



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**ESTIMACION DE EFICIENCIA CUANTICA EN CELDAS DE SILICIO USANDO
MECANISMO DE ELECTROLUMINISCENCIA NIR**

POR

Catalina Fernanda Ortega Villablanca

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título profesional de Ingeniero(a) Civil Electrónico(a)

Profesor Guía

Luis Emiliano Arias Parada

Agosto 2023
Concepción (Chile)

©2023 Catalina Ortega Villablanca

©2023 Catalina Ortega Villablanca

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

A mi familia y al Paulo, gracias por su apoyo incondicional en esta etapa de mí vida.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todos los profesionales y docentes que siempre me brindaron ayuda, tanto en contexto académico como en el ámbito personal, entre las personas que me gustaría destacar esta:

- Luis Emiliano Arias Parada, por confiar en mis aptitudes para poder llevar a cabo este proyecto y resolver cada duda que me surgió en el camino.
- Luis Domingo Arteaga Rozas, por ayudarme en todo lo que estuviera a su alcance, desde facilidades con los laboratorios, materiales, información, hasta apoyarme con consejos que me ayudarán al día a día.
- Franco Rivas, por apoyarme en dudas conceptuales, tomas de mediciones y siempre ofrecer ayuda con la mejor disposición.
- Valentina Jara, por colaborar en el proyecto y darnos ánimos mutuamente.
- Finalmente agradecer a la Universidad de Concepción, por ayudarme a mi formación personal y profesional.

Sumario

En este trabajo, se muestran los resultados obtenidos mediante la implementación de un set-up óptico, para estimar la eficiencia cuántica de las celdas solares de un panel fotovoltaico, primero se procedió a polarizar dicho panel fotovoltaico, en polarización directa, produciendo así una emisión espectral en la banda cercana a las 1100nm, con distintos niveles de corriente (entre 0.94 hasta 3[A]), y se procedió a medir esa emisión con un espectrofotómetro NIR512 (OceanInsight) y una cámara SWIR Acuros1920.

Se realizó un análisis bibliográfico para tener un correcto conocimiento de los componentes a utilizar, teoría física que describe su comportamiento y principalmente para entender la importancia de lo que se intenta lograr en la realización de este proyecto.

Como resultado se obtuvo el set-up óptico, con el cual se llevó a cabo las mediciones correspondientes a la emisión de radiación de los paneles fotovoltaicos y con ello se logró medir la potencia óptica emitida 1305235.254[uW] entregando diferentes voltajes de salida, dependiendo de la celda medida, por lo que se logró determinar la eficiencia cuántica, en unidades de medida de [Uw/mV].

Summary

In this report, we show the results obtained by implementing an optical set-up to estimate the quantum efficiency of the solar cells of a photovoltaic panel, first we proceeded to polarize the photovoltaic panel, in direct polarization, thus producing a spectral emission in the band near 1100nm, with different levels of current (between 0.94 to 3 [A]), and proceeded to measure that emission with a spectrophotometer NIR512 (OceanInsight) and a SWIR Acuros1920 camera.

A bibliographic analysis was carried out in order to have a correct knowledge of the components to be used, the physical theory that describes their behavior and mainly to understand the importance of what we are trying to achieve in the realization of this project.

As a result, the optical set-up was obtained, with which the measurements corresponding to the radiation emission of the photovoltaic panels were carried out, and with it, the optical power emitted 1305235.254 [uW] was measured, delivering different output voltages, depending on the cell measured, so that the quantum efficiency was determined, in units of measurement of [Uw/mV].

Tabla de Contenido

Agradecimientos	iv
Sumario.....	v
Summary.....	vi
Lista de acrónimos	x
1. Introducción.....	11
2. Fundamentos y Teoría relacionada	20
3. Implementación del Set-up Óptico.....	30
4. Generación del NUC Table de la cámara	36
5. Estimación de la Eficiencia cuántica.....	43
6. Conclusiones.....	47
Referencias	50
Anexo A.....	52
Anexo B.....	53
Anexo C.....	54

Lista de Tablas

Tabla 1: Valores de eficiencia cuántica en [uW/mV]	46
--	----

Lista de Figuras

Figura 1.1: Radiación Solar en el mundo [1].....	16
Figura 2.1: Procesos de absorción, creación de electrones y huecos [2].....	21
Figura 2.2: Efecto fotoeléctrico [3].....	22
Figura 2.3: Estructura de Celdas Fotovoltaicas [4].....	24
Figura 2.4: Acuros CQD 1920 GigE [5]	25
Figura 2.5: Respuesta espectral de los sensores.....	25
Figura 2.6: Transmitancia del lente [6]	26
Figura 2.7: Panel Solar Policristalino.....	26
Figura 2.8: Espectro Fotómetro NIR-512.....	27
Figura 2.9: Lente Colimador	27
Figura 2.10: Fibra óptica VIS-NIR	27
Figura 2.11: Fuente de poder DC POWER SUPPLY HY 3003D-Y	28
Figura 2.12: Software utilizado para medir la banda del Panel Solar	28
Figura 2.13: Láser Verde.....	28
Figura 2.14: Cámara Gobi	29
Figura 2.15: Software Xenics	29
Figura 3.1: Set-up Identificación del rango espectral del Panel Solar	30
Figura 3.2: Detección del Panel Solar con cámara VIS-NIR	31
Figura 3.3: Detección de radiación en Panel Solar con cámara IR	32
Figura 3.4: Detección de voltaje de salida al iluminar cada celda con láser verde	33
Figura 3.5: Respuesta espectral del Panel Solar, se evidencia la emisión en 1147.45nm	34
Figura 3.6: Panel Solar a 1.5[A] y 22.7[V]	34
Figura 3.7: Panel Solar a 2[A] y 22.7[V]	34
Figura 3.8: Panel Solar a 0.94[A] y 22[V]	34
Figura 3.9: Panel Solar a 3[A] y 23[V]	34
Figura 3.10: Panel Solar a 0[A] y 0[V]	35
Figura 3.11: Panel Solar a 0.95[A] y 22[V].....	35
Figura 3.12: Panel Solar a 1.53[A] y 22.75[V].....	35
Figura 3.13: Panel Solar a 2.01[A] y 22.7[V].....	35
Figura 3.14: Panel Solar a 3.02[A] y 23.65[V].....	35
Figura 4.1: Parámetros a seleccionar en el Software SVSImgIR.....	36
Figura 4.2: Ruta de datos de video de Acuros	37
Figura 4.3: Dark Frame	40

Figura 4.4: Flat Field en CSV, la información se traduce a un cuerpo oscuro a 950ms y 400°C	42
Figura 4.5: Fotografía tomada con método de corrección de 2 puntos	43
Figura 5.1: Set-up óptico para medición de voltaje de salida de cada celda	44
Figura 5.2: Panel Fotovoltaico con sus correspondientes voltajes de salida de cada celda.....	45
Figura 5.3: Grafica de Flujo vs Longitud de onda	45
Figura 5.4: Grafica de relieve de eficiencia cuántica[mV/uW] de cada celda solar	46
Figura 5.5: Grafica de relieve de eficiencia cuántica[mV/uW] de cada celda solar desde otro ángulo	46
Figura 6.1: Imagen con cámara Acuros a 23[V] y 3[A].....	48
Figura 6.2:Grafica de relieve de la eficiencia cuántica	48

Lista de acrónimos

- EL: Electroluminiscencia
- PL: Fotoluminiscencia
- LID: Degradación Inducida por la Luz (Light Induced Degradation)
- LeTID: Degradación Inducida por Exposición a la luz y temperaturas altas (Light and Elevated Temperature Induced Degradation)
- PID: Potential Induced Degradation (Fenómeno de degradación y pérdida de potencia)
- SWIR: Infrarrojo de onda corta (Short-Wave Infrared)
- NIR: Infrarrojo cercano (Near infrared) VIS: Rango espectral visible
- LWIR: Infrarrojo de onda larga (Long-Wave infrared) CIGS: Célula Solar de Cobre e Indio de Selenio de Cobre
- CCD: Dispositivo de carga acoplada (Charge Coupled Device) CQD: Punto cuántico coloidal (Coloidal Quantum Dot)
- InGaAs: Indio-Galio-Arsenico
- Mc-Si: Silicio policristalino
- SP&R: Spectral Processing and Radiometry
- CMOS: Semiconductor complementario de oxido metálico (Complementary Metal-Oxide Semiconductor)

1. Introducción

1.1. Introducción general

La electroluminiscencia es un método que permite detectar defectos estructurales en las celdas fotovoltaicas, provenientes de manejos inadecuados de módulos tal como transportes, técnicas deficientes de limpieza, degradación natural y/o acelerada, entre otros. Los defectos mencionados pueden tomar forma de cracks (roturas). Dicho método conocido como Electroluminiscencia (EL), de la mano con el trazado de curva IV y mediciones de degradación de baja incertidumbre en terreno, son los mecanismos por excelencia para determinar el estado del campo solar actual y futuro, permitiendo detectar fallas actuales y pronosticar futuras.

Las ventajas que ofrece este método sobre otros son: No ser invasivo y normado, permite detectar defectos estructurales en celdas y degradación (LID, LeTID, PID), permite detectar gestión inapropiada de módulos a nivel de mantenimiento de campos solar y no genera pérdida de producción eléctrica al ser realizado de noche.

Otra de las ventajas de la luminiscencia como método de caracterización de células solares es no necesitar de ningún tipo de contacto con la célula, al contrario de lo que ocurre cuando se quiere caracterizar la célula mediante sus parámetros eléctricos (tensión de vacío, intensidad de cortocircuito, factor de forma, etc).

Estas y otras razones hacen del estudio de imágenes de luminiscencia (PL y EL) un método óptimo de caracterización de las celdas en todo proceso productivo, desde el comienzo con las obleas de silicio, hasta una vez instalados los paneles fotovoltaicos en los parques solares, donde estas técnicas se usan para la revisión de estos.

Por otro lado, también se puede mencionar que la caracterización de las células fotovoltaicas mediante métodos de luminiscencia presenta ciertas limitaciones. La primera es la falta de una normativa que recoja las condiciones de ensayo. Otros factores como la necesidad de realizar los ensayos en oscuridad debido a la interferencia de la luz luminiscencia son limitaciones que deben superarse para la expansión de este método de caracterización de células solares fotovoltaicas a nivel industrial y comercial.

Particularmente en esta tesis se pretende montar y poner en operación una cámara VIS-NIR (Acuros™ CQDTM) para la obtención de imágenes en el NIR (Near InfraRed), de la emisión de un

panel solar al inyectarle corriente y así poder estimar la eficiencia cuántica en base a estos resultados.

1.2. Estado del arte y revisión bibliográfica

A continuación, se presenta la revisión bibliográfica realizada para el proyecto, la cual consiste en una investigación de los conceptos generales relacionados con la materia y los fenómenos físicos que ocurren. Además de un estudio de los componentes que se podrían utilizar para el set-up, el funcionamiento de la cámara VIS-NIR, detectores lentes, entre otros. Finalmente, también se investigó sobre el desarrollo y la obtención de las imágenes a capturar en el infrarrojo cercano.

- ❖ Castillo, F. (14 de diciembre de 2016). *Diseño de un prototipo basado en un radiómetro NIR-512 Para verificación de estados de paneles solares*. [7]

En el trabajo se muestra cómo es posible medir la electroluminiscencia y fotoluminiscencia en los paneles solares u obleas de silicio, por medio estos dos métodos. En el primero, se utilizó un radiómetro NIR-512 y un láser de 852nm, donde se midió la banda del espectro de dicho panel, dando un resultado que ronda los 1100nm, 1138nm exactamente. Posteriormente, por medio de la electroluminiscencia se vuelve a medir la banda del espectro, ahora utilizando un voltaje de 21.3V y una corriente de 1.1A. En el espectrofotómetro en la misma celda fotovoltaica, muestra una emisión de una banda de 1147.45nm. Una de las conclusiones más importante que se llevaron a cabo con este experimento fue que se aprecian distintas intensidades, las cuales pueden estar asociadas a posibles defectos de fabricación o al mal uso de estas.

- ❖ Castillo, F. (10 de julio de 2017). *Análisis del estado de celdas solares en modo electroluminiscencia y fotoluminiscencia usando imágenes espectrales*. [8]

Se hizo el análisis de imágenes aplicando polarización directa 2.01A y 23.3V, en donde se ocupó una cámara Cedip (LWIR), obteniéndose resultados que muestran las zonas en las cuales se tienen mayor temperatura y otras no, debido a la no homogeneidad de la celda solar, atribuyendola los defectos de red o a una mala circulación de la corriente. Además, se apreciaron que las microgrietas de la célula que se pueden ver de mejor forma con luz ultravioleta y su respectiva cámara.

- ❖ Fuyuki, T., Kondo, H., Yamazaki, T., Takahashi, Y., & Uraoka, Y. (2005). Photographicsurveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence. *Applied physics letters*, 86(26), 262108. <https://doi.org/10.1063/1.1978979>. [9]

En esta investigación se trabajó con levantamiento fotográfico de la distribución de longitudes de difusión de portadores minoritarios en silicio policristalino. Se propusieron las celdas solares. La emisión de luz de la celda bajo polarización directa fue capturada por una cámara del dispositivo de carga acoplada. Se halló que la distribución de intensidad de la emisión de luz claramente estuvo de acuerdo con el mapeo de la longitud de difusión del portador minoritario en capas activas de silicio policristalino. La intensidad de emisión tenía una relación de uno a uno con la longitud de difusión de los portadores minoritarios, que arrojó un método de análisis semicuantitativo del mapeo de longitud y difusión.

- ❖ Photonics, R. (s/f). *Solar cell inspection with raptor photonics' owl (SWIR) and falcon(EMCCD)*. www.laser2000.co.uk. [10]

En este documento se habla de la inspección de celdas solares, que se basa en obtener imágenes de las señales de fotoluminiscencia o electroluminiscencia de una oblea para caracterizarla. La emisión máxima para el silicio ocurre alrededor de 1150nm, mientras que para el di seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS) y el di seleniuro de cobre e indio (CIS) es de alrededor de 1330nm.

Este valor está fuera de rango de sensibilidad de los detectores basados en silicio, como los CCD, y tradicionalmente su eficiencia cuántica solo se mide hasta 1000nm.

Sin embargo, el pico de emisión es en realidad lo suficiente amplio como para permitir que el CCD enfriado en profundidad capture imágenes significativas usando tiempos de integración muy largos (en el rango de minutos). Aunque interesante, esto es insuficiente y poco práctico para aplicaciones industriales.

Como alternativa, la tecnología InGaAs de infrarrojos de onda corta (SWIR) es ideal para detectar directamente la electroluminiscencia emitida a $1,3 \mu\text{m}$ por las celdas solares y asegurar su caracterización rápida (en milisegundos) ya sea durante la fabricación o para la operación de mantenimiento de un plan fotovoltaico.

- ❖ Princeton, I. (s/f). *Solar cell inspection via photoluminescence imaging in the NIR/SWIR*. www.princetoninstruments.com. [11]

Se estudia el uso de imágenes de fotoluminiscencia (PL) para la inspección de celdas solares en un área de interés en rápido crecimiento en el campo de la investigación energética. Cabe mencionar que recientemente, grupos de vanguardia en los Estados Unidos, Alemania, Japón, Australia y

Singapur han comenzado a explorar las ventajas de utilizar matrices de plano focal (FPA) de InGaAs para caracterizar celdas solares de silicio multicristalino(mc-Si) a través de imágenes PL en el NIR y SWIR A diferencia de las imágenes de electroluminiscencia (EL), que se basan en la detección de señales relativamente brillantes y solo pueden emplearse en la etapa final de la fabricación de celdas solares, las imágenes PL de baja señal pueden implementarse durante todo el proceso de fabricación.

Las imágenes de PL tienen un gran potencial como herramienta de monitoreo en línea. La capacidad de utilizar esta técnica de imagen altamente sensible durante las primeras etapas del proceso de fabricación ha ramificaciones significativas, ya que las imágenes de PL de lingotes, ladrillos y obleas recién cortadas pueden predecir la eficiencia final de la celda solar.

- ❖ M. Kasemann¹, W. Kwapil, B. Walter, J. Giesescke, B. Michl, M. The, J-M. Wagner, J. Bauer, A. Cartensen, S. Kluska, F. Granek, H. Kampwerth, P. Gundel, M. C. Schubert, R. A. Bardos, H. Föll, H. Nagel, P. Würfel, T. Trupke, O. Breitenstein, M. Hermule, W. Warta, S. W. Glunz. (1-5 September 2008). *Progress in silicon solar cell characterization with infrared imaging methods*. [12]

Este artículo revisa los últimos resultados en la aplicación y el desarrollo de métodos de imágenes infrarrojas para la caracterización rápida y espacialmente resulta de celdas solares de silicio. Los métodos de imágenes infrarrojas comprenden imágenes de electroluminiscencia (EL), imágenes de fotoluminiscencia (PL) y termografía de bloqueo (LIT). Se informan sobre nuevos conocimientos sobre la naturaleza de las resistencias en serie locales y observaciones importantes sobre la ruptura de uniones locales en celdas solares de silicio multicristalino industriales. Se han logrado mejoras significativas sobre la ruptura de uniones locales de celdas solares de silicio multicristalino industriales. Además, se han logrado mejoras significativas en la aplicabilidad de los métodos de imágenes infrarrojas para la aplicación en línea en la producción de celdas solares de silicio. Por otro lado, se demostró que los valores cuantitativos de las corrientes inversas locales en puntos calientes se pueden obtener fácilmente en 10 milisegundos. Se obtuvieron imágenes de resistencia en serie cuantitativa en 800 milisegundos con un buen potencial para reducir el tiempo de medición por debajo de los 500 milisegundos.

- ❖ M. Vollmer y K.-P. Möllmann, “Infrared Thermal Imaging”. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017. [13]

Este libro muestra un amplio estudio y fundamentos de las imágenes IR, explica el fenómeno de radiación de los cuerpos, las leyes que lo originan, propiedades básicas de un sistema de imágenes IR y sus términos asociados. También enseña acerca de funcionamiento de los detectores de radiación utilizados en los sistemas de imágenes térmicas, sus principios de operación, factores limitantes para el rendimiento. El detector de infrarrojos actúa como transductor, que convierte la radiación detectada en señales eléctricas y la calidad de dicha transducción determina la calidad de imagen. En termografía, los sensores IR deben ser capaces de poder detectar cambios de temperatura mínimos, pero sujeto a los rangos donde opera dicha cámara.

En la mayoría de las aplicaciones de imágenes IR, la investigación se realiza de forma pasiva, es decir la cámara observa una escena y detecta la radiación térmica emitida por los objetos. Debido a la radiación térmica del entorno, solo se observa un contraste térmico en una imagen si existen diferencias de temperatura con la temperatura ambiente.

❖ B. E. A. Saleh, “Fundamentals of photonics”. New York: Wiley, 1991. [14]

En este libro se muestra un estudio bastante extenso de la óptica relacionada, desde los espectros electromagnéticos, como se propaga la luz a través de espejos, filtros, lentes, entre otros, por lo cual ayuda al entendimiento de los componentes esenciales.

❖ FLIR “The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals”. [15]

En este libro se muestra el estudio de la termografía IR, haciendo énfasis principalmente al correcto funcionamiento y uso de una cámara IR, además se analizan los componentes que la conforman tales como el plano focal, detectores y lentes. Señalando que la termografía es un tipo de imagen que se logra con una cámara infrarroja calibrada para mostrar los valores de temperatura en un objeto o escena. Por tanto, la termografía permite que uno no tenga contacto en las medidas de temperatura de un objeto.

Una cámara IR tiene entre sus componentes principales un lente que enfoca IR en un detector. El detector de cámara IR es una matriz de plano focal (FPA). Normalmente las cámaras de infrarrojos están diseñadas y calibradas para un rango específico del espectro de infrarrojos. Esto significa que la óptica y los materiales a utilizar deben seleccionarse para el rango deseado. IR tiene las mismas propiedades que la luz visible en cuanto a la reflexión, refracción y transmisión.

Es importante recordar de aquí que la radiación que incide en la lente de la cámara de infrarrojo proviene de tres fuentes diferentes. La cámara recibe radiación del objeto en estudio, más la radiación de su entorno que se ha reflejado en la superficie del objeto que está emitiendo es vital para lograr temperaturas precisas. La cámara de infrarrojo calcula una temperatura en función de las mediciones de radiación y emisividad del objeto.

1.3. Discusión

La energía es el “combustible” necesario para el crecimiento económico y la mejora del bienestar. La energía eléctrica es la que hace funcionar las fábricas y permite disfrutar de un ambiente confortable en nuestros hogares mediante la calefacción y el aire acondicionado. Es por esto, que todos los países donde crece la economía registran también un aumento de su consumo energético.

Según informa el Ministerio de Energía de Chile el 2019 la energía solar llegó a cubrir un 18.5% de la demanda eléctrica en el norte del país.

Con respecto a los beneficios de la energía solar, estos son múltiples. Dicha energía, ayuda al desarrollo sostenible, puesto que el sol es una fuente renovable, no contaminante y disponible en todo el planeta. Por cada 100kW de potencia solar instalada se evita la emisión de 75.000kg de CO₂ al año. Además, contribuye a generar empleo en aquellas zonas donde se implanta.

Por otro lado, es importante mencionar que Chile ofrece condiciones únicas para el potente desarrollo de dicha energía, debido a este excelente recurso existente en la región.

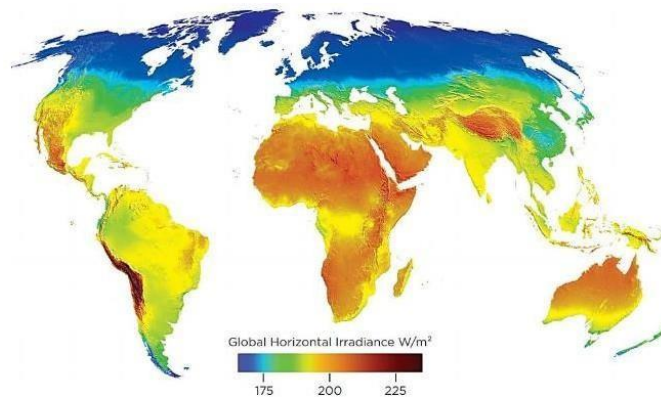


Figura 1.1: Radiación Solar en el mundo [1]

De todas las fuentes de energías renovables, la radiación solar, es la que tiene mayor potencial, fiabilidad y factibilidad en el norte del país para ser transformada individualmente en electricidad de uso industrial, y ser aplicada en procesos productivos de alta potencia y gran consumo energético.

El silicio es un mineral fundamental en todo panel fotovoltaico, ya que sus propiedades son claves para poder transformar los rayos del sol en energía eléctrica a través del efecto fotovoltaico.

Los paneles fotovoltaicos están contruidos fundamentalmente utilizando dos tipos de silicio, el silicio monocristalino y el silicio policristalino. Cada uno de ellos cuenta con sus características y propiedades que los hacen más adecuados dependiendo del tipo de panel solar a elegir para una instalación fotovoltaica.

Estos pueden presentar posibles defectos que afectan a la eficiencia, tales como las microrroturas, puntos de calor, baba de caracol, entre otros.

Por lo cual se implementará una solución para saber cuándo las celdas fotovoltaicas no están en su funcionamiento óptimo, para que luego se les haga una mantención inmediata y poder aprovechar al máximo el potencial de este tipo de energía.

Con respecto a los Trabajos de investigación relacionados al área, se puede mencionar que a base de los métodos de electroluminiscencia (EL) y fotoluminiscencia (PL) es posible detectar ciertas características y localizar posibles defectos presentes en la celda solar. Además, de dar información que las micro-grietas se pueden capturar utilizando una cámara NIR, para también poder crear una correlación de la mala eficiencia con las micro-grietas.

Por otro lado, se pudieron recopilar una serie de consideraciones al momento de diseñar el set-up óptico. Por ejemplo, se debe tener en cuenta el tamaño del filtro para que coincida con el tamaño del lente de la cámara VIS-SWIR, el tipo de filtro a utilizar, como verificar que el panel este emitiendo radiación, entre otros.

Finalmente es importante una buena configuración en las características de la cámara, en particular en el tiempo de integración y la eliminación del ruido de esta, que son claves para una imagen lo más nítida posible.

Además, se puede concluir que la implementación del set-up es una de las etapas más complejas por lo cual hay que hacerlo con rigurosidad y paciencia.

1.4. Definición del Problema

Actualmente existen métodos para determinar fallas en paneles fotovoltaicos, sin embargo, no existe un método que, a partir de estas imágenes, se pueda determinar la eficiencia cuántica. En este trabajo, se propone hacerlo por medio del método de electroluminiscencia, combinado con el cálculo de la eficiencia cuántica, por medio de la potencia óptica transmitida versus la salida de voltaje de

cada celda solar, lo cual ayudara de gran manera a saber cuándo una celda solar está en buen estado o no.

1.5. Hipótesis de Trabajo

1. Poder identificar rápidamente los paneles o celdas solares defectuosas que son responsables de la reducción de la eficiencia energética. Esto se pretende lograr, utilizando el método de electroluminiscencia.
2. Conseguir un método que no tenga tantas desventajas como es el de medición de voltaje de salida, usando para ello la estimación de eficiencia cuántica.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

- El objetivo de este trabajo consiste en la utilización del método de electroluminiscencia en paneles solares para poder estimar la eficiencia cuántica de estos. Además, así lograr identificar de forma rápida y eficiente las fallas de cada celda, utilizando el cálculo de su eficiencia cuántica, (en W/V, o responsividad) a partir de la emisión espectral medida con un espectrofotómetro NIR-512. Para su desarrollo, se debe medir el voltaje generado frente a potencia óptica controlada y luego correlacionar con la potencia óptica emitida en el proceso de electroluminiscencia.

Para ello, primero se necesita hacer un estudio acerca del espectro en infrarrojo cercano (780nm a 1400nm), ya que es el rango del espectro en el cual se trabajará, esto debido a que el panel solar a utilizar emite radiación alrededor de los 1100nm.

Por otro lado, también es importante conocer el funcionamiento de una cámara VIS-NIR y los elementos que la componen, principalmente el detector (ya que su material de fabricación determinará el rango de longitudes de onda en el cual se puede hacer las respectivas mediciones) y los lentes (enfocan la radiación en el detector).

1.6.2. Objetivos Específicos

- Implementación de un set-up óptico específico capaz de lograr identificar cuando una celda solar no está trabajando de forma eficiente.
- Lograr eliminación de ruido de la cámara Acuros CQD y ajustar sus parámetros para una imagen nítida.

- Optimizar la cantidad de componentes ópticos utilizados en el set-up, de manera que se pueda realizar con un bajo costo de implementación.
- Mediante el uso de filtros poder obtener información en distintas bandas del espectro.

1.7. Alcances y Limitaciones

- Los análisis y gráficos resultantes se modelarán en MatLab y Excel.
- Las principales limitaciones serán impuestas por el laboratorio de SP&R, pues para poder tomar mediciones de salida de voltaje en el panel solar, es necesario cambiarse a un laboratorio con completa oscuridad, en el cual hay la menor cantidad de luz posible. También se puede añadir, que habrá que ajustar el set-up de manera que por ejemplo el osciloscopio no emita luz en su pantalla, pues afectaría de forma directa a las mediciones del panel.

1.8. Metodología

El desarrollo relacionado con la implementación del set-up óptico se realizará en las dependencias del laboratorio SP&R, mientras que el algoritmo para correlacionar los resultados se implementará en Matlab y en Excel, donde se pretende procesar los datos para generar la estimación de la eficiencia cuántica de cada celda solar, esto se llevará a cabo por medio del voltaje de salida de cada celda, que varía desde los 15[mV] hasta los 420[mV] aproximadamente y midiendo la potencia óptica del láser utilizado en dicho experimento que es de 1305235.254[uW].

Por otro lado, en el experimento de electroluminiscencia fueron inyectados portadores en forma de corriente desde los 0.94[A] hasta los 3[A] con voltajes de 22[V] a 23[V], lo cual genera en el NIR imágenes que indican las partes del panel solar en buen y mal estado, para luego relacionarlo con su eficiencia cuántica.

Finalmente, en la detección de la radiación en el panel solar se utilizó desde 0.95[A] hasta 3.02[A] con 22[V] a 23.65[V] para poder analizar el comportamiento del panel solar (como se va calentando).

1.9. Temario

Primero se muestran los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo de esta Memoria de Título, lo cual incluye el efecto fotoeléctrico, en que se basa el método de electroluminiscencia, cómo funcionan las cámaras NIR, entre otros.

Posteriormente se muestra la implementación del set-up utilizado y sus componentes.

Finalmente se mencionarán las conclusiones y el trabajo futuro que se podría realizar para mejorar el funcionamiento de la implementación actual.

2. Fundamentos y Teoría relacionada

2.1. Introducción

En este apartado se expone información sobre los fenómenos físicos que se producen cuando sobre una celda solar o una oblea de silicio se proyecta un haz de luz como es el efecto fotoeléctrico. Procesos que intervienen en la caracterización de las células fotovoltaicas. Además, se exponen algunos conceptos fundamentales de la teoría de semiconductores que afectan a las células solares y a las obleas de silicio.

2.2. Conceptos elementales de la teoría de semiconductores

El silicio es un material semiconductor, por lo que se comporta como un conductor o como un aislante dependiendo de diversos factores, como por ejemplo al campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que le incide, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre. En el caso de la radiación incidente la energía de los fotones incidentes sobre el semiconductor es absorbida por los electrones de valencia, que pueden romper el enlace como sus átomos y quedar libres para desplazarse en el seno del material. La densidad de electrones libres creados por la absorción de la luz incidente representa una población en exceso respecto a la concentración existente en equilibrio térmico, siendo ésta última estable y característica a una temperatura dada.

La ausencia de un electrón en el enlace atómico se denomina hueco, y su comportamiento se asimila al de una partícula de carga positiva, que puede desplazarse de un átomo a otro en el seno de la red cristalina. Las propiedades de contribución de ambos tipos de material semiconductor deben entenderse como debidas a la contribución de ambos tipos de cargas (electrones y huecos), aspecto que los diferencia respecto al comportamiento de materiales conductores y aislantes. A electrones y huecos se les engloba normalmente con la denominación más genérica de portadores de carga. Es importante observar que la concentración de electrones y de huecos en un material puro o intrínseco será la misma, puesto que ambos tipos de portadores se crean simultáneamente, en el mismo instante.

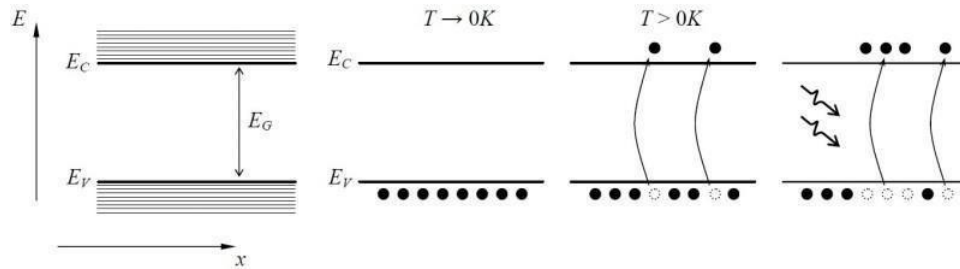


Figura 2.1: Procesos de absorción, creación de electrones y huecos [2]

En este modelo, los niveles de energía permitidos para los electrones más alejados del núcleo atómico (electrones de valencia) de los átomos que conforman una red cristalina se agrupan en dos rangos o bandas de energía. El rango o banda inferior de estados permitidos se denomina banda de valencia y representa el conjunto de valores energéticos posibles para electrones de valencia que aún permanecen ligados a los átomos de la red. La banda superior se denomina banda de conducción y engloba los valores de energía posibles para electrones que han roto su enlace y pueden moverse libremente en el seno del material. Ambas bandas aparecen separadas entre sí por un intervalo que representa la cantidad de energía necesaria para que un electrón de valencia pueda romper el enlace. Este salto energético se llama banda prohibida o gap de energía, E_G y su anchura es característica de cada material semiconductor (ejemplo: $E_G = 1,12$ eV para el Si, $0,66$ eV para el Ge; $1,42$ eV para el GaAs).

2.3. Efecto Fotoeléctrico

Fue descubierto en 1887 por Heinrich Hertz al observar que el arco eléctrico que se crea entre dos electrodos conectados a la alta tensión alcanza distancias mayores cuando se ilumina con luz ultravioleta que en la oscuridad. Posteriormente Albert Einstein en 1905 dio una explicación teóricamente a este proceso, por la cual fue condecorado en 1921 con el premio Nobel de física en 1923.

El efecto fotoeléctrico se define como la emisión de electrones de un material resultado de la interacción de una radiación electromagnética, como la luz del sol, con dicho material. Una radiación electromagnética se puede definir como una composición de partículas denominadas fotones, los cuales se caracterizan por tener forma de onda, por lo que se definen mediante su longitud de onda, λ , que determinara la cantidad de energía que transporta el fotón, E_f . La longitud de onda y la energía del fotón se relacionan de la siguiente manera:

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

Donde h es la constante de Planck y c es la velocidad de la luz en el vacío. Solamente los fotones cuya energía sea superior a la de la banda prohibida serán capaces de formar un par electrón-hueco.

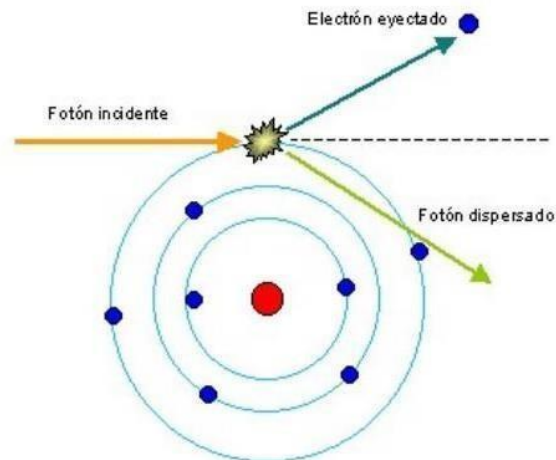


Figura 2.2: Efecto fotoeléctrico [3]

Los semiconductores a diferencia de los metales muestran una mayor absorción de luz para determinadas longitudes de onda por encima de la banda prohibida. Esta luz es absorbida casi por completo dependiendo del grosor del material. La banda prohibida nos dará para cada material un valor de longitud de onda para el cual el material se comportaría como un material transparente. Estas longitudes de onda, a temperatura ambiente, son, por ejemplo: para el Silicio $\lambda = 1.11\mu m$.

El proceso de creación de pares electrón-hueco mediante la absorción de energía de los fotones es básico en el funcionamiento de las células solares fotovoltaicas. La excitación de un electrón directamente desde la banda de valencia, en la que se encuentra el hueco a la banda de conducción se denomina absorción fundamental.

2.4. Luminiscencia

Es el fenómeno de emisión de luz por sólidos o moléculas los cuales se encuentran excitados por una fuente externa, dicha excitación eleva a los electrones a estados de excitación

los cuales al volver a su estado de equilibrio emiten luz.

En lo que a los semiconductores respecta, el efecto de luminiscencia se produce por la recombinación radiactiva de pares electrón-hueco. Existen dos tipos de espectros de luminiscencia.

Emisión intrínseca o fundamental y emisión extrínseca o característica. La emisión intrínseca aparece como una banda de energías de distribución casi normal a temperatura ambiente, con el foco de intensidad para la energía de banda prohibida $h\nu = E_g$, esto es debido a la recombinación de electrones de la banda de conducción y de huecos en la banda de valencia, siendo por tanto una propiedad intrínseca del material. La emisión extrínseca depende de las impurezas, por ende, no son intrínsecos a la naturaleza del semiconductor. Estas bandas de emisión se activan por átomos de impurezas y otros defectos, la emisión será característica de la propia impureza.

Dependiendo del tipo de excitación, existen varias formas de luminiscencia, como son: fotoluminiscencia, electroluminiscencia, termoluminiscencia, quimioluminiscencia y la electroluminiscencia:

- ✓ Fotoluminiscencia: La Fotoluminiscencia es un tipo de luminiscencia en la que el agente excitador de los pares electrón-hueco es un fotón con energía suficiente para vencer la energía de banda prohibida y así elevar un electrón a un estado de excitación mayor. Una vez en ese estado de excitación mayor se produce la recombinación radiactiva de un par electrón-hueco y se emite un fotón. Ese fotónes lo que denominamos fotoluminiscencia.
- ✓ Electroluminiscencia: Es un tipo de luminiscencia en la que la excitación necesaria para elevar un electrón desde la banda de valencia a la banda de conducción se efectúa inyectando portadores mediante una corriente eléctrica. Cuando el par electrón-hueco se recombina de forma radiactiva emite luminiscencia, la cual se denominará electroluminiscencia.

2.5. Estructura de una celda solar fotovoltaica:

La estructura simplificada de una celda fotovoltaica se muestra en la figura 2.3 y en ella se puede ver los principales elementos o secciones que la conforman.

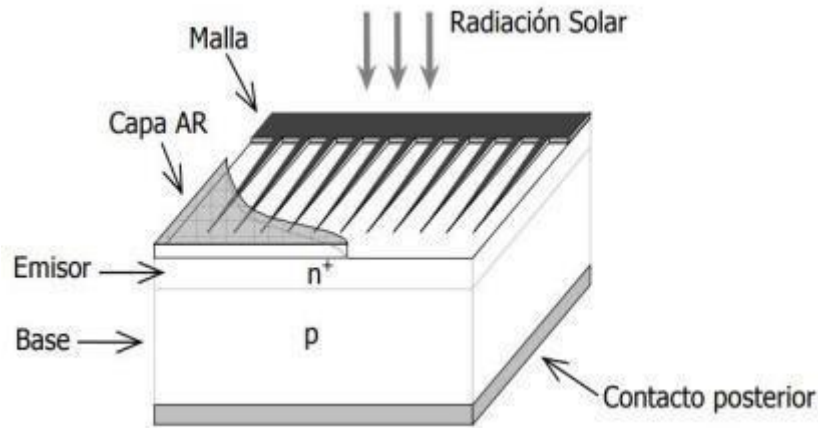


Figura 2.3: Estructura de Celdas Fotovoltaicas [4]

- ✓ Una capa anti reflexiva (capa AR), diseñada para reducir al máximo las pérdidas por reflexión superficial.
- ✓ Una malla de metalización, que debe garantizar una colección adecuada de los electrones del dispositivo, sin introducir una resistencia eléctrica elevada, pero al mismo tiempo debe dejar pasar la mayor cantidad de luz posible al interior del dispositivo.
- ✓ Las capas activas de material semiconductor, es decir, las dos regiones que forman la unión p-n (denominadas emisor y base). Además del tipo y la calidad del semiconductor empleado, el espesor de las capas y la concentración de impurezas en el rendimiento de la célula.
- ✓ El contacto metálico posterior, que se suele realizar metalizando toda la superficie, cuando la célula no recibe luz por su parte posterior.

2.6. Componentes de los set-ups ópticos

A continuación, se presentan las características más importantes de los componentes utilizados en la implementación de los set-ups ópticos.

2.6.1. Cámara Acuros CQD 1920 GigE

La cámara utilizada para esta implementación es la cámara monocromática de Acuros CQD de SWIR Vision Systems, corresponde a una cámara monocromática capaz de digitalizar su salida con 8, 10, 12 o 14 bits, es decir existen de 2^8 a 2^{14} niveles de intensidad para representar un píxel, además el tamaño de su sensor es de 1920x1080 pixeles.



Figura 2.4: Acuros CQD 1920 GigE [5]

La cámara está construida con sensores patentados Coloidal Quantum Dot (CQD) de SWIR Vision Systems, los cuales tienen el potencial de lograr imágenes SWIR, mientras que los sensores de imágenes CMOS han logrado imágenes infrarrojas de onda larga (LWIR). Estos sensores logran una mejor resolución, ya que no tienen tantas limitaciones en el tamaño de píxel y espacio entre píxeles necesarios en su fabricación [19-20].

Con este tipo de sensores es capaz de ofrecer imágenes en el rango VIS-SWIR, con longitudes de onda que están dentro del rango $0.4\text{-}1.7\ \mu\text{m}$, cuya eficiencia cuántica se muestra en la figura 2.5

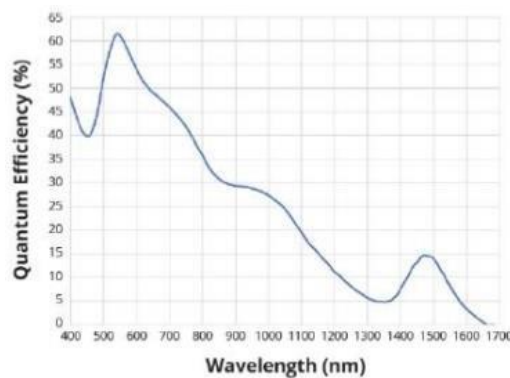


Figura 2.5: Respuesta espectral de los sensores

Es importante notar de aquí que la eficiencia cuántica de los sensores CQD, es menor en algunos rangos que la de los sensores CMOS, por ejemplo, la eficiencia cuántica a 940nm en los sensores CMOS está en el rango del 40% mientras que para sensores CQD esta alrededor del 30%, pero los sensores CMOS tienen un costo comercial asociado que es mucho mayor.

2.6.2. *Lente*

El lente utilizado para la cámara Acuros CQD corresponde a un lente de distancia focal fija de 25mm, capaz de transmitir en el rango VIS-SWIR, es decir, 400 a 2000nm. Es importante tener en cuenta la transmitancia del lente, ya que permite obtener resultados más precisos.

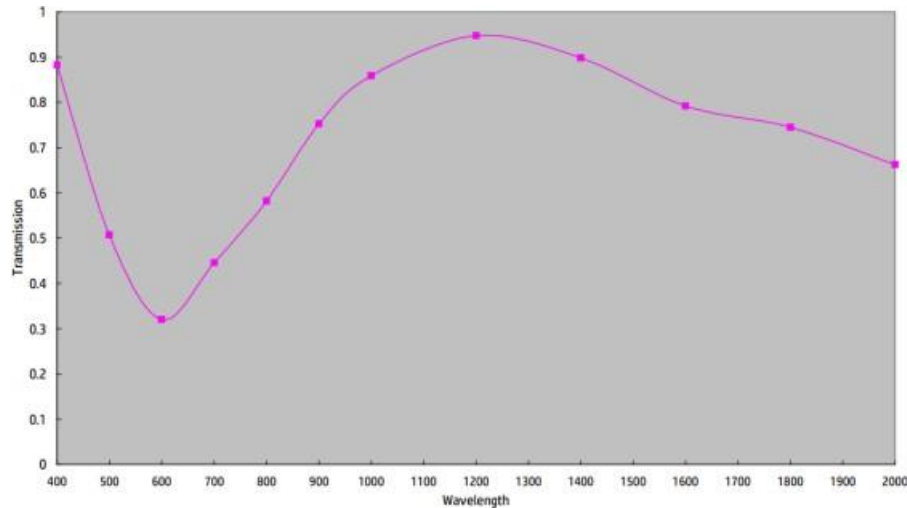


Figura 2.6: Transmitancia del lente [6]

2.6.3. *Panel Solar*

Son dispositivos diseñados para transformar la luz en electricidad. Sin embargo, en esta Memoria de Título se utilizarán de forma inversa, como lo haría un LED, al inyectarle portadores en forma de corriente, este emite en el NIR, por medio del método de electroluminiscencia (EL). Finalmente se logran ver los defectos de las celdas.



Figura 2.7: Panel Solar Policristalino

2.6.4. *Especto Fotómetro NIR-512*

Mide la absorción de luz, de la muestra de la región NIR a diferentes longitudes de onda e indicará la banda en la cual el Panel Solar emite radiación.



Figura 2.8: Espectro Fotómetro NIR-512

2.6.5. Lente Colimador

El lente Colimador, guiará los rayos de luz para que se proyecten de forma paralela, homogenizando dichos rayos.



Figura 2.9: Lente Colimador

2.6.6. Fibra óptica VIS-NIR



Figura 2.10: Fibra óptica VIS-NIR

2.6.7. Fuente de poder DC POWER SUPPLY HY 3003D-Y

La Fuente de Poder DC POWER SUPPLY HY 3003D-Y es quién alimentará al Panel Solar.



Figura 2.11: Fuente de poder DC POWER SUPPLY HY 3003D-Y

2.6.8. Computador con el software Ocean SpectraSuite



Figura 2.12: Software utilizado para medir la banda del Panel Solar

Donde se entrega la información requerida.

2.6.9. Láser Verde

Transmite la potencia óptica.



Figura 2.13: Láser Verde

2.6.10. Cámara Gobi

Permite ver la diferencia de calor que hay en cada celda.



Figura 2.14: Cámara Gobi

2.6.11. Software Xenics

Donde se entrega la información requerida.



Figura 2.15: Software Xenics

2.7. Método de corrección por 2 puntos

La falta de uniformidad comúnmente existe en el plano focal infrarrojo, que se comporta como el ruido de patrón fijo (FPN) y afecta seriamente la calidad de imagen de los sistemas de detección del infrarrojo. El método de corrección de dos puntos (TPC) se usa comúnmente para reducir la imagen FPN en ingeniería y debido a esto se implementará.

1. El método consiste en encontrar la ganancia y offset (dark noise), del i -th píxel, de la k -th líneaescaneada
2. Para el offset $B_i(k)$, se adquiere una imagen tapando la entrada de luz (cerrando el obturador del lente)
3. Para la ganancia $A_i(k)$, se almacena la respuesta $Y''(k)$ frente a 2 entradas conocidas $X_i''(k)$ (medidas a intensidades distintas), por lo que la ganancia sería:

$$A_i(k) = \frac{Y_i'(k) - Y_j'(k)}{X_i'(k) - X_j'(k)} \quad (2)$$

$$Y_i(k) = A_i(k)X_i(k) + B_i(k) \quad (3)$$

3. Implementación del Set-up Óptico

3.1. Set-ups ópticos

Fueron utilizados 4 diferentes tipos de Set-up, los cuales fueron:

- Identificación del rango del espectro del Panel Solar
- Detección de la emisión del Panel Solar con cámara VIS-NIR
- Detección de radiación en Panel Solar con cámara IR
- Detección de voltaje de salida al iluminar cada Celda Solar con lámpara Vástago

3.1.1 Identificación del Rango del Espectro del Panel Solar

El sistema utilizado se muestra en la figura 3.1, y consta un espectro fotómetro NIR-512, un computador con el software Ocean Optics, lente colimador, fibra óptica VIS-NIR, fuente de poder DC POWER SUPPLY HY 3003D-Y y un Panel Solar, el propósito de este set-up es poder identificar en que rango espectral en el cual emite el Panel Solar.

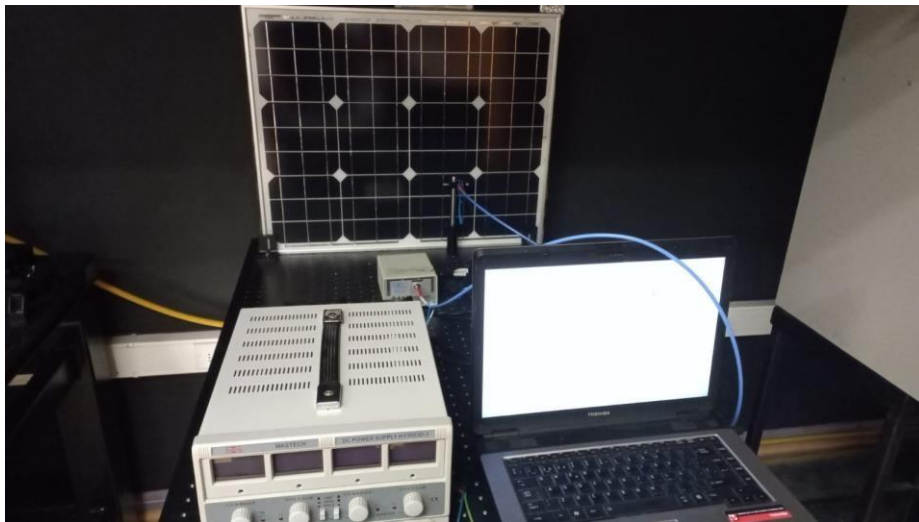


Figura 3.1: Set-up Identificación del rango espectral del Panel Solar

3.1.2 Detección de la emisión del Panel Solar con cámara VIS-NIR

El sistema utilizado para esta implementación se puede observar en la figura 3.1, y consta de un Panel Solar, cámara monocromática VIS-NIR Acuros CQD, fuente de poder DC POWER SUPPLY HY 3003D-Y y un computador con el software SWIR Vision Systems, lo que se pretende lograr con dicha implementación es poder identificar las celdas solares en mal estado de un panel fotovoltaico, por medio del método de electroluminiscencia, por lo cual se le inyectan portadores por medio de una corriente, para que así el electrón pase de la capa de valencia a la capa de conducción y al momento de la recombinación del par electrón-hueco, se genera este tipo de luminiscencia.

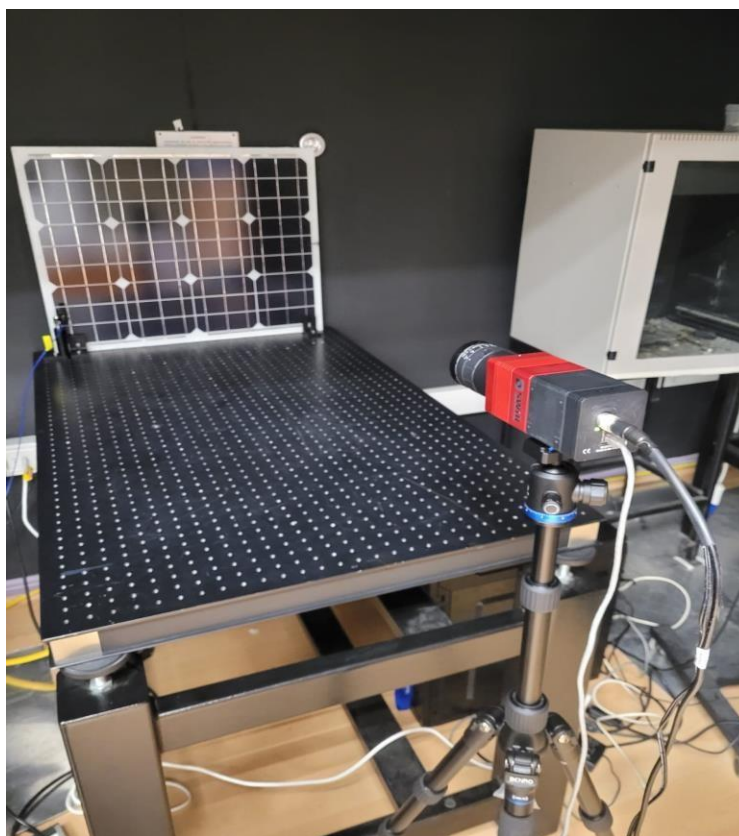


Figura 3.2: Detección del Panel Solar con cámara VIS-NIR

3.1.3 Detección de radiación en Panel Solar con cámara IR

Para este experimento se utilizó la cámara Gobi, la cual es una cámara térmica. Se basa en un detector micro bolómetro no refrigerado con una resolución de 640x480 píxeles, esta cámara está diseñada para un uso en Investigación científica y avanzada, médico y monitoreo de procesos. Dentro de sus ventajas se encuentran el tamaño compacto, la fácil conectividad a través de múltiples interfaces, velocidades de fotogramas de hasta 60Hz, opciones de detector inferior NETD y calibraciones de temperatura para aplicaciones termográficas.

Lo que se pretende distinguir en estos resultados es como se calienta el Panel Solar, según las diferentes corrientes y voltajes utilizados.



Figura 3.3: Detección de radiación en Panel Solar con cámara IR

3.1.4 Detección de voltaje de salida al iluminar cada Celda Solar con láser verde

El propósito de este set-up óptico consiste en medir el voltaje de salida de cada celda solar, iluminada por un láser verde, en el cual se utilizó un osciloscopio para poder medir la salida de voltaje. Cabe mencionar, que el láser fue utilizado para transmitir la potencia óptica.



Figura 3.4: Detección de voltaje de salida al iluminar cada celda con láser verde

3.2. Análisis de resultados

3.2.1 Identificación del rango del Espectro del Panel Solar

El resultado obtenido debido a la emisión del Panel Solar es ilustrado en la figura 3.5 y se puede ver como alrededor de los 1100nm hay una respuesta espectral de dicho Panel Solar, aproximadamente en los 1147.5nm, esto fue por medio del método de electroluminiscencia en el cual se le inyectaron portadores al panel por medio de una corriente eléctrica, provocando que esté emita como un LED y esto se analizó con un espectrofotómetro NIR-512 con el cual se logró identificar el rango espectral.

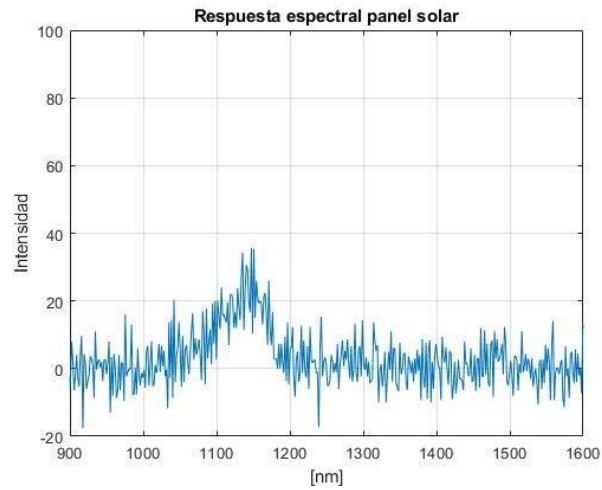


Figura 3.5: Respuesta espectral del Panel Solar, se evidencia la emisión en 1147.45nm

3.2.2 Detección de la emisión del Panel Solar con cámara VIS-NIR

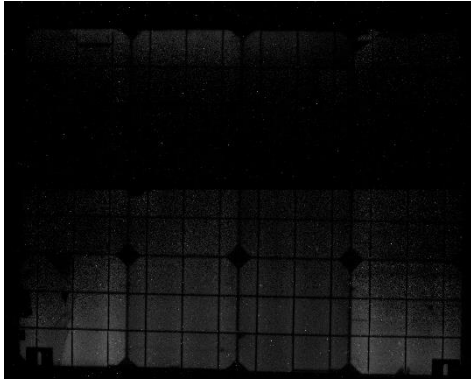


Figura 3.6: Panel Solar a 1.5[A] y 22.7[V]

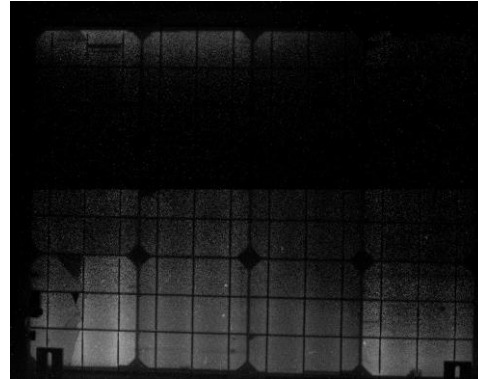


Figura 3.7: Panel Solar a 2[A] y 22.7[V]



Figura 3.8: Panel Solar a 0.94[A] y 22[V]

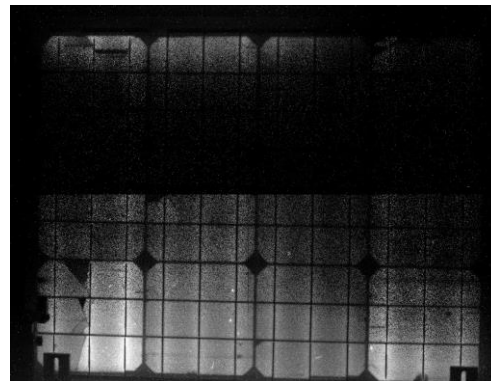


Figura 3.9: Panel Solar a 3[A] y 23[V]

3.2.3 Detección de radiación en Panel Solar con cámara IR

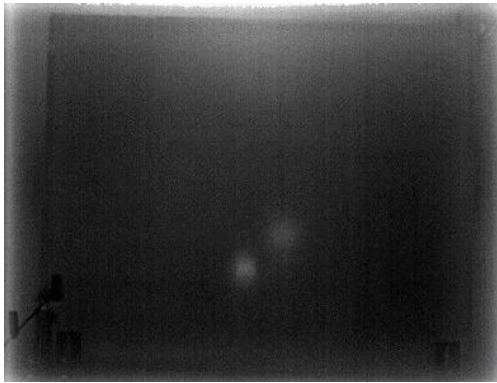


Figura 3.10: Panel Solar a 0[A] y 0[V]

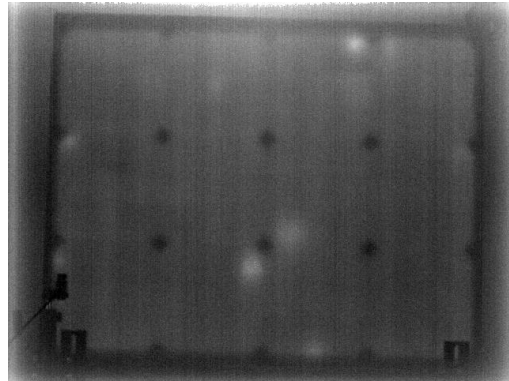


Figura 3.11: Panel Solar a 0.95[A] y 22[V]

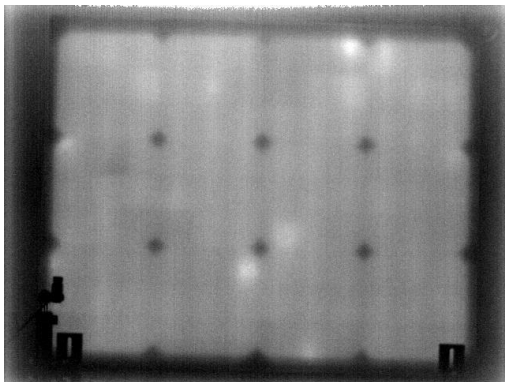


Figura 3.12: Panel Solar a 1.53[A] y 22.75[V]

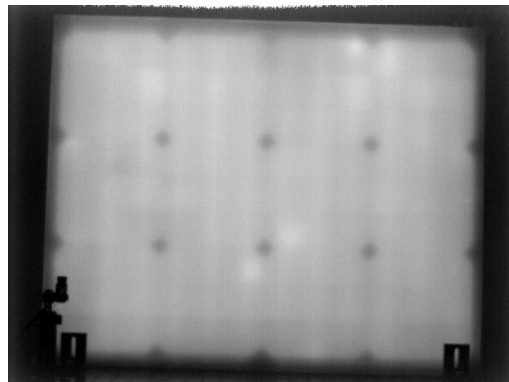


Figura 3.13: Panel Solar a 2.01[A] y 22.7[V]

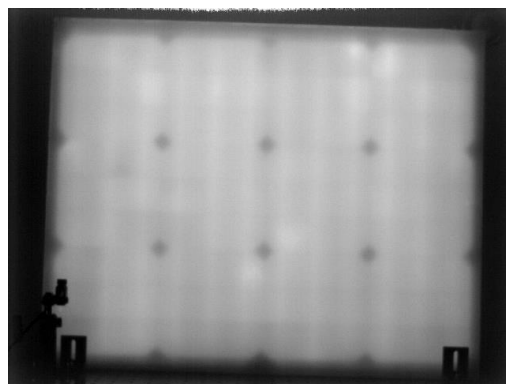


Figura 3.14: Panel Solar a 3.02[A] y 23.65[V]

4. Generación del NUC Table de la cámara

Generación del NUC Table de la cámara ACUROS

Para poder generar el NUC Table (corrección de no uniformidad), se siguieron las indicaciones dadas por el manual de la cámara Acuros CQD, estas instrucciones consisten en:

Primero es necesario conectar la cámara y para aquello de debe abrir el software, ya instalado, SVSImagIR, posteriormente para la conexión se hace clic en “Connect Device” en la esquina superior izquierda, como se puede ver en la figura 4.1

The screenshot displays the SVSImagIR software interface, which is connected to an Acuros 1.2 HD camera. The interface is divided into several sections:

- Imaging Settings:** Includes options for Stop Video, Set FrameTime (65.53600 ms), FPS (12.177), Target FPS (15.259), Set ExposureTime (0.10000 ms), Set Width (640 pixels), Set Height (512 pixels), PixelFormat (Mono14), Mirror (Horizontal On / Vertical On), Binning (Horizontal Off / Vertical Off), TriggerMode (Internal), MasterClock (Low), Load Factory Defaults, and Save Settings.
- Software NUC:** Includes Create Dark Frame (Average: 10 frames), Create Flat Field (Average: 10 frames), Create Gain Matrix, and a checked box for 2PI NUC with a Normalization to 100.0 % of Flat Field max.
- Firmware NUC:** Includes NUCTable (0), NucEnable (OffSet Off / Gain Off), and BadPixelReplacement (Off).
- Export:** Includes options for Export Image CSV, Export n Images CSV (n: 10), Export Image PNG, Export n Images PNG (n: 10), Export Processed Image PNG, Export n Processed PNG (n: 10), and Export Video (Time: 30 sec).
- Contrast Enhancement:** Includes Auto (2.0, 98.0 %) and Manual (0, 16383 ADU) options, with a CE Range of 7744 - 7871.
- Histogram:** Shows a Frame Intensity Histogram with a peak at 7872. The x-axis is Pixel/Value (1696 to 16384) and the y-axis is # (26440 to 264404).
- TEC:** Shows Thermistor Temperature = 30.1 deg. C.
- SVS Internal:** Includes a table for FPGA 1 with Address and Write Value fields, a Command field (0x0000), Message Bytes (0x00, 0x00), and a Set Detector Com field (0.73487 V).
- TEC Controls:** Includes Set TEC Temperature (30 deg. C), Controller State (On), Read TEC Current (0.18 A), and Upload TEC uC Code.
- InputMux:** Set to (2) Sensor.
- Load ROIC Defaults:** Includes Upload ROIC Reg, Upload uC Code, Upload FPGA Code, Upload NUC Table, Upload NUC Dr., and PTC Collection (Threshold +/- 0.15 FPS).
- History:** Shows 20 Frames.

Figura 4.1: Parámetros a seleccionar en el Software SVSImagIR

Como siguiente paso, se inicia el vídeo, para lo cual se hace clic en “Star Video”, en el botón de la esquina superior derecha como se ve en la figura 4.1.

Para el control de imágenes y Software, se deben presionar los botones de los parámetros a modificar. Por otro lado, con respecto a la ruta de los datos de vídeo, se pueden ver en la figura 4.2, pues se muestra desde el sensor (circuito integrado de lectura o ROIC) a través de la salida de video digital de la FPGA

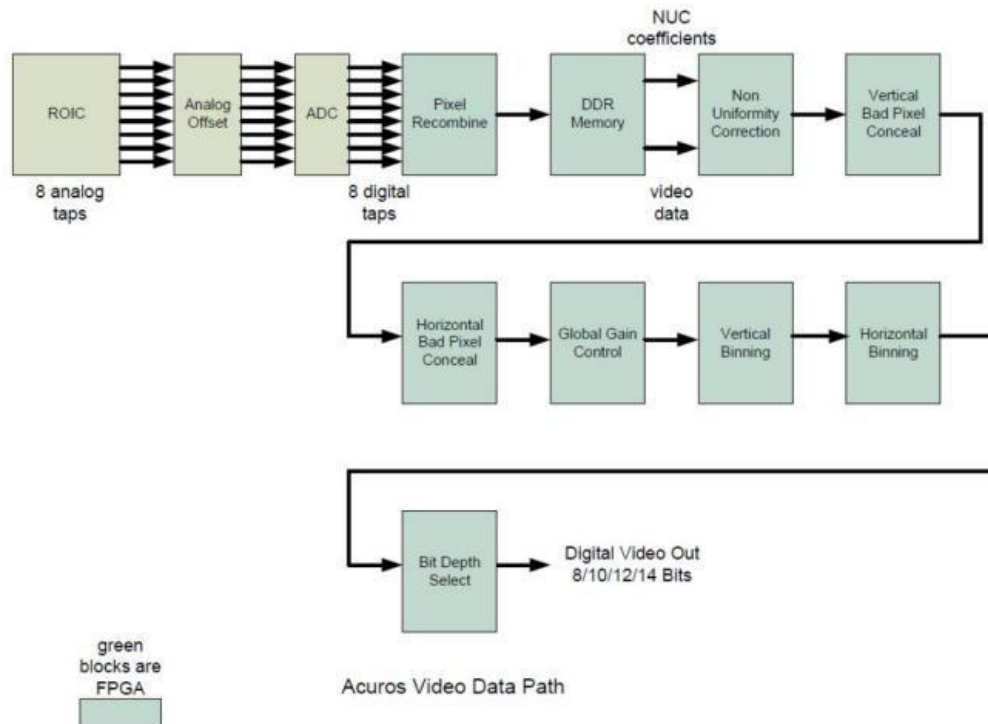


Figura 4.2: Ruta de datos de video de Acuros

Lo siguiente fue establecer el marco de tiempo, además de mencionar que el tiempo de fotograma no puede ser un valor menor al tiempo de exposición de la cámara.

Con respecto a los Frames per Seconds (FPS), este es el parámetro principal que determina el tiempo de cuadro, y otros factores incluyen la resolución de la cámara, el formato del píxel, la velocidad de reloj y la configuración de la ventana.

El tiempo de exposición o de integración se habilita cuando no hay tablas NUC de firmware en uso. Los valores típicos de este parámetro son entre 0,5 ms (aplicaciones de alta velocidad) y 15 ms (aplicaciones con poca luz). Este tiempo debe configurarse en un valor menor o igual al tiempo de cuadro y tiene un máximo de 4290ms. En este caso se utilizó un tiempo de integración 900ms.

La configuración de ventana permite al usuario seleccionar los píxeles leídos por el ROIC y está limitada por el formato de la cámara.

Para establecer el ancho son el total de píxeles leídos por el ROIC en el eje horizontal y para establecer el largo serían los píxeles totales leídos por el ROIC en el eje vertical

El formato de 7,6 píxeles establece la profundidad de bits de la salida de la cámara según sea necesaria para la velocidad de comunicación del usuario o para reducir la cantidad de datos de salida. Donde se utilizó MONO14, ya que es compatible con la versión actual del software.

La configuración de Mirror refleja en el eje x o y, y se modifica según la posición de montaje.

La agrupación forma una imagen de menor resolución al sumar los valores de conteo digital de los píxeles adyacentes y se usa solo después de que se haya habilitado una tabla NUC de firmware.

El MasterClock tiene 2 configuraciones, las cuales son alta y baja, y controla la frecuencia IC de lectura del sensor. Se utilizó Low (0).

De la ganancia se puede ajustar el condensador de integración en el amplificador de entrada de píxeles. Los modos de mayor ganancia aumentan la relación señal/ruido cuando el ruido está dominado por la electrónica de la cámara. Los modos de ganancia media y alta son más útiles en tiempos de integración más cortos y niveles de luz bajos. Se utilizó “Medium (1)”, pues los niveles de luz son bajos.

Para los archivos de configuración se tiene: Selecciona un percentil del rango de salida de la cámara para expandirse al rango de visualización completo. El rango de visualización de la cámara se puede seleccionar de forma manual o automática en este caso se asignó manual y se utilizó un valor de 0- 1600 ADU (Unidades analógico- digitales).

Otras funciones del software, como la exportación de imágenes en varios formatos

- Exportar imágenes CSV

- Exportar imágenes PNG

- Exportar videos

Del TEC, se puede mencionar que indica la temperatura del sensor de la cámara en su paquete. Los ajustes predeterminados de fabricación son estado del controlador “Encendido” y “Temperatura de 30°C”, al agregar el usuario entregado por el fabricante se cambió la temperatura del sensor por 11°C, para evitar que la cámara se sobrecaliente.

Un tema muy importante es la Corrección de no uniformidad (NUC), el software utiliza el método de puntos para compensar las faltas de uniformidad espacial de píxel a píxel en todo el sensor. Este método utiliza una imagen de cuadro oscuro y una imagen de cuadro claro, cada imagen consiste en un promedio de 10 cuadros, para calcular una compensación de ganancia para cada píxel. Estos valores se almacenan en la matriz de ganancia NUC del software o en las tablas NUC del firmware. Sobre las tablas NUC, estas pueden generarse en tiempo real en el software de la cámara o crearse externamente y almacenarse en el firmware.

Algunas de las consideraciones térmicas son el ruido térmico, pues puede ser una falta de uniformidad y depende de las condiciones ambientales y la configuración de la imagen. El sensor de luz y la electrónica integrada generan calor y pueden degradar el rendimiento óptimo. La cámara Acuros CQD utiliza una unidad de refrigeración termoeléctrica (TEC) en el paquete del sensor para la gestión térmica activa. La configuración predeterminada para el estado del control es 'On' y 30°C. Además, la carcasa de la cámara y las monturas de la lente se han diseñado para llevar el calor del sensor al entorno externo.

Para el proceso de Generación de Tablas NUC de software, se debe crear una Tabla NUC de 2 puntos de software para condiciones de imágenes distintas de las utilizadas por las tablas de firmware. Las Tablas NUC de software son exclusivas de la configuración de la cámara que se utiliza durante la creación de imágenes de cuadros oscuros y claros.

El equipo por utilizar para la creación de las Tablas NUC es:

- Cámara
- Trípode
- PC con software SVS ImagIR
- Fuente de luz
- Difusor de luz
- Superficie blanca y plana

Luego el procedimiento consiste en:

- Configuración deseada para "SetExposure", "SetWidth", "SetHeight", además del formato de píxeles y espejo.

- Anular la selección de “NUC de 2 puntos”
- Anular la selección de “Normalizar a”
- Apagar FW NUCS: Se estableció NucEnable en (0) Offset Off/Gain Off
- Anular la selección de Mejora de contraste automática y manual

Creación de los datos del cuadro oscuro:

- Cerrar la apertura de la lente y colocar la tapa (no debe llegar luz al sensor)
- Tener en cuenta la ubicación del pico del histograma: este ruido de fondo para la configuración actual de la cámara. Este valor se utiliza al recopilar el campo plano
- Hacer clic en “Create Dark Frame”
- Un cuadro de diálogo del Explorador de Windows solicitará al usuario un nombre de archivo y una ubicación.

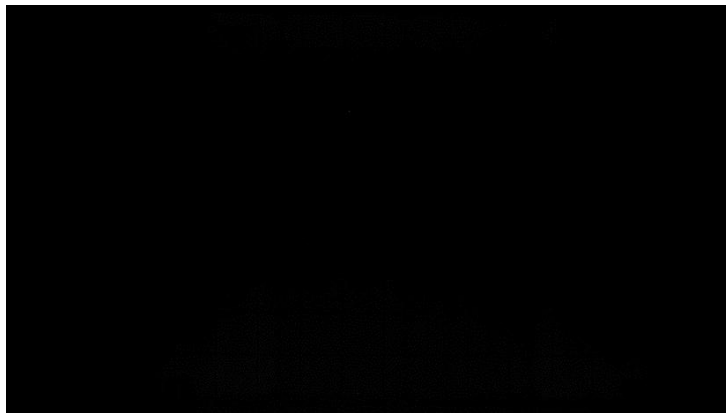


Figura 4.3: Dark Frame

Creación de datos de campo plano:

- Se debe apuntar a la cámara a una escena plana uniformemente iluminada
- Retirar la tapa de la lente y abrir parcialmente la apertura de la lente
- Cubrir la lente con el vidrio esmerilado
- Ajustar la intensidad de la luz y la apertura de la lente para que todos los píxeles estén por encima del ruido de fondo y por debajo de la saturación (por debajo del valor de píxel de 15K, normalmente centrado alrededor del valor de 8500 píxeles).
- Hacer clic en “Create flat field”

Un cuadro de diálogo del Explorador de Windows solicitará al usuario un nombre y una ubicación

Creación de la Tabla de Ganancias:

- Hacer clic en “Create Gain Matrix”
- Seguir las instrucciones y seleccionar el archivo de datos del campo oscuro
- Seguir las instrucciones y seleccionar el archivo de datos de campo plano

Habilitación de NUC: Una vez que se crea la matriz de ganancia, se puede activar el software marcando “2Pt NUC”

mediana

6098.1	8836.5	10186.9	6478.9	6012.2	7393.1	10067.8	4936.8	8291.7	7850.1
11216.3	7970.5	5788.1	7662.7	7013.3	7290.4	8799.9	7530	7661	8408.1
7299	6766	5932.6	5537.5	7937.2	6317.8	6945	10601.3	8498.8	5540.9
7299	6766	6608.3	3248	8574.4	10397.1	7953.6	4807.6	6771.3	7398.1
6903.2	6987.2	6675.9	8209.4	5631.4	11148.3	5547.1	6297.3	7351.9	5160.9
6903.2	6987.2	9136	3841.2	6645.4	5141.7	8799.6	8121.3	6549.5	9230.1
6903.2	6987.2	4897.9	9238.6	3928.7	6721.7	6910.1	7642.8	9857.6	9047.6
6903.2	6987.2	7600.3	6794.7	6273.2	5660.4	7095.5	8948	6957.4	4538.3
5016.9	7156.5	4665.6	6927.3	6302.5	7293	6877.9	8767.5	8041.5	6863.4
3341.3	6530.6	6519.3	6520.7	5597.6	7257.3	9649.9	8179.2	9707.7	3554.7
6237.9	4884.4	6544.2	6820.2	6792.6	8607.2	8973.2	8553.2	7390	2311.4
7502.4	4519.6	11707.6	6946.2	7702.5	8658	6828.7	6554.2	6205.5	6046.6
7561.8	4804.2	8027.2	5030	6168.7	5911.5	8185.9	5993.6	7020.8	8040.5
7034.5	8200	8065.5	4966	4638.8	7435.2	6349.1	6716.6	6339.5	5118.1
7019.7	6456.6	4948.2	5250.8	5442.1	6869.4	4577.7	5118.5	12287.2	6472
9069.8	4641	6195.5	13343.3	7903.9	8924.9	4488.7	9902.4	5627.2	9401.1
9069.8	6524.8	5637.4	4531.8	5201.7	8432.6	8296.7	5911.8	6662.3	10796.3
9069.8	5803.2	6208.4	6782.5	6336.9	5443.9	7069.8	8150.7	8350.6	8828.3
9069.8	7736	6538.4	5369.6	6078.8	6281.6	6084.8	5842.5	8531.7	6651
5010.5	7736	5986.3	5414.6	3780.4	8715.1	4711.1	5940.3	6810.8	6133
7448.8	7736	7501	4761.9	13858.2	7985.3	5699.3	6408.2	5300.7	8461
5157.9	7736	5857.5	7345	4426.5	3382.4	8948.7	6808.9	5390.2	7874.5
6426.8	5548.3	5160.1	7082.1	7667.5	4504.3	5501.4	6912.1	4330.5	3120.9
7782.5	7806	5707	8299.9	6378.5	8046.9	4404	7453.7	6709.6	8826.8
13976.1	4509.9	7709.7	6857.8	7357.4	6352.4	8581.1	11840.4	8231.1	7831.7
13976.1	4509.9	6729.8	4763.4	10259.1	5626.5	7682.1	9485.1	8236	8711.7
5032	3373.6	5716	8024.1	6372.3	6659.3	7511.7	6167.2	9339.9	7540.5
5032	6340.3	5456	6605	6407.5	5120.6	5006.5	8217.6	8162.8	6031.6
5032	6467.7	7346.6	4539.2	5464.1	5800.6	7316.5	6088.7	7642.4	4377.4
5032	8602.1	6579.2	6374.3	5804.5	5262	3225.3	4736.9	5787.8	7601.2
4679.4	8602.1	7642.8	6399	5256.3	4531.2	6705.8	6965.1	7280.4	6433.2
5970.6	3115.3	5307.5	4861.7	5027.7	5742.8	7574.1	6669.1	5691.6	7615.1
4217.4	7334.3	4900.8	7551.4	5401.8	7752.4	7845.4	5628.5	4205.5	7977.6
6642.2	7888.3	6967.6	6570.1	5981.7	8602.3	5636.7	7438.7	7729.9	6541.5
3076.1	4050.6	7106.1	5023.1	9087.3	3067.1	7895.7	7262.8	4582.9	8687.6
3353	7443.2	4399.7	2245	5107	9580	6133.1	7121.3	8094	5597.7
6646.4	7982.8	5967	7050.9	4952.3	1692.8	13424.9	6051.1	6749.2	7263.8
4840.3	6175.9	5931	5076.6	5920.5	5012	8964.5	7452.4	8871.7	7543.2
5792.8	8432.4	5883.9	7132.3	5090.1	6192.2	6727.5	6877.8	6167.3	7342
4527.6	10132.3	6960.4	9915.2	10894.1	6414.8	5399.4	6778.4	7767.1	6650.1
6039.9	9798.3	4075.3	6796.5	7545.4	4601.5	8922.5	6791.2	10072.7	3317.6
5681.2	6139.4	6093.7	5438.3	6578.3	8438.3	6260	9018.2	4089.2	4881.3
6356	5719.9	8022.8	9393.7	7861.1	7070.8	8394.8	6287.7	6955.8	3692.7
4572.4	4756.5	6755.7	3721.5	6984.3	7801.6	4328.8	2793.1	7875.4	7218.8
5783.7	6147	4984.9	10470.2	6373.6	6005.8	5443.9	7326	7120.7	6072
2453.5	4771.7	5750.7	6060.9	3793.2	5672.7	828.6	5052.4	4965.9	5599.3
5136.8	5331.4	8692.3	5101.7	6112.4	5571.3	5085.1	4917.7	9599	4371.3
6166.4	7558.3	1886.6	7524.7	5921.3	7189.9	5825.6	3100.7	6241.2	2824.7
7681.7	6805.8	9763.7	7986.5	5349.6	5186.1	4676.8	6713.3	14468.9	6796.6
3801.8	4954.6	5881.5	6007.6	7000	6662	3367.1	6121.6	4935.1	4193.5
6302.3	6696.2	3667.2	6998.2	8134.6	6724.2	4115.7	4980.5	6042.5	10755.2
4405.8	2845.3	7484.4	6910.8	7161.9	6203.3	9838.8	4397.1	6220.5	4845.3
7364.3	2900.8	8049.1	6870.2	4612.8	7017.3	6788.2	5359.9	6545.1	6315.6

Figura 4.4: Flat Field en CSV, la información se traduce a un cuerpo oscuro a 950ms y 400°C

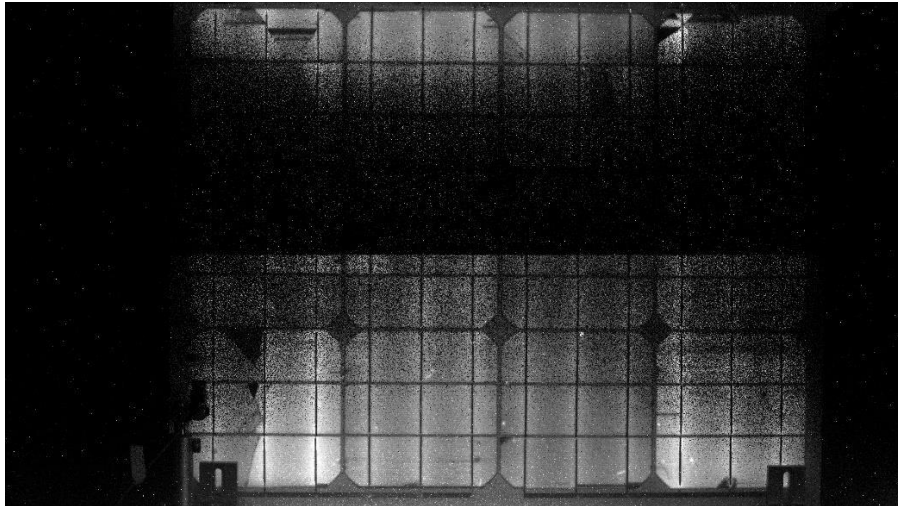


Figura 4.5: Fotografía tomada con método de corrección de 2 puntos

5. Estimación de la Eficiencia cuántica

Para el cálculo de la estimación de la eficiencia cuántica del panel fotovoltaico, se utilizará la ecuación(4), que está en función de la potencia transmitida, largo del panel y ancho.

$$Eficiencia\ cuantica = \frac{Potencia\ Optica}{Voltaje\ de\ salida} \quad (4)$$

Este experimento fue llevado a cabo por medio de un set-up óptico implementado en un cuarto oscuro para no que no haya ningún tipo de luz que pueda interferir en los resultados.



Figura 5.1: Set-up óptico para medición de voltaje de salida de cada celda

El fin de dicho experimento es el cálculo de la eficiencia cuántica, esto se llevó a cabo de la siguiente forma:

Primero con un láser verde se ilumina de forma directa cada celda del panel, transmitiendo potencia óptica. La cual se calculó posteriormente con ayuda del espectrofotómetro HR-4000, calculando el área bajo la curva del espectro.

Al transmitir potencia, en el osciloscopio fue entregado el voltaje de salida de cada celda, valor que será útil para obtener la eficiencia cuántica de cada celda.

En la figura 5.2, se muestra el voltaje de salida que entregaba el osciloscopio al iluminar de formadirecta cada celda

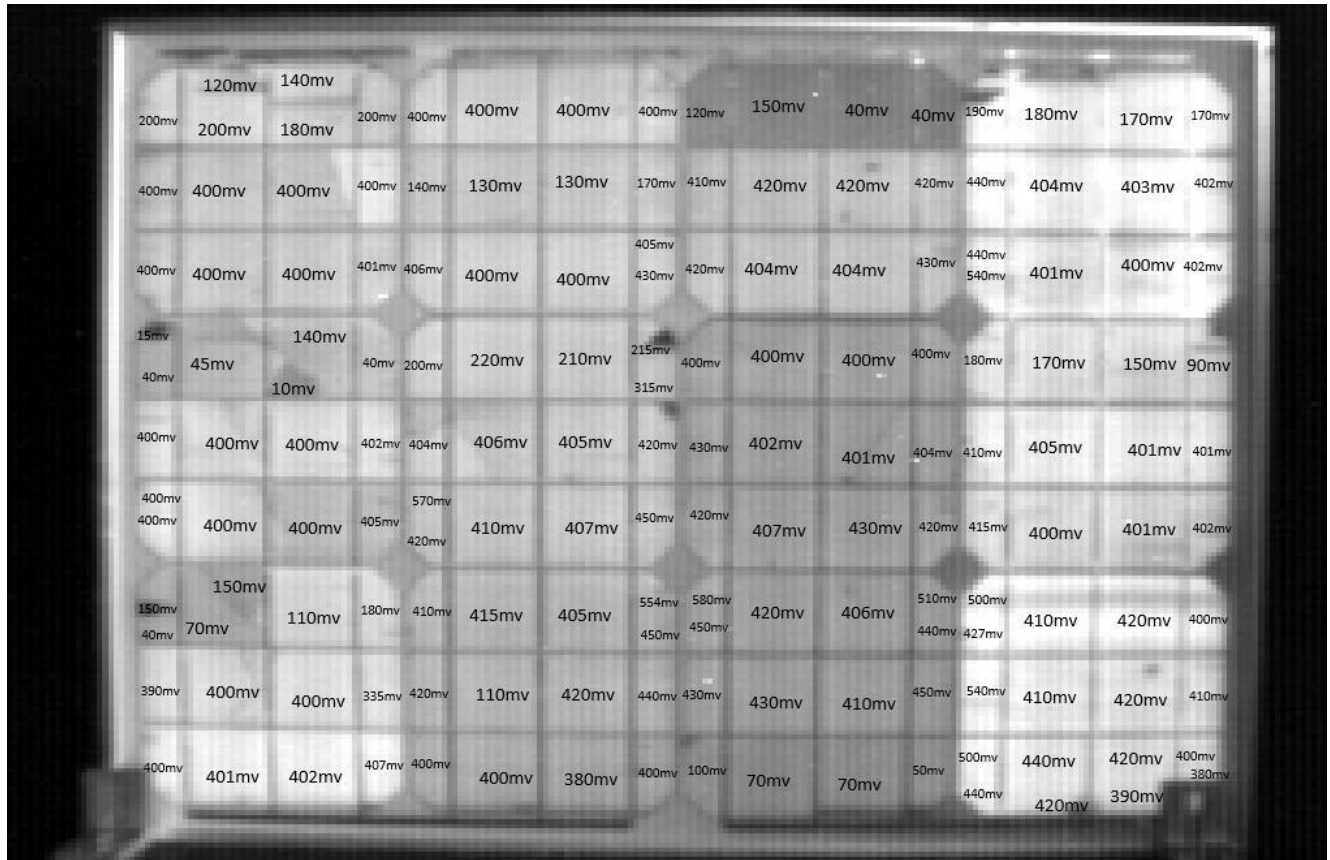


Figura 5.2: Panel Fotovoltaico con sus correspondientes voltajes de salida de cada celda

En la figura 5.3 se muestra la gráfica de potencia óptica y el área bajo esta curva da el valor de 1305235,254[uW] para el posterior cálculo de la eficiencia cuántica.

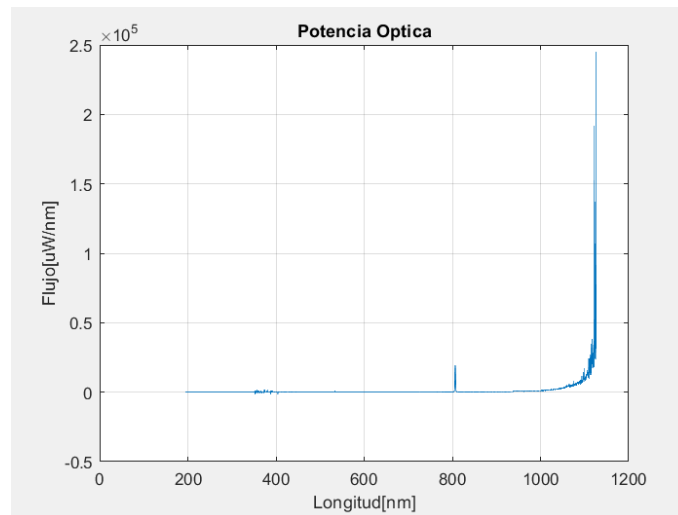


Figura 5.3: Grafica de Flujo vs Longitud de onda

Al calcular el área bajo la curva del láser calibrado, se obtuvo la potencia óptica, con la cual es posible calcular la eficiencia cuántica de cada celda solar, este cálculo fue generado en Excel en el mismo orden de las celdas del panel fotovoltaico, para relacionar las imágenes y los resultados de **frm** más sencilla.

Tabla 1: Valores de eficiencia cuántica en [uW/mV]

6,5262,E+03	1,0877,E+04	9,3231,E+03	6,5262,E+03	3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,2631,E+03	1,0877,E+04	8,7016,E+03	3,2631,E+04	3,2631,E+04	6,8697,E+03	7,2513,E+03	7,6779,E+03	7,6779,E+03
3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,2631,E+03	9,3231,E+03	1,0040,E+04	1,0040,E+04	7,6779,E+03	3,1835,E+03	3,1077,E+03	3,1077,E+03	2,9664,E+03	2,9664,E+03	3,2308,E+03	3,2388,E+03	3,2469,E+03
3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,2550,E+03	3,2149,E+03	3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,2228,E+03	3,1077,E+03	3,2308,E+03	3,2308,E+03	3,0354,E+03	2,9664,E+03	3,2550,E+03	3,2631,E+03	3,2469,E+03
8,7016,E+04	2,9005,E+04	9,3231,E+03	3,2631,E+04	6,5262,E+03	5,9329,E+03	6,2154,E+03	6,0709,E+03	3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,2631,E+03	7,2513,E+03	7,6779,E+03	8,7016,E+03	1,4503,E+04
3,2631,E+04	1,3052,E+05	3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,2149,E+03	3,2228,E+03	4,1436,E+03	3,1077,E+03	3,0354,E+03	3,2469,E+03	3,2550,E+03	3,2308,E+03	3,1835,E+03	3,2228,E+03	3,2550,E+03
3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,2469,E+03	3,2308,E+03	3,2149,E+03	3,2228,E+03	3,1077,E+03	3,1077,E+03	3,0354,E+03	3,2469,E+03	3,2550,E+03	3,1835,E+03	3,2228,E+03	3,2550,E+03	3,2550,E+03
3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,2228,E+03	3,1077,E+03	3,1835,E+03	3,2070,E+03	2,9005,E+03	3,1077,E+03	3,2070,E+03	3,0354,E+03	3,1077,E+03	3,1451,E+03	3,2631,E+03	3,2550,E+03	3,2469,E+03
8,7016,E+03	8,7016,E+03	8,7016,E+03	8,7016,E+03	8,7016,E+03	8,7016,E+03	8,7016,E+03	8,7016,E+03	8,7016,E+03	8,7016,E+03	8,7016,E+03	8,7016,E+03	8,7016,E+03	8,7016,E+03	8,7016,E+03	8,7016,E+03
3,2631,E+04	1,8646,E+04	1,8666,E+04	7,2513,E+03	3,1835,E+03	3,1451,E+03	3,2228,E+03	2,9005,E+03	2,9005,E+03	3,1077,E+03	3,2149,E+03	2,9664,E+03	3,0568,E+03	3,1835,E+03	3,1077,E+03	3,2631,E+03
3,3468,E+03	3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,8962,E+03	3,1077,E+03	1,1866,E+04	3,1077,E+03	2,9664,E+03	3,0354,E+03	3,0354,E+03	3,1835,E+03	2,9005,E+03	2,4171,E+03	3,1835,E+03	3,1077,E+03	3,1835,E+03
3,2631,E+03	3,2550,E+03	3,2469,E+03	3,2070,E+03	3,2631,E+03	3,2631,E+03	3,4348,E+03	3,2631,E+03	1,3052,E+04	1,8646,E+04	1,8646,E+04	2,6105,E+04	2,9664,E+03	3,1077,E+03	3,3468,E+03	3,4348,E+03

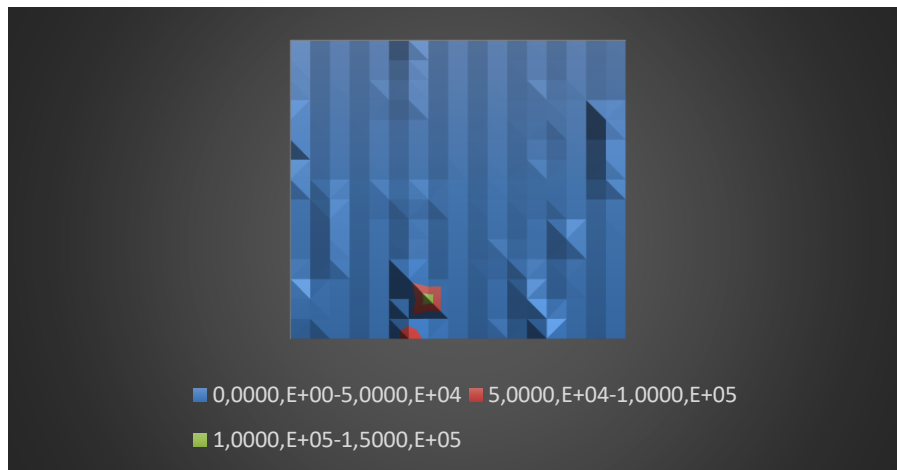


Figura 5.4: Grafica de relieve de eficiencia cuántica[mV/uW] de cada celda solar

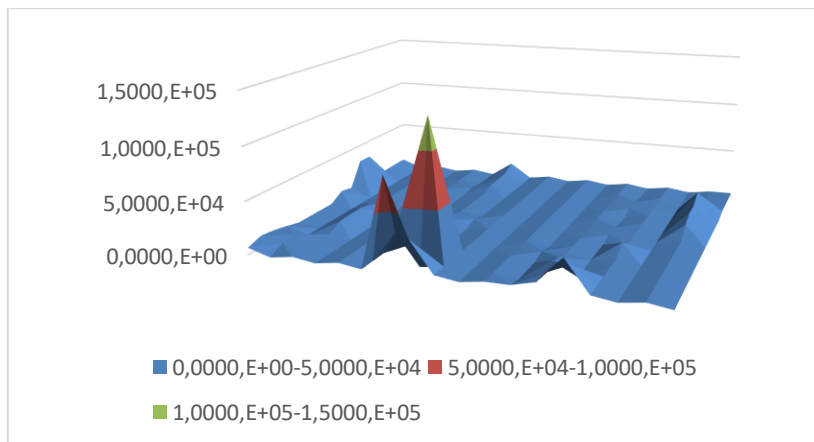


Figura 5.5: Grafica de relieve de eficiencia cuántica[mV/uW] de cada celda solar desde otro ángulo

6. Conclusiones

6.1. Conclusión

El set-up óptico permite obtener imágenes de las celdas fotovoltaicas para poder caracterizarlas según su emisión. Lo cual se pudo llevar a cabo con el experimento de electroluminiscencia al inyectarle portadores al panel fotovoltaico por medio de una corriente eléctrica, el rango espectral fue medido con un radiómetro NIR-512, donde se indicó que emite alrededor de los 1100nm y como era de esperar la cámara Acuros logro identificar las celdas en mal estado en el rango del NIR, pues estas celdas al emitir permanecen más oscuras.

Se concluyeron con éxito los 3 experimentos fundamentales, que son la base para poder estimar la eficiencia cuántica de cada celda solar y así mismo poder relacionar sus resultados, como en la figura 6.1 y 6.2, pues se logra diferenciar la imagen tomada con la cámara Acuros y un gráfico de relieve de eficiencia cuántica, que el color naranja indica mayor eficiencia y el azul menor. Como se puede ver en los puntos clave del gráfico (color naranja), hay mayor eficiencia y así mismo las celdas solares no muestran ningún tipo de anomalía en estos sectores, no así en los sectores más azules con menor relieve que se pueden distinguir fisuras, grietas, puntos negros, entre otros, lo cual genera un bajo valor de eficiencia cuántica e indicaría que la emisión de las celdas se puede ver contrastada por su eficiencia. En otras palabras, una celda solar en buen estado tendrá una alta eficiencia cuántica o una celda solar en mal estado tendrá bajo valor de eficiencia cuántica. Además de mencionar que hay pérdidas de fotones por temperatura, lo cual se puede ver en las imágenes tomadas con la cámara Gobi (figura 3.11 a 3.14), que también podría afectar su eficiencia cuántica.

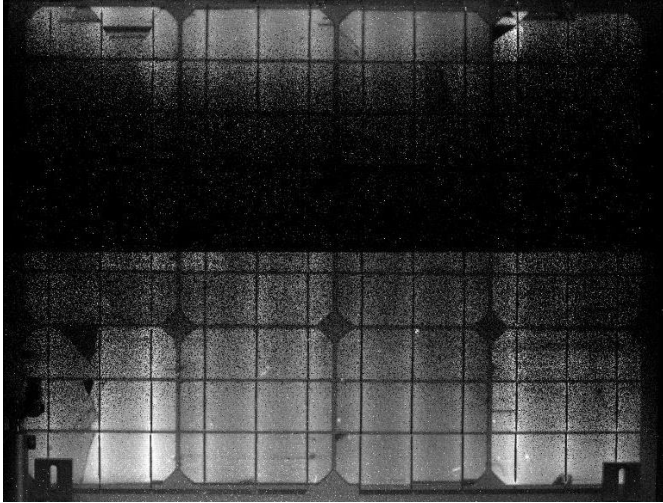


Figura 6.1: Imagen con cámara Acuros a 23[V] y 3[A]

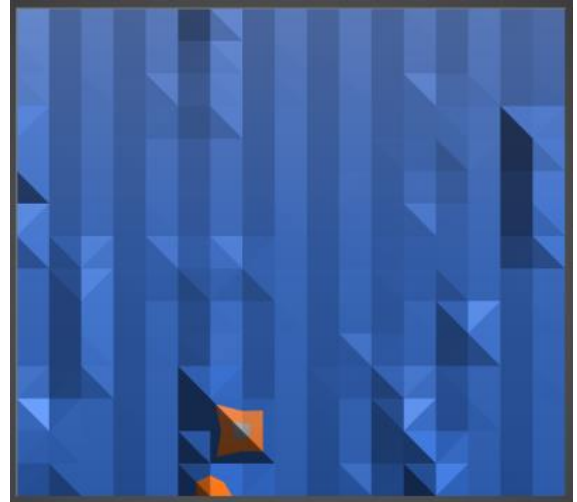


Figura 6.2: Grafica de relieve de la eficiencia cuántica

El análisis cualitativo de las imágenes de luminiscencia permite ver los distintos defectos habituales en las celdas solares. Gracias a este método de caracterización se podrán identificar dichos defectos tanto en su fase de fabricación como en instalaciones de campos de paneles fotovoltaicos, lo cual sería bastante útil a gran escala, como en campos de paneles fotovoltaicos.

Para finalizar es importante buscar una solución para el mantenimiento de las celdas solares, ya que es una energía inagotable y no contaminante, por lo que contribuye al desarrollo sostenible, tanto del país como del mundo y contribuiría de forma positiva en esta área.

6.2. Trabajo Futuro

Se deja como trabajo futuro:

- ✓ Seguir mejorando la eliminación de ruido de la cámara Acuros CQD, ya que el sensor de esta tiene ruido de patrón fijo y cada cámara posee estos inconvenientes, pero dependiendo de sus tecnologías puede variar en la complejidad de su eliminación
- ✓ Por otro lado, se plantea seguir con la investigación sobre la detección de celdas en mal estado por el método de electroluminiscencia, enfocándolo a la relación que tiene con su eficiencia cuántica. Teniendo en cuenta que quedo pendiente el cálculo de esta en función de la potencia óptica de salida con la

corriente de entrada, ya que la calculada en esta Memoria de Título fue en función de la potencia óptica de salida con el volteja de salida de cada celda.

- ✓ También sería de suma importancia mejorar el set-up, ya que en el laboratorio SP&R existen reflexiones que pueden influir en los resultados

Referencias

- [1] Carne, T. (s/f). *Transportes Carne*. Carne.Cl. Recuperado el 22 de junio de 2023, de <http://www.carne.cl/servicios/agua-desmineralizada/>
- [2] *J615: El proceso de absorción y la creación de electrones y huecos o pares*. (2013, octubre 26). Matlab/Simulink and Renewable Energy [Jorge Mírez]. <https://jmirez.wordpress.com/2013/10/26/j615-el-proceso-de-absorcion-y-la-creacion-de-electrones-y-huecos-o-pares/>
- [3] Corvetto, R. H. (2014, noviembre 4). *Introducción a la espectroscopia Ramán: el fotón*. El Ilustralografo. <https://lecorvett.wordpress.com/2014/11/04/introduccion-a-la-espectroscopia-raman-el-foton/>
- [4] Buenaposada, M., Rebollo, G., Ángel, M., Física De La, D., & Condensada, M. (s/f). Uva.es. Recuperado el 22 de junio de 2023, de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/47990/TFG-I-1974.pdf?sequence=1>
- [5] SWIR vision systems, “Acuros CQD camera user manual”, junio de 2020.
- [6] 25mm FL SWIR Series Fixed Focal Length Lens | Edmund Optics. (s.f.). Optical Imaging | Laser Optics | Edmund Optics. <https://www.edmundoptics.com/p/25mm-fl-swir-fixed-focal-length-lens/23307/>
- [7] Castillo, F. (14 de diciembre de 2016). *Diseño de un prototipo basado en un radiómetro NIR-512 Para verificación de estados de paneles solares*
- [8] Castillo, F. (10 de julio de 2017). *Análisis del estado de celdas solares en modo electroluminiscencia y fotoluminiscencia usando imágenes espectrales*
- [9] Fuyuki, T., Kondo, H., Yamazaki, T., Takahashi, Y., & Uraoka, Y. (2005). Photographicsurveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence. *Applied physics letters*, 86(26), 262108. <https://doi.org/10.1063/1.1978979>
- [10] Photonics, R. (s/f). *Solar cell inspection with raptor photonics' owl (SWIR) and falcon(EMCCD)*. www.laser2000.co.uk.
- [11] Princeton, I. (s/f). *Solar cell inspection via photoluminescence imaging in the NIR/SWIR*. www.princetoninstruments.com.
- [12] M. Kasemann¹, W. Kwapil, B. Walter, J. Giesescke, B. Michl, M. The, J-M. Wagner, J. Bauer,

A. Cartensen, S. Kluska, F. Granek, H. Kampwerth, P. Gundel, M. C. Schubert, R. A. Bardos, H. Föll, H. Nagel, P. Würfel, T. Trupke, O. Breitenstein, M. Hermule, W. Warta, S. W. Glunz. (1-5 September 2008). *Progress in silicon solar cell characterization with infrared imaging methods*.

[13] M. Vollmer y K.-P. Möllmann, "Infrared Thermal Imaging". Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017.

[14] B. E. A. Saleh, "Fundamentals of photonics". New York: Wiley, 1991.

[15] FLIR "The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals".

Anexo A

%a 400°C

```
tabla1 = load('C:\Users\catyt\OneDrive - Universidad de Concepción\Desktop\bad
pixelon\950ms\950_1.csv');
tabla2 = load('C:\Users\catyt\OneDrive - Universidad de Concepción\Desktop\bad
pixelon\950ms\950_2.csv');
tabla3 = load('C:\Users\catyt\OneDrive - Universidad de Concepción\Desktop\bad
pixelon\950ms\950_3.csv');
tabla4 = load('C:\Users\catyt\OneDrive - Universidad de Concepción\Desktop\bad
pixelon\950ms\950_4.csv');
tabla5 = load('C:\Users\catyt\OneDrive - Universidad de Concepción\Desktop\bad
pixelon\950ms\950_5.csv');
tabla6 = load('C:\Users\catyt\OneDrive - Universidad de Concepción\Desktop\bad
pixelon\950ms\950_6.csv');
tabla7 = load('C:\Users\catyt\OneDrive - Universidad de Concepción\Desktop\bad
pixelon\950ms\950_7.csv');
tabla8 = load('C:\Users\catyt\OneDrive - Universidad de Concepción\Desktop\bad
pixelon\950ms\950_8.csv');
tabla9 = load('C:\Users\catyt\OneDrive - Universidad de Concepción\Desktop\bad
pixelon\950ms\950_9.csv');
tabla10 = load('C:\Users\catyt\OneDrive - Universidad de Concepción\Desktop\bad
pixelon\950ms\950_10.csv');

I1=double(zeros(1080, 1920,10));
I1(:,:,1) = tabla1;
I1(:,:,2) = tabla2;
I1(:,:,3) = tabla3;
I1(:,:,4) = tabla4;
I1(:,:,5) = tabla5;
I1(:,:,6) = tabla6;
I1(:,:,7) = tabla7;
I1(:,:,8) = tabla8;
I1(:,:,9) = tabla9;
I1(:,:,10) = tabla9;

MedianaI950 = mean(I1,3);

%Asegurate de cambiar el nombre cuando vayas a guardar otro set a distinta
%temperatura
%revisa la direccion de donde se esta guardando tu

archivowritematrix(MedianaI1,'mediana950.csv');
imshow(MedianaI950,[]);
```

Anexo B

```
data=readcell('datosgrafica1.csv');  
valores=cell2mat(data(:, :));
```

```
Flujo =  
valores(:,  
1);  
Longitud =  
valores(:,  
2);  
  
Integral =  
trapz(Flujo, Longitud);  
  
figure  
plot(Flujo, Longitud);  
  
title(  
'Potencia  
Optica');  
xlabel('Longitud[nm]')  
;  
ylab  
el('Flujo  
[uW/nm]')  
;grid on;
```


**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA
RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO**

Departamento : Departamento de Ingeniería Eléctrica
Carrera : Ingeniería civil electrónica
Nombre del memorista : Catalina Ortega Villablanca
Título de la memoria : Estimación de Eficiencia cuántica en Celdas de Silicio usando Mecanismo de electroluminiscencia NIR
Fecha de la presentación oral: 30/agosto/2023

Profesor(es) guía : Luis Arias Parada
Profesor(es) revisor(es) : Alejandro Rojas y Sergio Torres
Concepto :
Calificación :

Resumen (máximo 200 palabras)

En esta tesis se pretende montar y poner en operación una cámara VIS-NIR(Acueros) para la obtención de imágenes en el NIR, de la emisión de un panel solar al inyectarle corriente y así poder estimar la eficiencia cuántica en base a estos resultados.

El objetivo de este trabajo consiste en la utilización del método de electroluminiscencia en paneles solares para poder estimar la eficiencia cuántica de estos. Además, así lograr identificar de forma rápida y efectiva las fallas de cada celda, utilizando dicho cálculo de eficiencia cuántica, (en W/V) a partir de la emisión espectral medida con un espectrofotómetro NIR-512. Para su desarrollo, se debe medir el voltaje de salida frente a la potencia óptica controlada. Para ello, primero se necesita hacer un estudio acerca del espectro en infrarrojo cercano, ya que es el rango del espectro en el cual se trabajará, esto debido a que el panel solar a utilizar emite radiación alrededor de los 1100nm.