



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA**



Correlación de eficiencia cuántica de emisión y absorción para el análisis de celdas solares de silicio a través de imágenes en la banda del infrarrojo cercano.

POR

Valentina Fernanda Jara Olave

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniera civil en Telecomunicaciones

Profesor Guía
Dr. Luis Arias Parada

Noviembre 2023
Concepción (Chile)

© 2023, Valentina Fernanda Jara Olave

© 2023, Valentina Fernanda Jara Olave

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi profesor guía Dr. Luis Arias, por todos los conocimientos, apoyo y motivación que me entrego, además de enseñarme a ser paciente y perseverante, aparte de ser un excelente profesor, es una excelente persona, muchas gracias profesor por formarme de una manera tan completa.

A todos los profesores de carrera, gracias por su profesionalismo, por su inmensa dedicación, paciencia y empatía, pero sobre todo debo agradecer su humildad y su calidad humana, hacen que la carrera destaque de manera positiva, ya que nos demuestran constantemente su apoyo y sus ganas de que todos aprendamos y podamos lograrlo.

Gracias a Fernando Castillo, por su apoyo incondicional, sus enseñanzas, por creer en mí cuando a veces ni yo lo hacía y por su ayuda durante este tiempo, es admirable su pasión por las ciencias y su desinteresada voluntad para difundirla y enseñarla a quien lo necesite.

A mis padres, Lidia y Fernando, y a mis hermanos, Carolina y Diego, si estoy hoy aquí es en gran medida por ellos, muchas gracias por su apoyo incondicional, por amarme tanto, por su contención cuando quería rendirme y por convencerme desde muy pequeña que puedo lograr todo lo que me proponga, independiente lo grande que pueda ser el desafío, estaré eternamente agradecida de todo lo que han hecho por mí y el esfuerzo que han dedicado en mi formación, los amo con toda mi alma.

A mis amigos de carrera, Carolayne y Matías, gracias por darme ánimos y por dejar la envidia o la competencia de lado y sentir alegría cuando al otro le va bien o tristeza cuando el otro fracasa, por su apoyo, la buena compañía, y las anécdotas que siempre recordaré. Es común escuchar que en la universidad no se encuentran amistades reales, yo creo es mentira, porque los encontré a ustedes.

Por último, a mis amigas, muchas gracias por siempre estar, por hacerme sentir amada y acompañada, por hacerme sentir en familia, porque sabían que la mía se encontraba lejos, por darme ánimos, y contención cuando más lo necesite. Soy afortunada de rodearme de buenas personas que de alguna forma contribuyeron en mi formación durante estos años.

Resumen

En la actualidad hablar de eficiencia en paneles solares es bastante común, debido a que estos pueden presentar anomalías con facilidad, las cuales hasta el momento se detectan mediante el rendimiento de corriente en respuesta a la luz absorbida. Este método es bastante ineficiente debido a la gran cantidad de paneles solares que tiene una planta solar.

Por lo tanto, esta memoria de título propone comprobar un método para analizar el estado de células solares de silicio mediante imágenes por electroluminiscencia. Estas imágenes serán comparadas con representaciones del estado del panel solar, las cuales se realizarán mediante la medición de salidas de voltaje, utilizando luces láser y luz halógena a diferentes potencias, las cuales serán las encargadas de excitar cada celda.

De esta forma se comparan las zonas de menor eficiencia con las imágenes por electroluminiscencia, para verificar que estas últimas reflejan las anomalías. Además, se presentarán patrones similares de emisión y absorción del panel, según la cantidad de corriente aplicada y luz absorbida.

Por otro lado, en esta memoria de título se ejecutará el procedimiento mencionado en 2 paneles fotovoltaicos de silicio, uno de tipo comercial y otro construido exclusivamente para este trabajo, el cual no cuenta con recubrimiento de vidrio, con el fin de reducir la reflexión y minimizar el error del método.

Finalmente, se podrá concluir que las imágenes en el infrarrojo cercano a través de electroluminiscencia son un buen método para establecer el estado de celdas solares, ya que representan fielmente las zonas con menor eficiencia de absorción mediante intensidades de electroluminiscencia bajas y zonas con alta eficiencia con electroluminiscencia de mayor intensidad.

Abstract

Nowadays, talking about efficiency in solar panels is quite common, because they can easily present anomalies, which so far are detected by the current yield in response to the absorbed light. This method is quite inefficient due to the large number of solar panels in a solar plant.

Therefore, this dissertation proposes to test a method to analyze the state of silicon solar cells by means of electroluminescence imaging. These images will be compared with representations of the state of the solar panel, which will be made by measuring voltage outputs, using laser lights and halogen light at different powers, which will be responsible for exciting each cell.

In this way, the areas of lower efficiency will be compared with the electroluminescence images, to verify that the latter reflect the anomalies. In addition, similar patterns of emission and absorption of the panel will be presented, depending on the amount of current applied and light absorbed.

On the other hand, in this title memory the mentioned procedure will be executed in 2 silicon photovoltaic panels, one of commercial type and another one built exclusively for this work, which does not have glass coating, in order to reduce the reflection and minimize the error of the method.

Finally, it can be concluded that near infrared images through electroluminescence are a good method to establish the state of solar cells, since they faithfully represent the areas with lower absorption efficiency through low electroluminescence intensities and areas with high efficiency with higher intensity electroluminescence.

Índice

Agradecimientos	III
Resumen.....	IV
Abstract	V
Índice de tablas.....	VIII
Índice de figuras.....	IX
Abreviaciones.....	XI
1 introducción.....	1
1.1 Definición del problema.....	2
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivos generales	2
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Alcances y limitaciones.....	3
1.4 Metodología	4
2 Marco Teórico.....	5
2.1 Reseña Histórica.....	5
2.2 Energía solar.....	7
2.3 Semiconductor.....	8
2.4 Efecto fotoeléctrico	9
2.5 Luminiscencia	9
2.6 Espectro electromagnético	10
2.7 Celdas fotovoltaicas	11
2.7.1 Estructura básica de una celda fotovoltaica.....	11
2.7.2 Principio de funcionamiento de celdas fotovoltaicas	12
2.8 Panel solar fotovoltaico.....	13
2.9 Fallas en sistemas fotovoltaicos	14
2.9.1 Fallas por temperatura	14
2.9.2 Efecto del polvo	14
2.9.3 Efecto de fisuras y fracturas	15
2.9.4 Efecto de microfisuras.....	15
2.9.5 Efecto de hot spots	16
2.10 Eficiencia cuántica	16
3 Resultados Experimentales	18
3.1 Verificación de la banda de emisión de un panel fotovoltaico de silicio	18
3.1.1 Descripción de la experiencia.....	18
3.1.2 Problemas y observaciones	18

3.1.3	Set-up	18
3.1.4	Resultados	20
3.2	Estado de un panel fotovoltaico de tipo comercial (Panel 1)	21
3.2.1	Descripción de la actividad	21
3.2.2	Problemas y observaciones	23
3.2.3	Set-up	24
3.2.4	Resultados	25
3.3	Tomas fotográficas mediante electroluminiscencia	28
3.3.1	Descripción de la actividad	28
3.3.2	Problemas y observaciones	28
3.3.3	Set-up	29
3.3.4	Resultados	29
3.4	Estado de un panel solar sin recubrimiento (panel 2).....	37
3.4.1	Descripción de la actividad	37
3.4.2	Problemas y observaciones	38
3.4.3	Set-up	38
3.4.4	Resultados con laser	39
3.4.5	Resultados con lampara halógena	42
3.5	Tomas fotográficas del panel sin recubrimiento (panel 2)	48
3.5.1	Descripción de la actividad	48
3.5.2	Problemas y observaciones	48
3.5.3	Set-up	48
3.5.4	Resultados	49
	49
4	Conclusiones	57
4.1	Conclusión.....	57
4.2	Trabajo Futuro.....	58
5	Referencias.....	59

Índice de tablas

Tabla 2.1: Clasificaciones de la banda infrarroja.....	10
Tabla 3.1: Resultados potencia óptica.....	22
Tabla 3.2: Salidas de voltaje por celda, panel 1, laser azul.....	25
Tabla 3.3: Salidas de voltaje por celda, panel 1, laser rojo.....	25
Tabla 3.4: Salidas de voltaje por celda, panel 1, laser verde.....	25
Tabla 3.5: Eficiencia cuántica de absorción por celda, panel 1, laser azul.....	26
Tabla 3.6:Eficiencia cuántica de absorción por celda, panel 1, laser rojo.....	26
Tabla 3.7:Eficiencia cuántica de absorción por celda, panel 1, laser verde.a.....	26
Tabla 3.8:Salidas de voltaje por celda, panel 2, laser azul.....	39
Tabla 3.9:Salidas de voltaje por celda, panel 2, laser rojo.....	39
Tabla 3.10:Salidas de voltaje por celda, panel 2, laser verde.....	39
Tabla 3.11:Eficiencia cuántica de absorción por celda, panel 2, laser azul.....	40
Tabla 3.12:Eficiencia cuántica de absorción por celda, panel 2, laser rojo.....	40
Tabla 3.13:Eficiencia cuántica de absorción por celda, panel 2, laser verde.....	40
Tabla 3.14: Salidas de voltaje por celda, panel 2, lampara halógena con 4 vueltas.....	42
Tabla 3.15: Salidas de voltaje por celda, panel 2, lampara halógena con 6 vueltas.....	42
Tabla 3.16:Salidas de voltaje por celda, panel 2, lampara halógena con 8 vueltas.....	43
Tabla 3.17:Salidas de voltaje por celda, panel 2, lampara halógena con 10 vueltas.....	43
Tabla 3.18:EQ de absorción por celda, panel 2, lampara halógena con 4 vueltas.....	44
Tabla 3.19:EQ de absorción por celda, panel 2, lampara halógena con 6 vueltas.....	44
Tabla 3.20:EQ de absorción por celda, panel 2, lampara halógena con 8 vueltas.....	45
Tabla 3.21:EQ de absorción por celda, panel 2, lampara halógena con 10 vueltas.....	45

Índice de figuras

Figura 2.1: Funcionamiento de un semiconductor, Fuente: [17].....	8
Figura 2.2: Espectro electromagnético, Fuente: Louis E. Kleiner, Coastal Carolina University.	10
Figura 2.3: Panel solar conformado por celdas solares (Fuente: AulaFacil.com).....	13
Figura 2.4: Estructura típica de un panel fotovoltaico, Fuente: [21].....	14
Figura 2.5: Hot spot en un panel solar observado desde una cámara termográfica, Fuente: [22].	16
Figura 2.6: Banda espectral de un panel solar de silicio, Fuente: [23].....	17
Figura 3.1: Set-up de la verificación de la banda de emisión de un panel de silicio.....	19
Figura 3.2: Set-up de imágenes de comprobación de la banda de emisión.....	20
Figura 3.3: Resultado de la banda de emisión del silicio.	20
Figura 3.4: Verificación de la banda de emisión mediante filtros.....	21
Figura 3.5: Subdivisión del panel 1.....	22
Figura 3.6: Set-up medición de salida de voltaje por celda, panel 1.....	24
Figura 3.7: Representaciones visuales panel 1, laser azul.....	27
Figura 3.8: Representaciones visuales panel 1, laser rojo.....	27
Figura 3.9: Representaciones visuales panel 1, laser verde.....	27
Figura 3.10: Set-up tomas fotográficas de electroluminiscencia al panel 1.	29
Figura 3.11: Imagen tomada con 0[A] y 18[V].....	30
Figura 3.12: Imagen tomada con 0.1[A] y 18[V].....	29
Figura 3.13: Imagen tomada con 0.2[A] y 19.5[V].	31
Figura 3.14: Imagen tomada con 0.3[A] y 21.5[V].....	30
Figura 3.15: Imagen tomada con 0.4[A] y 20.6[V].....	31
Figura 3.16: Imagen tomada con 0.5[A] y 20.9[V].....	30
Figura 3.17: Imagen tomada con 0.6[A] y 21.3[V].....	31
Figura 3.18: Imagen tomada con 0.7[A] y 21.5[V].....	30
Figura 3.19: Imagen tomada con 0.81[A] y 21.8[V].....	32
Figura 3.20: Imagen tomada con 0.91[A] y 22[V].....	31
Figura 3.21: Imagen tomada con 1[A] y 22[V].....	32
Figura 3.22: Imagen tomada con 1.1[A] y 22.2[V].....	31
Figura 3.23: Imagen tomada con 1.2[A] y 22.4[V].....	32
Figura 3.24: Imagen tomada con 1.3[A] y 22.6[V].....	31
Figura 3.25: Imagen tomada con 1.4[A] y 22.5[V].....	33
Figura 3.26: Imagen tomada con 1.5[A] y 22.7[V].....	32
Figura 3.27: Imagen tomada con 1.6[A] y 22.8[V].....	33
Figura 3.28: Imagen tomada con 1.7[A] y 23[V].....	32
Figura 3.29: Imagen tomada con 1.8[A] y 23.2[V].....	33
Figura 3.30: Imagen tomada con 1.9[A] y 23.3[V].....	32
Figura 3.31: Imagen tomada con 2[A] y 23.3[V].....	34
Figura 3.32: Imagen tomada con 2.1[A] y 23.4[V].....	33
Figura 3.33: Imagen tomada con 2.2[A] y 23.6[V].....	34

Figura 3.34: Imagen tomada con 2.3[A] y 23.7[V].....	33
Figura 3.35: Imagen tomada con 2.4[A] y 23.8[V].....	34
Figura 3.36: Imagen tomada con 2.5[A] y 23.9[V].....	33
Figura 3.37: Imagen tomada con 2.6[A] y 24[V].....	35
Figura 3.38: Imagen tomada con 2.7[A] y 24[V].....	34
Figura 3.39: Imagen tomada con 2.8[A] y 24.2[V].....	35
Figura 3.40: Imagen tomada con 2.9[A] y 24.2[V].....	34
Figura 3.41: Imagen tomada con 3[A] y 24.3[V].....	34
Figura 3.42: Patrones de emisión y absorción similares en panel 1.....	35
Figura 3.43: Patrones de emisión y absorción similares en panel 1.....	36
Figura 3.44: Patrones de emision y absorción similares en panel 1.....	36
Figura 3.45: subdivisión del panel 2.	37
Figura 3.46: Set up medición de salidas de voltaje del panel 2.....	38
Figura 3.47: Representación visual de panel 2, laser azul.....	41
Figura 3.48: Representaciones visuales panel 2, laser rojo.	41
Figura 3.49: Representaciones visuales panel 2, laser verde.....	41
Figura 3.50: Representaciones visuales panel 2, lampara halógena en 4 vueltas.....	46
Figura 3.51: Representaciones visuales panel 2, lampara halógena en 6 vueltas.....	46
Figura 3.52: Representaciones visuales panel 2, lampara halógena en 8 vueltas.....	46
Figura 3.53: Representaciones visuales panel 2, lampara halógena en 10 vueltas.....	47
Figura 3.54: Comportamiento del panel 2 según potencia de la lámpara.	47
Figura 3.55: Panel con 0.1[A] y 4.6[V].....	50
Figura 3.56: Panel con 0[A] y 4[V].....	49
Figura 3.57:Panel 2 con 0.2 [A] y 4.9[V].....	50
Figura 3.58: Panel 2 con 0.3 [A] y 5.1[V].....	49
Figura 3.59: Panel 2 con 0.4 [A] y 5.3[V].....	50
Figura 3.60: Panel 2 con 0.5 [A] y 5.4[V].....	49
Figura 3.61: Panel 2 con 0.6 [A] y 5.6[V].....	51
Figura 3.62: Panel 2 con 0.7 [A] y 5.7[V].....	50
Figura 3.63: Panel 2 con 0.8 [A] y 5.8[V].....	51
Figura 3.64: Panel 2 con 0.9 [A] y 6[V].....	50
Figura 3.65: Panel 2 con 1 [A] y 6.1[V].....	51
Figura 3.66: Panel 2 con 1.1 [A] y 6.2[V].....	50
Figura 3.67: Panel 2 con 1.24 [A] y 6.3[V].....	52
Figura 3.68: Panel 2 con 1.35 [A] y 6.5[V].....	51
Figura 3.69: Panel 2 con 1.4 [A] y 6.5[V].....	52
Figura 3.70: Panel 2 con 1.5 [A] y 6.6[V].....	51
Figura 3.71: Panel 2 con 1.6 [A] y 6.7[V].....	52
Figura 3.72: Panel 2 con 1.7 [A] y 6.8[V].....	51
Figura 3.73: Panel 2 con 1.8[A] y 7[V].....	53
Figura 3.74: Panel 2 con 1.9[A] y 7.1[V].....	52
Figura 3.75: Panel 2 con 2[A] y 7.1[V].....	53
Figura 3.76: Panel 2 con 2.1[A] y 7.2[V].....	52
Figura 3.77: Panel 2 con 2.2[A] y 7.4[V].....	53

Figura 3.78: Panel 2 con 2.3[A] y 7.4[V].....	52
Figura 3.79: Panel 2 con 2.4[A] y 7.5[V].....	54
Figura 3.80: Panel 2 con 2.5[A] y 7.6[V].....	53
Figura 3.81: Panel 2 con 2.6[A] y 7.7[V].....	54
Figura 3.82: Panel 2 con 2.7[A] y 7.8[V].....	53
Figura 3.83: Panel 2 con 2.8[A] y 7.9[V].....	54
Figura 3.84: Panel 2 con 2.9[A] y 8[V].....	53
Figura 3.85: Panel 2 con 3[A] y 8[V].....	54
Figura 3.86: Patrones de emisión y absorción similares en panel 2.....	55
Figura 3.87: Patrones de emisión y absorción similares en panel 2.....	56
Figura 3.88: Patrones de emisión y absorción similares en panel 2.....	56

Abreviaciones

IR: Infrared

NIR: Near infrared

EQ: Eficiencia cuantica

SWIR: Short wave IR

MWIR: Mid Wavelength IR

LWIR: Long wavelength IR

FIR: Far IR

1 introducción

La energía solar se caracteriza por aprovechar la energía electromagnética proveniente del sol, donde el principal criterio para determinar el lugar de ubicación de una planta solar es la cantidad de energía que incide sobre una unidad de área y tiempo (kWh / m^2) al día. La zona norte de Chile, más específicamente el desierto de atacama, posee la mayor incidencia solar del mundo.

En los últimos años la tecnología solar ha presentado un descenso en sus costos, por lo tanto, la capacidad instalada ha aumentado notablemente. El Ministerio de energía (2022) afirma que: “En Chile a marzo de 2022 existen 6.328 MW de instalaciones solares, logrando una penetración del 20% en el sistema”.

Además, el silicio en paneles solares se ha convertido en uno de los materiales más utilizados, no solo por su fácil y económica obtención, sino también por la calidad que brinda a los módulos fotovoltaicos. Sin embargo, estas celdas fotovoltaicas de silicio pueden desarrollar anomalías a lo largo de su vida útil. Las causas principales de falla son por temperatura, el efecto soiling, microfisuras, fracturas y hot spot.

Debido a estas causas, se vuelve necesario poder identificar celdas solares defectuosas que son responsables de la reducción de la eficiencia. Hasta el momento, las celdas fabricadas se inspeccionan por el rendimiento de la corriente o por la salida de tensión en respuesta de la luz solar absorbida, volviéndose un método poco eficiente debido al gran número de paneles solares que tiene una planta solar.

Entonces, en esta memoria de título se prueba un método de análisis de celdas solares de silicio a través de imágenes en la banda NIR, donde con ayuda de sensores ópticos y cámaras que trabajan en el infrarrojo cercano se podrá observar la emisión por electroluminiscencia de paneles fotovoltaicos de silicio en la banda de los 1150nm, donde según la intensidad por píxel, se podrá concluir el estado de estas.

Además, se obtienen diferentes eficiencias de absorción según el instrumento que se utilice para excitar cada celda. De esta manera, se podrá concluir como afecta la longitud de onda a la eficiencia, y a su vez, establecer la relación existente entre eficiencias cuánticas de absorción y patrones de emisión. Finalmente, se estima el error del método, utilizando un panel comercial y otro de tipo artesanal sin recubrimiento de vidrio.

1.1 Definición del problema

La industria fotovoltaica está dominada por silicio cristalino, estos pueden presentar posibles defectos que afectan a la eficiencia, esto requiere poder identificar rápidamente los paneles solares con celdas solares defectuosas que son responsables de la reducción de la eficiencia.

Hasta el momento, las celdas fabricadas se inspeccionan simplemente por el rendimiento de la corriente o por la salida de tensión en respuesta a la luz solar absorbida. Este método tiene muchas desventajas, convirtiéndose en un método poco eficiente, debido a la gran cantidad de paneles que puede tener una planta solar.

Además, considerando que la capacidad instalada ha aumentado notablemente durante las últimas décadas, los paneles solares fotovoltaicos de silicio se vuelven un interesante objeto de estudio. Sin embargo, hasta la fecha, no existen estudios que relacionen eficiencias cuánticas de emisión y absorción con imágenes obtenidas mediante electroluminiscencia para establecer el estado de estos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos generales

El objetivo general de esta investigación será describir un método de análisis de celdas solares de silicio mediante imágenes NIR, ya que, al aplicar corriente a un panel solar, este emitirá luz en dicha banda (electroluminiscencia) la cual puede ser captada mediante la cámara XEVA 320 (Xenics).

Por lo tanto, se busca relacionar la eficiencia cuántica de absorción de cada celda con la intensidad de emisión por píxel captada con la cámara y de esta manera, se podrá conocer el estado de cada celda. Además, se busca encontrar patrones coincidentes entre la eficiencia de absorción y las imágenes obtenidas. Finalmente, se calcula el error de este método, considerando la reflexión presente debido al recubrimiento de vidrio de un panel comercial.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Medir el espectro electromagnético del panel comercial (panel 1) al aplicarle corriente eléctrica.
2. Realizar fotografías de la electroluminiscencia del panel 1 al aplicarle diferentes valores de corriente eléctrica mediante una cámara NIR.
3. Estimar la eficiencia cuántica de absorción de las celdas solares de un panel comercial mediante tres tipos distintos de luz laser, con distintas longitudes de onda.
4. Estimar la eficiencia cuántica de emisión del panel solar comercial.
5. Realizar los objetivos 2,3 y 4 pero con un panel solar construido a mano (panel 2), el cual no cuenta con recubrimiento de vidrio.
6. Determinar la correlación de patrones de eficiencias cuánticas de emisión y absorción.
7. Calcular el error de este análisis considerando la reflexión presente en un panel fotovoltaico convencional.

1.3 Alcances y limitaciones

Esta memoria de título busca continuar con el trabajo realizado en el curso de Proyecto de Habilitación Profesional, por lo tanto, como alcance se busca materializar la metodología ya establecida, tanto la experimentación como el posterior análisis de resultados. Así, se podrá establecer un método de análisis de celdas solares de silicio, totalmente caracterizado y cuantificado.

Una de las grandes limitaciones de este proyecto es el valor monetario de los implementos a utilizar, debido a que la cámara XEVA 320 tiene un gran valor comercial. Por otro lado, se debe tener extremo cuidado, paciencia y detalle a la hora de realizar las mediciones, ya que factores como la hora del día en la que se trabaje, el clima o la temperatura pueden traer resultados imprecisos. Además, se debe tener bastante delicadeza al construir el panel artesanal, ya que las celdas individuales son sumamente frágiles y fáciles de dañar.

1.4 Metodología

La metodología de trabajo será de manera presencial, donde la mayoría de las experiencias serán realizadas en el laboratorio SP&R, sin embargo, algunas mediciones serán efectuadas en el laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia, debido a que este cuenta con una habitación oscura, donde las mediciones podrán ser más precisas.

Esta memoria de título se divide en 5 grandes partes, se comienza con la verificación de la banda de emisión de un panel fotovoltaico de silicio, este experimento será la base de esta memoria de título, ya que desde este punto se podrá dar paso a las siguientes experimentaciones.

Luego, se procede a estimar el estado del panel solar comercial midiendo su salida de voltaje y calculando su eficiencia de absorción mediante 3 tipos diferentes de luz láser a diferentes longitudes de onda, a partir de estos resultados se realiza una representación visual con el fin de poder encontrar patrones similares con las imágenes por electroluminiscencia.

Como tercera etapa se realizan tomas del panel con la cámara XEVA320, donde la intensidad por píxel de estas imágenes se compara con la eficiencia de absorción, buscando patrones similares. Por último, como cuarta y quinta etapa, se efectúa el mismo procedimiento mencionado, pero con un panel fotovoltaico de tipo artesanal sin recubrimiento de vidrio.

2 Marco Teórico

2.1 Reseña Histórica

En 2005 comenzaron los primeros análisis de módulos fotovoltaicos con la ayuda de nuevas tecnologías. Donde, mediante fotografías se estudió la distribución de longitud de difusión de portadores minoritarios en células solares de silicio policristalino y se establece una relación directamente proporcional entre la distribución de intensidad de la emisión que tenían las imágenes y el mapeo de la longitud de difusión de portadoras [5].

Tres años más tarde, en la 23ª conferencia europea de energía solar fotovoltaica en el año 2008, se presentan los avances en la caracterización de células solares de silicio con métodos de imagen infrarroja [6], además, muestra las mejoras más recientes sobre el uso de estas cámaras, las cuales también servirían para detectar corrientes y voltajes de ruptura.

Ya en el año 2012, Raptor Photonics publica una Technical Note, en la cual se realiza una comparación entre tecnología SWIR y EMCCD para caracterizar módulos fotovoltaicos, donde concluye que SWIR permite la captura de imágenes más rápida, aunque con una resolución limitada y a un coste más elevado, mientras que EMCCD ofrece una mayor resolución y una alternativa de mejor coste, pero a una frecuencia de imagen limitada [7].

Cuatro años más tarde, en la 32ª conferencia europea de energía solar fotovoltaica, se presenta una investigación sobre imágenes de electroluminiscencia en exteriores en módulos fotovoltaicos [8], donde analizan distintos factores que pueden afectar las mediciones.

En el mismo año, se publica un proyecto de investigación el cual consiste en el estudio de la fotoluminiscencia en obleas y células solares de Silicio. En el cual hace una caracterización general sobre módulos fotovoltaicos, el cual se centra en abarcar distintos focos de análisis. Además, propone la fotoluminiscencia en células solares y obleas de silicio como un método de caracterización [9].

Ya en el año 2019 el uso de tecnología para detectar hot spots comenzaba a tomar fuerza, principalmente mediante cámaras termográficas, sin embargo, aún seguía siendo costoso, por lo tanto, se publica el estudio de Termografía infrarroja de bajo costo, donde mediante el análisis de curvas I-V/P-V y de una matriz de sensores de temperatura validan el uso de cámaras termográficas más económicas [10].

Un año más tarde, en 2020, se publica un trabajo de investigación, el cual consiste en detectar anomalías en paneles fotovoltaicos basándose en imágenes multiespectrales, en el cual principalmente se utiliza el espectro visible para localizar trizaduras y otros defectos generados en la superficie de los paneles, el empleo de fotografías termográficas y además algunos algoritmos desarrollados para el análisis de imágenes termográficas y RGB [11].

En este mismo año, princeton instruments publica una application note, en la cual muestra mediante imágenes de fotoluminiscencia en el NIR/SWIR la caracterización de células solares y además compara algunas cámaras con sus ventajas y desventajas para dicha aplicación [12].

Durante el año 2023 se han publicado diversas investigaciones con respecto a la electroluminiscencia en paneles solares. Una de ellas fue la investigación de imágenes de paneles fotovoltaicos por luminiscencia, desde su extracción y técnicas de procesamiento digital de estas [13], hasta su clasificación para detección de anomalías [14] y la utilización de inteligencia artificial mediante redes neuronales para la clasificación de este tipo de imágenes [15].

Los módulos fotovoltaicos de silicio sin duda han sido un foco de estudio en el cual la tecnología cada vez ha tomado más protagonismo en la investigación, sin embargo, en esta área sigue débil el análisis de celdas solares de silicio a través de imágenes en la banda NIR, estableciendo una relación con respecto a la eficiencia cuántica de absorción. Hasta la fecha no existe un estudio en el cual de manera detallada explique la relación de la intensidad emitida por cada píxel con su respectiva eficiencia cuántica, convirtiéndose en un importante objeto de estudio, siendo el propósito de esta memoria de título.

2.2 Energía solar

La energía solar irradiada sobre la tierra permite la existencia de organismos vivos y además se encarga de dar vida al planeta Tierra, Osses (2019), indica en su libro que: “el flujo de energía que atraviesa una superficie de $1m^2$ perpendicular a los rayos solares es de 1.367 Watt. A partir de esto se ha acordado internacionalmente la constante solar E_0 con un valor de $1367 \text{ W/ } m^2$, valor que varía un 7% al año por la excentricidad de la órbita terrestre alrededor del Sol”.

Existen distintas tecnologías para aprovechar la energía solar, siendo una de las más comunes las celdas fotovoltaicas. Estas son las que han experimentado un mayor desarrollo en el último tiempo, ya que, los costos de producción cada vez son menores, son fáciles de implementar y su eficiencia en términos de conversión energética cada vez es mayor.

Un haz de luz proveniente de la energía del sol se encuentra constituido por fotones. Cada fotón posee un nivel de energía asociado, el cuál dependerá de la longitud de onda a la que viaje. Esta energía, está caracterizada por las siguientes relaciones matemáticas [16].

$$E_f = h \cdot \nu, \quad (2.1)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad (2.2)$$

Donde:

- E_f : Energía de un foton.
- ν : frecuencia asociada a un foton.
- h : Constante de Planck.
- c : velocidad de la luz.
- λ : Longitud de onda.

/

2.3 Semiconductor

Los materiales semiconductores tienen la característica de comportarse como un conductor o como un aislante dependiendo de diversos factores, en este proyecto es de suma importancia manejar la teoría de semiconductores debido al hecho de que gran parte de las celdas fotovoltaicas son construidas a base de silicio, el cual es un material semiconductor.

En un átomo de silicio, los electrones se mantienen juntos con suficiente fuerza. Los electrones ubicados en la banda de valencia necesitan de un estímulo, por ejemplo, suministrar temperatura al material, por ende, a una temperatura de cero absoluto, no existirá ninguna vibración térmica, así, no abran electrones que salten a la capa de conducción, y al no haber corriente, el material se comportará como aislante.

Al suministrar energía a los electrones, estos podrán romper sus enlaces covalentes y saltar de la banda de valencia a la banda de conducción, convirtiéndose en electrones libres. Por lo tanto, siempre que un electrón salte a una banda superior, se creará un hueco en la banda de valencia, los cuales actúan como partículas con carga positiva, así, al aumentar la temperatura, un mayor número de electrones se eleva y aumentará la corriente [17].

Para que un electrón logre dar el salto y ubicarse en la banda de conducción, es necesario que se le suministre una cantidad de energía suficiente, este salto energético se llama banda prohibida o gap de energía y su anchura es característica de cada material semiconductor ($E_g = 1,12 \text{ eV}$ para el Si).

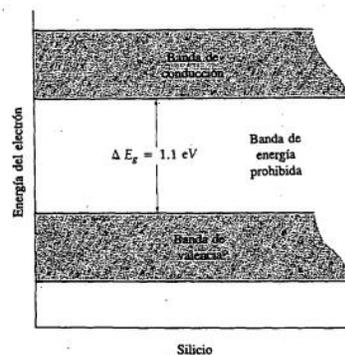


Figura 2.1:Funcionamiento de un semiconductor, Fuente: [17].

2.4 Efecto fotoeléctrico

(Cervantes-Cota, 2016) indica: “Si iluminamos una superficie metálica con un haz luminoso de frecuencia apropiada (por ejemplo, se ilumina sodio con luz a una frecuencia de $6 \cdot 10^{14}/s$) se emiten electrones en la superficie. Esta emisión de electrones desde la superficie por la acción de la luz se denomina efecto fotoeléctrico”. Por lo tanto, este se define como la transformación parcial de la energía lumínica en energía eléctrica, siendo la base del funcionamiento de celdas solares fotovoltaicas.

2.5 Luminiscencia

La luminiscencia es un proceso en el cual un material genera radiación proveniente de una fuente distinta a la combustión, es decir, es la emisión por diferentes medios a temperaturas bajas, o por lo menos más bajas, a las que necesita el proceso de combustión.

Cuando cierto material absorbe energía, una parte de esa energía se emite en forma de luz, ya que esta energía hará que un electrón se excite, saltando a una órbita exterior, cuando este electrón vuelve a su estado original, entonces caerá, y la energía sobrante se emitirá en forma de fotones de luz [18].

Según el tipo de excitación, la cual será la encargada de producir luminiscencia, se le asignarán diferentes nombres, siendo las siguientes las más comunes:

- Fotoluminiscencia: Es la emisión de luz producida por ciertos materiales que son irradiados por luz ultravioleta [18].
- Electroluminiscencia: Es un tipo de luminiscencia en la que un material emite luz en respuesta a una corriente eléctrica.

2.6 Espectro electromagnético

Se le llama espectro electromagnético a todas las longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas. El cual incluye Rayos Gamma, rayos X, Radiación UV, luz visible, radiación infrarroja, y ondas radioeléctricas [19].

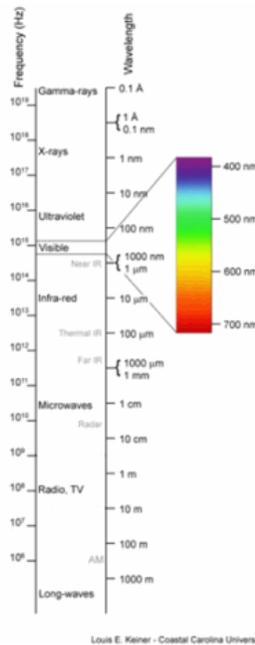


Figura 2.2: Espectro electromagnético, Fuente: Louis E. Kleiner, Coastal Carolina University.

En este proyecto de investigación se espera que el panel solar emita en la banda NIR, el cual es una subdivisión del espectro electromagnético infrarrojo, en la siguiente tabla se muestran las diferentes bandas del infrarrojo:

Tabla 2.1: Clasificaciones de la banda infrarroja.

Banda IR	Longitud de onda (Micrómetros)
(NIR)	0.7 – 1.4
(SWIR)	1.4-3
(MWIR)	3.8
(LWIR)	8-15
(FIR)	15-1000

2.7 Celdas fotovoltaicas

Duarte (2008), indica que: “Las células fotovoltaicas son dispositivos que convierten energía solar en electricidad, en este proceso la luz incide sobre un dispositivo semiconductor de dos capas, donde se produce una diferencia de voltaje o de potencial entre las capas. Este voltaje es capaz de conducir una corriente eléctrica a través de un circuito externo, de modo que se pueda producir trabajo útil”.

Una celda fotovoltaica es un dispositivo electrónico en el cual inciden los rayos solares y los fotones de la luz solar son absorbidos por las celdas para luego irradiar electrones, cuando estos electrones son capturados, entonces se forma una corriente eléctrica, la cual es utilizada como energía [20].

2.7.1 Estructura básica de una celda fotovoltaica

Para conseguir un flujo de corriente que sea útil para el sinnúmero de aplicaciones para las cuales se utilizan las celdas fotovoltaicas, es importante que estas contengan una unión pn, lo que consiste en fabricar un semiconductor p y otro tipo n y unirlos de manera que la red cristalina del semiconductor no se interrumpa al pasar de una región a otra.

Al existir la unión pn, se genera un campo eléctrico el cual fluye desde n hacia p, ya que esta unión separa los pares electrón-hueco, de manera que los electrones se dirigen hacia el lado n y los huecos se dirigen hacia el lado p, donde se produce la corriente eléctrica, por lo tanto, permite el funcionamiento de la célula como generador fotovoltaico.

Otro elemento relevante en la estructura de una celda fotovoltaica es la malla de metalización frontal, la cual es la encargada de extraer la corriente eléctrica de la célula. Una característica fundamental de esta malla a la hora de fabricar la celda es su tamaño, ya que al ser muy grande se puede oponer al paso de la luz del sol, pero si es muy pequeña, entonces aumentará la resistencia en serie y, por lo tanto, se verá una baja en la eficiencia de la célula [20].

2.7.2 Principio de funcionamiento de celdas fotovoltaicas

Para comprender el principio de funcionamiento de una celda fotovoltaica hay que conocer los siguientes términos:

E_f : Energía de un fotón.

\emptyset : Energía mínima necesaria para desplazar un electrón de un sólido hacia un punto fuera de su superficie.

Como ya se mencionó, los fotones que componen un haz de luz tendrán una energía E_f , la cual dependerá de su longitud de onda. Durante el proceso de fotoemisión el electrón absorberá cierta energía, si esta energía absorbida es mayor que \emptyset , entonces el electrón será arrancado del material, si la energía absorbida es menor que \emptyset , entonces el electrón no será capaz de escapar del material y por ende no habrá flujo de electrones [11].

Si un fotón colisiona con un electrón y su E_f es mayor que \emptyset , entonces parte de la energía, más precisamente la porción \emptyset , es utilizada para liberar al electrón del material, mientras que la otra parte de la energía se utilizará como la energía cinética del electrón, la cual se define en la ecuación 2.3, por otro lado, si E_f es menor que \emptyset , y un fotón colisiona con un electrón, entonces el electrón conservará su estado energético [11].

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 . \quad (2.3)$$

Un rayo de luz que incide sobre un material semiconductor generará muchos pares electrón-hueco, ya que, si el electrón alcanza la energía suficiente, este saldrá de su órbita creando un hueco. El electrón que fue liberado viajará aleatoriamente en el material, al igual que los huecos, cuando ambos se encuentran y colisionan, se generará recombinación, liberando calor hasta llegar al estado de equilibrio [11].

Como ya se mencionó, debido a la juntura pn, se generarán campos eléctricos, los cuales serán los encargados de ordenar los pares electrón-hueco, generando un flujo direccionado de electrones y de esta manera, generar corriente eléctrica [11].

2.8 Panel solar fotovoltaico

Con el fin de poder obtener un nivel más alto de energía eléctrica, las celdas fotovoltaicas individuales se pueden unir entre sí, en configuración serie-paralelo, formando un panel solar fotovoltaico. Los paneles fotovoltaicos están diseñados de cierta manera, con el objetivo de captar la mayor cantidad de radiación solar, protegiéndolas de las condiciones ambientales y otros factores que pueden contribuir a una disminución de su eficiencia. [11].

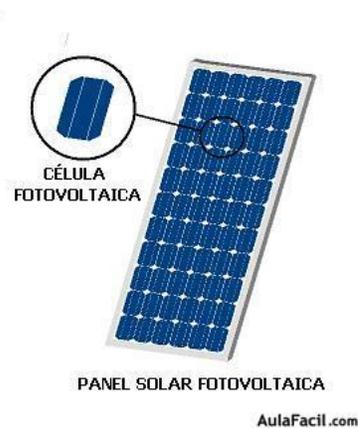


Figura 2.3: Panel solar conformado por celdas solares (Fuente: AulaFacil.com).

La figura 2.4 muestra la estructura típica de un panel fotovoltaico. Los componentes indicados en la figura son:

- Vidrio templado: Capa superior del panel, generalmente hecha de vidrio templado, su función es proteger a las celdas fotovoltaicas de golpes y así evitar daños en su interior, además sirve como filtro de radiación, dejando fuera gran parte de la radiación UV.
- Encapsulado EVA: La función del Etileno-Vinil-Acetato es aislar las celdas de elementos externos como aire o humedad. Cuando se aplica calor sobre el EVA, se genera una fina capa selladora y aislante en torno a las celdas.
- Celdas solares: Tienen como función transformar la energía solar en energía eléctrica.
- Lámina de polímero posterior: Capa inferior del panel fotovoltaico, su función es proteger a las células fotovoltaicas de los efectos degradantes de la radiación UV y actuar como aislante eléctrico.

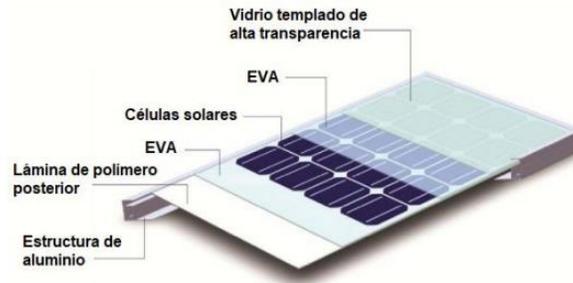


Figura 2.4: Estructura típica de un panel fotovoltaico, Fuente: [21].

2.9 Fallas en sistemas fotovoltaicos

En sistemas fotovoltaicos hablar sobre eficiencia, es bastante común, ya que esta puede verse reducida debido a que los componentes del sistema no estén operando correctamente.

La presencia de fallas en sistemas fotovoltaicos es muy recurrente, y estas se pueden encontrar desde la instalación de los paneles, durante su vida útil debido a condiciones climáticas extremas o simplemente al desgaste de sus componentes. A continuación, se muestran las fallas más propensas a ocurrir:

2.9.1 Fallas por temperatura

Uno de los mayores problemas en paneles fotovoltaicos son los relacionados con la temperatura, debido a que mientras mayor es la radiación recibida, mayor es la potencia generada, no obstante, esto significa un aumento en la temperatura de cada celda, lo que trae como consecuencia una caída en su desempeño. La mayor producción energética de cada panel está dada por el punto en que ambas condiciones se equilibran.

2.9.2 Efecto del polvo

Debido a que los paneles fotovoltaicos están constantemente expuestos al viento, estos acumulan polvo en su superficie, esta capa de polvo produce un efecto sombra o soiling, evitando que los fotones provenientes del sol interactúen sobre toda el área de la celda, provocando que los paneles fotovoltaicos generen un nivel menor de corriente y, en consecuencia, una reducción de su eficiencia.

2.9.3 Efecto de fisuras y fracturas

Debido a la fragilidad de su estructura, al momento de instalarlos es frecuente que se formen fisuras o fracturas, debido a que no siempre son manipulados con el cuidado que necesitan, o bien, debido a condiciones climatológicas extremas como el granizo o fuertes lluvias [11].

Las fracturas impiden la captación del total de fotones incidentes sobre el panel, y estas pueden producirse en 2 partes de este. Si la fractura se produce en el cristal que recubre el panel, entonces, debido a la refracción y reflexión, se dispersará la trayectoria de los fotones y se reducirá su eficiencia. Por otro lado, si la fractura se produce en las obleas semiconductoras que conforman la juntura P-N, entonces se alterará la interacción entre los materiales, lo que se traduce en una menor movilidad de electrones desde la capa P hasta la N, por lo tanto, el flujo de corriente sería menor [11].

Si la conexión entre paneles del sistema es en serie, el panel fracturado limitará toda la corriente del arreglo, lo que significa que el arreglo completo entregará una potencia menor, independientemente de que los demás paneles del grupo no tengan ninguna falla. Este problema, a diferencia de los problemas anteriormente mencionados, es de mayor envergadura, debido a que el panel fotovoltaico debe ser reemplazado [11].

2.9.4 Efecto de microfisuras

Se le llama microfisura a la rotura que se genera dentro de una celda fotovoltaica, la cual, es difícil de identificar mediante la vista. Sus consecuencias son similares a las fisuras y fracturas, ya que finalmente la corriente eléctrica es la que se ve reducida.

Las causas principales de esta falla en general corresponden a errores humanos de fabricación, por ejemplo, en el proceso de ensamblado, utilización de materiales de mala calidad, etc. Estos factores generan estrés mecánico, lo que finalmente produce pequeñas fracturas dentro del material [11].

2.9.5 Efecto de hot spots

Los hot spots se forman debido a otras fallas previas, ya que, como las celdas de un panel están organizadas en serie, la corriente que circula por el arreglo será homogénea, por lo tanto, si existe una celda defectuosa, generará menor cantidad de corriente también en celdas que estén en perfecto estado, generando un cuello de botella, trayendo como consecuencia que la corriente eléctrica total del panel sea equivalente a la corriente generada por la celda defectuosa.

La diferencia de corriente generada por una celda defectuosa y por celdas sanas es disipada en forma de calor sobre la celda con fallas. Esto produce que el panel guarde el calor de manera no uniforme en su estructura y que el estado de sus celdas varíe a lo largo de sí, creando los hot spots. La presencia de estos constituye una serie de problemas, ya que significa una reducción de la producción energética del panel fotovoltaico [11].

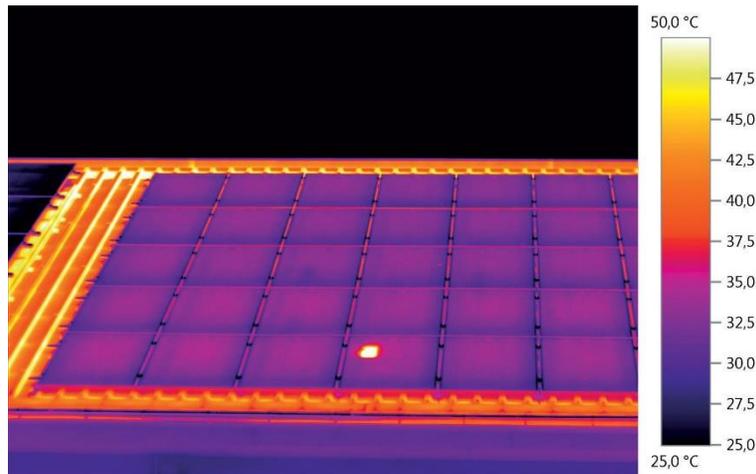


Figura 2.5: Hot spot en un panel solar observado desde una cámara termográfica, Fuente: [22].

2.10 Eficiencia cuántica

La eficiencia cuántica (EQ) se define como la relación entre las portadoras que fueron absorbidas por la célula solar y la cantidad de fotones totales incidentes, es decir, es la probabilidad de que el fotón que impacta en el dispositivo sea absorbido y genere un par electrón-hueco.

Por lo tanto, si la energía de los fotones está por debajo de la banda Gap, entonces la eficiencia cuántica será cero, por otro lado, si todos los fotones en una cierta longitud de onda se absorben y generan pares electrón- hueco, entonces, la eficiencia cuántica será máxima.

A continuación, se presenta el comportamiento de la eficiencia cuántica de un panel fotovoltaico de silicio, la cual varía según la longitud de onda del haz de luz incidente.

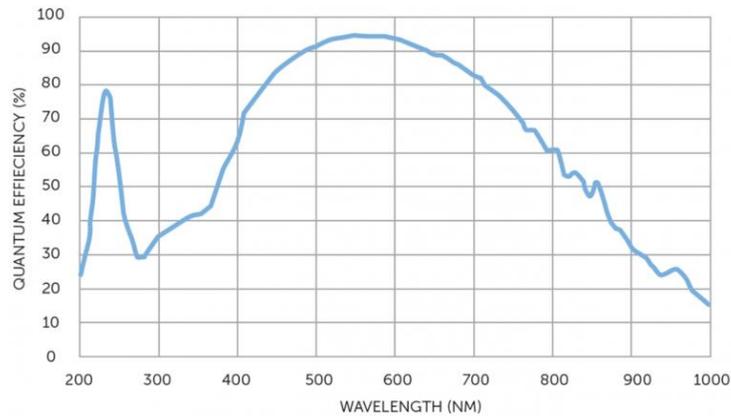


Figura 2.6: Banda espectral de un panel solar de silicio, Fuente: [23].

Para calcular la eficiencia cuántica de absorción para cada celda, es necesario dividir la salida de voltaje de cada una de las celdas (V_{Out}) por la potencia óptica de la herramienta utilizada para excitar cada una de ellas (P_{In}), como se muestra a continuación:

$$EQ_{Abs} = \frac{V_{Out}}{P_{In}} \quad (2.4)$$

Por otro lado, también se podría calcular la eficiencia cuántica estimada al operar como un panel en modo inverso, o eficiencia de emisión, la cual se calcula mediante la división de la potencia óptica de salida (P_{Out}), es decir, el área bajo la curva del espectro de emisión del panel, con la corriente utilizada para polarizar el panel (I_{In}):

$$EQ_{em} = \frac{P_{Out}}{I_{In}} \quad (2.5)$$

3 Resultados Experimentales

3.1 Verificación de la banda de emisión de un panel fotovoltaico de silicio

3.1.1 Descripción de la experiencia

Esta experiencia, la cual es el experimento base de este proyecto, consiste en comprobar que un panel solar de silicio emite en la banda infrarroja al suministrarle corriente eléctrica (por electroluminiscencia), por lo tanto, se le suministran aproximadamente 3[A] de corriente eléctrica al panel solar, y posteriormente se mide la banda de emisión con el espectrofotómetro NIR-512 (Ocean Optics).

Considerando que la banda espectral debería estar en el NIR, al aplicarle corriente y generar tomas con una cámara VIS-NIR, esta sí debiera captar su emisión, por lo tanto, se realizan tomas con la cámara Xeva 320(Xenics) y se utilizan 2 diferentes tipos de filtros, con el fin de confirmar lo mencionado.

3.1.2 Problemas y observaciones

Se debe setear un tiempo de integración y un average correcto, en caso contrario, la banda no se refleja con claridad debido a la reducida cantidad de fotones con la que se trabaja. Cuando se logran manejar estos factores, se elige un tiempo de integración de 5[s] y un average de 3.

3.1.3 Set-up

A. Set-up 1: Medición de la banda espectral.

Para este experimento los elementos a utilizar son:

- Un computador con el software “Ocean Optics SpectralSuite”.
- Fibra óptica VIS-NIR.
- Panel solar.
- Espectrofotómetro NIR-512.
- Fuente de poder DC POWER SUPPLY HY 3003D-Y.
- Lente colimador.

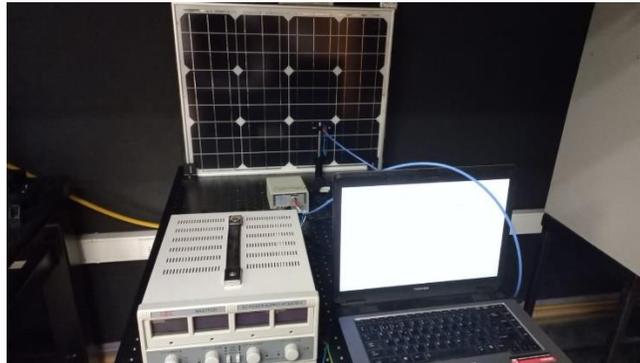


Figura 3.1: Set-up de la verificación de la banda de emisión de un panel de silicio.

Este set-up consiste en conectar la fuente de poder al panel solar, para suministrarle corriente, por otro lado, el computador se conecta al espectrofotómetro y este último, mediante una fibra óptica se conecta al lente colimador para poder recibir fotones y así, la información se transmite al software.

B. Set-up 2: Comprobación de la banda espectral mediante filtros.

Para esta experiencia los elementos a utilizar son:

- Un computador.
- Panel solar.
- Cámara Xeva 320.
- Fuente de poder DC POWER SUPPLY HY 3003D-Y.
- Filtro pasa banda en 1100nm.
- Filtro pasa banda en 1260nm.



Figura 3.2: Set-up de imágenes de comprobación de la banda de emisión.

En este experimento, la fuente de poder se conecta al panel solar y se aplican 3[A] de corriente, por otro lado, la cámara enfoca hacia el panel solar y se conecta al computador, las tomas se realizan con 2 diferentes filtros, un filtro que considera la banda de emisión del panel y otro que contempla una banda diferente.

3.1.4 Resultados

A. Resultados medición de la banda espectral

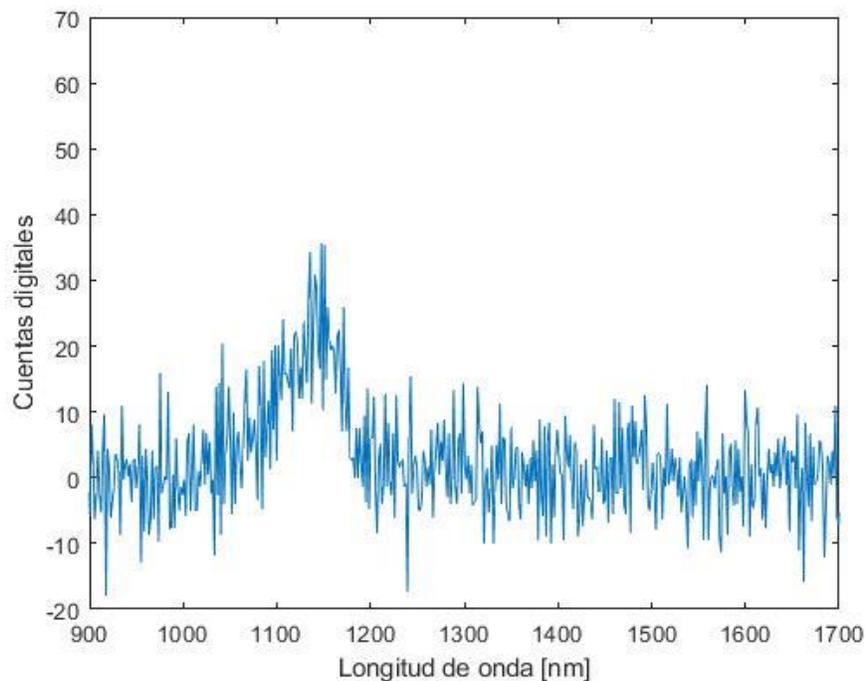
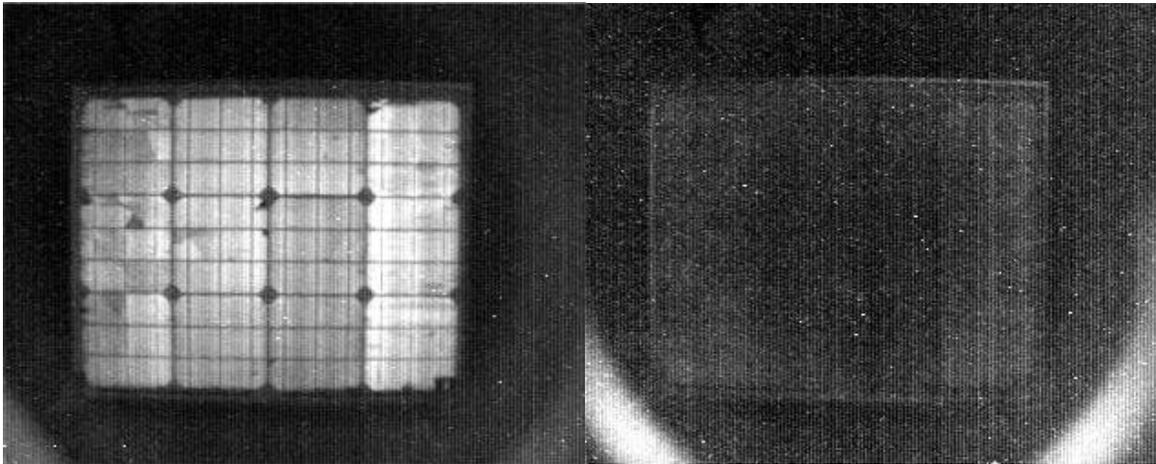


Figura 3.3: Resultado de la banda de emisión del silicio.

Observando esta figura, se puede concluir que el panel emite en el infrarrojo, más específicamente en el NIR, ya que la banda de emisión se encuentra en los 1150nm, por lo que, al aplicarle corriente y generar tomas con una cámara VIS-NIR, esta si debiera captar su emisión, por lo tanto, este experimento da paso hacia las siguientes experimentaciones.

B. Resultados verificación de la banda espectral



(a)

(b)

Figura 3.4: Verificación de la banda de emisión mediante filtros.

(a) Imagen tomada con filtro pasa banda en 1100nm, (b) Imagen tomada con filtro pasa banda en 1260nm.

De la figura anterior se puede confirmar la banda de emisión de un panel fotovoltaico de silicio ya que, al involucrar filtros en las tomas, se puede confirmar que se tiene una emisión por electroluminiscencia en la banda de los 1150nm, por ende, al trabajar en otra banda, no se podrá observar ningún tipo de actividad.

3.2 Estado de un panel fotovoltaico de tipo comercial (Panel 1)

3.2.1 Descripción de la actividad

Esta actividad se realiza en el laboratorio de Sistemas Eléctricos de potencia debido a que este cuenta con una habitación oscura, ya que se busca que no exista ningún tipo de luz en el ambiente que pudiese afectar en los resultados, debido a la dificultad de esto, se mide también el offset para posteriormente restarlo de los resultados. Para efectos técnicos del experimento se subdivide el panel solar y se enumeran sus celdas de la siguiente manera:

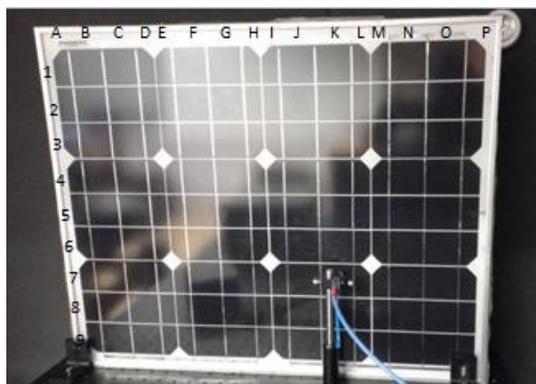


Figura 3.5: Subdivisión del panel 1.

Entonces, se ilumina cada una de las celdas o subdivisiones de ella con 3 diferentes luces láser de color rojo, verde y azul y con la lámpara halógena HL-2000-FHSA, por otro lado, con el osciloscopio TDS 1002 se mide y se registra la salida de voltaje de la celda que se alumbra y el offset presente en el momento.

Una vez obtenidas todas las salidas de voltaje de cada una de las celdas del panel, con las diferentes luces, se procede a calcular la eficiencia cuántica de absorción de cada celda con la ecuación 2.4, donde P_{in} es la potencia óptica de cada luz utilizada, la cual fue calculada midiendo el área bajo la curva de su contenido en espectro.

Cabe destacar que la potencia óptica de la lámpara halógena se mide a diferentes intensidades, la cual varía según la cantidad de vueltas que se le diera a la perilla que regula el obturador, en la siguiente tabla se muestran los resultados:

Tabla 3.1: Resultados potencia óptica.

Tipo de luz	laser			lámpara halógena				
Característica	Azul	Rojo	Verde	2 vueltas	4 vueltas	6 vueltas	8 vueltas	10 vueltas
Potencia óptica [uw/cm2]	21.21	20.20	19.65	0.03	41.1	142.6	210.47	225.93

De los resultados anteriores, no se considera válida la potencia óptica obtenida en 2 vueltas, ya que el espectrofotómetro es incapaz de medir una potencia tan baja, por lo tanto, se realizan mediciones desde 4 vueltas en adelante. Además, considerando que la lámpara halógena HL-2000-FHSA tiene contenido espectral desde los 360 a los 2400nm, pero que la eficiencia cuántica del silicio es nula luego de los 1100nm, la potencia óptica de la lámpara es calculada considerando el área bajo la curva de su espectro hasta los 1100nm.

Una vez obtenidas todas las potencias ópticas de luz incidente y las salidas de voltaje por cada celda utilizando las diferentes herramientas, se calcula la eficiencia cuántica de absorción por celda. Estos resultados, se tabulan y luego se digitalizan para obtener una representación visual, las cuales servirán a futuro para buscar patrones similares con imágenes mediante electroluminiscencia.

Cabe destacar que a las representaciones se le asignan intensidades altas para celdas con mayor salida de voltaje e intensidades bajas para celdas con menor salida de voltaje. Además, con el fin de poder compararlas entre sí, se establece el máximo global entre todas las mediciones de un mismo panel con un mismo tipo de luz y este máximo se establece como máximo de todas las representaciones.

3.2.2 Problemas y observaciones

Se debe tener en consideración que el offset sea el mismo durante todo el experimento, esto es difícil de conseguir, ya que la habitación oscura no está completamente aislada de la luz, por lo tanto, factores como el clima y la hora del día influyen en los resultados, volviéndose necesario medir también el offset existente durante las mediciones, y restarlo en el resultado final.

Por otro lado, debido al recubrimiento de vidrio del panel solar, la luz aplicada mediante la lámpara HL-2000-FHSA se refleja y viaja por la lámina protectora de vidrio, por lo tanto, las mediciones con este tipo de instrumento no son representativas ni válidas para su posterior análisis, ya que la salida de voltaje considera la celda alumbrada, pero también las

celdas vecinas. Debido a que la luz láser es de tipo coherente, la reflexión no está presente en estas mediciones, considerándose resultados válidos.

3.2.3 Set-up

Para este experimento son necesarios los siguientes elementos:

- Habitación oscura.
- Panel solar.
- Osciloscopio TDS 1002 Tektronix.
- Lámpara HL-2000-FHSA.
- Luz láser azul, roja y verde.
- Fibra óptica VIS-NIR.



Figura 3.6: Set-up medición de salida de voltaje por celda, panel 1.

3.2.4 Resultados

A. Salidas de voltaje por celda

Tabla 3.2: Salidas de voltaje por celda, panel 1, laser azul.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
1	270	60	440	350	230	230	230	230	230	220	200	230	40	40	350	350	
		250	120										200	200			
2	270	260	250	350	230	220	240	240	240	200	40	150	300	350	350	350	350
3	270	260	260	270	230	240	250	250	250	230	200	250	350	360	360	360	
4	40	160	150	150	300	200	200	200	120	130	120	130	350	360	370	380	
	200		40	40													150
5	300	310	300	310	40	200	210	150	150	100	110	120	120	350	380	360	380
					150												
6	320	330	260	260	210	230	240	220	120	130	130	120	350	360	380	380	
7	40	100	40	360	360	160	170	180	190	150	150	150	150	350	360	380	380
	250	250	100														
8	260	200	40	360	360	160	160	170	170	140	140	130	130	350	390	370	390
		250	200														
9	260	250	370	370	180	190	160	170	120	130	140	50	350	390	370	390	

Tabla 3.3: Salidas de voltaje por celda, panel 1, laser rojo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
1	300	60	40	400	260	270	290	280	250	260	250	260	40	40	420	420	
		340	200										250	250			
2	300	310	310	400	260	270	280	270	250	250	40	150	350	420	420	420	420
3	310	320	320	320	260	270	270	270	250	270	250	280	420	420	420	420	
4	40	230	230	230	370	260	260	260	180	190	190	190	430	430	430	420	
	270		40	40													200
5	360	360	370	370	40	240	270	200	40	180	170	170	420	410	410	410	
					200												
6	360	360	320	320	280	280	280	280	180	180	180	180	420	410	410	420	
7	40	100	40	400	410	230	250	250	250	180	180	150	150	420	440	440	440
	310	300	100														
8	320	300	40	400	410	230	240	210	240	180	150	150	150	440	440	430	430
		300	300														
9	320	320	420	420	240	220	210	220	180	150	150	150	400	450	450	450	

Tabla 3.4: Salidas de voltaje por celda, panel 1, laser verde.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
1	350	60	40	450	350	340	330	330	320	330	300	310	40	40	450	450	
		360	230										300	300			
2	360	370	360	450	350	340	340	320	330	300	40	200	400	470	470	480	470
3	370	360	360	360	350	320	300	300	310	320	320	330	450	500	480	480	
4	40	260	260	260	440	350	340	300	250	250	250	250	500	500	500	500	
	350		40	40													250
5	430	460	420	430	40	250	300	250	250	250	250	250	480	500	500	490	
					250												
6	430	430	360	360	300	310	320	300	250	250	250	250	480	490	490	490	
7	40	80	50	460	470	250	250	250	260	270	250	250	500	510	520	530	
	340	350	350														
8	360	350	40	460	480	270	270	270	270	250	250	250	530	470	480	570	
		350	350														
9	360	360	470	470	270	270	270	270	250	250	250	250	570	570	570	570	

B. Eficiencia cuántica de absorción por celda

Tabla 3.5: Eficiencia cuántica de absorción por celda, panel 1, laser azul.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P		
1	270	60	440	350	230	230	230	230	230	220	200	230	40	40	350	350		
		250	120										200	200				
2	270	260	250	350	230	220	240	240	240	200	40	150	300	350	350	350	350	
3	270	260	260	270	230	240	250	250	250	230	200	250	350	360	360	360		
4	40	160	150	150	300	200	200	200	40	40	120	130	120	130	350	360	370	380
	200		40	150					150									
5	300	310	300	310	40	200	210	150	40	100	110	120	120	350	380	360	380	
					150			150										
6	320	330	260	260	210	230	240	220	120	130	130	120	350	360	380	380		
7	40	100	40	360	360	160	170	180	190	150	150	150	150	350	360	380	380	
	250	250	100															
8	260	200	40	360	360	160	160	170	170	140	140	130	130	350	390	370	390	
		250	200															
9	260	250	370	370	180	190	160	170	120	130	140	50	350	390	370	390		

Tabla 3.6: Eficiencia cuántica de absorción por celda, panel 1, laser rojo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P		
1	312.5	62.5	41.7	416.7	270.8	281.3	302	281.7	260.4	270.8	260.4	270.8	41.7	41.7	437.5	437.5		
		354.2	208.3										250.4	260.4				
2	312.5	322.9	322.9	416.7	270.8	281.3	291.7	281.3	260.4	260.4	41.7	156.3	364.6	437.5	437.5	437.5	437.5	
3	322.9	333.3	333.3	333.3	270.8	281.3	281.3	281.3	260.4	281.3	265.3	291.7	437.5	437.5	437.5	437.5		
4	41.7	239.6	239.6	239.6	385.4	270.8	270.8	270.8	41.7	41.7	187.5	197.9	197.9	197.9	447.9	447.9	447.9	437.5
	281.3		41.7	208.3					208.3									
5	375	375	385.4	385.4	41.7	250	281.3	208.3	208.3	187.5	177.1	177.1	177.1	437.5	427.1	427.1	427.1	
					208.3													
6	375	375	333.3	333.3	291.7	291.7	291.7	297.7	187.5	187.5	187.5	187.5	437.5	427.1	427.1	437.5		
7	41.7	104.1	41.7	416.7	125	239.6	260.4	260.4	260.4	187.5	187.5	156.2	156.2	437.5	458.3	458.3	458.3	
	322.9	312.5	194															
8	333.3	312.5	41.7	416.7	427.1	239.6	250	218.8	250	187.5	156.3	156.3	156.3	458.3	458.3	447.9	447.9	
		312.5																
9	333.3	333.3	437.5	437.5	250	229.2	218.8	229.2	187.5	156.2	156.2	156.2	416.7	468.8	468.8	468.8		

Tabla 3.7: Eficiencia cuántica de absorción por celda, panel 1, laser verde.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P		
1	376.3	64.5	43	483.9	376.4	365.6	354.8	354.8	344.1	354.8	322.6	333.3	43	43	483.9	483.8		
		387.1	247.3										322.6	322.6				
2	287.1	397.8	381.1	483.9	376.3	365.6	365.6	354.8	354.8	322.6	43	215.1	430.1	505.4	505.4	516.1	505.4	
3	397.8	387.1	387.1	387.1	376.3	344.1	322.6	322.6	333.3	344.1	344.1	354.8	516.1	537.6	516.1	516.1		
4	43	376.3	279.6	279.6	473.1	376.3	365.6	322.6	43	43	268.8	268.8	268.8	268.8	537.6	537.6	537.6	537.6
	376.3		279.6	43					43									
5	462.4	387.1	451.6	462.4	268.8	268.8	226.6	268.8	268.8	268.8	268.8	268.8	516.1	537.6	537.6	526.9		
6	462.4	462.4	387.1	387.1	322.6	333.3	344.1	322.6	268.9	268.9	268.9	268.9	516.1	526.9	526.9	526.1		
7	43	86	53.8	494.6	505.4	268.8	268.8	279.6	290.3	268.8	268.8	268.8	537.6	548.4	559.1	569.9		
	365.6	365.6	86															
8	387.1	376.3	43	494.6	516.1	290.3	290.3	290.3	290.3	268.8	268.8	268.8	268.8	569.9	505.4	516.1	612.9	
		376.3	376.3															
9	387.1	387.1	505.4	505.4	290.3	290.3	290.3	290.3	268.8	268.8	268.8	268.8	612.9	612.9	612.9	612.9		

C. Representaciones visuales de salidas de voltaje y eficiencias cuánticas de absorción

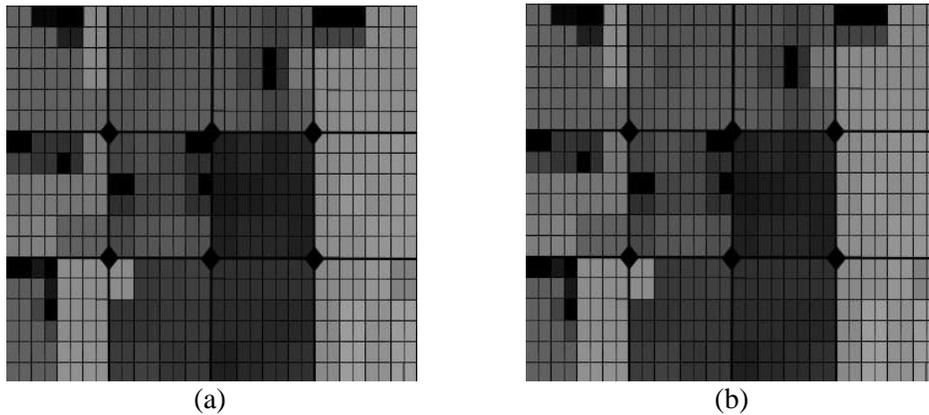


Figura 3.7: Representaciones visuales panel 1, laser azul.
 (a) Salidas de voltaje por celda, (b) Eficiencia cuántica de absorción por celda.

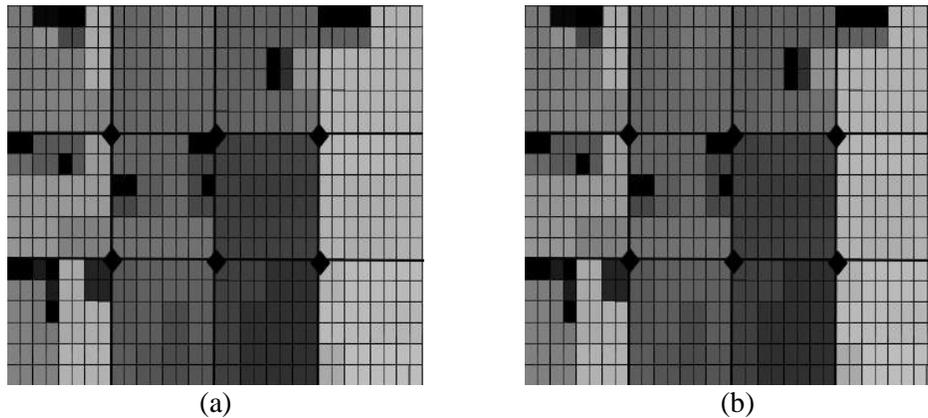


Figura 3.8: Representaciones visuales panel 1, laser rojo.
 (a) Salidas de voltaje por celda, (b) Eficiencia cuántica de absorción por celda.

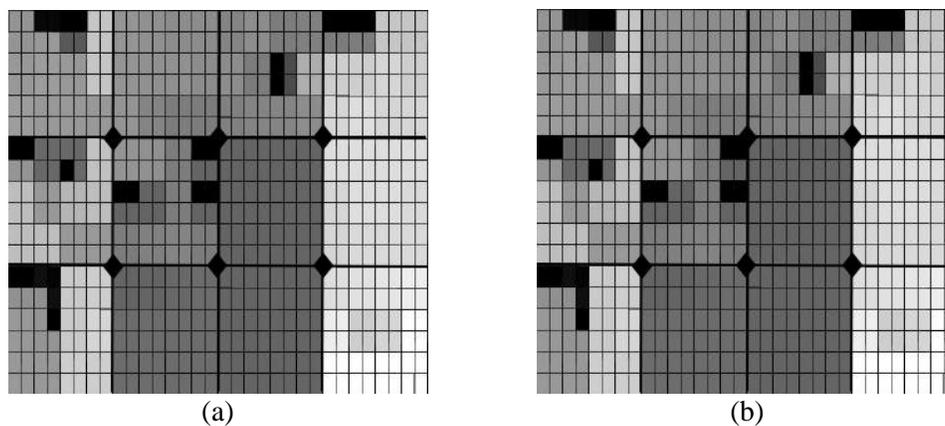


Figura 3.9: Representaciones visuales panel 1, laser verde.
 (a) Salidas de voltaje por celda, (b) Eficiencia cuántica de absorción por celda.

Una celda con menor salida de voltaje corresponde a una celda en mal estado, la representación visual de esto, son celdas que toman un tono oscuro o gris, mientras que las celdas en buen estado toman tonos más claros o de mayor intensidad. Por otro lado, en la representación visual de eficiencias cuánticas de absorción, las celdas más oscuras pueden significar que cuentan con una salida de voltaje baja, o bien, que la salida de voltaje no es lo suficientemente alta para la potencia óptica incidente que recibe esa celda.

Debido a que la potencia óptica incidente en los 3 casos es aproximadamente 20 uw/cm^2 , las imágenes de salida de voltaje y de eficiencia de absorción quedan representadas de manera similar.

Por otro lado, se puede apreciar que el panel obtiene mayores salidas de voltaje utilizando el láser verde, luego el rojo y por último el azul, respaldando estos resultados con la teoría, la cual indica que la eficiencia cuántica de un panel de silicio es baja en los 400nm (color azul), luego sube y toma su máximo valor en los 550nm (color verde) para luego bajar en los 750nm (color rojo), careciendo de eficiencia desde la banda infrarroja en adelante.

3.3 Tomas fotográficas mediante electroluminiscencia

3.3.1 Descripción de la actividad

Esta experiencia consiste en capturar la emisión del panel solar mediante la cámara Xeva 320 (Xenics), con el fin de obtener mediante electroluminiscencia fotografías del estado del panel solar, las cuales serán de ayuda para ver la relación de estas fotografías con las representaciones visuales de salidas de voltaje y eficiencias cuánticas de absorción.

3.3.2 Problemas y observaciones

Se debe seleccionar un tiempo de integración adecuado, ya que, si este es muy pequeño, no se logra observar la total emisión, por otro lado, si este es muy extenso, el ruido aumenta considerablemente, finalmente el tiempo de integración utilizado fue de 100ms.

3.3.3 Set-up

Para esta experiencia los elementos a utilizar son:

- Computador.
- Panel solar.
- Cámara Xeva 320.
- Fuente de poder DC POWER SUPPLY HY 3003D-Y.



Figura 3.10: Set-up tomas fotográficas de electroluminiscencia al panel 1.

En este set-up la fuente de poder se conecta al panel solar y se aplica un barrido de corrientes desde 0[A] hasta 3[A], por otro lado, la cámara enfoca hacia el panel solar y se conecta al computador, donde se van observando las imágenes con diferentes emisiones del panel según la cantidad de corriente eléctrica aplicada.

3.3.4 Resultados

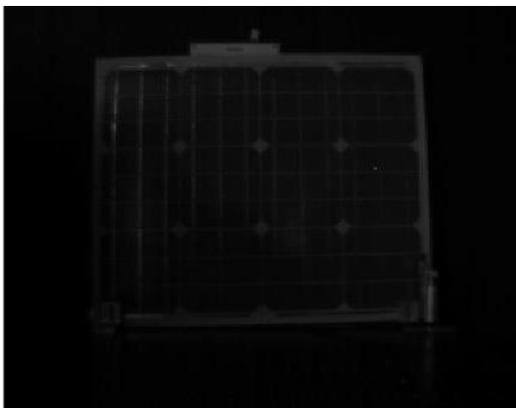


Figura 3.11: Imagen tomada con 0[A] y 18[V].

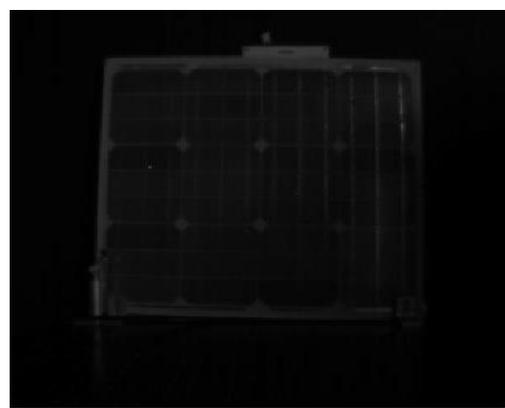


Figura 3.12 Imagen tomada con 0.1[A] y 18[V].

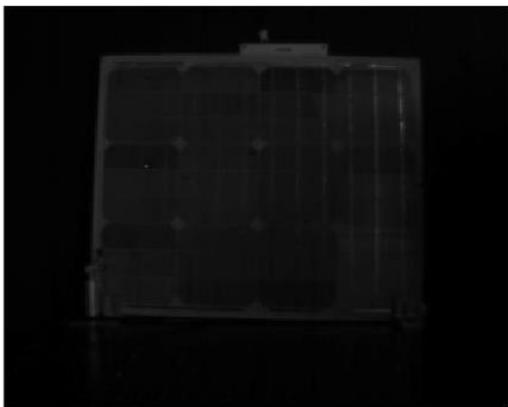


Figura 3.13: Imagen tomada con 0.2[A] y 19.5[V].

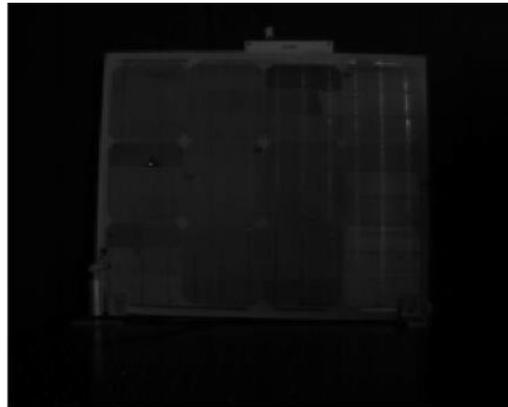


Figura 3.14: Imagen tomada con 0.3[A] y 21.5[V].

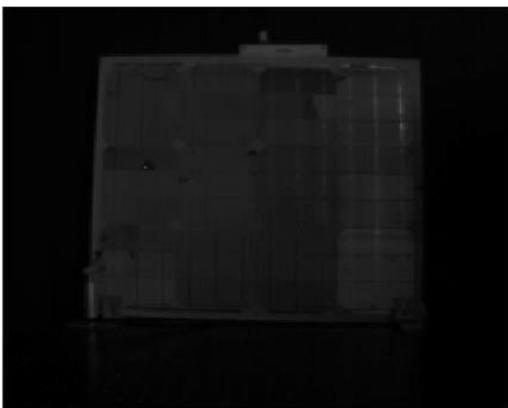


Figura 3.15: Imagen tomada con 0.4[A] y 20.6[V].



Figura 3.16 Imagen tomada con 0.5[A] y 20.9[V].

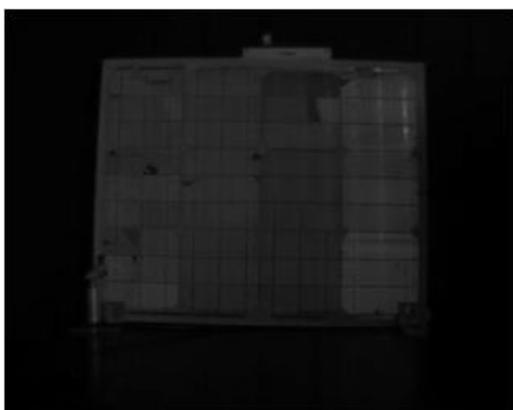


Figura 3.17: Imagen tomada con 0.6[A] y 21.3[V].

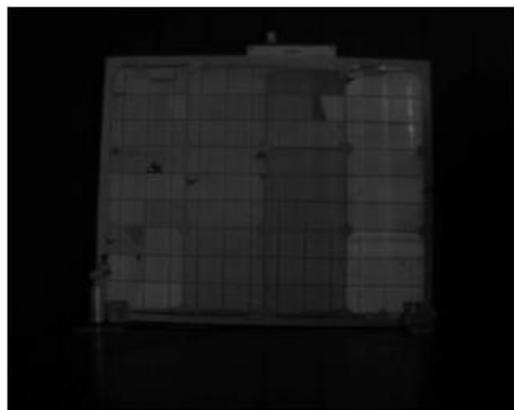


Figura 3.18: Imagen tomada con 0.7[A] y 21.5[V].

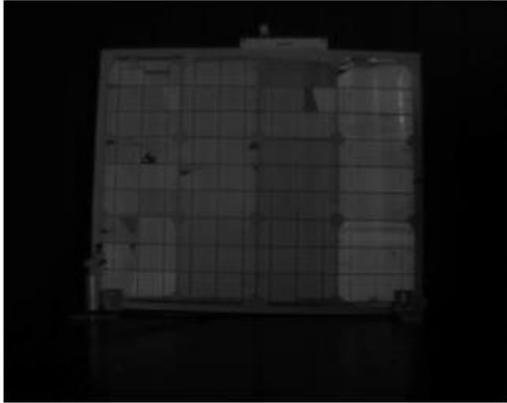


Figura 3.19: Imagen tomada con 0.81[A] y 21.8[V].

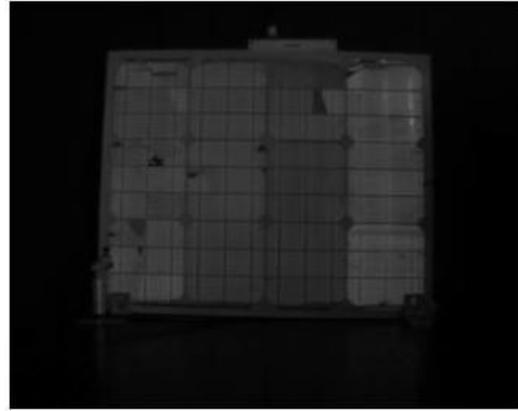


Figura 3.20: Imagen tomada con 0.91[A] y 22[V].

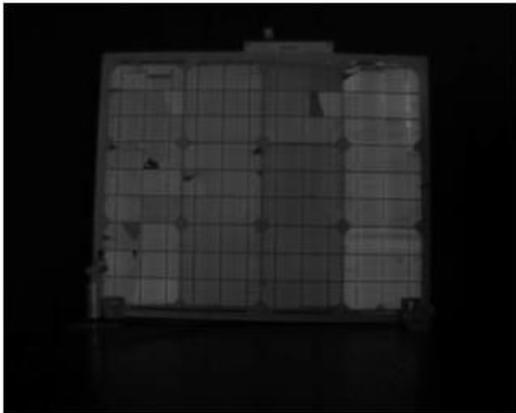


Figura 3.21: Imagen tomada con 1[A] y 22[V].

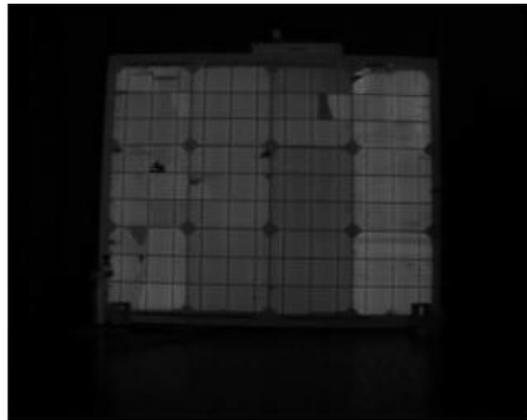


Figura 3.22: Imagen tomada con 1.1[A] y 22.2[V].

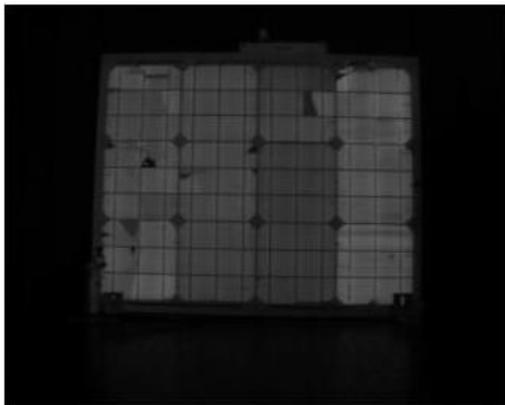


Figura 3.23: Imagen tomada con 1.2[A] y 22.4[V].

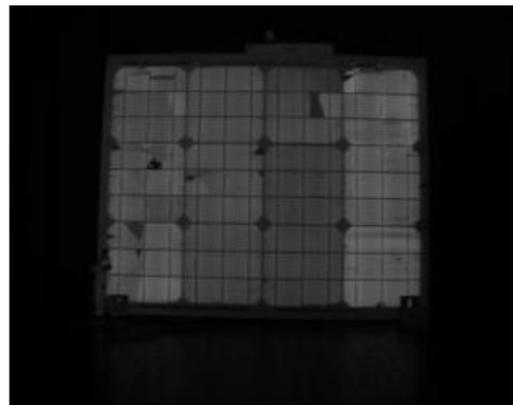


Figura 3.24: Imagen tomada con 1.3[A] y 22.6[V].

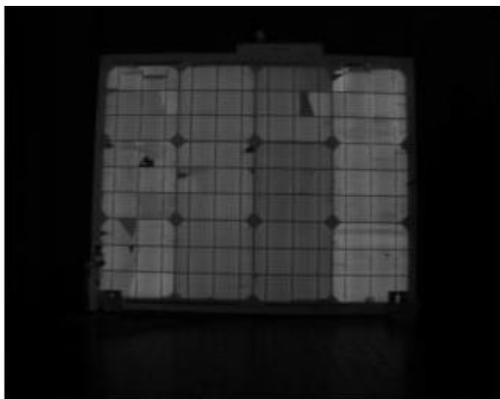


Figura 3.25: Imagen tomada con 1.4[A] y 22.5[V].

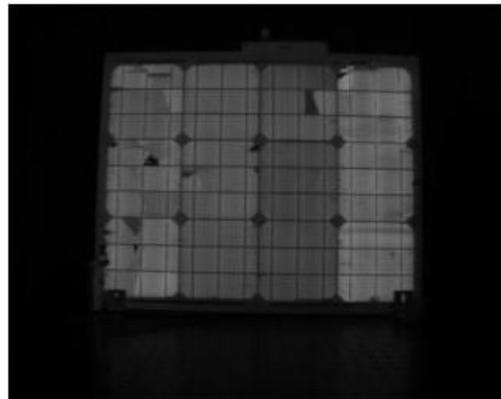


Figura 3.26: Imagen tomada con 1.5[A] y 22.7[V].

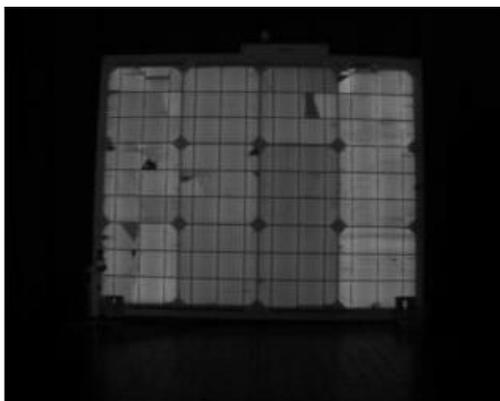


Figura 3.27: Imagen tomada con 1.6[A] y 22.8[V].

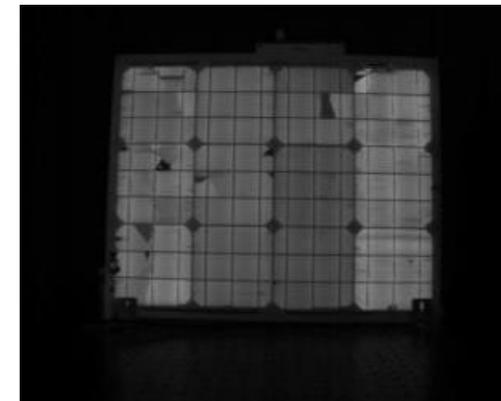


Figura 3.28: Imagen tomada con 1.7[A] y 23[V].

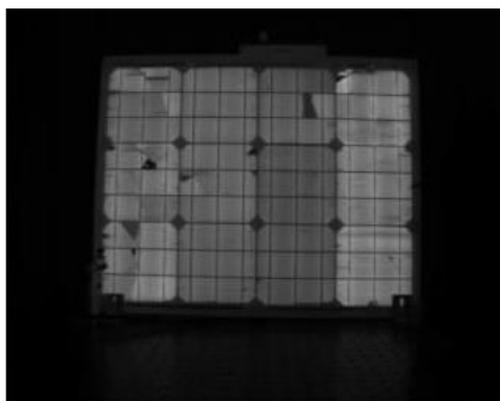


Figura 3.29: Imagen tomada con 1.8[A] y 23.2[V].

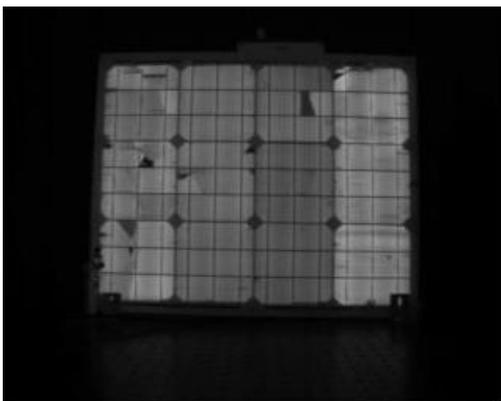


Figura 3.30: Imagen tomada con 1.9[A] y 23.3[V].

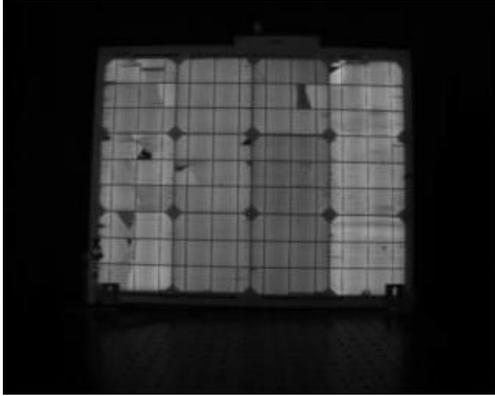


Figura 3.31: Imagen tomada con 2[A] y 23.3[V].

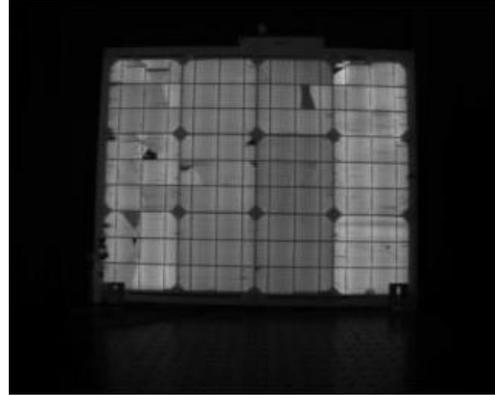


Figura 3.32: Imagen tomada con 2.1[A] y 23.4[V].

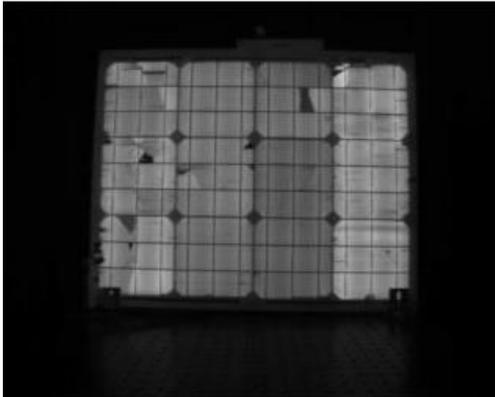


Figura 3.33: Imagen tomada con 2.2[A] y 23.6[V].

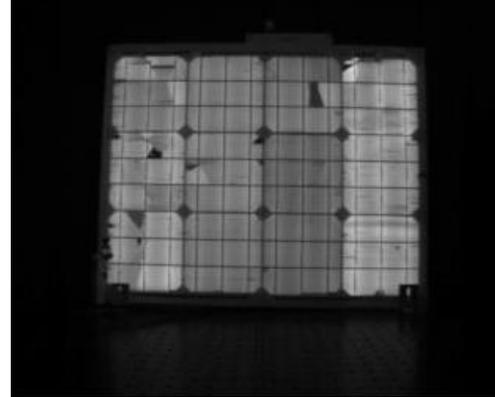


Figura 3.34: Imagen tomada con 2.3[A] y 23.7[V].



Figura 3.35: Imagen tomada con 2.4[A] y 23.8[V].

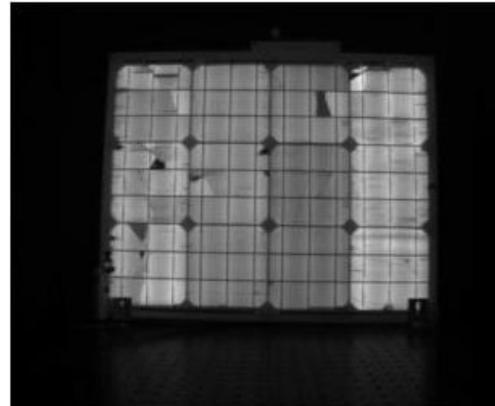


Figura 3.36: Imagen tomada con 2.5[A] y 23.9[V].



Figura 3.37: Imagen tomada con 2.6[A] y 24[V].

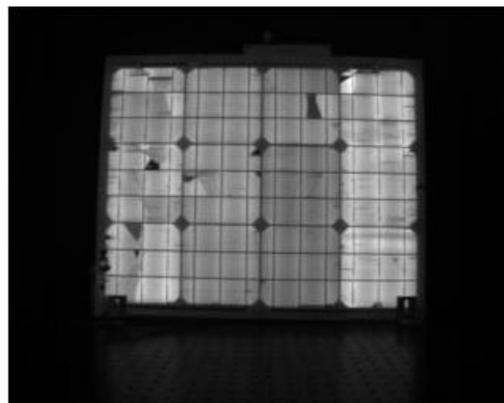


Figura 3.38: Imagen tomada con 2.7[A] y 24[V].

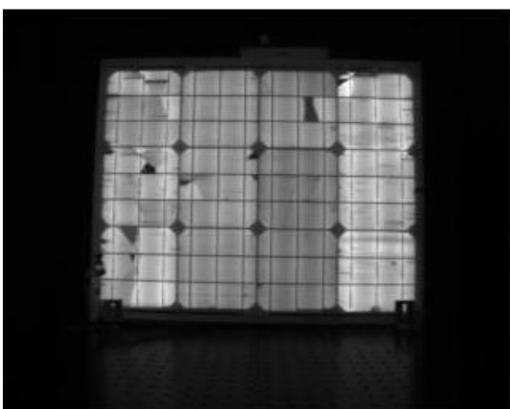


Figura 3.39: Imagen tomada con 2.8[A] y 24.2[V].

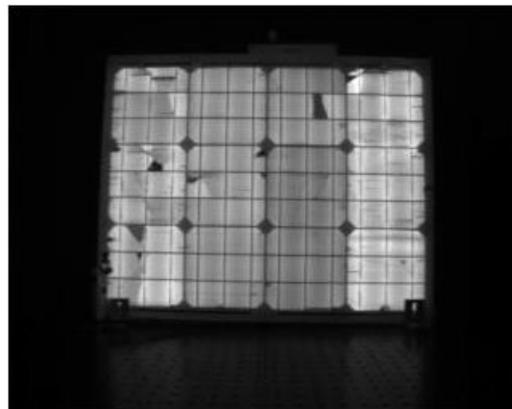


Figura 3.40: Imagen tomada con 2.9[A] y 24.2[V].

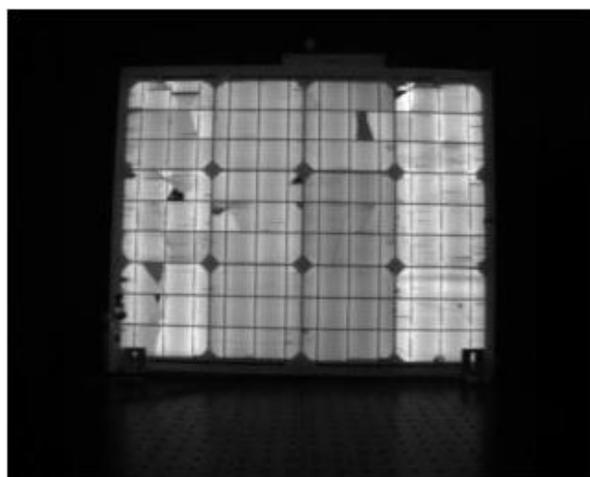


Figura 3.41 Imagen tomada con 3[A] y 24.3[V].

De las fotografías se puede observar la emisión del panel solar mediante electroluminiscencia, donde las zonas del panel más oscuras, coinciden con las zonas de menor eficiencia de absorción o celdas en mal estado. Esto indica que mediante fotografías en el NIR es posible detectar anomalías en paneles solares.

También, se puede observar que a medida que se modifica la corriente, la intensidad por píxel en la imagen va cambiando. Por lo tanto, se vuelve necesario analizar el valor de corriente en el cual el patrón de emisión se asemeja más a las representaciones visuales, basándose en salidas de voltaje o eficiencias de absorción mediante los 3 tipos de luz láser.

Si se compara cada una de las imágenes obtenidas mediante electroluminiscencia y las representaciones visuales, se tiene que la representación realizada mediante el láser azul tiene intensidades similares a la imagen por electroluminiscencia a 1.2[A], donde se presentan intensidades bajas, sin embargo, de igual manera se pueden distinguir sus anomalías. Luego, se puede relacionar la representación efectuada con el láser rojo con la imagen por electroluminiscencia a 1.8[A], donde las zonas en mejor estado comienzan a obtener mayores intensidades. Finalmente, la representación con láser verde cuenta con las más altas intensidades, asemejándose al patrón de emisión de la imagen por electroluminiscencia a 3[A].

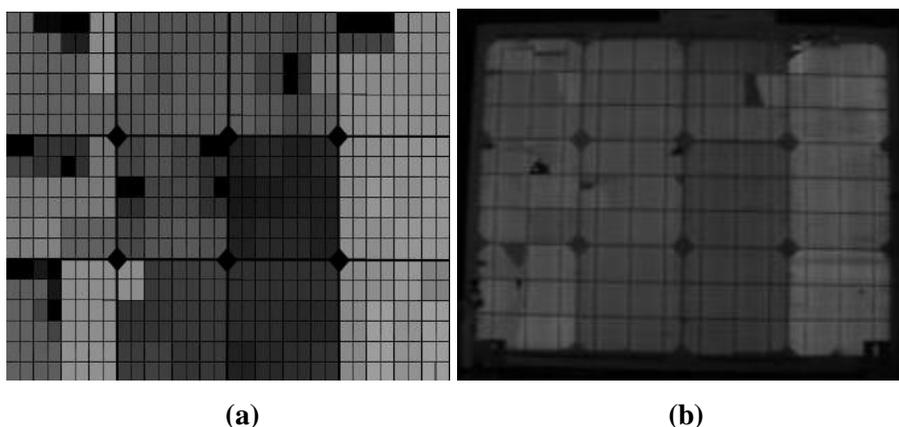


Figura 3.42: Patrones de emisión y absorción similares en panel 1.
(a) Representación visual de eficiencia de absorción del panel 1 con láser azul, **(b)** Imagen del panel 1 por electroluminiscencia tomada a 1.2[A].

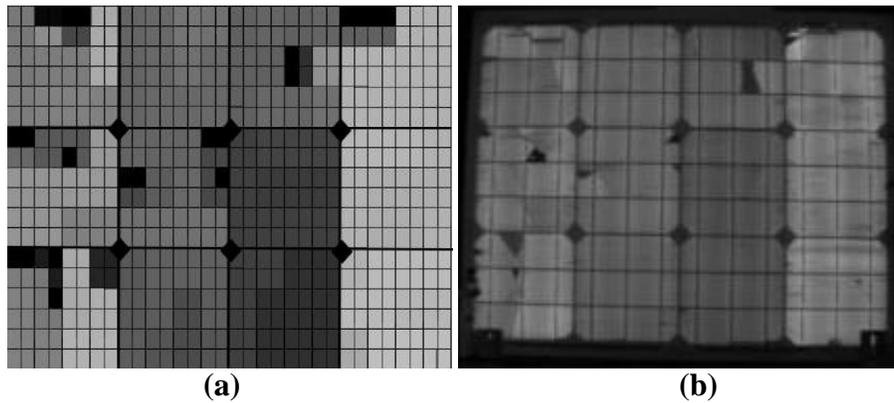


Figura 3.43: Patrones de emisión y absorción similares en panel 1.

- (a) Representación visual de eficiencia de absorción del panel 1 con láser rojo, (b) Imagen del panel 1 por electroluminiscencia tomada a 1.8[A].

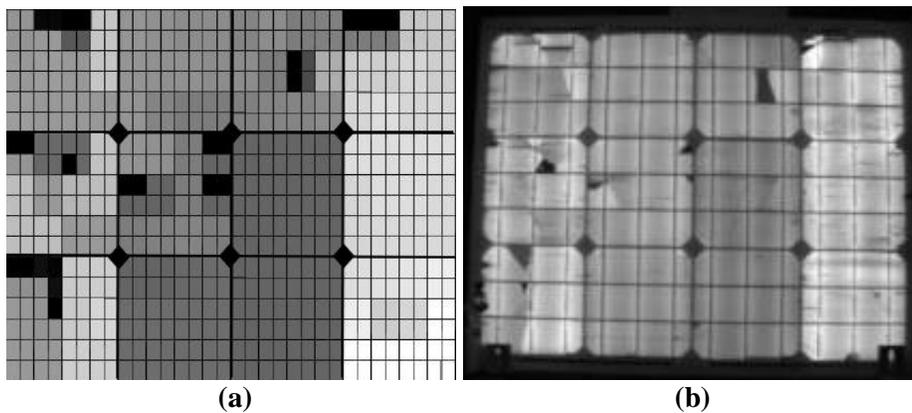


Figura 3.44: Patrones de emisión y absorción similares en panel 1.

- (a) Representación visual de eficiencia de absorción del panel 1 con láser rojo, (b) Imagen del panel 1 por electroluminiscencia tomada a 3[A].

Las tres imágenes se asemejan tanto en patrones como en intensidad, pudiendo comprobar que una celda averiada se puede descubrir mediante una fotografía en el NIR que capture la electroluminiscencia.

Sin embargo, en las celdas vecinas a las celdas averiadas se tienen salidas de voltaje más bajas, lo cual no está presente en la imagen por electroluminiscencia, por ejemplo, en la celda M1 se puede ver que debajo de la zona oscura se encuentra una de las zonas con mayor electroluminiscencia, lo que no está presente en la representación.

Entonces, se vuelve necesario comprobar que este error es debido a la reflexión y no al posible hecho de que las imágenes por electroluminiscencia no reflejen todas las anomalías. Debido a lo anterior, se realiza el mismo procedimiento, pero en un panel de tipo artesanal, el cual no cuenta con la capa de protección de vidrio, la que podría ser la causante de que, de las 576 mediciones realizadas al panel, 30 no fueran correctas, obteniendo un 5.2% de error en el método.

3.4 Estado de un panel solar sin recubrimiento (panel 2).

3.4.1 Descripción de la actividad

Debido a que el panel 1 cuenta con una capa de vidrio la cual causa reflexión y las mediciones se vuelven imprecisas, se vuelve necesario construir un panel solar que no cuente con esta capa protectora, y realizar las mismas mediciones que en el apartado 3.2 y 3.3.

Por lo tanto, se construye dicho panel de forma cuadrada, con 3 celdas individuales en cada fila y 3 columnas, donde cada una de estas celdas tiene una salida independiente de las demás, con el objetivo de obtener resultados aún más precisos, para efectos técnicos de experimentación, se enumeraron sus celdas y cada una se subdivido en 4 partes.

	A				B				C			
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1.1												
1.2												
1.3												
1.4												
2.1												
2.2												
2.3												
2.4												
3.1												
3.2												
3.3												
3.4												

Figura 3.45: subdivisión del panel 2.

3.4.2 Problemas y observaciones

Al igual que en la experimentación con el panel comercial se debe tener en consideración que el offset sea el mismo durante todo el experimento, esto es complicado de obtener, por lo que en cada celda además de medir su salida de voltaje, se mide también el offset de ese instante, y luego se resta al resultado.

Por otro lado, como este panel no cuenta con recubrimiento de vidrio, la reflexión esta vez no está presente, por lo tanto, es posible medir con la lámpara halógena HL-2000 a diferentes potencias y además con los 3 diferentes tipos de luz láser.

3.4.3 Set-up

Para esta experiencia son necesarios los siguientes elementos:

- Habitación oscura.
- Panel solar de tipo artesanal.
- Osciloscopio TDS 1002 Tektronix o amperímetro.
- Lámpara HL-2000-FHSA.
- Luz láser azul, roja y verde.
- Fibra óptica VIS-NIR.



Figura 3.46: Set up medición de salidas de voltaje del panel 2.

3.4.4 Resultados con laser

A. Salidas de voltaje por celda

Tabla 3.8: Salidas de voltaje por celda, panel 2, laser azul.

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1.1	1	80	80	80	80	80	1	80	1	80	80	1
1.2	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	1	80
1.3	80	1	1	80	85	90	85	85	90	1	90	80
1.4	80	1	1	80	1	1	90	90	80	80	80	80
2.1	120	120	120	1	120	120	120	120	120	120	120	120
2.2	120	120	120	120	125	120	125	125	125	125	125	120
2.3	125	125	125	125	125	125	125	120	125	120	120	120
2.4	125	125	130	130	125	125	125	125	120	120	120	120
3.1	170	170	165	1	200	200	200	200	200	200	1	1
3.2	170	165	175	170	200	200	200	200	210	210	205	200
3.3	170	170	170	1	200	200	200	200	200	200	200	200
3.4	165	175	1	170	200	200	200	200	1	210	210	205

Tabla 3.9: Salidas de voltaje por celda, panel 2, laser rojo.

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1.1	1	100	100	100	100	100	1	100	1	100	100	1
1.2	100	100	110	100	100	100	110	100	100	100	1	100
1.3	100	1	1	100	100	100	100	100	110	1	100	100
1.4	100	1	1	100	0	0	110	110	100	100	100	100
2.1	150	150	150	1	150	155	155	150	150	155	160	160
2.2	150	150	150	160	150	150	150	150	155	160	155	155
2.3	150	155	155	160	160	160	160	160	155	150	150	155
2.4	150	155	155	150	160	160	160	160	150	150	150	150
3.1	200	200	200	1	240	235	230	240	240	240	1	1
3.2	200	200	200	210	230	230	230	230	235	240	240	240
3.3	190	190	190	1	230	230	230	230	230	240	240	240
3.4	200	200	1	200	240	230	230	230	1	240	240	240

Tabla 3.10: Salidas de voltaje por celda, panel 2, laser verde.

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1.1	1	180	180	190	180	180	1	180	1	190	190	1
1.2	180	180	180	180	180	180	180	180	190	180	1	190
1.3	180	1	1	180	190	190	190	190	180	1	190	180
1.4	180	1	1	180	0	1	180	180	190	190	190	190
2.1	230	230	230	1	230	230	230	230	230	230	230	230
2.2	230	230	240	240	230	230	230	240	230	230	230	240
2.3	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240
2.4	240	240	240	230	230	230	230	230	240	230	240	230
3.1	300	300	300	1	330	330	330	330	330	330	1	1
3.2	300	300	300	300	330	330	330	330	330	330	330	330
3.3	330	330	330	1	320	320	320	320	320	320	320	320
3.4	300	300	1	300	330	330	330	330	1	330	330	330

B. Eficiencias cuánticas de absorción por celda

Tabla 3.11: Eficiencia cuántica de absorción por celda, panel 2, laser azul.

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1.1	1	80	80	80	80	80	1	80	1	80	80	1
1.2	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	1	80
1.3	80	1	1	80	85	90	85	85	90	1	90	80
1.4	80	1	1	80	1	1	30	30	80	80	80	80
2.1	120	120	120	1	120	120	120	120	120	120	120	120
2.2	120	120	120	120	125	120	125	125	125	125	125	120
2.3	125	125	125	125	125	125	125	120	125	120	120	120
2.4	125	125	130	130	125	125	125	125	120	120	120	120
3.1	170	170	165	1	200	200	200	200	200	200	1	1
3.2	170	165	175	70	200	200	200	200	210	210	205	200
3.3	170	170	170	1	200	200	200	200	200	200	200	200
3.4	165	175	1	170	200	200	200	200	1	210	210	205

Tabla 3.12: Eficiencia cuántica de absorción por celda, panel 2, laser rojo.

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1.1	4.2	104.2	104.2	104.2	104.2	104.2	1.04	104.2	1.04	104.2	104.2	1.04
1.2	104.2	104.2	114.6	104.2	104.2	104.2	104.2	104.2	104.2	104.2	1.04	104.2
1.3	104.2	1.04	1.04	104.2	104.2	104.2	104.2	104.2	114.6	1.04	104.2	104.2
1.4	104.2	1.04	1.04	104.2	0	0	114.6	114.6	104.2	104.2	104.2	104.2
2.1	156.3	156.3	156.3	1.04	156.3	161.5	161.5	156.3	156.3	161.5	166.7	166.7
2.2	156.3	156.3	156.3	166.7	156.3	156.3	156.3	156.3	161.5	166.7	161.5	161.5
2.3	156.3	161.5	161.5	166.7	166.7	166.7	166.7	166.7	161.5	156.3	156.3	161.5
2.4	156.3	161.5	161.5	156.3	166.7	166.7	166.7	166.7	156.3	156.3	156.3	156.3
3.1	208.3	208.3	208.3	1.04	250	244.8	239.6	250	250	250	1.04	1.04
3.2	208.3	208.3	208.3	218.8	239.6	239.6	239.6	239.6	244.8	250	250	250
3.3	197.9	197.9	197.9	1.04	239.6	239.6	239.6	239.6	239.6	250	250	250
3.4	208.3	208.3	1.04	208.3	250	239.6	239.6	239.6	1.04	250	250	250

Tabla 3.13: Eficiencia cuántica de absorción por celda, panel 2, laser verde.

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1.1	1.08	193.5	193.5	204.3	193.5	193.5	1.08	193.5	1.08	204.3	204.3	1.08
1.2	193.5	193.5	193.5	193.5	193.5	193.5	193.5	193.5	204.3	193.5	1.08	204.3
1.3	193.5	1.08	1.08	193.5	204.3	204.3	204.3	204.3	193.5	0	204.3	193.5
1.4	193.5	1.08	1.08	193.5	1.08	1.08	193.5	193.5	204.3	204.3	204.3	204.3
2.1	247.3	247.3	247.3	1.08	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3
2.2	247.3	247.3	258.1	258.1	247.3	247.3	247.3	258.1	247.3	247.3	247.3	258.1
2.3	258.1	258.1	258.1	258.1	258.1	258.1	258.1	258.1	258.1	258.1	258.1	258.1
2.4	258.1	258.1	258.1	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	258.1	247.3	258.1	247.3
3.1	322.6	322.6	322.6	1.08	354.8	354.8	354.8	354.8	354.8	354.8	1.08	1.08
3.2	322.6	322.6	322.6	322.6	354.8	354.8	354.8	354.8	354.8	354.8	354.8	354.8
3.3	354.8	354.8	354.8	1.08	344.1	344.1	344.1	344.1	344.1	344.1	344.1	344.1
3.4	322.6	322.6	1.08	322.6	354.8	354.8	354.8	354.8	1.08	354.8	354.8	354.8

C. Representaciones visuales de salidas de voltaje y eficiencias de absorción.

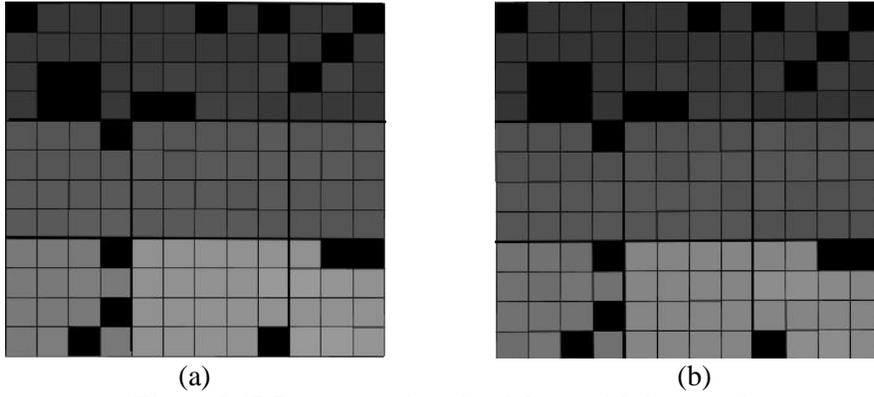


Figura 3.47: Representación visual de panel 2, laser azul.
 (a) Salidas de voltaje por celda, (b) Eficiencia cuántica de absorción por celda.

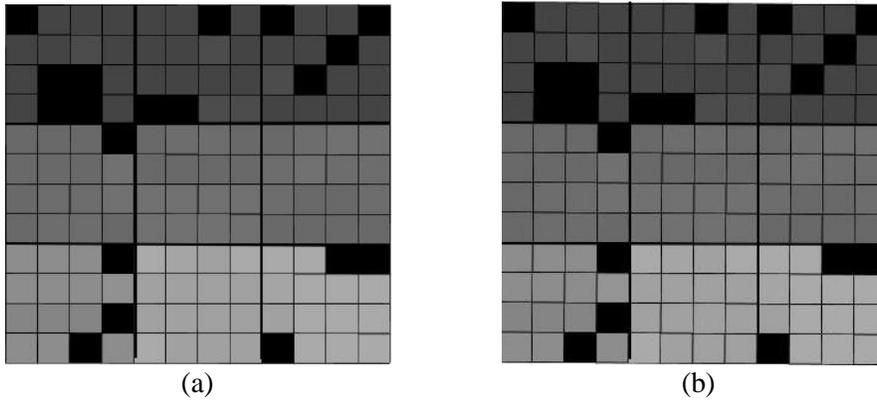


Figura 3.48: Representaciones visuales panel 2, laser rojo.
 (a) Salidas de voltaje por celda, (b) Eficiencia cuántica de absorción por celda.

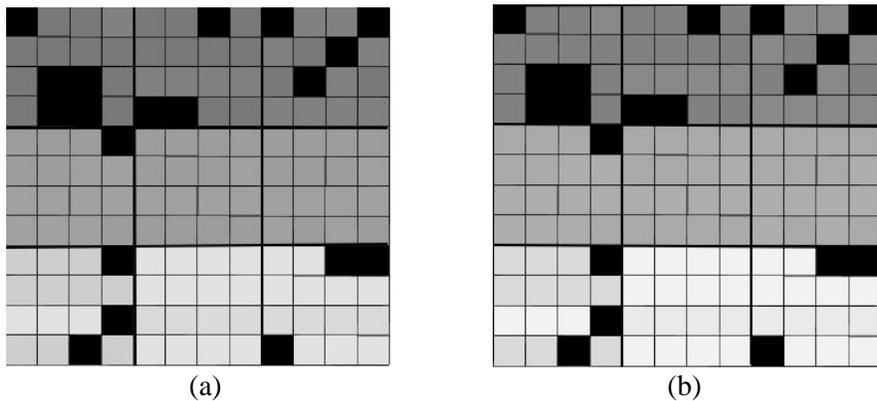


Figura 3.49: Representaciones visuales panel 2, laser verde.
 (a) Salidas de voltaje por celda, (b) Eficiencia cuántica de absorción por celda.

3.4.5 Resultados con lampara halógena

A. Salidas de voltaje por celda

Tabla 3.14: Salidas de voltaje por celda, panel 2, lampara halógena con 4 vueltas.

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1.1	1	7	7	7	7	7	1	7	1	7	7	1
1.2	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	1	7
1.3	7	1	1	7	7	7	7	7	7	1	7	7
1.4	7	1	1	7	1	1	7	7	7	7	7	7
2.1	20	20	20	1	20	20	21	21	21	21	20	20
2.2	20	20	20	20	20	20	20	21	20	20	21	21
2.3	20	21	21	20	20	20	20	20	21	20	20	21
2.4	20	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20	20
3.1	36	36	36	1	40	40	40	40	40	40	1	1
3.2	36	36	36	36	40	40	40	40	40	40	40	40
3.3	36	36	36	1	40	40	40	40	40	40	40	40
3.4	36	36	1	36	40	40	40	40	1	40	40	40

Tabla 3.15: Salidas de voltaje por celda, panel 2, lampara halógena con 6 vueltas.

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1.1	1	70	70	70	70	70	1	70	1	70	70	1
1.2	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	1	70
1.3	70	1	1	70	70	70	70	70	70	1	70	70
1.4	70	1	1	70	1	1	70	70	70	70	70	70
2.1	110	120	120	1	120	120	121	121	121	121	120	120
2.2	120	120	120	120	120	120	120	121	120	120	121	121
2.3	120	121	121	120	120	120	120	120	121	120	120	121
2.4	120	121	121	120	120	120	120	120	120	120	120	120
3.1	143	143	143	1	170	170	170	170	170	170	1	1
3.2	143	143	143	143	170	170	170	170	170	170	170	170
3.3	143	143	143	1	170	170	170	170	170	170	170	170
3.4	140	140	1	140	170	170	170	170	1	170	170	170

Tabla 3.16: Salidas de voltaje por celda, panel 2, lampara halógena con 8 vueltas.

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1.1	1	100	100	100	100	100	1	100	1	100	100	1
1.2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1	100
1.3	100	1	1	100	100	100	100	100	100	1	100	100
1.4	100	1	1	100	1	1	100	100	100	100	100	100
2.1	150	150	150	1	150	150	151	151	151	151	150	150
2.2	150	150	150	150	150	150	150	151	150	150	151	151
2.3	150	151	151	150	150	150	150	150	151	150	150	151
2.4	150	151	151	150	150	150	150	150	150	150	150	150
3.1	193	193	193	1	210	210	210	210	210	210	1	1
3.2	193	193	193	193	210	210	210	210	210	210	210	210
3.3	193	193	193	1	210	210	210	210	210	210	210	210
3.4	190	190	1	190	210	210	210	210	1	210	210	210

Tabla 3.17: Salidas de voltaje por celda, panel 2, lampara halógena con 10 vueltas.

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1.1	1	120	120	120	120	120	1	120	1	120	120	1
1.2	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	1	120
1.3	120	1	1	120	120	120	120	120	120	1	120	120
1.4	120	1	1	120	1	1	120	120	120	120	120	120
2.1	170	170	170	1	170	170	171	171	171	171	170	170
2.2	170	170	170	170	170	170	170	171	170	170	171	171
2.3	170	171	171	170	170	170	170	170	171	170	170	171
2.4	170	171	171	170	170	170	170	170	170	170	170	170
3.1	215	215	215	1	230	230	230	230	230	230	1	1
3.2	215	215	215	215	230	230	230	230	230	230	230	230
3.3	215	215	215	1	230	230	230	230	230	230	230	230
3.4	215	215	1	215	230	230	230	230	1	230	230	230

B. Eficiencias cuánticas de absorción por celda

Tabla 3.18: Eficiencias cuánticas de absorción por celda, panel 2, lampara halógena con 4 vueltas.

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1.1	5.6	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9	5.6	38.9	5.6	38.9	38.9	5.6
1.2	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9	5.6	38.9
1.3	38.9	5.6	5.6	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9	5.6	38.9	38.9
1.4	38.9	5.6	5.6	38.9	5.6	5.6	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9
2.1	111.1	111.1	111.1	5.6	111.1	111.1	116.7	116.7	111.1	111.1	111.1	111.1
2.2	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	116.7	111.1	111.1	116.7	116.7
2.3	111.1	116.7	116.7	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	116.7	111.1	111.1	116.7
2.4	111.1	116.7	116.7	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1
3.1	200	200	200	5.6	222.2	222.2	222.2	222.2	222.2	222.2	5.6	5.6
3.2	200	200	200	200	222.2	222.2	222.2	222.2	222.2	222.2	222.2	222.2
3.3	200	200	200	5.6	222.2	222.2	222.2	222.2	222.2	222.2	222.2	222.2
3.4	200	200	5.6	200	222.2	222.2	222.2	222.2	5.6	222.2	222.2	222.2

Tabla 3.19: Eficiencias cuánticas de absorción por celda, panel 2, lampara halógena con 6 vueltas.

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1.1	158	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	158	111.1	158	111.1	111.1	158
1.2	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	158	111.1
1.3	111.1	158	158	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	158	111.1	111.1
1.4	111.1	158	158	111.1	158	158	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1	111.1
2.1	174.6	174.6	174.6	158	174.6	174.6	192.6	192.6	174.6	174.6	174.6	174.6
2.2	174.6	174.6	174.6	174.6	174.6	174.6	174.6	192.6	174.6	174.6	192.6	192.6
2.3	174.6	192.6	192.6	174.6	174.6	174.6	174.6	174.6	192.6	174.6	174.6	192.6
2.4	174.6	192.6	192.6	174.6	174.6	174.6	174.6	174.6	174.6	174.6	174.6	174.6
3.1	226.38	226.38	226.38	158	263.84	263.84	263.84	263.84	263.84	263.84	158	158
3.2	226.38	226.38	226.38	226.38	263.84	263.84	263.84	263.84	263.84	263.84	263.84	263.84
3.3	226.38	226.38	226.38	158	263.84	263.84	263.84	263.84	263.84	263.84	263.84	263.84
3.4	231.7	231.7	158	231.7	263.84	263.84	263.84	263.84	158	263.84	263.84	263.84

Tabla 3.20:Eficiencias cuánticas de absorción por celda, panel 2, lampara halógena con 8 vueltas.

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1.1	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5
1.2	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5
1.3	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5
1.4	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5
2.1	161.3	161.3	161.3	107.5	161.3	161.3	162.4	162.4	162.4	162.4	161.3	161.3
2.2	161.3	161.3	161.3	161.3	161.3	161.3	161.3	162.4	161.3	161.3	162.4	162.4
2.3	161.3	162.4	162.4	161.3	161.3	161.3	161.3	161.3	162.4	161.3	161.3	162.4
2.4	161.3	162.4	162.4	161.3	161.3	161.3	161.3	161.3	161.3	161.3	161.3	161.3
3.1	207.5	207.5	207.5	107.5	225.8	225.8	225.8	225.8	225.8	225.8	107.5	107.5
3.2	207.5	207.5	207.5	207.5	225.8	225.8	225.8	225.8	225.8	225.8	225.8	225.8
3.3	207.5	207.5	207.5	107.5	225.8	225.8	225.8	225.8	225.8	225.8	225.8	225.8
3.4	210.7	210.7	107.5	210.7	225.8	225.8	225.8	225.8	107.5	225.8	225.8	225.8

Tabla 3.21:Eficiencias cuánticas de absorción por celda, panel 2, lampara halógena con 10 vueltas.

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
1.1	1	120	120	120	120	120	1	120	1	120	120	1
1.2	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	1	120
1.3	120	1	1	120	120	120	120	120	120	1	120	120
1.4	120	1	1	120	1	1	120	120	120	120	120	120
2.1	170	170	170	1	170	170	171	171	171	171	170	170
2.2	170	170	170	170	170	170	170	171	170	170	171	171
2.3	170	171	171	170	170	170	170	170	171	170	170	171
2.4	170	171	171	170	170	170	170	170	170	170	170	170
3.1	215	215	215	1	230	230	230	230	230	230	1	1
3.2	215	215	215	215	230	230	230	230	230	230	230	230
3.3	215	215	215	1	230	230	230	230	230	230	230	230
3.4	215	215	1	215	230	230	230	230	1	230	230	230

C. Representaciones visual de salidas de voltaje y eficiencias de absorción

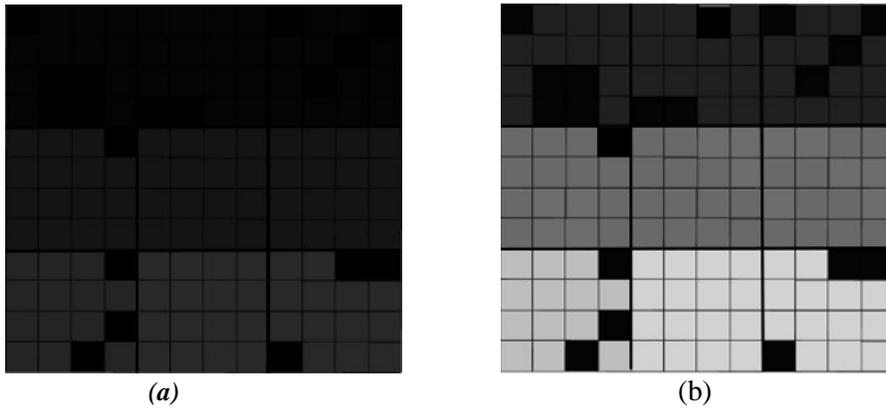


Figura 3.50: Representaciones visuales panel 2, lampara halógena en 4 vueltas.
 (a) Salidas de voltaje por celda, (b) Eficiencia cuántica de absorción por celda.

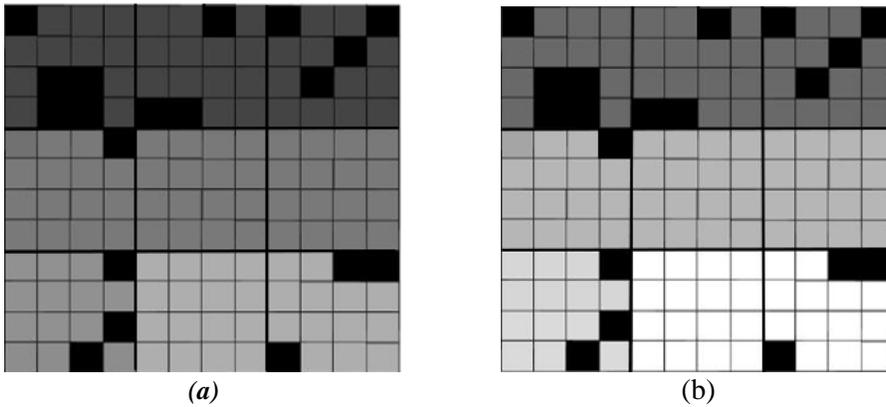


Figura 3.51: Representaciones visuales panel 2, lampara halógena en 6 vueltas.
 (a) Salidas de voltaje por celda, (b) Eficiencia cuántica de absorción por celda.

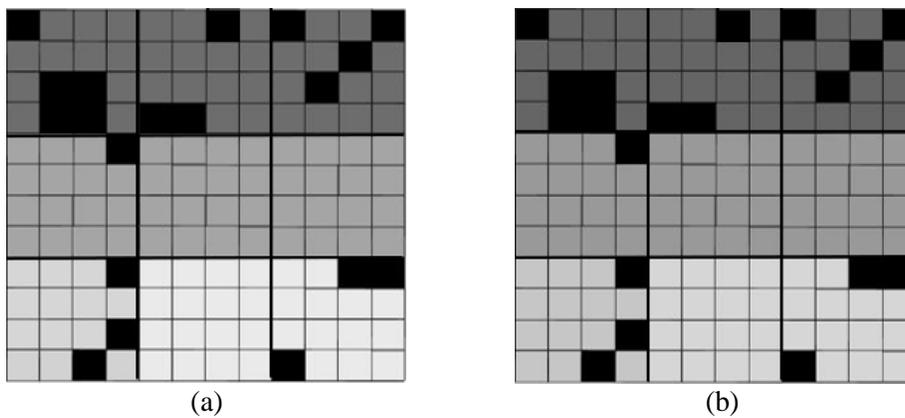


Figura 3.52: Representaciones visuales panel 2, lampara halógena en 8 vueltas.
 (a) Salidas de voltaje por celda, (b) Eficiencia cuántica de absorción por celda.

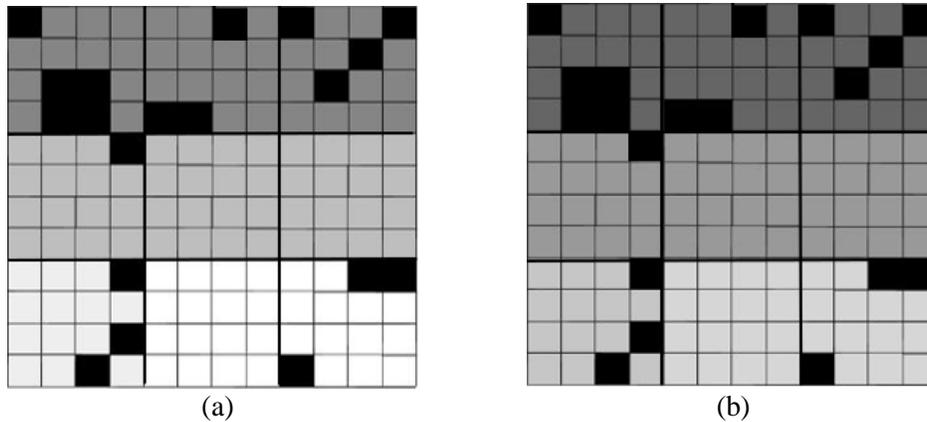


Figura 3.53: Representaciones visuales panel 2, lámpara halógena en 10 vueltas.
 (a) Salidas de voltaje por celda, (b) Eficiencia cuántica de absorción por celda.

Se puede observar que, a medida que se abre el obturador de la lámpara según la cantidad de vueltas que se le dé a la perilla reguladora, las salidas de voltaje van creciendo, sin embargo, a diferencia de las mediciones anteriores, la eficiencia cuántica de absorción no tiene un comportamiento directamente proporcional a la luz que se le suministra.

En las imágenes se refleja que, a partir de las 6 vueltas a la perilla, la eficiencia deja de aumentar, pues a partir de ese punto, se tendrá una salida de voltaje no tan alta en comparación a la luz que se le está entregando a la celda solar, lo cual, se ve representado en las imágenes 3.51 (b) y 3.52 (b), donde se ve un panel con intensidades más claras hasta la vuelta 6 y luego más opacas. Lo anterior se puede confirmar en los siguientes gráficos:

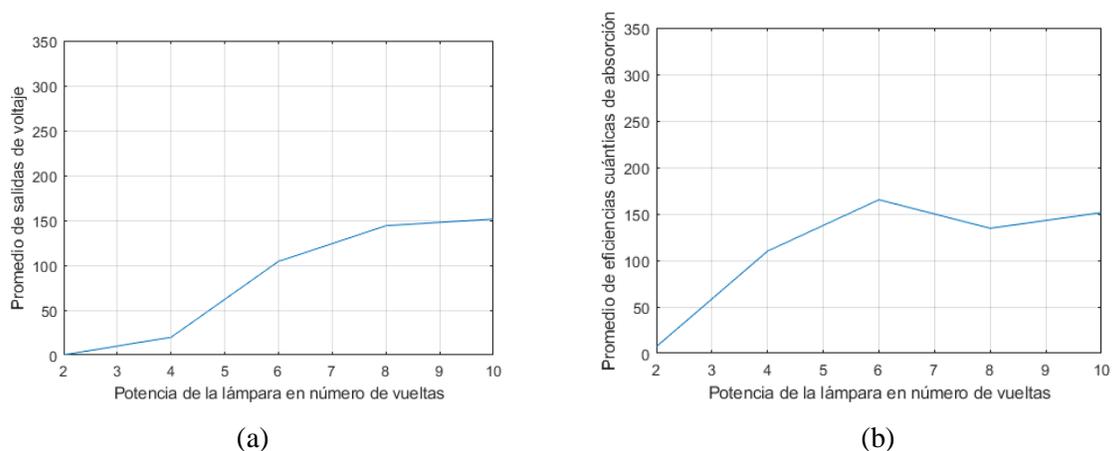


Figura 3.54: Comportamiento del panel 2 según potencia de la lámpara.

(a) Salidas de voltaje según potencia de la lámpara, (b) Eficiencia cuántica de absorción según potencia de la lámpara.

De los gráficos anteriores se puede decir que las salidas de voltaje promedio del panel 2 crecen a medida que la luz incidente sea mayor. Se puede ver un crecimiento exponencial hasta la vuelta 6, ya que, luego de esta vuelta, las salidas de voltaje comienzan a estabilizarse. Esto explica la figura 3.54 (b), donde luego de la vuelta 6, la eficiencia promedio del panel 2 baja, debido a que las salidas de voltaje no son lo suficientemente altas, con respecto a la cantidad de luz incidente que se le está entregando al panel.

3.5 Tomas fotográficas del panel sin recubrimiento (panel 2)

3.5.1 Descripción de la actividad

Esta experiencia consiste en capturar la emisión del panel solar de tipo artesanal mediante la cámara Xeva 320 (Xenics), con el fin de obtener mediante electroluminiscencia fotografías del estado de este panel. Estas serán necesarias para compararlas con las representaciones visuales de salida de voltaje y eficiencia de absorción por celda del panel artesanal.

El fin de ejecutar esta experiencia es poder comprobar que el error que tenían presentes las mediciones del panel comercial era debido a la reflexión y que las fotografías por electroluminiscencia son un buen reflejo del estado de una celda solar. Por lo tanto, mediante una fuente de poder se le suministra corriente eléctrica al panel, desde 0[A] hasta 3[A] y se toman fotografías cada 0.1[A].

3.5.2 Problemas y observaciones

Al igual que en el apartado 3.3.2 era necesario seleccionar un tiempo de integración lo suficientemente alto para captar la reducida cantidad de fotones con la cual se está trabajando. Por otro lado, se debía tener precaución con la cantidad de corriente aplicada al panel solar, ya que al ser construido a partir de celdas individuales con datasheet desconocido, era posible dañar la celda al suministrarle más corriente de la permitida.

3.5.3 Set-up

Similar al apartado 3.3.3, sin embargo, se utiliza el panel 2.

3.5.4 Resultados

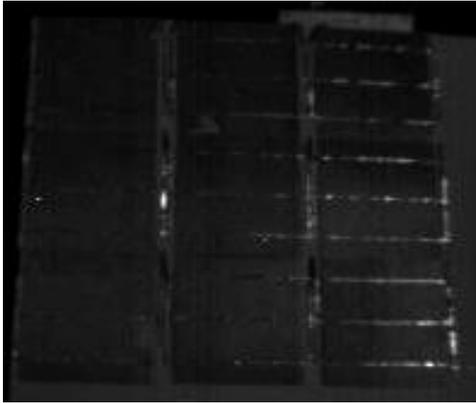


Figura 3.55: Panel con 0.1[A] y 4.6[V].

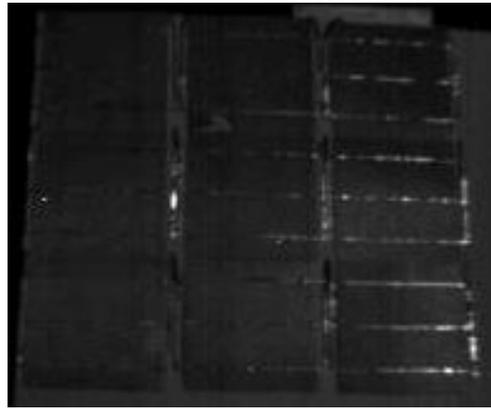


Figura 3.56: Panel con 0[A] y 4[V].

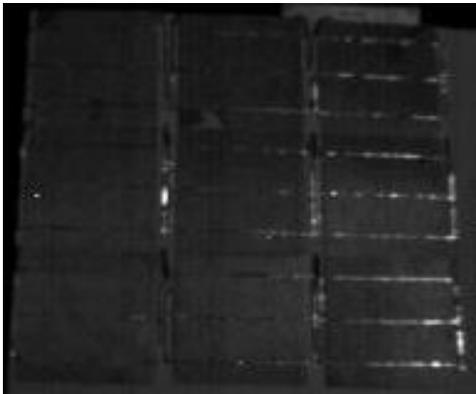


Figura 3.57: Panel 2 con 0.2 [A] y 4.9[V].

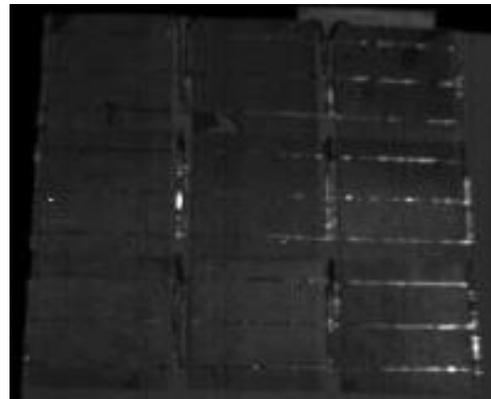


Figura 3.58: Panel 2 con 0.3 [A] y 5.1[V].

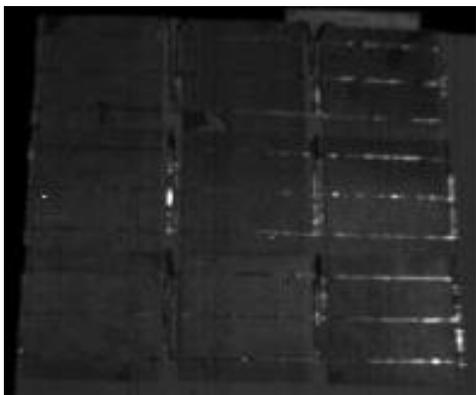


Figura 3.59: Panel 2 con 0.4 [A] y 5.3[V].

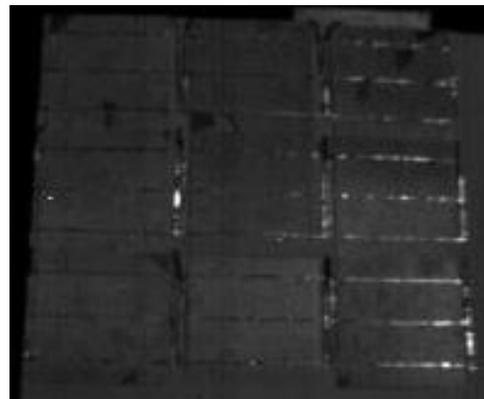


Figura 3.60: Panel 2 con 0.5 [A] y 5.4[V].

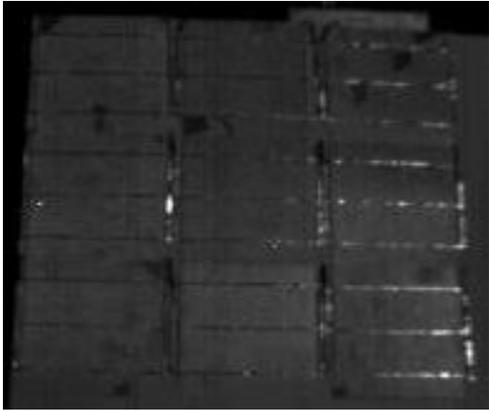


Figura 3.61: Panel 2 con 0.6 [A] y 5.6[V].

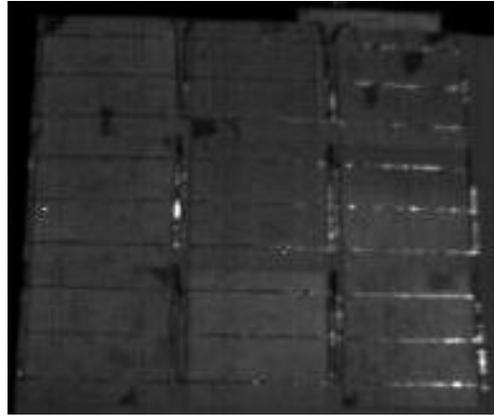


Figura 3.62: Panel 2 con 0.7 [A] y 5.7[V].

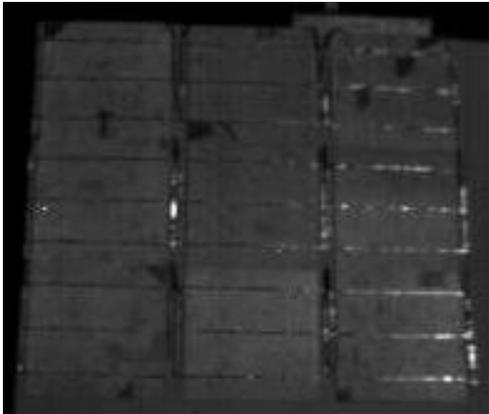


Figura 3.63: Panel 2 con 0.8 [A] y 5.8[V].

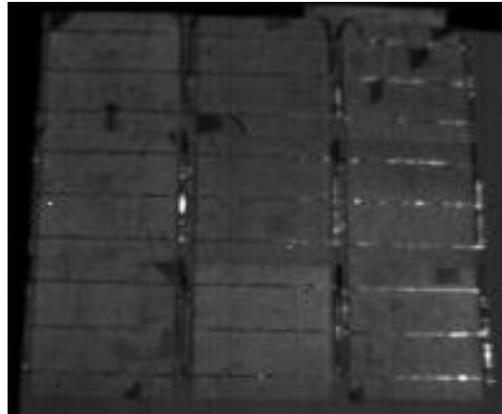


Figura 3.64: Panel 2 con 0.9 [A] y 6[V].

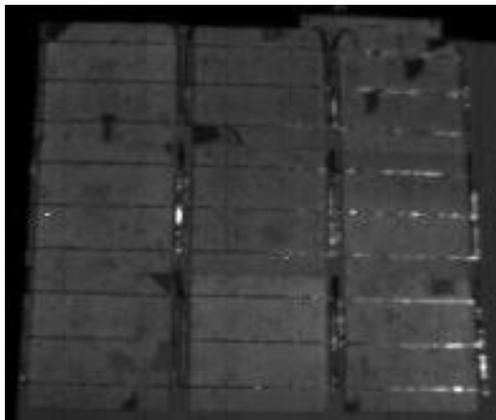


Figura 3.65: Panel 2 con 1 [A] y 6.1[V].

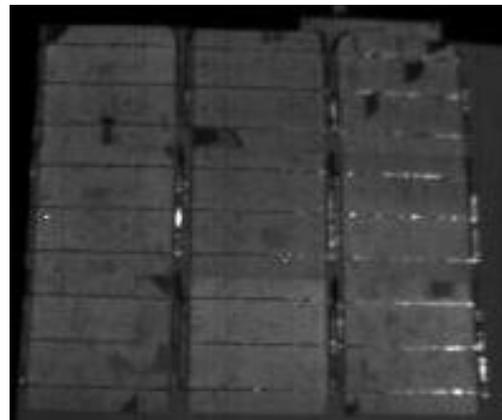


Figura 3.66: Panel 2 con 1.1 [A] y 6.2[V].

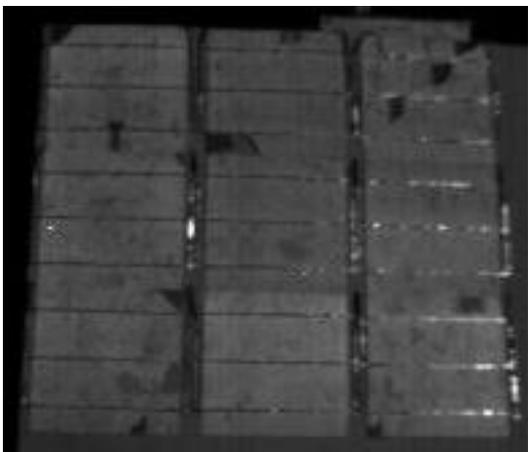


Figura 3.67: Panel 2 con 1.24 [A] y 6.3[V].

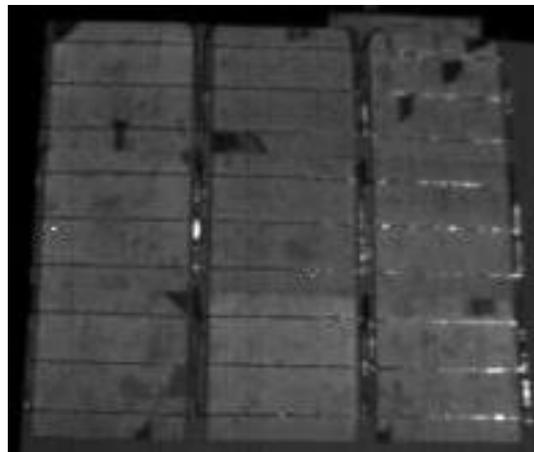


Figura 3.68: Panel 2 con 1.35 [A] y 6.5[V].

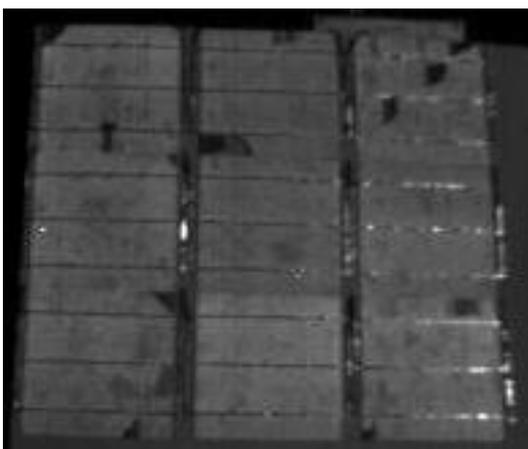


Figura 3.69: Panel 2 con 1.4 [A] y 6.5[V].

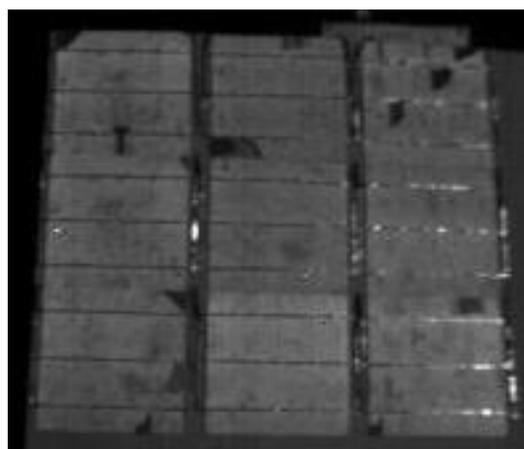


Figura 3.70: Panel 2 con 1.5 [A] y 6.6[V].

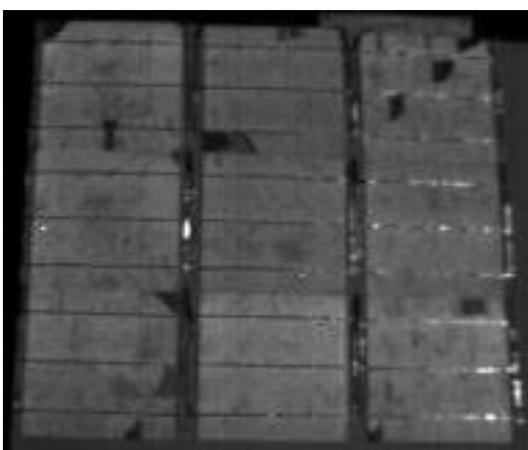


Figura 3.71: Panel 2 con 1.6 [A] y 6.7[V].

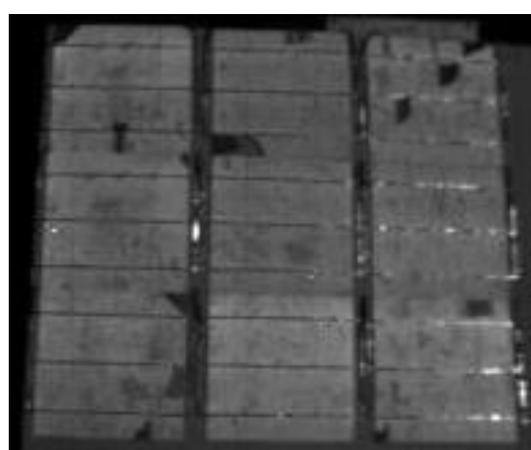


Figura 3.72: Panel 2 con 1.7 [A] y 6.8[V].

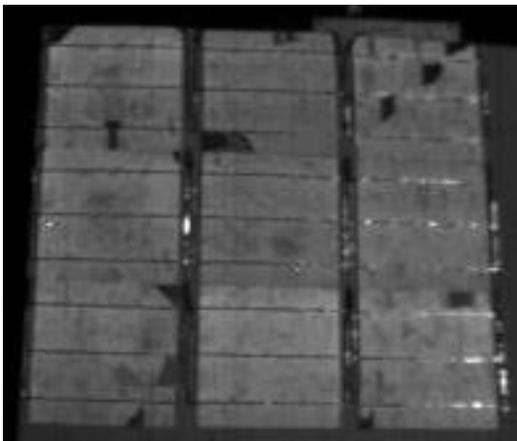


Figura 3.73: Panel 2 con 1.8[A] y 7[V].

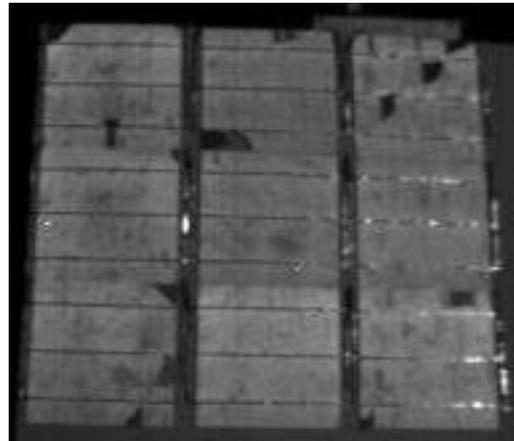


Figura 3.74: Panel 2 con 1.9[A] y 7.1[V].

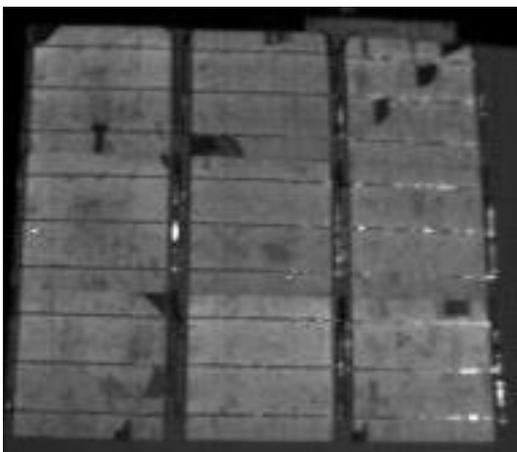


Figura 3.75: Panel 2 con 2[A] y 7.1[V].

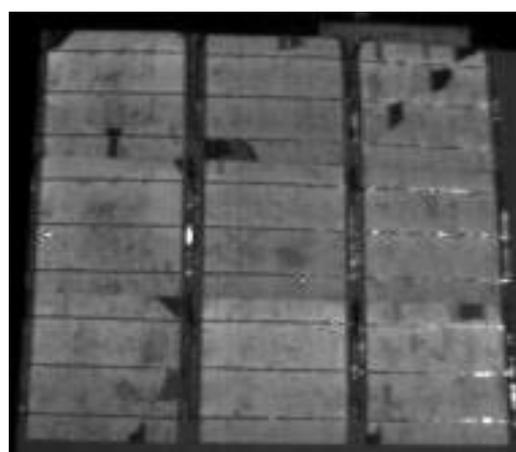


Figura 3.76: Panel 2 con 2.1[A] y 7.2[V].

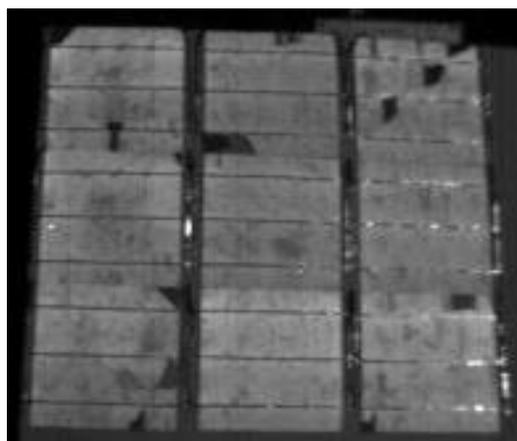


Figura 3.77: Panel 2 con 2.2[A] y 7.4[V].

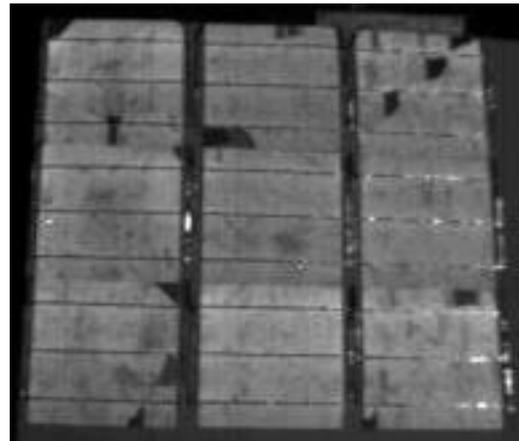


Figura 3.78: Panel 2 con 2.3[A] y 7.4[V].

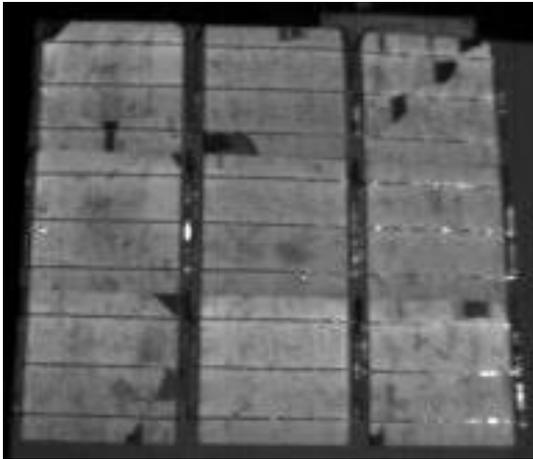


Figura 3.79: Panel 2 con 2.4[A] y 7.5[V].

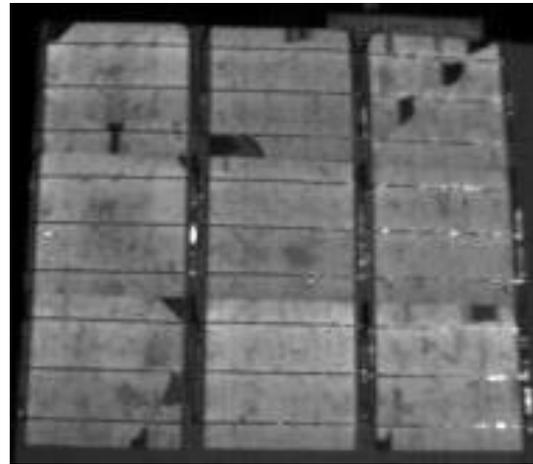


Figura 3.80: Panel 2 con 2.5[A] y 7.6[V].

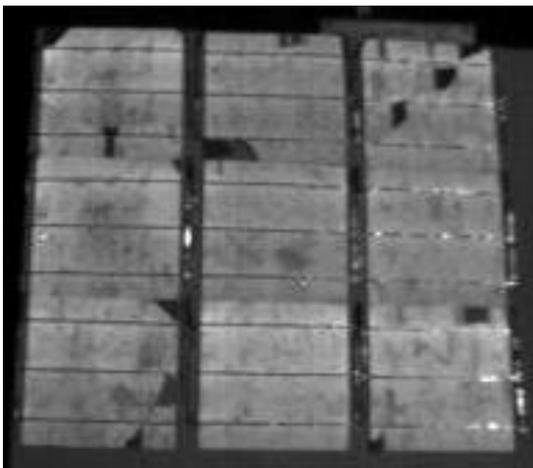


Figura 3.81: Panel 2 con 2.6[A] y 7.7[V].

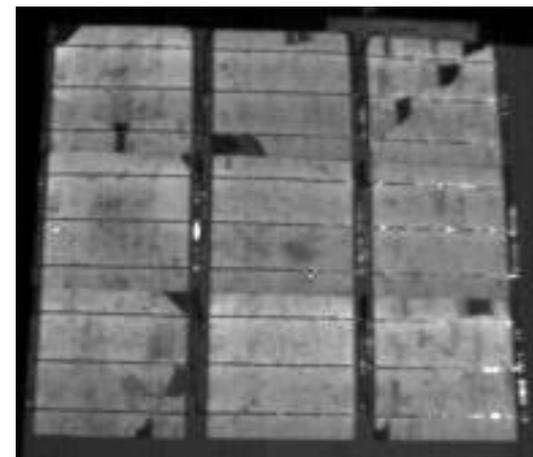


Figura 3.82: Panel 2 con 2.7[A] y 7.8[V].

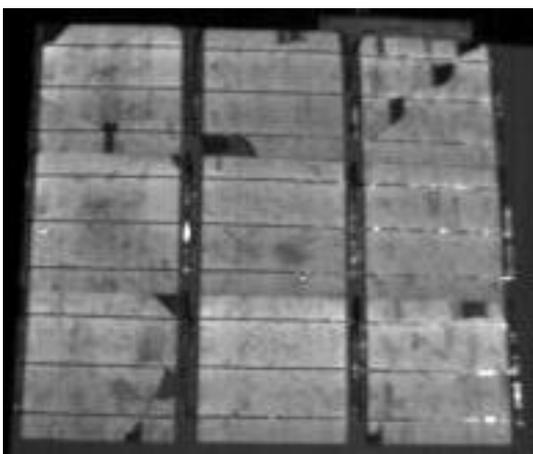


Figura 3.83: Panel 2 con 2.8[A] y 7.9[V].

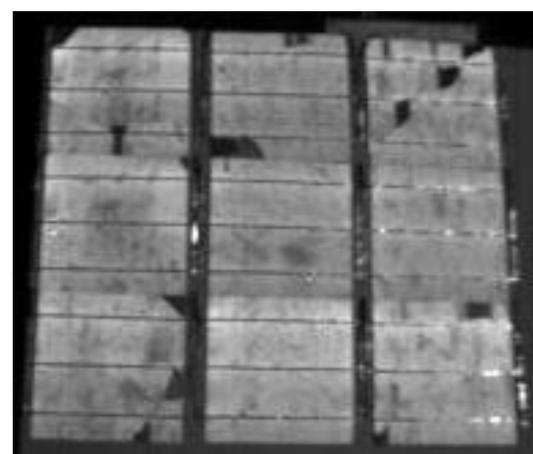


Figura 3.84: Panel 2 con 2.9[A] y 8[V].

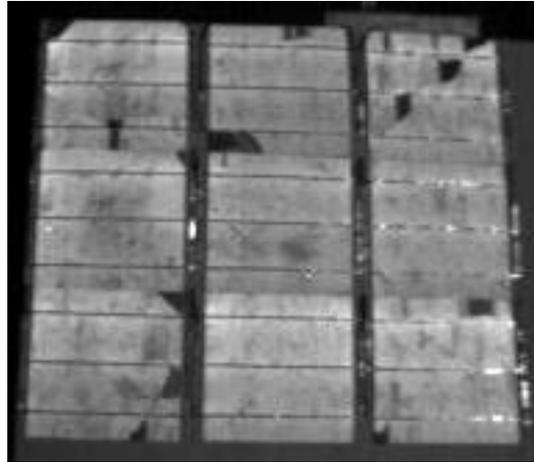


Figura 3.85: Panel 2 con 3[A] y 8[V].

En las fotografías anteriores se puede observar la emisión del panel solar de tipo artesanal mediante electroluminiscencia, el cual sufrió daños en el proceso de construcción debido a la fragilidad de las celdas individuales. Estos daños son fielmente reflejados en las fotografías anteriores con corrientes eléctricas a partir de 1[A], ya que se comienzan a diferenciar todas las zonas con fallas, las que corresponden a zonas más oscuras o lugares donde la electroluminiscencia es menor o nula. Estas zonas coinciden con las zonas de menor eficiencia de absorción o celdas de menor salida de voltaje.

Por otro lado, el fin de la construcción de este panel era poder comprobar que el error que se tenía en las mediciones con el panel comercial, eran debido a la reflexión presente en las mediciones de salida de voltaje y no debido a que la electroluminiscencia no esté reflejando posibles anomalías.

Lo anterior se puede comprobar con este último panel, ya que si se comparan las representaciones visuales de eficiencias cuánticas de absorción del panel número 2 con las fotografías por electroluminiscencia, ya no se observan diferencias de intensidad alrededor de una celda en mal estado.

Por lo tanto, se comprueba que, capturando la electroluminiscencia de paneles solares con fotografías en la banda NIR se podría tener una fiel representación del estado de cualquier panel solar construido a partir de celdas de silicio.

Finalmente, al igual que en el panel 1, se tiene que la electroluminiscencia es mayor a medida que se suministra más corriente eléctrica, por lo tanto, se pueden relacionar patrones de emisión de este panel con diferentes patrones de eficiencia de absorción.

Por ejemplo, si se observan las representaciones medidas con láser es posible relacionar la fotografía por electroluminiscencia a 1.2[A] con la representación de eficiencias de absorción realizada mediante el láser azul, ya que las 3 filas tienen intensidades similares, siendo las 3 bastante opacas, a pesar de esto, todas las anomalías se pueden diferenciar.

Además, se podría relacionar la fotografía por electroluminiscencia a 2.5[A] con la representación de eficiencias de absorción efectuada mediante láser rojo, puesto que, en estas imágenes, las intensidades de las 3 filas comienzan a diferenciarse, siendo las celdas B3 Y C3 las de mayor intensidad. Por otro lado, la representación llevada a cabo con láser verde tiene intensidades sobre el patrón de emisión, no asemejándose a ninguna imagen por electroluminiscencia.

Ahora, si se analizan las representaciones mediante lámpara, se puede relacionar la fotografía mediante electroluminiscencia a 3[A], con la representación efectuada con 8 vueltas, donde, las zonas con mayor intensidad se asemejan. Por otro lado, las representaciones con 6 y 10 vueltas cuentan con intensidades sobre el patrón de emisión.

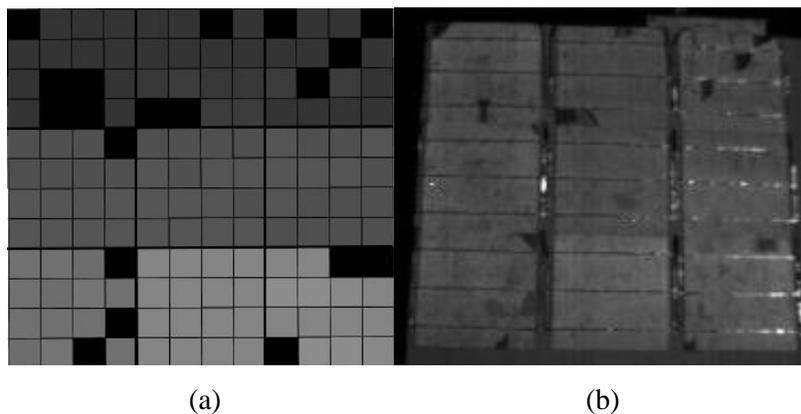


Figura 3.86: Patrones de emisión y absorción similares en panel 2.
 (a) Representación visual de EQ de absorción en panel 2 con láser azul, (b) Imagen por electroluminiscencia del panel 2 con 1.2[A].

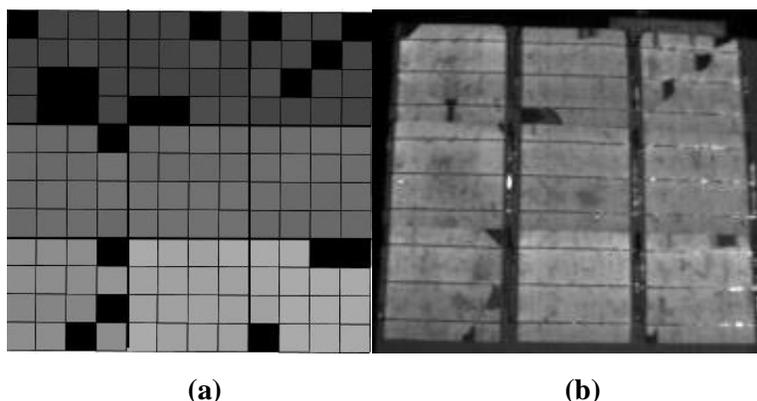


Figura 3.87: Patrones de emisión y absorción similares en panel 2.
 (a) Representación visual de EQ de absorción en panel 2 con láser rojo, (b) Imagen por electroluminiscencia del panel 2 con 2.5[A]

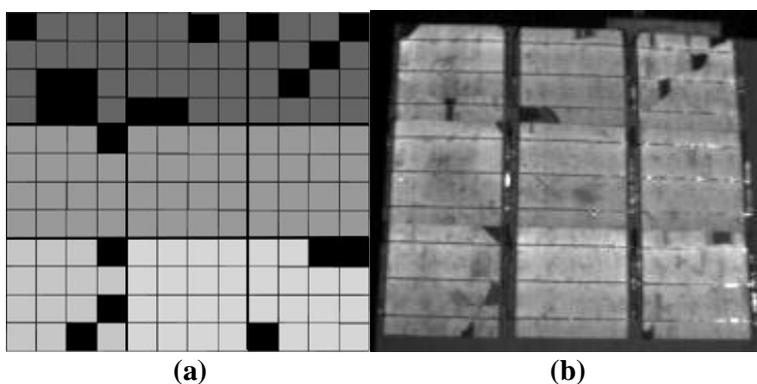


Figura 3.88: Patrones de emisión y absorción similares en panel 2.
 (a) Representación visual de EQ de absorción en panel 2 con 8 vueltas, (b) Imagen por electroluminiscencia del panel 2 con 3[A].

En las imágenes anteriores se puede observar que independiente la cantidad de corriente aplicada, o el tipo y cantidad de luz absorbida, las fallas en el panel se pueden detectar con facilidad. Por otro lado, estas imágenes cuentan con intensidades similares, pudiendo comprobar que el error que se tenía en las mediciones del panel comercial era debido a la reflexión, ya que en estas representaciones no existen zonas más oscuras alrededor de una celda en mal estado. Por lo tanto, las imágenes mediante electroluminiscencia son una buena representación del estado del panel, reduciendo por completo el error.

4 Conclusiones

4.1 Conclusión

A lo largo de este informe se estudia un método para analizar el estado de celdas solares de silicio, el cual consiste en comprobar por medio de salidas de voltaje por celdas y eficiencias cuánticas de absorción, que las imágenes en la banda NIR son una fiel representación del estado de un panel solar de silicio, de ello se pueden concluir los siguientes puntos:

Al realizar la medición de la banda de espectro electromagnético en la cual las celdas de silicio emiten luz por electroluminiscencia, se puede concluir que es una banda ubicada en los 1150nm. Entonces, para poder obtener imágenes que entreguen información sobre el estado de las celdas, es completamente necesario contar con una cámara que trabaje en esta banda espectral y que además se configure a tiempo de integración correcto.

Por otro lado, al capturar estas imágenes NIR se debe tener en consideración que el patrón de emisión de un panel solar cambia en intensidad según la cantidad de corriente eléctrica que se le suministre. Por lo tanto, dependiendo de este factor se podrán apreciar las anomalías con mayor o menor claridad.

Además, en este informe se presentan correlaciones entre imágenes por electroluminiscencia e imágenes de representación de eficiencias cuánticas de absorción, con el fin de demostrar que una imagen NIR es suficiente para poder encontrar anomalías en celdas solares de silicio, destacándose las siguientes conclusiones:

- En la mayoría de los casos analizados, el patrón de absorción del panel solar con su patrón de emisión coincide en cuanto a la detección de anomalías, sin importar la corriente que se aplique al panel solar, ni el tipo o cantidad de luz que este absorba. Sin embargo, debido a la reflexión las mediciones del panel comercial cuentan con un 5.2% de error, el cual se reduce completamente al realizar las mediciones con el panel artesanal, obteniendo resultados aún más precisos debido a la ausencia de reflexión.

- Además, las eficiencias de absorción cambian según la longitud de onda de la luz absorbida por las celdas solares, ya que se comprueba que estos tienen mayor eficiencia cuando la luz laser es verde, luego de color rojo y por último de color azul. Por otro lado, el panel ya no tiene ninguna respuesta a la luz absorbida, si el contenido espectral de esta es mayor a los 1100nm.
- Por último, hay patrones de emisión y absorción que se relacionan más en cuanto a intensidad, esta idea se pudo observar en las imágenes 3.42, 3.43, 3.44, 3.86, 3.87 y 3.88. Al obtener estos resultados, se asegura que una imagen NIR es suficiente para el análisis de celdas solares de silicio, ya que es una fiel representación del estado del panel solar, tanto de sus celdas en buen estado como celdas que contienen anomalías que sean o no visibles para el ojo humano.

4.2 Trabajo Futuro

Utilizando una fuente de poder donde se puedan suministrar más de 3[A] de corriente eléctrica al panel, se podría establecer el comportamiento de la electroluminiscencia, y con eso su patrón de emisión. Por ejemplo, establecer el punto en el cual ya no aumenta más y se vuelve constante. Por otro lado, se podría trabajar en llevar a cabo este método en una planta solar, donde será completamente necesario estudiar factores que puedan influir en la toma de imágenes NIR.

5 Referencias

- [1] C.Estrada,Transición energética, energías renovables y energía solar de potencia, Revista Mexicana de Física, 59(2), 75-84, 2013.
- [2] Mercado Eléctrico Generadoras de Chile”, Santiago, Boletín, junio de 2023
- [3] A. Goetzberger, J. Knobloch, V. Vob, “Crystalline Silicon Solar” Cells,Vol. 1, pp. 114-118, 1998.
- [4] P.Morales, “ Detección de anomalías en paneles fotovoltaicos en base a imágenes multispectrales” unpublished, 2020.
- [5] Fuyuki, T. (2005). Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence. Applied Physics Le, 86.
- [6] Kasemann, M. (2008). 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference. Progress In Silicon Solar Cell Characterization With Infrared Imaging Methods.
- [7]Photonics, R. (2012). Solar Cell Inspection With Raptor Photonics’ Owl (Swir) And Falcon (Emccd).
- [8]Weber, S. K. T. (2016). 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference And Exhibition. Outdoor Electroluminescence Imaging Of Crystalline Photovoltaic Modules: Comparative Study Between Manual Ground-Level Inspections And Drone-Based Aerial Surveys.
- [9] Fernandez, A. M. (2016). Estudio De La Fotoluminiscencia En Obleas Y Células Solares De Silicio. Universidad De Valladolid.
- [10] Sacoto, M. D. (2019). Termografía Infrarroja De Bajo Costo Como Soporte Para La Investigación Sobre Degradación De Paneles Fotovoltaicos. Revista Facultad De ingeniería Universidad De Antioquia, 20–30.
- [11] Le Roy, P. I. M. (2020). Detección De Anomalías En Paneles Fotovoltaicos En Base A Imágenes Multispectrales. Universidad De Chile.
- [12] Instruments, P. (2020). Solar cell inspection via photoluminescence imaging in the NIR/SWIR.
- [13] T.Hussain, M. Hussain, T. Alsboui, R.Hill, “A Review on Defect Detection of Electroluminescence-Based Photovoltaic Cell Surface Images Using Computer Vision”,Energies, 16(10), 4012, 2023.
- [14]A.Korovin, A. Vasilev, F. Egorov, D. Saykin, ”Anomaly detection in electroluminescence images of heterojunction solar cells”, Energy, 259, 130-136, 2023.

- [15] M. Turek, M. Meusel, "Automated classification of electroluminescence images using artificial neural networks in correlation to solar cell performance parameters", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 260, 112483, 2023.
- [16] Neamen, D. A. (2011). *Semiconductor physics and devices* (4a ed.). McGraw-Hill
- [17] Carpenter, Roden, Savant, & Savant, C. J. (2000). *Diseño electrónico: Circuitos y sistemas*. Addison Wesley Longman.
- [18] Faridy Panohaya García Dr. Arturo Olivares Pérez Q.I. Israel Fuentes Tapia. (2004). "Conceptos y bibliografía sobre la fotoluminiscencia y procesos similares".
- [19] Fontal, B. (2005). *El espectro electromagnético*.
- [20] Duarte, E. S. (2008). *Sistema de regulación fotovoltaico basado en microcontrolador*.
- [21] RIGK. (2020). *Alternativas de tratamiento de módulos fotovoltaicos luego de su vida útil*.
- [22] KGaA, T. S. E. &. (2023). *Funcionamiento más rentable y seguro de las instalaciones fotovoltaicas*. testo.com. <https://www.testo.com/es-AR/aplicaciones/energia-solar>.
- [23] Short Article - Quantum Efficiency (2020) Teledyne Photometrics. Available at: <https://www.photometrics.com/learn/imaging-topics/quantum-efficiency> (Accessed: 20 October 2023).