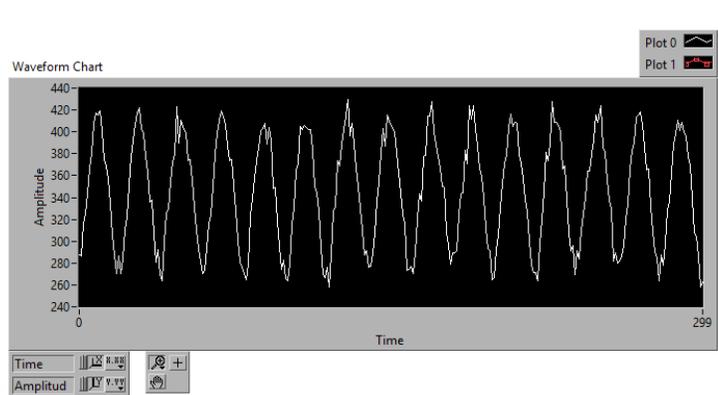


Figura 4.20 Señal reconstruida de un píxel de zona 3.

Tabla 4.4 Niveles de armónicos para ROI zona 3.

Armónico	Niveles
1	68.89
2	4.95
3	3.08

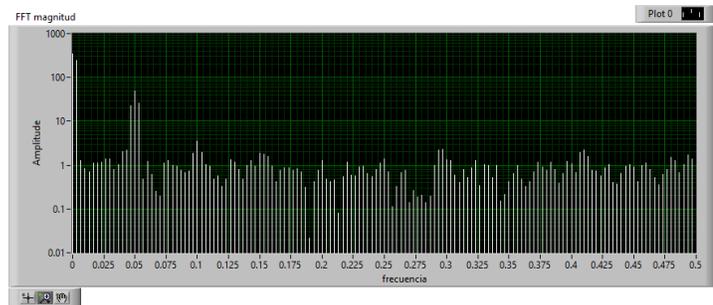


Figura 4.22 Espectro de armónicos para ROI para zona 3.

En una zona severamente rota de la Figura 4.23, y donde es unida solo por el ribbon se observa la reconstrucción de la señal en la Figura 4.24 y obtiene un DAT del 10.14% con frecuencia detectada 0.05017 Hz , los niveles de armónicos se observan en la Tabla 4.5 y el espectro en la Figura 4.25.

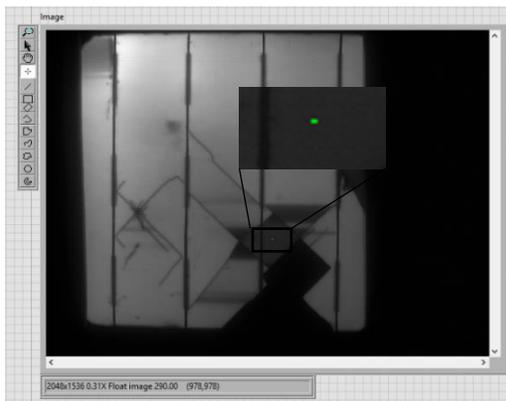


Figura 4.24 Selección de región de interés en una imagen de electroluminiscencia, zona 4.

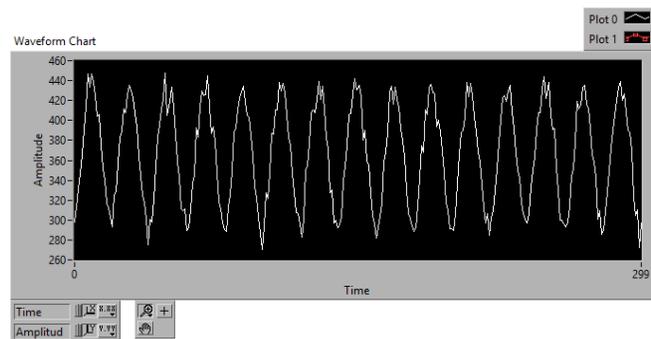


Figura 4.23 Señal reconstruida de un píxel, para zona 4.

Tabla 4.5 Niveles de armónicos para ROI en zona 4.

Armónico	Niveles
1	70.33
2	5.43
3	2.26

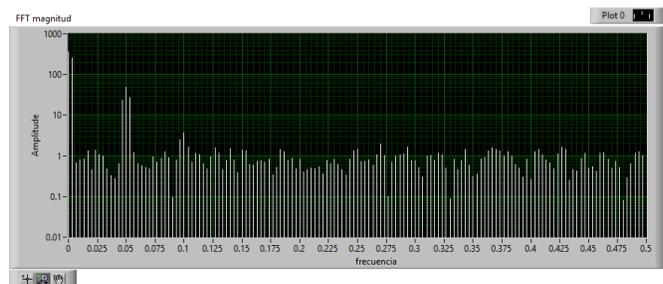


Figura 4.25 Espectro de armónicos para ROI, para zona 4.

Otra zona de interés se observó al analizar un píxel de una fractura de la Figura 4.27. La señal reconstruida se observa en la Figura 4.26, y se obtiene un DAT de 4.56%, frecuencia detectada 0.05012 Hz con datos de nivel de armónicos en la Tabla 4.6 y espectro de armónicos en la Figura 4.28.



Figura 4.27 Selección de región de interés en una imagen de electroluminiscencia, sobre una fisura para zona 5.

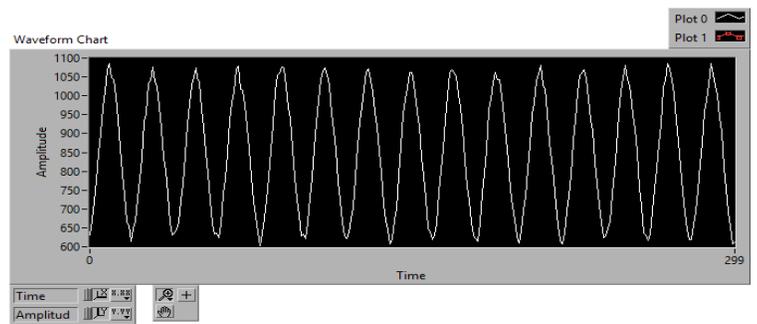


Figura 4.26 Señal reconstruida de un píxel, para zona 5.

Tabla 4.6 Niveles de armónicos para zona 5.

Armónico	Niveles
1	221.86
2	8.74
3	2.34

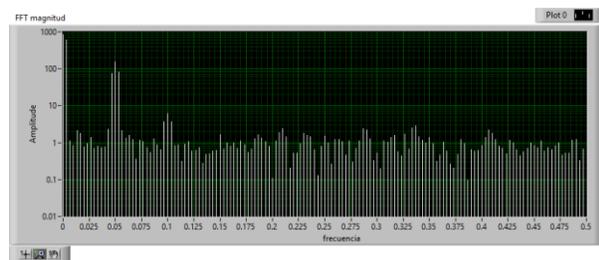


Figura 4.28 Espectro de armónicos para zona 5.

Por lo tanto, se puede observar que se requieren dos fracturas paralelas para desactivar severamente una zona de la celda, mostrando en electroluminiscencia unos pixeles oscuros y una DAT mayor a 10%. Para una fisura solo se desactiva levemente la ruta de la grieta y no la zona cercana a esta, además de presentar una DAT menor a 5%. Las zonas que se encuentran altamente activas en electroluminiscencia muestran mayor amplitud en los armónicos. Con este tipo de análisis se puede conocer la calidad de las zonas que aparentemente y sin automatizar, la electroluminiscencia considera como activas.

Por otro lado, se realizó la visualización de la DAT con el fin de analizar la distorsión armónica píxel por píxel del área seleccionada. En la Figura 4.29 de electroluminiscencia se selecciona un área delimitada en color verde de 584 x 720 pixeles, en la que se pueden apreciar zonas oscuras de baja actividad y fracturas.

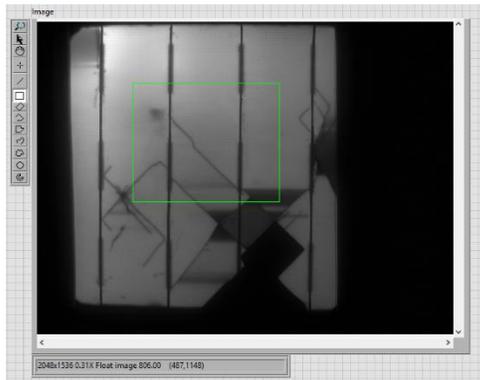


Figura 4.29 Selección de zona de interés.

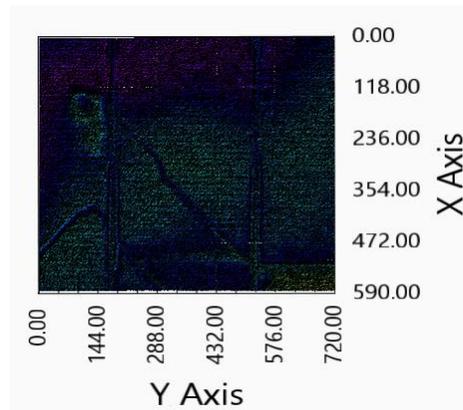


Figura 4.30 DAT en zona de interés.

Al realizar el análisis de distorsión total, se puede observar la imagen con mayor detalle píxel por píxel. Esto hace posible convertir la imagen que se muestra en electroluminiscencia en términos de DAT en la **Figura 4.30** y sus valores de DAT para el eje X en la **Figura 4.32** y eje Y en la **Figura 4.31**.

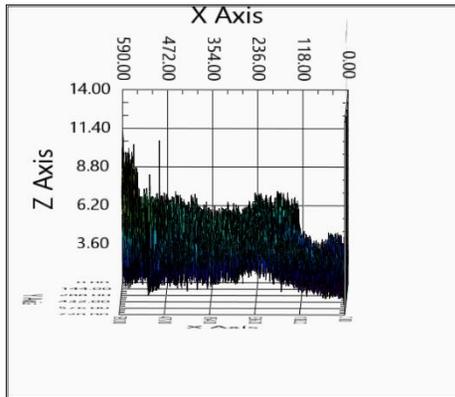


Figura 4.32 DAT en eje X de zona de interés.

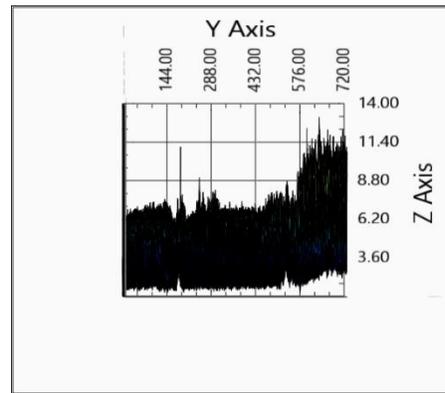


Figura 4.31 DAT en eje Y de zona de interés.

En la **Figura 4.34** **Figura 4.33** podemos observar otra zona seleccionada en contorno verde de 186 x 134 píxeles. En la parte inferior hay una rotura que en electroluminiscencia se observa con señal débil, así mismo en la izquierda se observa una zona difuminada con débil iluminación. Al realizar una gráfica de superficie en 3D de DAT, en la **Figura 4.33**, podemos observar que en ambas zonas se reportan alto porcentaje de distorsión de 7.57% y en zonas uniformemente iluminadas en electroluminiscencia el DAT alcanza hasta 4.1866%, también se puede observar que en la periferia de estas zonas hay 6.32% y 5.04% de DAT presentados en la **Figura 4.35** y **Figura 4.36** en eje X y Y respectivamente.

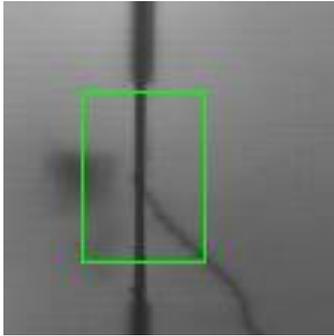


Figura 4.34 Zona de interés con fisura.

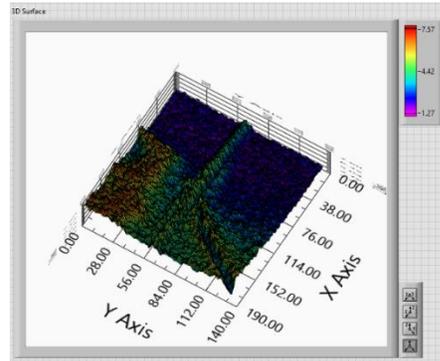


Figura 4.33 Zona de interés con fisura. DAT de superficie de zona de interés.

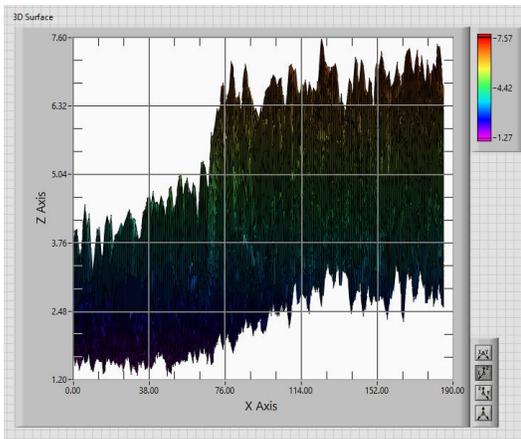


Figura 4.35 Datos de DAT en eje X.

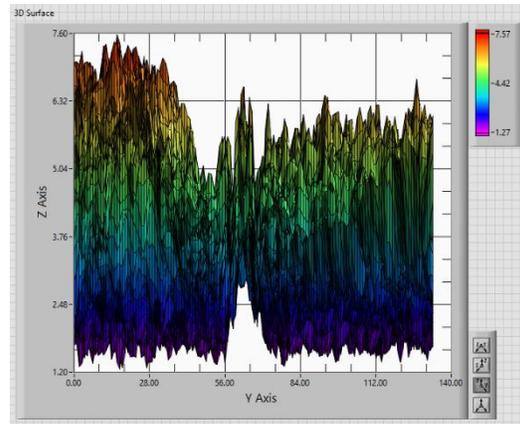


Figura 4.36 Datos de DAT en eje Y.

En otra área, de 273 x 72 pixeles de la celda cerca del pin de voltaje (Figura 4.37), podemos observar como también se aprecia una distorsión. Cabe mencionar que en los estudios de Kampwerth [42] se revela que la resistencia es mayor en la vecindad del pin de voltaje, y también agrega que una característica importante a considerar es cómo la celda es contactada (soldadura aplicada) ya que implica variaciones en la resistencia; esto se puede observar en la DAT que se presenta en la Figura 4.38. En la Figura 4.39

se observa el DAT del eje X , en la Figura 4.40 en el eje Y se registra hasta un 5.03% de DAT y en zonas uniformemente iluminadas hasta 1.74% de DAT.

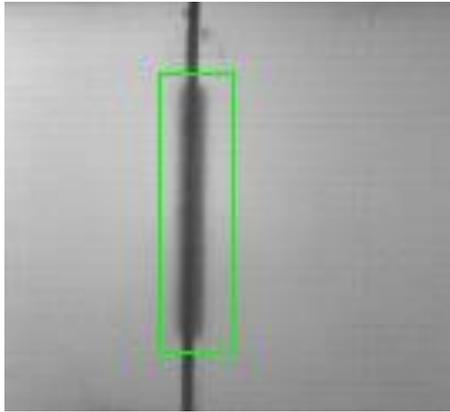


Figura 4.37 Zona de interés en pin de voltaje.

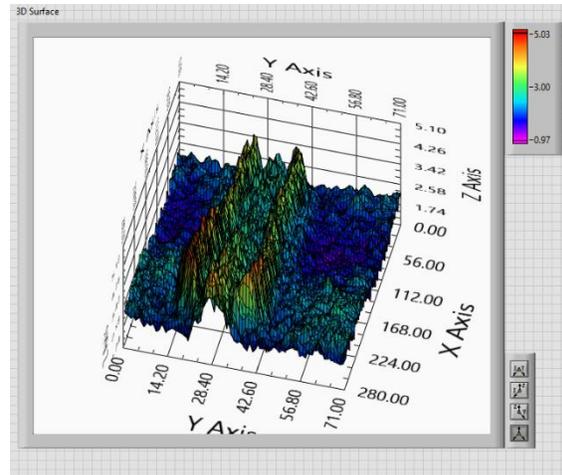


Figura 4.38 DAT de superficie de zona de interés.

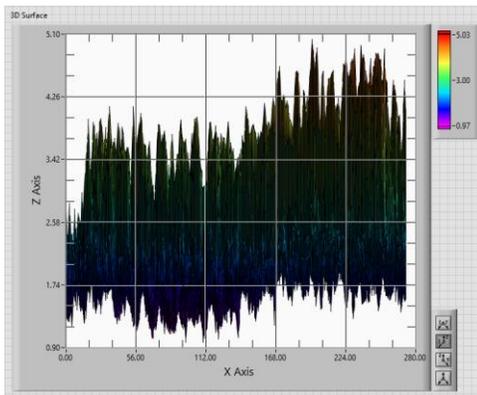


Figura 4.39 Datos de DAT en eje X.

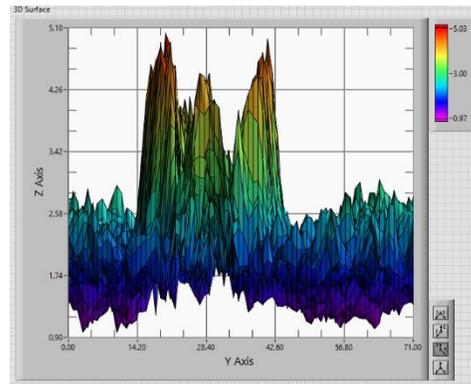


Figura 4.40 Datos de DAT en eje Y.

En otra zona de 161 x 197 píxeles de la **Figura 4.42** podemos observar cómo se comportan las áreas de baja iluminación en electroluminiscencia cerca del pad, donde se selecciona parte de la barra colectora y una fisura. Las zonas con baja iluminación reportan 7.46% de DAT, como se observa en la **Figura 4.41** y su distribución en el eje Y en la **Figura 4.44** registrando un DAT máximo del 12.38 % y mínimo de 2.12 % y vista del eje X en la **Figura 4.43**.

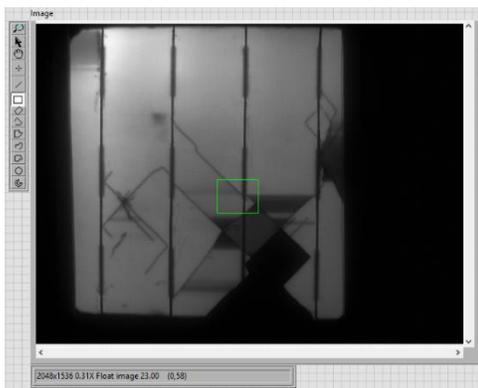


Figura 4.42 Zona de interés. DAT de superficie en zona de interés

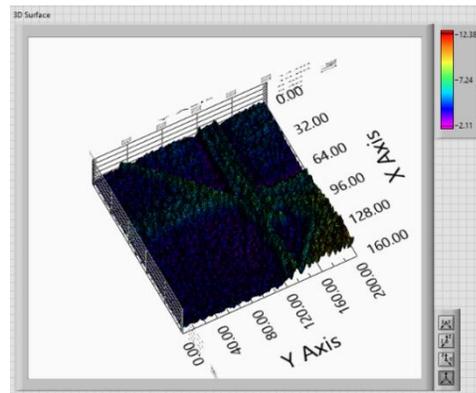


Figura 4.41 DAT de superficie en zona de interés.

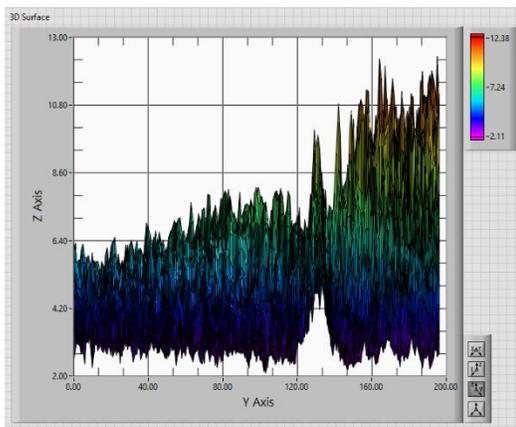


Figura 4.44 Datos de DAT en eje Y.

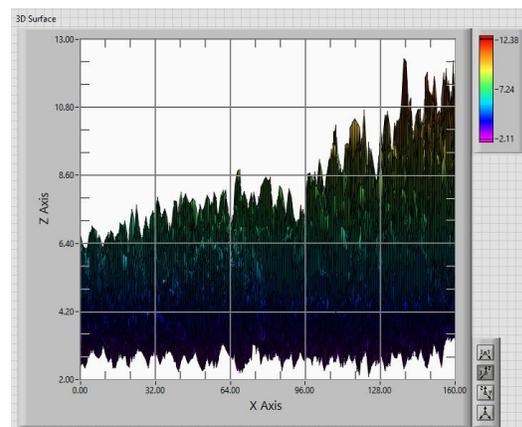


Figura 4.43 Datos de DAT en eje X.

4.2 Electroluminiscencia con variación de temperatura

Para las empresas productoras de paneles solares es de suma importancia la necesidad de reducir los defectos, lo cual esto lleva a mejorar los procesos de calidad, como afirma Alfredo [43]. Dentro del proceso de producción se presentan algunos problemas los cuales se ven reflejados en el producto terminado, así como en la vida útil del módulo. Para algunos de estos problemas existen métodos que durante el proceso permiten detectarlos y corregirlos tales como: mala soldadura, celdas rotas o defectos en la materia prima, sin embargo, hay defectos que solo se pueden detectar con el paso del tiempo y el deterioro del módulo. Hasta el momento, la técnica de electroluminiscencia es usada en líneas de producción debido a su practicidad y que revela información a los proveedores de paneles solares para gestionar temas de garantía; derivado de esto, la IEC (Comisión internacional de electrotecnia) en 2018 ha creado una hoja técnica TS 60904-13:2018 “Electroluminiscencia de paneles solares” [44], la cual especifica los métodos para:

- Capturar imágenes de módulos fotovoltaicos.
- Procesar imágenes para obtener métricas acerca de las imágenes tomadas en términos cuantitativos.
- Proporcionar orientación para interpretar cualitativamente las imágenes y las características que se observan en ellas.

Lo anterior, con el fin de estandarizar el proceso en la creciente industria fotovoltaica; por este motivo es importante profundizar en la exploración de los datos que la electroluminiscencia puede ofrecer.

La literatura nos indica que la señal de electroluminiscencia puede variar por la difusión local, y de acuerdo a Kampwerth [42] por la recombinación radiactiva. Esta constante puede ser medida experimentalmente por una intensidad de iluminación dada y por cada píxel si es tomada la imagen en condiciones de corto circuito.

También, en la investigación de Karcher [45] la variación en la intensidad de la electroluminiscencia se debe por la cantidad de voltaje que pueda ser regulado, y puede ser analizado cuando se modifican las variables de temperatura y de irradiancia. Al medir el espectro de electroluminiscencia de la celda se puede tener acceso a importantes parámetros de la subcelda, pues en celdas de multiunión, cada sub celda emite fotones

distribuidos a energías cercanas al bandgap. Cada unión emite un flujo de fotones el cual es directamente relacionado con su EQE (eficiencia cuántica externa), como se muestra en la **Figura 4.45**.

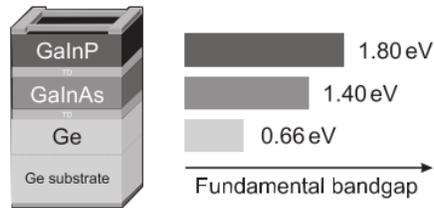


Figura 4.45 Esquema de la una estructura de celda multiunión y sus bandgaps fundamentales a 298 K, obtenido de Karcher [45].

En la mencionada investigación, se propone un control de temperatura realizada con una celda peltier y un sensor de temperatura RTD montado en una placa de cobre adyacente a la celda solar, donde la temperatura es cercana a la temperatura de la celda, regulando en el rango de 25 °C a 170 °C. Adicionalmente, se cuenta con mini espectrómetros los cuales son acoplados a la luz que emite la celda y miden la luz a diferentes temperaturas, como se muestra en la **Figura 4.46**:

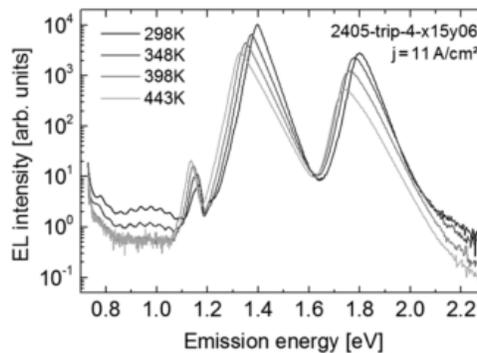


Figura 4.46 Emisión espectral de una celda de triple unión a una inyección de corriente de 11 A/cm² variando la temperatura, obtenido de Karcher [45].

Podemos observar que las características del espectro cambian con el aumento de temperatura. En otro estudio de Frazão [9] se muestran imágenes de electroluminiscencia en dos temperaturas diferentes las cuales son sustraídas y revelan más defectos que a simple vista no se pueden observar; una fisura detectada al centro del círculo A, en la Figura 4.47, es menos sensible a variaciones de temperatura y por lo tanto en la sustracción resulta en pequeñas diferencias. Sin embargo, los defectos son enfatizados en electroluminiscencia a altas temperaturas cuando el efecto de los extrínsecos se debilita. En esta inspección se pueden observar zonas oscuras que indican que la iluminación en esa zona no varió, pero en zonas iluminadas se reporta un cambio en la señal de luminiscencia que ha sido variada por la temperatura. Esto corresponde a los defectos intrínsecos asociados con los límites de grano que hay en la celda solar, como se muestra en la Figura 4.48:

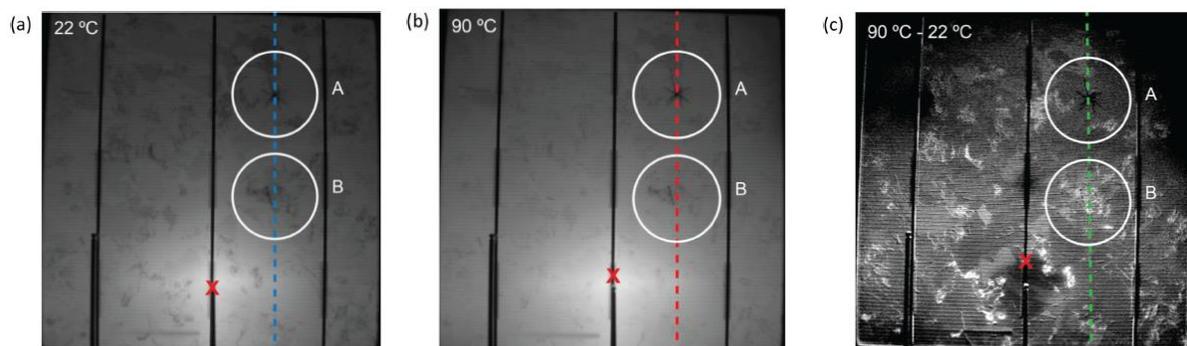


Figura 4.47 Imágenes de EL: a) 22°C, b) 90°C, c) resultado de la sustracción, obtenido de Frazão [9].

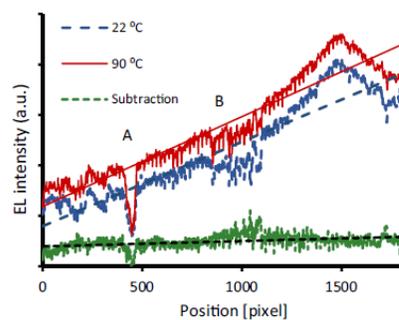


Figura 4.48 Variación de la señal de EL de una celda multicristalina, las líneas de tendencia son ajustes lineales por el método de mínimos cuadrados, obtenido de Frazão [9].

Así mismo, la degradación de paneles solares causa un excesivo sobrecalentamiento que resulta en la reducción de salida de potencia del panel y eventualmente causa un daño, por este motivo es necesario realizar un diagnóstico del panel. Otra técnica utilizada es la termografía infrarroja que no es destructiva y se obtiene información de puntos calientes.

En trabajos futuros, se puede llevar a cabo la convergencia de estas técnicas para hacer una correlación de temperatura, corriente aplicada y tipos de defectos en paneles solares. Estos datos extraídos se pueden aprovechar en la industria fotovoltaica y pueden ser importantes para el seguimiento de calidad, reportes, monitoreos y futuros mantenimientos más precisos, para reducir el número de paneles rechazados, ya que aquellos paneles que han sido rechazados posteriormente al encapsulado no se integran a los canales de distribución debido a que no aprueban parámetros de calidad en las celdas que aparentemente la señal de electroluminiscencia muestra como buenas. El desecho de estos materiales es importante desde el punto de vista económico y sustentable, ya que las celdas que reportan mala señal de electroluminiscencia no son recuperadas; si se realizara una caracterización de la calidad del panel este puede ser clasificado con otros parámetros de voltaje de salida y ofertarlo al mercado con otra estimación de tiempo de vida.

Se llevó a cabo una experimentación con el arreglo de electroluminiscencia en la Figura 4.49, el cual consta de una cámara CCD pico 1300 con lente navitar. Se inyecta corriente a la celda y se aplica aire caliente por la parte trasera. De esto se pudo observar como la señal de electroluminiscencia aumenta en la Figura 4.50. **Figura 4.50** Imagen a) celda a 31.4 °C, b) celda a 50.6 °C.

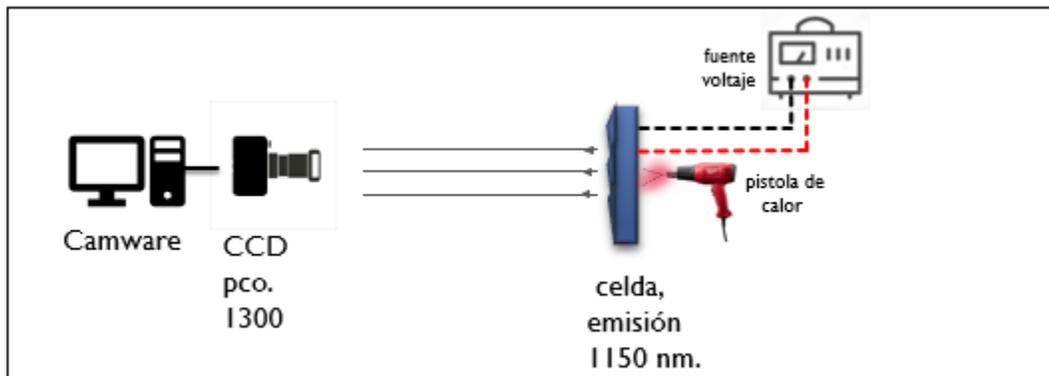


Figura 4.49 Arreglo de electroluminiscencia aplicando calor.



Figura 4.50 Imagen a) celda a 31.4 °C, b) celda a 50.6 °C.

Una incorporación a este arreglo, puede ser el uso de una almohadilla térmica (Figura 4.51), con un control de temperatura. El arreglo se muestra en la Figura 4.52. En la industria fotovoltaica se usa este material para precalentar las cadenas de celdas solares y disminuir el diferencial de temperatura que pudiera ocasionar microfracturas al momento de realizar la soldadura en las diferentes conexiones de la celda. El material intermedio

entre la almohadilla y la celda es un vidrio común como conductor térmico, que permite estabilidad al soldar.



Figura 4.51 Almohadilla térmica.

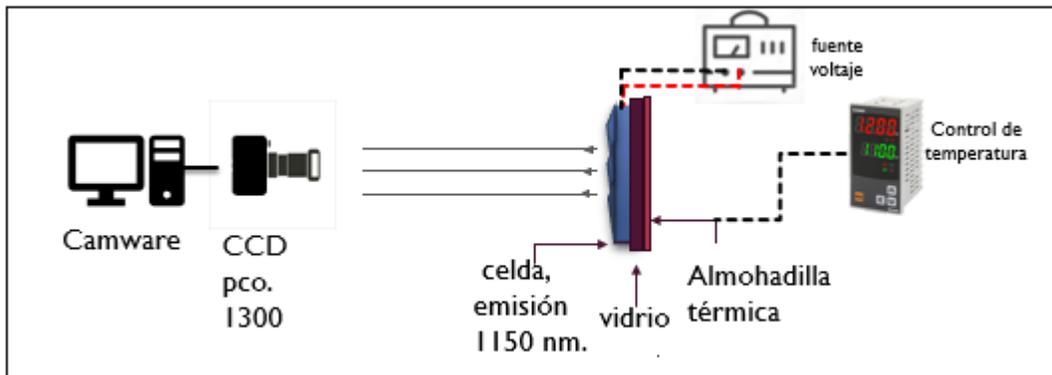


Figura 4.52 Arreglo con aplicación de calor usando almohadilla térmica.

4.3 Análisis de longitudes de onda emitidas por EL

Siguiendo el planteamiento anterior, referente a la importancia de detectar daños o información relevante de las celdas solares, se afirma en la investigación de Bothe [46] que la emisión de una celda solar multicristalina la podemos observar en el rango de los 1500 y 1700 nm. Usando imágenes de luminiscencia y termografía, se pueden correlacionar las áreas con mayor densidad de dislocación analizando la luminiscencia banda a banda, a través de una polarización directa o indirecta. Los beneficios de esta técnica de electroluminiscencia han sido positivos para el mercado de paneles solares, de

ahí que en el 2005 se introdujeron las cámaras especializadas en las líneas de producción de paneles solares.

Por otro lado, el efecto fotoeléctrico ocurre en el silicio en las uniones p-n, permitiendo a los electrones saltar la banda prohibida. La banda prohibida de un semiconductor decrece cuando incrementa la temperatura y por lo tanto menos energía es requerida para atravesarla. También cuando incrementa la temperatura, la densidad del fotón y consecuentemente la transición del fotón aumenta, resultando en una pérdida de voltaje; se puede visualizar con este tipo de información en las imágenes la precipitación de impurezas que ocurren en dislocaciones y otras imperfecciones del cristal. También es conocido que una alta concentración de dislocaciones resulta en una creciente área de recombinaciones y esto reduce el tiempo de vida.

En la investigación de Fuyuki [13] se menciona que las celdas solares que son polarizadas de forma directa, emiten luz infrarroja en la longitud de onda alrededor de los 1000 y 1200 nm, y esta intensidad refleja el número de portadores menores en las capas bases. De los datos de electroluminiscencia se pueden detectar los portadores minoritarios por difusión de longitud (tiempo de vida), velocidad de recombinación en la superficie y en las interfaces (propiedades del material intrínsecas), así como la ruptura de electrodos en la celda (defectos extrínsecos). Es importante destacar que para una caracterización detallada y una evaluación optimizada en las celdas solares, el parámetro del material más importante que debe ser analizado son los portadores minoritarios por difusión de longitud los cuales gobiernan la corriente de corto circuito y el voltaje de circuito abierto.

Como se mencionó, con el aumento de temperatura, las dislocaciones y propiedades de grano (deficiencia intrínseca) son más sensibles a la temperatura que las fisuras, dedos rotos o defectos inducidos por el proceso (deficiencia extrínseca). La variación en la medida de electroluminiscencia por temperatura puede ofrecer la diferencia en el contraste de intensidad de electroluminiscencia; estas diferencias pueden ser efectivas para distinguir las deficiencias solares intrínsecas y extrínsecas.

Debido a la amplia longitud de onda que emite la celda solar, es necesario solo coleccionar la longitud de onda de interés, y para ello se implementan algunos filtros que permiten delimitarla y reducir la perturbación de la luz circundante. Es importante destacar que

debe contarse con una CCD que tenga alta sensibilidad en el rango de emisión de la celda, pues al aumentar la temperatura la intensidad de EL aumentará y la longitud de onda puede moverse a los 1150 nm, como se muestra en el trabajo de Fuyuki [47]; sin embargo, la calidad en áreas específicas en imágenes de EL muestran poca información ya que son mostradas en una paleta de escala de grises, y esto dificulta la distinción y ordenamiento de aquellas áreas deficientes, como se muestra en la Figura 4.53:

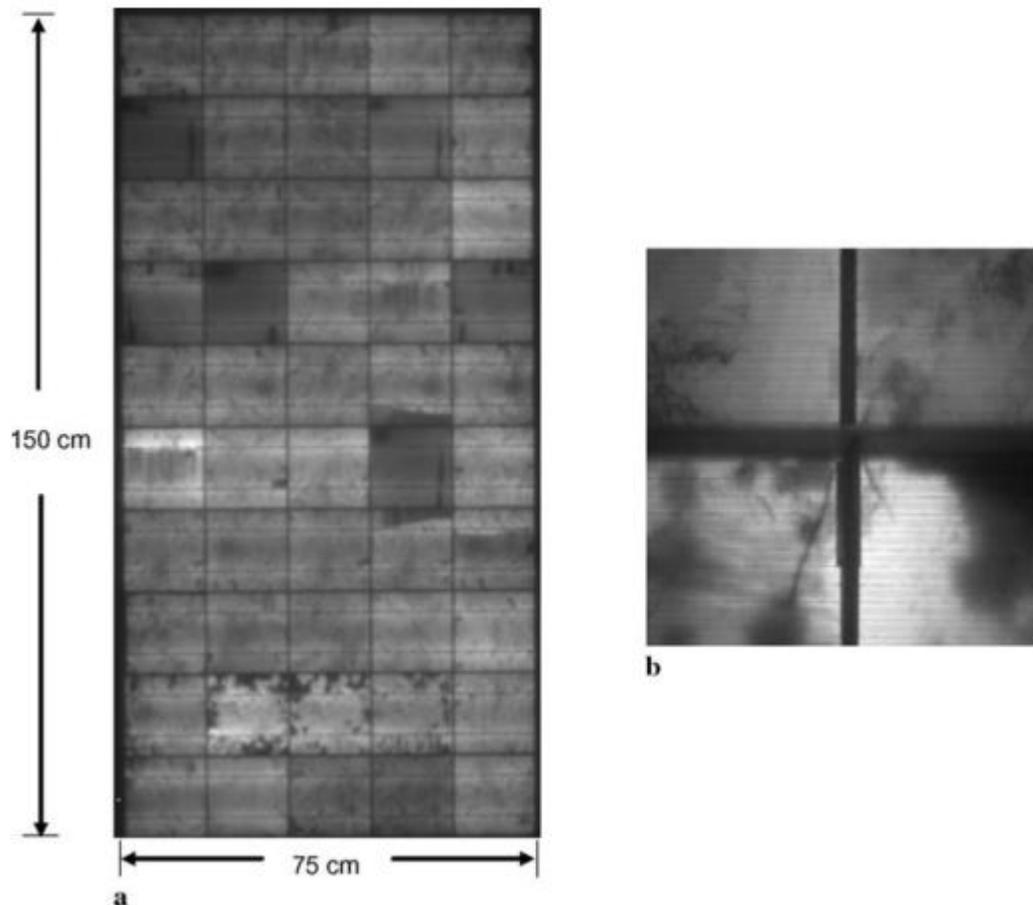


Figura 4.53 a) EL de un panel solar, b) crack en un punto de presión (falla debida a la soldadura de conexiones metálicas) obtenida de Fuyuki [47].

Fuyuki [47] también realiza la experimentación por variación de temperatura. Como ejemplo realiza una resta de intensidad luminosa en una muestra que está sometida a 100 °C menos la misma muestra a 25 °C, donde se puede notar claramente la presencia de

imperfecciones intrínsecas y extrínsecas, como se muestra en la Figura 4.54 y Figura 4.55:

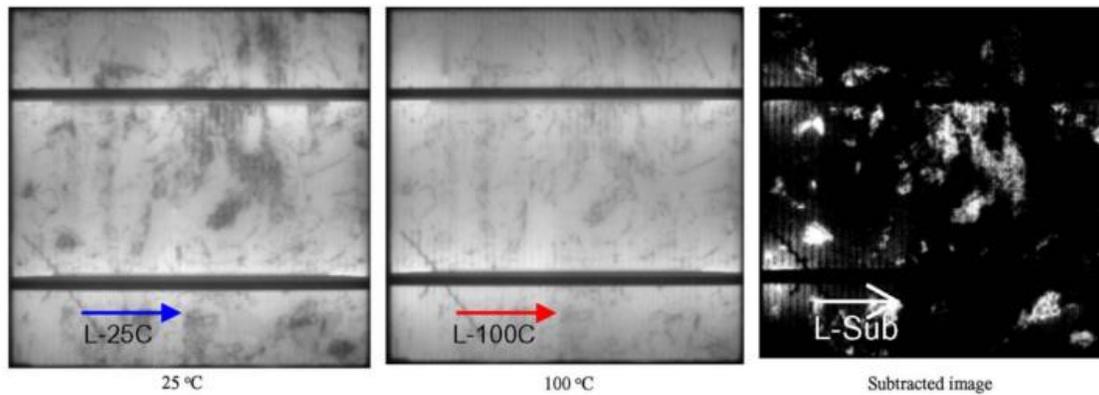


Figura 4.54 Procesamiento por sustracción de diferencia de temperatura en imágenes de EL entre 100°C y 25°C, obtenida de Fuyuki [47].

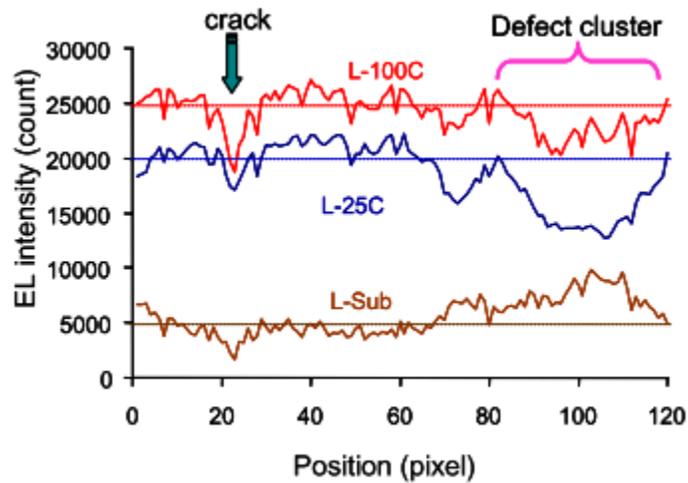


Figura 4.55 Perfiles de intensidad de EL, correspondiente a la figura anterior, obtenida de Fuyuki [47].

Esta experimentación no solo se puede llevar a cabo en celdas sino en paneles ya instalados, ya que no se tiene un estándar que hable sobre el mantenimiento que tome en

cuenta pruebas ópticas ni evaluación en sitio para conocer los datos de degradación para planear su reemplazo.

Hasta el momento, se han realizado pruebas con filtros pasa altas ya que estos se encuentran montados en las cámaras de venta comercial para inspección en línea de paneles solares o la selección de un filtro a una sola frecuencia de corte, o pasa banda; sin embargo, no se tiene una comparación de la intensidad de EL a diferentes longitudes de onda que pudiera emitir la celda y la información intrínseca que esta pudiera ofrecer.

En la investigación de Würfel [48], se realiza un estudio con imágenes de luminiscencia tomadas con dos tipos de filtros espectrales, partiendo de que el espectro emitido de la celda se basa en la fotocorriente que hay entre los pares de los electrones y huecos y esto genera una distancia variable desde la unión p-n que depende de la longitud de difusión del portador minoritario, y considerando que la intensidad de luminiscencia emitida se encuentra en la longitud de onda de 850 a 1250 nm, correspondiente a profundidades de penetración de fotones que van de los 20 μm a varios centímetros.

Restringir la señal de luminiscencia con filtros a diferentes longitudes permite obtener información acerca de la densidad total de portadores a través de todo el espectro de la muestra, es decir, analizar la luminiscencia de longitud larga con profundidad de penetración y pequeñas longitudes de onda de luminiscencia para pequeñas profundidades de penetración.

Los filtros que se seleccionan son pasa bajas, los cuales tiene que cumplir con $\lambda < \lambda_{\text{cutoff}}$. Usando un filtro pasa bajas se elimina toda longitud de onda larga emitida, que se ve reforzada por la captura de luz en la celda solar; la porción de la intensidad de luminiscencia a largas y cortas longitudes de onda contienen información acerca del camino óptico que los fotones han viajado dentro de la muestra y, por lo tanto, acerca de la distribución de portadores. En la Figura 4.56 se muestra la luminiscencia esperada variando los filtros pasa bajas, como una función de la longitud de difusión del electrón de una celda solar de 300 μm de grosor.

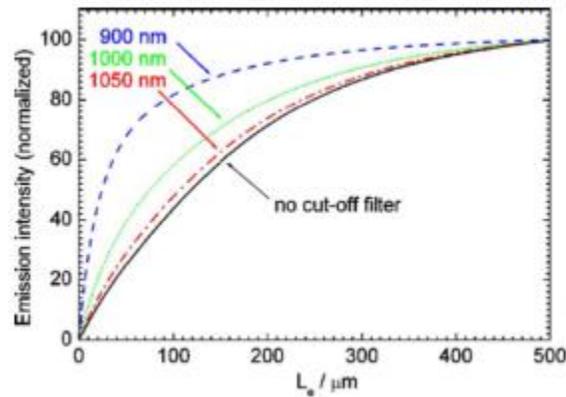


Figura 4.56 Emisión de luminiscencia registrada en una CCD de silicio con diferentes pasa bajas y sin filtro, obtenida de Würfel [48].

De sus resultados, se puede observar en la Figura 4.57 una imagen tomada con un filtro pasa bajas de 1000 nm, con una cámara CCD de silicio, en donde se pueden observar una región negra en la esquina inferior izquierda, la cual muestra una intensidad muy baja con respecto al promedio de la celda; sin embargo, al aumentar la corriente, se muestra más brillante, debido a una variación de resistencia y no de una longitud de difusión reducida. Esta experimentación enfatiza las variaciones de voltaje la cual es ignorada en análisis de imágenes de luminiscencia en términos de la longitud de difusión.

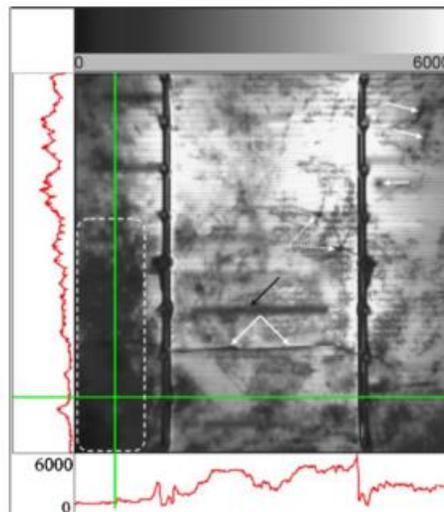


Figura 4.57 Imagen de electroluminiscencia de celda multicristalina, con filtro pasa bajas de 1000 nm y tiempo de adquisición de 1s, obtenida de Würfel [48].

Una segunda imagen de electroluminiscencia es tomada con un filtro pasa bajas de 900 nm, mostrando fallas similares. Se realiza la relación píxel a píxel de las dos imágenes en donde se puede observar la cancelación de las zonas que son relacionadas con variaciones de voltaje mostrada en la Figura 4.58.

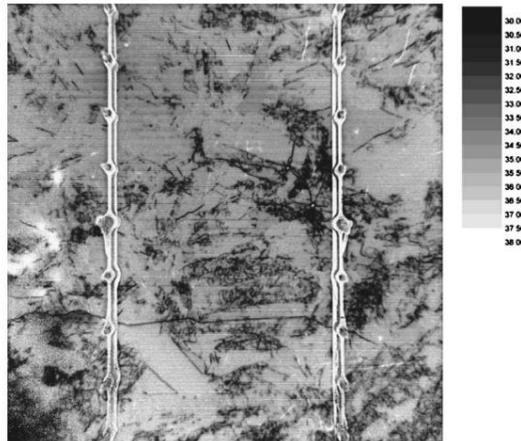


Figura 4.58 Relación de intensidad de dos imágenes de electroluminiscencia tomadas con filtros pasa bajas de 900 y 1000 nm, obtenida de Würfel [48].

Finalmente, al realiza la conversión de intensidad a longitud de difusión se observa el mapa de la Figura 4.59:

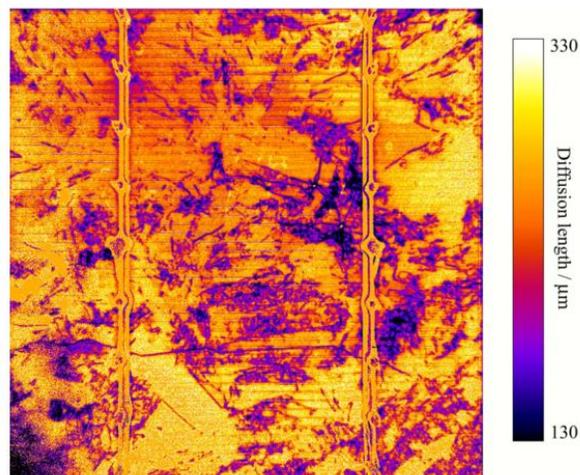


Figura 4.59 Distribución de longitud de distribución calculada desde la relación de intensidad, obtenida de Würfel [48].

Este análisis que proporciona mayor información que una imagen tomada en la línea de producción por electroluminiscencia, puede ayudar a obtener datos más precisos para análisis, toma de decisiones y seguimiento de calidad en paneles solares, pues las empresas que le dan importancia a la calidad de sus datos les permiten obtener beneficios clave para agregar valor al negocio y diferenciarse del resto de sus competidores; y esto se puede obtener con diferentes filtros. Un filtro es capaz de darnos la versatilidad de recorrer diferentes longitudes de onda a medida que se varía el ángulo de entrada y se va ensanchando su longitud de onda, pero cambiando su porcentaje de transmitancia como se mostró en la Figura 3.55.

4.4 Análisis del método de los elementos finitos en una celda solar

El método de los elementos finitos es otra alternativa de estudio para las celdas solares ya que es usado como una herramienta para resolver problemas de forma práctica. Barbero [49] menciona que el proceso de diseño tiene como objetivo definir un sistema físico que satisfaga una serie de requisitos o criterios, que pueden ser de índole mecánica, térmica, magnética etc. Al analizar el comportamiento de un sistema durante el proceso de diseño, es preciso decidir el procedimiento de análisis que se va a emplear. Los procedimientos de análisis pueden clasificarse como procedimientos tradicionales, numéricos o bien experimentales.

En un diseño mecánico, por ejemplo, los procedimientos tradicionales son aquellos que utilizan expresiones simplificadas de las teorías clásicas de elasticidad y resistencia que permiten realizarse de forma sencilla con fórmulas, tablas, gráficos, etc.

En comparación a esta simplicidad, la precisión que aportan no es generalmente muy elevada y tienen un rango de aplicación relativamente pequeño. Los métodos numéricos permiten realizar análisis que los procedimientos tradicionales no pueden abordar, es decir, se utilizan para analizar piezas con geometrías, estados de carga, materiales u otras características que no cumplen las hipótesis simplificativas en las que se basan los procedimientos tradicionales. Uno de los métodos numéricos más utilizados en la actualidad es el método de los elementos finitos (MEF).

De acuerdo a Abasolo [50] los softwares comerciales de elementos finitos comparten la misma estructura básica, están organizados en tres partes principales: preprocesador, procesador y postprocesador.

Preprocesador

El preprocesador es la parte del programa en donde se define la geometría de la pieza, el material, las cargas que actúan sobre él, las condiciones de contorno y el tipo de análisis (estático, dinámico, etc.) que se va a realizar. También divide la geometría en elementos finitos; a este proceso de división se le denomina mallado o discretización.

A) Geometría

La geometría depende del objeto que se quiera analizar, las piezas que lo conforman estarán presentes sólo si aportan una información necesaria para el analista, de lo contrario se puede diseñar una geometría básica, sin detalles, pero que sea capaz de proporcionar los resultados requeridos con una precisión aceptable y con el mínimo costo de análisis posible.

B) Cargas y condiciones de contorno

En esta sección se determinan las cargas y condiciones de contorno a aplicar, deben ser simples, pero que no conlleven a una pérdida de precisión en los resultados.

C) Mallado

Existen muchos tipos de elementos: unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales, se debe elegir el más apropiado para un análisis en particular.

Otro aspecto importante es el tamaño de los elementos, cuanto más pequeño sea el tamaño de los elementos, más nodos y grados de libertad tendrá el modelo y por tanto más preciso será el resultado; sin embargo, al aumentar el número de grados de libertad, también lo hacen las dimensiones de los vectores y matrices de una ecuación. Por el contrario, unos elementos excesivamente grandes permiten realizar el análisis con un costo computacional reducido, pero con muy poca precisión, por lo que las zonas críticas de la pieza se mallan con elementos pequeños, ya que en estas zonas donde habrá importantes incrementos de esfuerzo que darán lugar al máxima de toda la pieza, por lo tanto, se debe captar esta variación de esfuerzos y su valor máximo con gran precisión.

Así mismo, en las zonas donde no se observe concentración de esfuerzos se suele usar un tamaño de elemento mayor porque los esfuerzos serán mucho mayores y por lo tanto no es necesario conocer su valor con mucha precisión.

D) Material

En esta sección, se deben definir los materiales que integran la pieza, la selección de características depende del tipo de análisis o variable que se esté buscando en los resultados.

Procesador

A partir del modelo definido y discretizado en el preprocesador, el programa de elemento finito genera y resuelve las ecuaciones características de problema planteado.

Postprocesador

Es la parte en la que el programa permite visualizar los resultados del análisis para que el analista pueda conocer primero e interpretar después la respuesta del modelo. En primer lugar, se conocen los resultados que sirven para validar el modelo en sí; aquí permite definir qué área se desea refinar en la malla, observar si se han definido bien las propiedades del material entre otros.

Una vez comprobado el modelo, el analista conoce los límites máximos de esfuerzo que los hacen permisibles para una aplicación del material. En caso de ser negativo, se puede rediseñar la pieza, cambiar de materiales, condiciones de frontera y rehacer en análisis en un proceso iterativo hasta conseguir resultados aceptables.

La aplicación del MEF permitirá caracterizar las capas de la celda solar y simular las variables que permitan la degradación del panel solar y localizar zonas de interés que han sido expuestas a movimientos mecánicos que comprometan la estructura y eficiencia de la celda tomando en cuenta el modelo de Paggi [51].

En la Figura 4.60 se observan las capas esenciales de un panel solar.

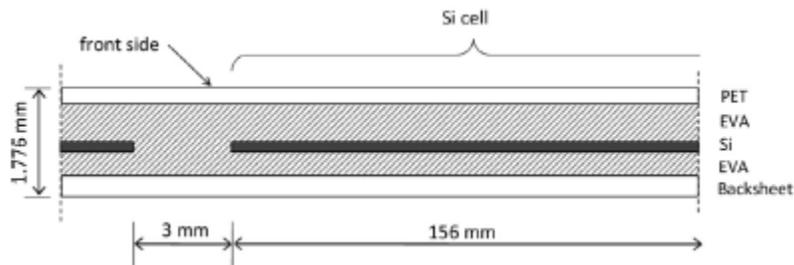


Figura 4.60 Dibujo de un módulo fotovoltaico semiflexible, Paggi [51].

En la Figura 4.61 se observan los elementos del módulo con las siguientes funcionalidades:

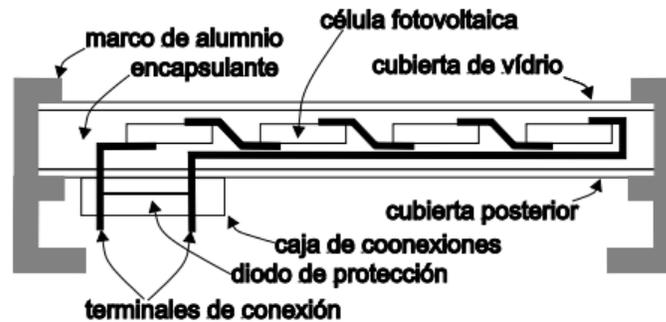


Figura 4.61 Elementos de un módulo fotovoltaico

Tereftalato de polietileno (PET): es un material que se encuentra expuesto de forma continua a factores ambientales (agua, viento, polvo, humedad, calor).

Encapsulante: funciona como un aislante adecuado frente al polvo y humedad. Se suele emplear EVA (etilenvinilacetato) este polímero sufre exposición de radiaciones UV lo cual debilitará su estructura química generando el mecanismo de degradación conocido como decoloración.

Celdas fotovoltaicas: donde se lleva a cabo la transformación de energía solar en electricidad. Puede ser objeto de roturas por esfuerzo térmico del módulo fotovoltaico o por cargas mecánicas. Dichas cargas pueden afectar a las conexiones eléctricas internas del módulo.

Cubierta posterior: El polímero más habitual es el PVF (Polifluoruro de vinilo) en combinación con PET formando una capa de PVF/PET/PVF. Sirve como respaldo del

panel y lo protege de cambios ambientales, por lo tanto, es resistente a la intemperie, tiene resistencia mecánica y adhesión.

Este método puede ser una opción para el análisis de cargas térmicas ambientales en paneles solares, ya que es uno de los principales factores que generan degradación en sus diferentes capas. Así mismo se puede simular la inyección de corriente en la celda para generar pequeñas deformidades superficiales.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en los dos arreglos ópticos:

Se observa que con el prototipo óptico propuesto para la inspección superficial con láser en la longitud de onda de 405 nm fue posible localizar zonas que sufren movimiento o deformación perpendicular al plano de la celda, a partir de una excitación eléctrica. Quedó pendiente el estudio de deformación dentro del plano, para el que se podría esperar mayor sensibilidad, dado que las celdas son mucho más extensas en el plano y son muy finas en espesor.

Del arreglo óptico de shearografía con luz de electroluminiscencia, no se obtuvieron resultados concluyentes: no fue posible observar franjas de interferencia ni algún contraste local que indicara deformación. Bajo las condiciones que se probaron, creemos que el largo ancho de espectro EL, la corriente de polarización no estabilizada con bajo ruido disminuye la coherencia de la luz EL. Además, la baja sensibilidad de la cámara CCD tampoco favoreció la observación.

Es necesario realizar ajustes con el fin de analizar el espectro de emisión de la celda asociándolo con la aplicación de temperatura. Como mejoras se requiere sumar componentes ópticos que permitan tener una mejor adquisición de la señal, por ejemplo, una cámara SWIR que tiene mayor eficiencia cuántica en las longitudes de onda de interés y selección de filtros a longitudes de onda cercanas 1100 nm para celdas monocristalinas, con esto se limitará la longitud de onda analizada y aumentará la coherencia de la luz EL, favoreciendo así su uso en interferometría. Estos ajustes serán objeto de futuros trabajos.

Como temas para desarrollar en el futuro se toma en cuenta el análisis de armónicos que proporciona información cuantitativa específica píxel a píxel en comparación al análisis convencional de electroluminiscencia en líneas de producción o mantenimientos preventivo y es una propuesta para enriquecer la información de calidad, seguimiento y toma de decisiones para el cambio de paneles solares.

La exploración en el estudio del espectro de electroluminiscencia filtrando la señal a diferentes longitudes de onda, permitirá un diagnóstico más específico en convergencia con la manipulación de temperatura.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Demant, M., Welschehold, T., Oswald, M., Bartsch, S., Brox, T., Schoenfelder, S., & Rein, S. (2016). Microcracks in Silicon Wafers I: Inline Detection and Implications of Crack Morphology on Wafer Strength. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6(1), 126–135. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2494692>
- [2] Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., & Warta, W. (2011). Solar cell efficiency tables (version 37). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(1), 84–92. <https://doi.org/10.1002/pip.1088>
- [3] Razeghi, M. (2017). A lifetime of contributions to the world of semiconductors using the Czochralski invention. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.01.009>
- [4] Tipos de paneles fotovoltaicos. (2017). Retrieved September 23, 2017, recuperado de: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-paneles-fotovoltaicos/>
- [5] Interstate Renewable Energy Council. (2010). *Field inspection Guidelines for PV systems* (Book solar). california. Recuperado de: www.brooksolar.com.
- [6] Xiong, H., Gan, C., Hu, Z., Niu, H., Li, J., Si, J., ... Luo, X. (2017). Formation and Orientational Distribution of Cracks Induced by Electromagnetic Induction Soldering in Crystalline Silicon Solar Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(4), 966–973. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2693442>
- [7] Dhimish, M., Holmes, V., Dales, M., Mather, P., Sibley, M., Chong, B., & Zhang, L. (2017). The impact of cracks on the performance of photovoltaic modules. In *2017 IEEE Manchester PowerTech* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PTC.2017.7980824>
- [8] Carrión Viramontes, F. J., Lomelí González, M. G., Quintana Rodríguez, J. a, & Martínez Madrid, M. (2003). La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes, (231), 1–202
- [9] Frazão, M., Silva, J. A., Lobato, K., & Serra, J. M. (2017). Electroluminescence of silicon solar cells using a consumer grade digital camera. *Measurement*, 99, 7–12. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2016.12.017>
- [10] Koshida, N., & Koyama, H. (1992). Visible electroluminescence from porous silicon. *Applied Physics Letters*, 60(3), 347–349. <https://doi.org/10.1063/1.106652>
- [11] Garma, T., Cvetković, M., & Bandalo, V. (2017). Experimental prediction of shaded solar cells hot-spots. *2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science, SpliTech 2017*.
- [12] Chen, Y. S., Hung, Y. Y., Ng, S. P., Huang, Y. H., & Liu, L. (2008). Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive testing and evaluation (NDT&E). In X. He, H. Xie, & Y. Kang (Eds.) (Vol. 7375, p. 73754W). International Society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.839322>
- [13] Fuyuki, T., Kitiyanan, A., Fuyuki, T., & Kitiyanan, A. (2009). Photographic diagnosis of crystalline silicon solar cells utilizing electroluminescence. *Appl Phys A*, 96, 189–196. <https://doi.org/10.1007/s00339-008-4986-0>

- [14] Boostandoost, M., Friedrich, F., Kerst, U., Boit, C., Gall, S., & Yokoyama, Y. (2011). Characterization of poly-Si thin-film solar cell functions and parameters with IR optical interaction techniques. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 22(10), 1553–1579. <https://doi.org/10.1007/s10854-011-0450-6>
- [15] Rupnowski, P., & Sopori, B. (2009). Strength of silicon wafers: Fracture mechanics approach. *International Journal of Fracture*. <https://doi.org/10.1007/s10704-009-9324-9>.
- [16] Waqar Akram, M., Li, G., Jin, Y., Chen, X., Zhu, C., Zhao, X., Ahmad, A. (2019). Improved outdoor thermography and processing of infrared images for defect detection in PV modules. *Solar Energy*, 190 (Marzo), 549–560. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.061>
- [17] Li, L. (2019). Aerospec Technology. Retrieved November 23, 2019, recuperado de: <https://aerospec.us/blog/>
- [18] Systems, G. I. (2018). DRON TECHNOLOGY APPLIED TO THE MANAGEMENT OF PHOTOVOLTAIC SOLAR PLANTS TO OPTIMIZE THE PROJECT. *22nd International Congress on Project Management and Engineering*, (Julio), 1511–1519.
- [19] López-Fernández, L., Lagüela, S., Fernández, J., & González-Aguilera, D. (2017). Automatic Evaluation of Photovoltaic Power Stations from High-Density RGB-T 3D Point Clouds. *Remote Sensing*, 9(6), 631. <https://doi.org/10.3390/rs9060631>
- [20] Kumar Tippabhotla, S., Song, W., Tay, A. A., & Budiman, A. (2019). Effect of encapsulants on the thermomechanical residual stress in the back-contact silicon solar cells of photovoltaic modules-A constrained local curvature model. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.028>
- [21] Santhakumari, M., & Sagar, N. (2019, August 1). A review of the environmental factors degrading the performance of silicon wafer-based photovoltaic modules: Failure detection methods and essential mitigation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.024>
- [22] Shearography: An optical measurement technique and applications. (2005). *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 49(3), 61–87. <https://doi.org/10.1016/J.MSER.2005.04.001>
- [23] Peng, Y., Liu, G., Quan, Y., & Zeng, Q. (2017). The depth measurement of internal defect based on laser speckle shearing interference. *Optics & Laser Technology*, 92, 69–73. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2017.01.004>
- [24] V Muzet, V., Blain, P., & Przybyla, D. (2010). Application of shearography to crack detection in concrete structures subjected to traffic loading, 73870K. <https://doi.org/10.1117/12.868951>
- [25] Jacquot, P. (2008). Speckle Interferometry: A Review of the Principal Methods in Use for Experimental Mechanics Applications. *Strain*, 44(1), 57–69. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2008.00372.x>

- [26] Shearography for non-destructive evaluation of composite structures. (1996). *Optics and Lasers in Engineering*, 24(2–3), 161–182. [https://doi.org/10.1016/0143-8166\(95\)00020-8](https://doi.org/10.1016/0143-8166(95)00020-8)
- [27] SENER. (2016). *Reporte de Avance de Energías Limpias Primer semestre 2016*. México. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177519/Reporte_Avance_Energ_as_Limpias_1er_sem_2016_VFinal_28122016.pdf
- [28] Yucatán, tercero en inversión de energías renovables | UNIÓN | Yucatán. (n.d.). Consultado el 26 de Diciembre de 2019 de: <https://www.unionyucatan.mx/articulo/2018/09/05/economia/yucatan-tercero-en-inversion-de-energias-renovables>
- [29] PROYECTOS | Articulación Yucatán. (2017). Consultado el 16 de Noviembre de 2017 de <https://mayaenergia.wordpress.com/proyectos/>
- [30] Nema, P., Nema, R. K., & Rangnekar, S. (2009). A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2096–2103. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2008.10.006>
- [31] Aristizabal, V. (2003). CONTORNEADO DE SUPERFICIES UTILIZANDO DSPI. *Revista de La Sociedad Colombiana de Fisica.*, 35, 133. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/263090077_CONTORNEADO_DE_SUPERFICIES_UTILIZANDO_DSPI
- [32] Matsumoto, Y. (2011). Celdas solares de silicio: fundamento y tendencia. *Division de Ciencias E Ingenieria*.
- [33] Surface Texturing | PVEducation. (n.d.). Retrieved November 15, 2019, recuperado de <https://www.pveducation.org/pvcdrom/design-of-silicon-cells/surface-texturing>
- [34] Pourakbar Saffar, A., & Deldadeh Barani, B. (2014). Thermal effects investigation on electrical properties of silicon solar cells treated by laser irradiation. *International Journal of Renewable Energy Development (IJRED)*, 3(3). <https://doi.org/10.14710/ijred.3.3.184-187>
- [35] Green, M. A. (2008). Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 K including temperature coefficients. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(11), 1305–1310. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2008.06.009>
- [36] Guo, G., & Qin, Y. (2002). Quantitative analysis on sensitivity of shearography in NDT. In X. Wu, Y. Qin, J. Fang, & J. Ke (Eds.) (Vol. 4537, pp. 341–344). International Society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.468860>
- [37] Sanchez, E., Benedet, M. E., Willemann, D. P., Fantin, A. V, Albertazzi, A. G., Federal, U., & Catarina, D. S. (2016). Analysis of a Shearography Device using a Wollaston Prism and Polarization Phase Shifting, 9960, 1–6. <https://doi.org/10.1117/12.2237395>

- [38] Klinger, T. (2003). *Image processing with LabVIEW and IMAQ vision. National Instruments virtual instrumentation series.*
- [39] Howard, A., Haberberger, D., Boni, R., Brown, R., & Froula, D. H. (2018). Implementation of a Wollaston interferometry diagnostic on OMEGA EP. *Review of Scientific Instruments*, 89(10), 107–112. <https://doi.org/10.1063/1.5036956>
- [40] Vannoni, M., & Molesini, G. (2004). Speckle interferometry experiments with a digital photcamera. *American Association of Physics Teachers*. <https://doi.org/10.1119/1.1643375>
- [41] Electroluminescence. (2018). Consultado el 29 de Octubre de 2019 de <http://pvcdrom.pveducation.org/CHARACT/EL.htm>
- [42] Kampwerth, H., Trupke, T., Weber, J. W., & Augarten, Y. (2008). Advanced luminescence based effective series resistance imaging of silicon solar cells. *Applied Physics Letters*, 93(20), 1–4. <https://doi.org/10.1063/1.2982588>
- [43] J. Alfredo, U. Chávez, and R. Hilda, “Estudio para detección de defectos en Paneles Solares Alfredo, J., Chávez, U., & Hilda, R. (2018). *Estudio para detección de defectos en Paneles Solares por medio de la Técnica de Electroluminiscencia. Junio* (Vol. 2). Recuperado de www.ecorfan.org/republicofperu
- [44] Standard - Photovoltaic devices - Part 13: Electroluminescence of photovoltaic modules IEC TS 60904-13:2018. (2019.). Consultado el 6 de Noviembre de 2019, de <https://www.sis.se/en/produkter/energy-and-heat-transfer-engineering/solar-energy-engineering/iec-ts-60904-132018/>
- [45] Karcher, C., Helmers, H., Schachtner, M., Dimroth, F., & Bett, A. W. (2014). Temperature-dependent electroluminescence and voltages of multi-junction solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(7), 757–763. <https://doi.org/10.1002/pip.2431>
- [46] Bothe, K., Ramspeck, K., Hinken, D., Schinke, C., Schmidt, J., Herlufsen, S., ... Breitenstein, O. (2009). Luminescence emission from forward-and reverse-biased multicrystalline silicon solar cells. <https://doi.org/10.1063/1.3256199>
- [47] Fuyuki, T., Kitiyanan, A., Fuyuki, T., & Kitiyanan, A. (2009b). Photographic diagnosis of crystalline silicon solar cells utilizing electroluminescence. *Appl Phys A*, 96, 189–196. <https://doi.org/10.1007/s00339-008-4986-0>
- [48] Würfel, P., Trupke, T., Puzzer, T., Schäffer, E., Warta, W., & Glunz, S. W. (2007). Diffusion lengths of silicon solar cells from luminescence images. *Journal of Applied Physics*, 101(12). <https://doi.org/10.1063/1.2749201>
- [49] Barbero, E. J. (2013). *Finite element analysis of composite materials using Abaqus.* (Taylor & francis group, Ed.).
- [50] Abasolo, M. (2017). *Guía práctica de elementos finitos en estática.* Paraninfo.
- [51] Paggi, M., Corrado, M., & Berardone, I. (2016). A global/local approach for the prediction of the electric response of cracked solar cells in photovoltaic modules under the action of mechanical loads. *Engineering Fracture Mechanics*, 168, 40–57.

<https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACMECH.2016.01.018>

- [52] Hacke, P., Terwilliger, K., Smith, R., Glick, S., Pankow, J., Kempe, M., Kloos, M. (2011). System Voltage Potential- Induced Degradation Mechanisms in PV Modules and Methods for Test Preprint. Retrieved from <http://www.osti.gov/bridge>
- [53] Osterwald, C. R., & McMahon, T. J. (2009). History of accelerated and qualification testing of terrestrial photovoltaic modules: A literature review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 17(1), 11–33. <https://doi.org/10.1002/pip.861>
- [54] Degradación en Paneles Solares por Potencial Inducido (PID). (2018). Consultado el 21 de Mayo de 2018, de <https://solenergy.mx/es/principal/blog/degradacion-en-paneles-solares-por-potencial-inducido-pid>
- [55] Broken Solar Cell Isolated On White Background Stock Photo, Picture And Royalty Free Image. Image 65685549. (2019.). Consultado el 8 de Diciembre de 2019 de https://www.123rf.com/photo_65685549_broken-solar-cell-isolated-on-white-background.html
- [56] INSENE | El mantenimiento de los paneles solares - INSENE. (2017). Consultado el 24 de Septiembre de 2017, de <http://insene.es/el-mantenimiento-de-los-paneles-solares/>
- [57] Instituto Asteco / Análisis de falla. (2019.). Consultado el 21 de Junio de 2019 de <http://institutoasteco.com/disponibles/Curso-18-analisis-falla/index.html#/3>

ANEXOS

Anexo 1 Aplicación de cargas en celdas solares.

El objeto de prueba es una celda monocristalina solar de silicio que en principio tiene defectos, la shearografía mide la deformación del área a evaluar cuando se somete a una tensión, se induce una anomalía de deformación en la proximidad del defecto. Si la falla no está muy profundamente incrustada dentro del objeto, la concentración de deformación causara anomalías en la distribución de la deformación de la superficie.

Posteriormente, estas anomalías se traducen en anomalías marginales si dos patrones de motas tomando uno antes y otro después de estresar, del objeto son comparados.

Durante la aplicación de estrés se requiere que sea lo suficiente para revelar defectos. Idealmente el estrés aplicado debe ser similar a las tensiones de servicio, de modo que se puedan revelar las fallas críticas y perjudiciales para la vida útil del objeto, y las fallas estéticas que no perjudiquen la integridad estructural del objeto que puedan ser ignoradas, esto minimizará los rechazos innecesarios durante la inspección de acuerdo a Chen [12].

Al inducir el estrés es importante restringir el movimiento del objeto durante el esfuerzo, ya que el movimiento excesivo podría causar decorrelación, lo que resulta en la degradación de la calidad de la imagen.

A continuación, se presentan las características de la prueba de degradación por potencial inducido realizado para generar un cambio en el estado del material:

Degradación por potencial inducido:

A este tipo de degradación también se le denomina PID (Potencial Induced Degradation, en inglés). Este modo de degradación se debe a las conexiones series que tienen lugar entre los diferentes módulos fotovoltaicos. Al ser conectados en serie se produce una suma de las tensiones de cada uno de los módulos con lo cual se le puede llegar fácilmente a varios volts.

Con el fin de proteger a las personas frente a un contacto directo (aquel que se produce cuando se toca una parte que se encuentra bajo tensión), el marco donde se encuentran instalados los módulos es conectado a tierra de tal forma que su potencial es de 0 V. Por ello aparece una diferencia de potencial negativo entre las células fotovoltaicas y el marco

metálico, de tal forma que surge una corriente de fuga que transita desde la capa activa del silicio, pasando por el encapsulante EVA y la cubierta frontal de vidrio hasta llegar al marco metálico.

Este mecanismo de degradación se ve favorecido en climas húmedos y calurosos, además de que aquellos módulos que han recibido en su superficie una aplicación de capa anti reflectante (ARC, anti reflective coating, en inglés) se da mayor probabilidad de sufrir este tipo de degradación.

Con el fin de minimizar este tipo de degradación se procede a conectar el polo negativo del inversor a tierra, para de esta forma eliminar la diferencia de potencial que ha aparecido previamente.

De acuerdo al laboratorio nacional de energía renovable [52] indica que la corriente de polarización es una causa de degradación en paneles solares, esto se logra aumentando el voltaje más allá de la calificación de la placa de identificación del módulo puede llevar a mecanismos alternativos de descomposición catastrófica, como la descarga parcial, que se evalúa en pruebas de la IEC 61730-2.

En las pruebas de tensión de la cámara, el voltaje para replicar la polarización del voltaje del sistema se puede aplicar a los cables del módulo cortocircuitado. Los componentes externos del módulo están conectados a tierra a través de una resistencia sobre la cual se mide el voltaje para determinar la corriente de fuga. Se puede usar un divisor de voltaje para evitar que se aplique un cortocircuito a través del módulo y que aplique una tensión que exceda las especificaciones del voltímetro. Se debe garantizar que el montaje del módulo sea lo suficientemente resistente incluso en un entorno de prueba húmedo de modo que la corriente de fuga a tierra fluya a través del circuito de medición.

Como se muestra en la Figura 5.1, el módulo está montado horizontalmente, la capa activa está sesgada a escala logarítmica con irradiancia a un voltaje máximo -600 V con los cables del módulo conectados a una resistencia de carga para mantener aproximadamente P_{max} . La corriente de fuga es más alta cuando el rocío de la mañana está en la cara del módulo y la resistencia de la superficie es baja.

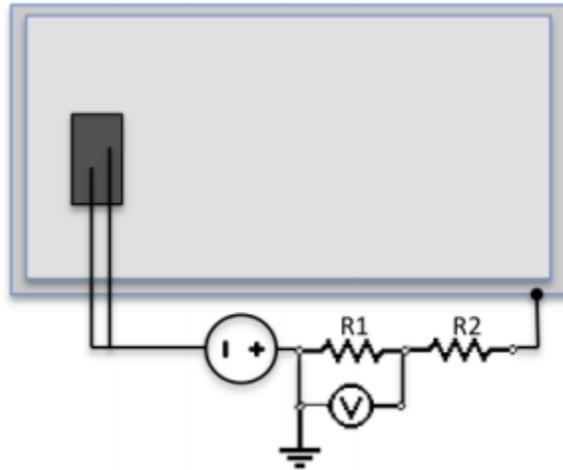


Figura 5.1 Aplicación de tensión a la capa activa de un módulo fotovoltaico a través de cables en cortocircuito. La corriente de fuga es monitoreada por un voltímetro a través de una resistencia R1 conectada a tierra. El voltímetro puede estar protegido contra la sobretensión por una segunda resistencia R2

De acuerdo a Osterwald [53] la degradación electroquímica de los módulos a- Si es capaz de duplicar los efectos de corrosión y daño en los módulos que se habían observado al aire libre, también se relacionó que la temperatura y la humedad afectan las corrientes de fuga.

De acuerdo a la degradación de paneles solares por PID [54] el ensayo es de la siguiente forma:

- a) Inicialmente se registra la curva I-V del panel solar antes de la prueba del PID, para conocer si dicha curva ha sido afectada negativamente al someter al panel a las pruebas de estrés de la prueba PID.
- b) Se realiza una captura del panel con una cámara termográfica, antes de realizar el PID test, para conocer posteriormente si alguna de las células presenta algún tipo de degradación tras las pruebas de estrés del PID.
- c) Se conecta el marco del panel a tierra, según indicaciones del manual de cada fabricante.
- d) Se introduce el panel en una cámara de ensayo a una temperatura de 85 °C y 85% de humedad.

- e) Se aplica una tensión entre los polos positivos y negativos del panel correspondiente a la máxima tensión admisible indicada en la ficha técnica del panel. Típicamente 1000 V.
- f) Se deja el panel en la cámara de ensayo bajo las condiciones mencionadas durante 45 horas.
- g) Pasada las 48 horas, se vuelve a medir la curva I-V y la imagen termográfica del panel, para poder notar si ha sufrido alguna degradación.

Si el panel ensayado no sufre una degradación de más de un 5%, será declarado como libre del efecto PID.

Anexo 2. Hoja de datos de la celda solar.



Mono Crystalline Silicon Solar Cell

Physical Characteristics

Dimension	156.75 mm x 156.75 mm ± 0.5 mm
Diagonal	210 mm ± 1.0 mm (round chamfers)
Thickness (Si)	200µm ± 30µm
Front	Four silver busbars, anisotropically texturized surface with dark blue silicon nitride anti-reflection coating.
Back	Full-surface aluminum BSF, Silver / Aluminum soldering pads.



Electrical Characteristics

Efficiency Code	2010	2000	1990	1980	1970	1960
Efficiency (%)	20.1	20.0	19.9	19.8	19.7	19.6
Pmax (W)	4.910	4.886	4.862	4.837	4.813	4.788
Vmpp (V)	0.549	0.549	0.548	0.547	0.545	0.544
Imp (A)	8.954	8.921	8.900	8.875	8.854	8.829
Voc (V)	0.647	0.646	0.646	0.645	0.644	0.642
Isc (A)	9.429	9.396	9.377	9.354	9.337	9.320

*Data under standard testing conditions (STC): 1000 W/m², AM1.5, 25°C. All figures bear ±5% of tolerance. The measurement of cell is calibrated by Fraunhofer ISE.
Model name = Product code + Efficiency code. Example: B156X1D4A-1970

Typical Temperature Coefficients

Voltage	-0.3144%/°C
Current	+0.0337%/°C
Power	-0.3388%/°C

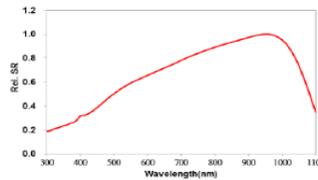
Quality

BIG SUN's Quality system is certified by ISO 9001, Environmental Management System by ISO 14001, Occupational Health and Safety Management System by OHSAS 18001.

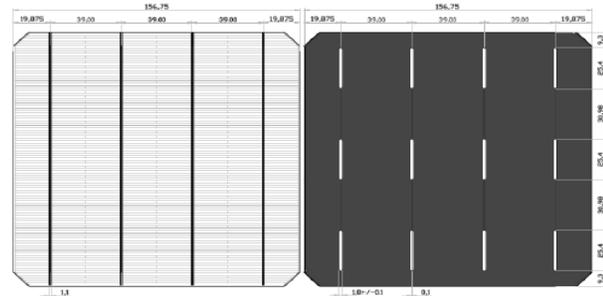
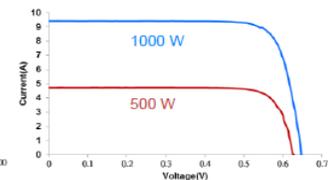
BIG SUN Energy Technology Inc.

No. 458-9, Sinsing Rd., Hukou Township,
Hsinchu County 30353, Taiwan
T: +886 3 598-0288
F: +886 3 598-0299
E: sales@bigsun-energy.com

Spectral Response (SR)



IV Curve of Cell: 1980



Subject to specification changes without notification.

Anexo 3. Hoja de datos de diodo láser.

THORLABS

405 nm Laser Diode, 20 mW

L405P20



Description

This 405 nm, 20 mW laser diode is a compact light source suited to many applications, including fluorescence and spectroscopic measurements, flow cytometry, microscopy, and as a component in optical instruments. It comes in a $\varnothing 5.6$ mm TO package with a monitor photodiode. It is recommended to have the base of the laser diode in good thermal contact with a heat sink.

Specifications

Absolute Maximum Ratings*	
Specification	Maximum
Output Power	35 mW
LD Reverse Voltage	2 V
Operating Case Temperature	0 to +75 °C
Storage Temperature	-40 to +85 °C

*Absolute Maximum Rating specifications should never be exceeded. Operating at or beyond these conditions can permanently damage the laser.

L405P20 Specifications				
	Symbol	Min	Typical	Max
Center Wavelength @ P _{op}	λ_o	400 nm	405 nm	410 nm
Output Power, CW	P _{op}	-	20 mW	-
Threshold Current	I _{TH}	20 mA	26 mA	30 mA
Operating Current CW @ P _{op}	I _{op}	-	38 mA	55 mA
Operating Voltage @ P _{op}	V _{op}	-	4.8 V	5.8 V
Slope Efficiency	η	0.7 W/A	1.2 W/A	-
Monitor Current @ P _{op}	I _{pd}	0.1 mA	0.7 mA	2.0 mA
Beam Divergence (FWHM) Parallel @ P _{op}	$\theta_{//}$	6°	8.5°	12°
Beam Divergence (FWHM) Perpendicular @ P _{op}	θ_{\perp}	16°	19°	23°
Off-axis deviation, Perpendicular @ P _{op}	$\Delta\theta_{//}$	-3°	-	3°
Off-axis deviation, Parallel @ P _{op}	$\Delta\theta_{\perp}$	-3°	-	3°

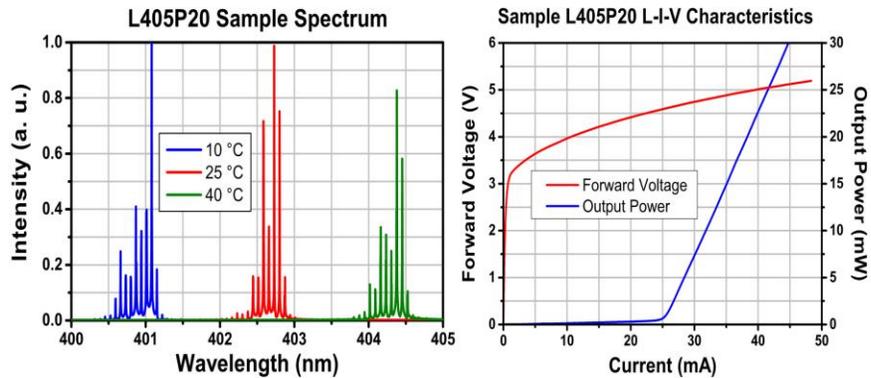
T_{CASE} = 25 °C

Specifications Subject to Change without Notice

March 24, 2015

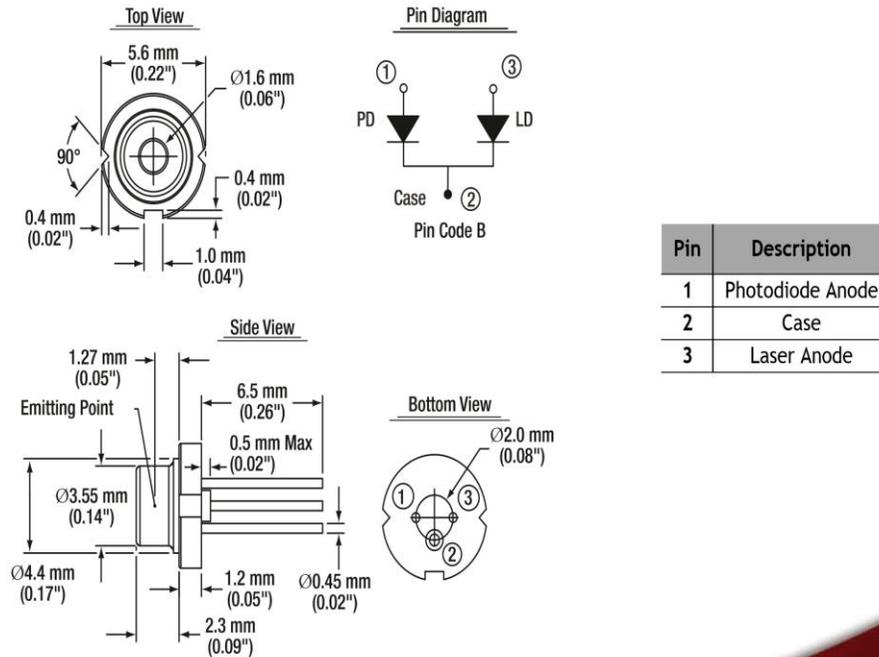
QTN009848-S01, Rev A

Performance Plots



The data presented here is for one particular laser diode. Slight variations in performance data will occur from device to device. The sample spectrum of the L405P20 laser diode was taken at 10 °C, 25 °C, and 40 °C using a Thorlabs OSA201 Spectrum Analyzer with resolution of 7.5 GHz. The L-I-V characteristics data was taken at 25 °C. Please visit our website for raw data and L-I-V characteristics at 10 °C, 25 °C, and 40 °C.

Drawings



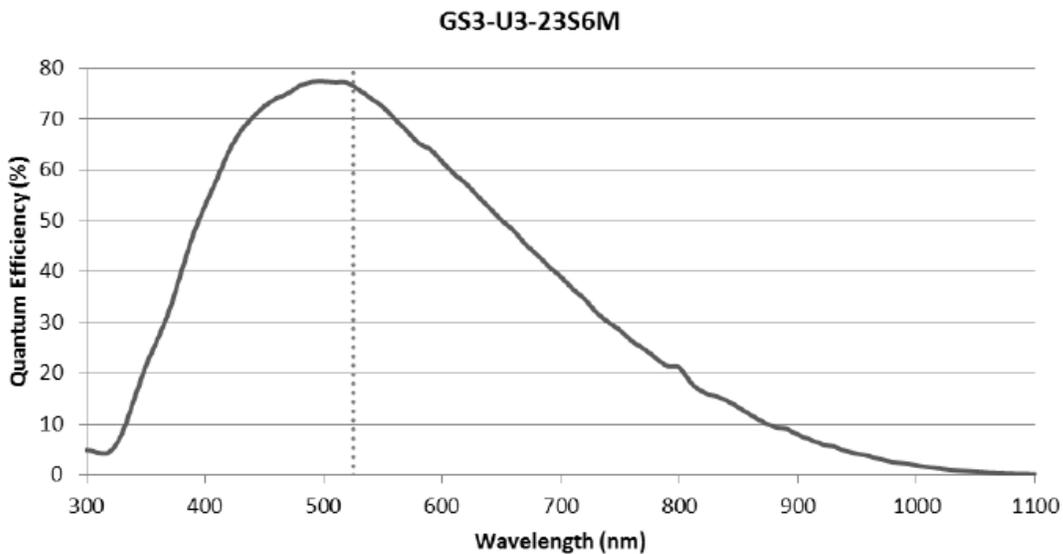
March 24, 2015

QTN009848-S01, Rev A

Anexo 4 Características de cámara GS3-U3-23S6M-C.

6 GS3-U3-23S6M-C Imaging Performance

Measurement	Video Mode 0	Video Mode 7
Pixel Clock (MHz)	37.13	37.13
ADC (Bits)	10-bit	12-bit
Quantum Efficiency (% at 525 nm)	76	76
Temporal Dark Noise (Read Noise) (e ⁻)	14.19	6.83
Signal to Noise Ratio Maximum (dB)	45.11	45.12
Signal to Noise Ratio Maximum (Bits)	7.49	7.49
Absolute Sensitivity Threshold (γ)	19.69	9.77
Saturation Capacity (Well Depth) (e ⁻)	32406	32513
Dynamic Range (dB)	66.87	72.94
Dynamic Range (Bits)	11.11	12.11
Gain (e ⁻ /ADU)	0.51	0.52



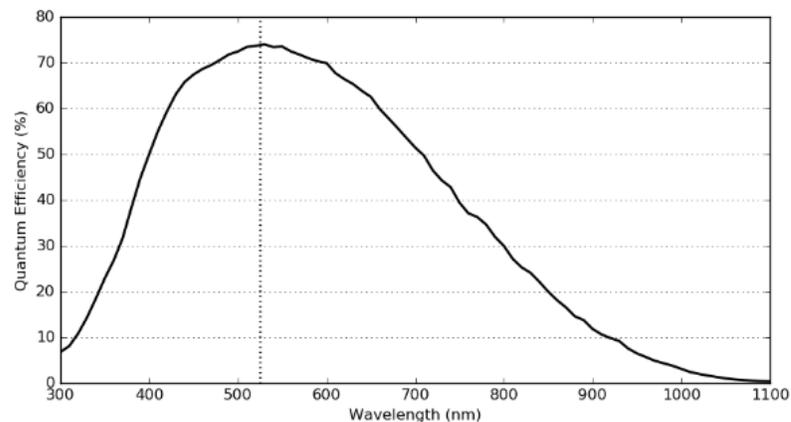
Sensor: SonyIMX252,1/1.8", Mono, máxima resolución 2048x1536, tamaño de píxel: 3.45 μ m.

Anexo 5. Características de cámara Blackfly S BFS-U3-32S4.

FLIR **BLACKFLY**[®]
BFS-U3-32S4

BFS-U3-32S4M

Resolution	2048 x 1536
Sensor	Sony IMX252, CMOS, 1/1.8"
Pixel Size (µm)	3.45
Firmware	1607.1.2.0
ADC	12-bit
Quantum Efficiency Mono (% at 525 nm)	73
Quantum Efficiency Blue (% at 470 nm)	N/A
Quantum Efficiency Green (% at 525 nm)	N/A
Quantum Efficiency Red (% at 640 nm)	N/A
Temporal Dark Noise (Read Noise) (e-)	2.46
Temporal Dark Noise (Read Noise) (DN)	14.09
Signal to Noise Ratio Maximum (dB)	39.91
Signal to Noise Ratio Maximum (Bits)	6.63
Absolute Sensitivity Threshold (γ)	4.05
Absolute Sensitivity Threshold (e-)	2.96
Saturation Capacity (Well Depth) (e-)	9803
Saturation Capacity (Well Depth) (Photons)	13402
Dynamic Range (dB)	70.39
Dynamic Range (Bits)	11.69
Gain (e-/ADU)	0.18



Anexo 6. Diagrama esquemático de circuito de alta corriente.

La Figura 5.2, muestra un circuito de alta corriente con un arreglo de dos op-amp OP 295 de Analog Device, es alimentado con una fuente de 12 V y 9 A en corriente directa, la señal de entrada en el operacional es variada por un generador de funciones el definirá la corriente y frecuencia entregada en la celda; la salida del arreglo del op-amp es conectado a la puerta del mosfet IRFZ44N que soporta una corriente máxima de 49 A, el pin fuente es conectado a la terminal positiva de la celda solar.

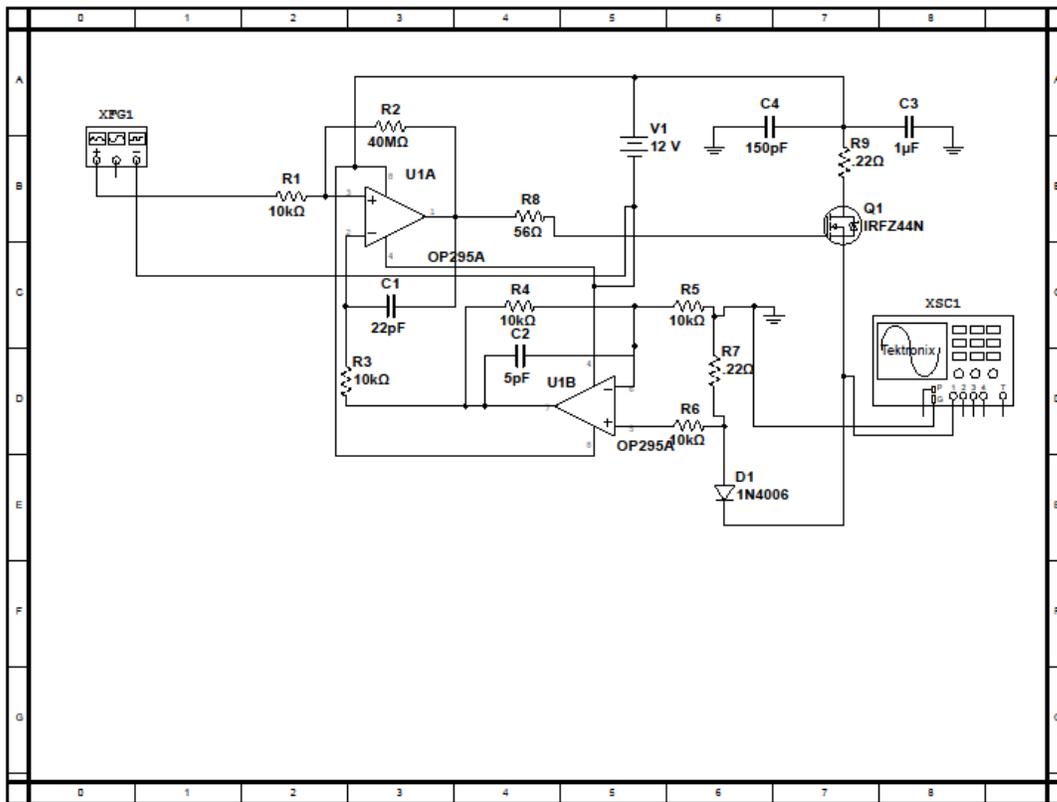


Figura 5.2 Circuito de alta corriente para alimentar celda solar.