

## **Evaluación de la Eficiencia Energética de Paneles Solares Operando In Situ**

Martín Ignacio Rodríguez Mendieta



Universidad de la Costa

Maestría en Eficiencia Energética y Energía Renovable

Barranquilla, Colombia

2022

## **Evaluación de la Eficiencia Energética de Paneles Solares Operando In Situ**

Martín Ignacio Rodríguez Mendieta



Trabajo de Grado presentado para optar al título de  
Magíster en Eficiencia Energética y Energía Renovable

PhD. Adalberto Ospino Castro

MSc. Eliana Noriega Angarita

Universidad de la Costa

Departamento De Energía

Maestría en Eficiencia Energética y Energía Renovable

Barranquilla, Colombia

2022

FUENTE DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

JURADO

---

JURADO

---

---

Barranquilla, 01 de septiembre de 2022

### **Agradecimientos**

A mi amada familia por su ejemplo de perseverancia, disciplina y por todo el apoyo brindado en los momentos difíciles, así como la constante motivación para llevar a buen término esta etapa académica, al Ingeniero Adalberto Ospino y a la Ingeniera Eliana Noriega por su guía y acompañamiento para el desarrollo del presente proyecto.

## Contenido

Agradecimientos.....	4
Contenido .....	5
Lista de tablas .....	8
Lista de figuras .....	9
1. Resumen.....	12
2. Abstract.....	13
3. Introducción.....	14
4. Planteamiento del problema.....	16
5. Justificación .....	18
6. Objetivos.....	19
6.1 General .....	19
6.2 Específicos .....	19
7. Delimitación de la Investigación .....	20
8. Aspectos metodológicos .....	21
8.1 Emplazamiento de equipos.....	23
8.2 Técnicas de recolección de datos .....	24
8.3 Fases de la investigación.....	26
9. Capítulo 1: Estudio documental sobre la física de semiconductores en las tecnologías	

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

fotovoltaicas.....	32
9.1 Dopaje.....	35
9.2 Irradiancia y respuesta espectral.....	36
9.3 Temperatura de Operación .....	38
9.3.1 Efectos de la Irradiancia y la temperatura en la eficiencia del panel solar.....	39
9.4 Tipos de Celdas. ....	42
9.4.1 Celdas de primera generación.....	44
9.4.2 Celdas de segunda generación. ....	47
9.4.3 Celda de tercera generación. ....	48
9.4.4 Celdas Multijuntura o en Tandem.....	50
10. Capítulo 2: Diseño del sistema de mediciones IN SITU .....	52
10.1 Generalidades del sistema de medición .....	52
10.2 Medición de la radiación solar y data logger .....	53
10.3 Estación meteorológica .....	55
10.4 Circuitos y sensores.....	55
10.4.1 Medición de tensión y corriente .....	55
10.4.2 Carga electrónica variable y Curva I-V .....	56
10.4.3 Temperatura de operación.....	59
10.4.4 Densidad de polvo.....	60
10.5 Trasmisión y procesamiento de datos .....	61
10.6 Diseño interfaz Gráfica .....	61

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

11. Capítulo 3: Análisis y evaluación de la eficiencia de los paneles fotovoltaicos .....	65
11.1 Datos meteorológicos recolectados .....	65
11.2 Datos recolectados de los paneles en circuito abierto .....	68
11.3 Eficiencia de los paneles Monocristalino, Policristalino y CIGS .....	75
11.4 Curvas I-V / P-V .....	77
11.5 Curvas I-V .....	82
12. Conclusiones.....	86
13. Referencias .....	88

**Lista de tablas**

**Tablas**

Tabla 1 Estándares internacionales y nacionales de referencia. ....	22
Tabla 2 Matriz de actividades .....	27
Tabla 3 Energía de banda prohibida de algunos semiconductores .....	33
Tabla 4 Elementos empleados para fabricación de células fotovoltaicas .....	34
Tabla 5. Coeficiente de temperatura de Diferentes módulos fotovoltaicos .....	40
Tabla 6. Resumen opciones de diseño y construcción de celda solares de Silicio. ....	43
Tabla 7 Características técnicas paneles solares .....	53
Tabla 8 Componentes empleados en los convertidores SEPIC. ....	59
Tabla 9 Máxima tensión de circuito abierto .....	68
Tabla 10 Temperatura máxima y promedio .....	70
Tabla 11 Condiciones de operación 2021-08-01 1:50-12:20.....	73
Tabla 12 Potencia a diferentes niveles de irradiancia.....	77

**Lista de figuras**

**Figuras**

Figura 1. Plataforma de medición..... 24

Figura 2. Ubicación sensores de temperatura en el panel solar. .... 25

Figura 3. Niveles de energía material semiconductor..... 32

Figura 4. Representación de una red cristalina de Silicio (Izq). Estructura atómica de una sección de cristal de silicio (Der)..... 34

Figura 5. Silicio dopado con impurezas para producir material tipo N y tipo P..... 35

Figura 6. Concentración de dopaje ( $\text{cm}^{-3}$ )..... .36

Figura 7. Espectro de la radiación solar..... 37

Figura 8. Curvas de respuestas espectral para diferentes tecnologías fotovoltaicas..... 37

Figura 9. Curva I-V a dos niveles de radiación ..... 39

Figura 10. Efecto de la temperatura sobre un panel fotovoltaico ..... 41

Figura 11. Eficiencia de conversión de tecnologías fotovoltaicas (2020) ..... 42

Figura 12. Textura anisotrópica obtenida por grabado alcalino sobre oblea de Si-Cristalino (Izq) y textura isotrópica de grabado ácido sobre obleas de Silicio-policristalino..... 46

Figura 13. Textura panel sobre obleas de Si-poli por litografía de nano impresión (Izq). Grabado reactivo de Iones (Der)..... 46

Figura 14. (a) Estructura de una celda solar de CIGS. (b) Imagen de laboratorio estructura CIGS. .... 48

Figura 15. Principio de funcionamiento de celda de tinta sensibilizada..... 49

Figura 16. Principio de funcionamiento celda solar orgánica..... 50

Figura 17. Principio de funcionamiento celda solar Multijuntura ..... 51

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

Figura 18. Diagrama de bloques sistema de medición .....	52
Figura 19. Diagrama esquemático Data Logger .....	54
Figura 20. Estación meteorológica Davis VUE.....	54
Figura 21. Divisor de voltaje .....	56
Figura 22. Sensor de corriente ACS712 .....	56
Figura 23. Topología SEPIC.....	57
Figura 24. Flujo de corriente conversor SEPIC. Arriba Q1 encendido, Abajo Q1 Apagado .....	57
Figura 25. Placa de la carga electrónica para el panel Si-C.....	59
Figura 26. Estación meteorológica Davis VUE.....	60
Figura 27. Sensor de polvo .....	60
Figura 28. Xbee 2SC PRO .....	61
Figura 29. Interfaz gráfica Irradiancia .....	62
Figura 30. Interfaz gráfica parámetros de los paneles en circuito abierto .....	63
Figura 31. Interfaz gráfica curvas I-V / P-V desarrollada en LabVIEW .....	64
Figura 32. Irradiancia.....	65
Figura 33. Irradiancia promedio horario.....	66
Figura 34. Temperatura ambiente .....	66
Figura 35. Temperatura ambiente promedio horario .....	67
Figura 36. Velocidad del viento promedios horarios.....	67
Figura 37. Densidad de polvo. ....	68
Figura 38. Tensión de circuito abierto. ....	69
Figura 39. Temperatura de operación de los paneles solares.....	69
Figura 40 Tensión del panel de Si-poli por variación de la temperatura. ....	71

Figura 41. Tensión del panel de Si-c por variación de la temperatura ..... 72

Figura 42. Tensión del panel de CIGS por variación de la temperatura..... 72

Figura 43 Temperatura de operación vs Tensión de circuito abierto Si-poli..... 74

Figura 44. Temperatura de operación vs Tensión de circuito abierto Si-c. .... 74

Figura 45. Temperatura de operación vs Tensión de circuito abierto CIGS ..... 75

Figura 46. Curvas I-V / P-V Panel Si-c, (A) Si-c 422W/m<sup>2</sup>, (B) Si-c 600W/m<sup>2</sup>, (C) Si-c  
700W/m<sup>2</sup>, (D) Si-c 815W/m<sup>2</sup>, (E) Si-c 900W/m<sup>2</sup> ..... 78

Figura 47. Curvas I-V / P-V Panel Si-poli, (A) Si-poli 422W/m<sup>2</sup>, (B) Si-poli 600W/m<sup>2</sup>, (C) Si-  
poli 700W/m<sup>2</sup>, (D) Si-poli 815W/m<sup>2</sup>, (E) Si-poli 900W/m<sup>2</sup> ..... 80

Figura 48. Curvas I-V / P-V Panel CIGS, , (A) CIGS 422W/m<sup>2</sup>, (B) CIGS 600W/m<sup>2</sup>, (C)  
CIGS700W/m<sup>2</sup>, (D) CIGS 815W/m<sup>2</sup>, (E) CIGS 900W/m<sup>2</sup> ..... 81

Figura 49. Curvas I-V Si-c..... 83

Figura 50. Curvas I-V Si-poli ..... 84

Figura 51. Curvas I-V CIGS ..... 85

## 1. Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia energética de tres tecnologías diferentes de paneles fotovoltaicos operando In Situ; paneles de silicio monocristalinos, policristalinos y CIGS (Cobre, indio, Galio y Selenio) de capa fina, considerando características propias de la ubicación del sistema, como son las variables meteorológicas de la ciudad de Barranquilla.

Con la sanción de la Ley 1715 de 2014 y el gran potencial energético solar que existe en la Región Caribe Colombiana; se abre un nuevo contexto en el mercado de importación de tecnologías de energías limpias, concentrando estas importaciones en tecnologías fotovoltaicas. Las experiencias en terreno de caracterización de aplicaciones de este tipo de tecnología para el sector rural y urbano son limitadas y se hace necesario comenzar a analizar en detalle las variables que afectan su funcionamiento en estas condiciones. Para el desarrollo de esta investigación se implementó un sistema de monitoreo en tiempo real de datos meteorológicos, ambientales y energéticos, para determinar la correlación de las variables que caracterizan el comportamiento energético de las tecnologías fotovoltaicas seleccionadas, se realizó su caracterización, determinando su producción de energía para finalmente desarrollar comparaciones energéticas para cada tecnología estudiada.

*Palabras clave: Tecnologías Fotovoltaicas, Mono-Si, Poly-Si, CIGS.*

## 2. Abstract

This research focused on the study of the real behavior of the energy efficiency of three different technologies of photovoltaic panels, Monocrystalline Silicon, Polycrystalline and Thin Layer CIGS, considering characteristics of the location of the system such as meteorological variables of Barranquilla. With the enactment of Law 1715 of 2014 and the great solar energy potential that exists in the Caribbean region (Corpoema, 2010), a new context is opened in the import market of clean energy technologies, concentrating these imports in photovoltaic technologies. Experiences in the field of characterization of applications of this type of technology for the rural and urban sectors are limited and it is necessary to begin to analyze in detail the variables that affect their operation under these conditions. For the development of the project, a real-time monitoring system of meteorological, environmental and energy data was implemented to determine the correlation of the variables that characterize the energy behavior of the selected photovoltaic technologies, their characterization was carried out, establishing energy production to finally develop energy comparisons for each technology studied.

*Keywords: Photovoltaic technologies, Mono-Si, Poly-Si, CIGS.*

### 3. Introducción

La integración de tecnologías para generación de energía a partir de la explotación de recursos renovables se hace más común cada día, convirtiéndose en una opción de gran conFuenteción en nuestros tiempos, donde la globalización pone al alcance de cualquier persona la información y los materiales necesarios para el aprovechamiento de estos recursos. Es así como mediante el diseño de sistemas e implementación de diferentes dispositivos es posible lograr la autosostenibilidad y dejar a un lado la dependencia energética tradicional.

Aunque se han logrado avances significativos en la generación de energía renovable en numerosos países (Cabello Eras et al., 2015; Christoffersen, Larsen, & Togeby, 2006; Gielen & Taylor, 2009; Hens et al., 2017; Palamutcu, 2010; Posch, Brudermann, Braschel, & Gabriel, 2015; Rudberg, Waldemarsson, & Lidestam, 2013; Vine, 2005; Weinert, Chiotellis, & Seliger, 2011), se reconoce que su potencial y las acciones de Eficiencia Energética (EE) para reducir el consumo de energía y el impacto ambiental del sector industrial está aún lejos de ser totalmente aprovechado (Bunse, Vodicka, Schönsleben, Brühlhart, & Ernst, 2011; Cagno & Trianni, 2014; European Commission (EC), 2014; Giacone & Mancò, 2012; ISO, 2014; Ospino-Castro, 2010; Weinert et al., 2011). Colombia no es la excepción y en el sector industrial del país existen grandes potenciales para la implementación de acciones de gestión energética.

La presente investigación se desarrolló en el campus de la Universidad del Costa, y se encuentra estructurada de la siguiente manera. Un capítulo inicial en el cual se diferencia la estructura molecular, proceso de fabricación y rendimiento en condiciones Standard Test Condictions (STC) de cada una de las tecnologías fotovoltaicas que hacen parte de este estudio. En el segundo capítulo se explica el diseño de los diferentes componentes que integran la plataforma de medición y la interfaz para la integración y visualización de los datos obtenidos. Y

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

un tercer capítulo donde se presentan los resultados y análisis de las diferentes variables para el desarrollo de una comparación que permitió parametrizar el rendimiento energético de cada una de tecnologías estudiadas y su aplicación en las condiciones de la región Caribe.

#### 4. Planteamiento del problema

La captación de energía solar fotovoltaica y su transformación en energía eléctrica mantiene una tendencia de crecimiento en todo el mundo (International Energy Agency, 2021) y es evidente que su alta penetración en algunas regiones ha conllevado a una mayor dinámica de implementación de estas tecnologías en base a las experiencias y resultados obtenidos hasta el momento, pero esta dinámica se encuentra dominada por las dos tecnologías tradicionales de fabricación de paneles fotovoltaicos, los de silicio Monocristalino y los Policristalinos, la incorporación de nuevas tecnologías con niveles de rendimiento similares o superiores ha sido limitada hasta el momento, el mercado de estas nuevas tecnologías tiene poco movimiento y son unos pocos fabricantes quienes han adelantado investigaciones empleando diferentes materiales como el CdTe (Cadmio, Telurio), GaAs (Galio, Arsénico), CIGS entre otros, para presentar alternativas competitivas en este sector.

En Latinoamérica la presencia de proyectos con paneles solares de nuevas tecnologías como los de CIGS tienen una proporción mínima en comparación con los tradicionales. En Colombia diversos estudios han demostrado que se posee un gran potencial en recursos energéticos no convencionales para la generación de energía eléctrica con lo que se lograrían nuevos escenarios para el sector eléctrico (Lezcano, 2011).

Con la sanción de la ley 1715 de 2014, se permite la integración de energías renovables no convencionales al sistema eléctrico nacional. Aprovechando este nuevo contexto, se han desarrollado proyectos en electrificación rural basados en energía fotovoltaica haciendo uso del gran potencial energético solar que existe a lo largo de todo el territorio nacional especialmente en la Región Caribe Colombiana (Corpoema, 2010). Estos proyectos se basan en importaciones de tecnologías de energía fotovoltaica, operando actualmente bajo la premisa de unas pocas

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

investigaciones sobre las variables meteorológicas particulares de Colombia y su influencia en la eficiencia de los módulos fotovoltaicos, sin embargo, no hay un estudio que permita identificar el comportamiento real de la eficiencia energética en paneles fotovoltaicos instalados en la Región Caribe Colombiana, donde se consideren las diferentes variantes meteorológicas y las características del lugar y ubicación del sistema. Con base en lo anterior se hace imprescindible la siguiente pregunta problema.

**¿Cómo afectan las variables meteorológicas propias de la ciudad de Barranquilla la eficiencia energética de paneles solares de Silicio Monocristalino, Silicio Policristalino y CIGS (Cobre-Indio-Galio-Selenio)?**

## 5. Justificación

La caracterización de tecnologías fotovoltaicas actualmente sigue una serie de procedimientos plasmados en diferentes normas internacionales tales como las contenidas en las serie IEC 60904 diseñadas para mediciones controladas bajo condiciones estándar en laboratorio o en el exterior, de tal manera que proyectar un comportamiento de una tecnología específica en condiciones reales de operación crea un margen de incertidumbre parcialmente regulado por los estudios previos sobre el terreno, los más detallados recopilan información que pueden proyectar en el corto plazo el rendimiento de una tecnología adoptada para su integración en un proyecto de energía solar fotovoltaica.

Llegar a tener una certeza real de la eficiencia de determinada tecnología implica un estudio prolongado en el tiempo de todas las variables que pueden influenciar sobre la misma. La Región Caribe Colombiana como lo demuestra el atlas de radiación solar y corroborado por algunas otras agencias internacionales cuenta con el mayor potencial de radiación solar en el país con algunas características especiales como son la cercanía al límite costero con un régimen de vientos considerables, altas temperaturas y zonas áridas con un índice alto de material particulado, lo cual hace necesario realizar un análisis detallado IN SITU, considerando variables climáticas y características eléctricas del sistema, comparando alternativas tradicionales (Si-c, Si-poli), con tecnología de capa fina de CIGS.

## 6. Objetivos

### 6.1 General

Evaluar la eficiencia energética de tecnologías Fotovoltaicas de paneles solares operando In Situ analizando las condiciones meteorológicas locales para establecer cual tecnología tiene el mejor rendimiento.

### 6.2 Específicos

Revisión sistemática en bases de datos especializada en tecnologías fotovoltaicas (Si-c, Poli-Si, CIGS) para determinar las variables meteorológicas que afectan la eficiencia energética de estos sistemas.

Construir una plataforma experimental para la medición de parámetros característicos de módulos fotovoltaicos como la tensión, corriente y temperatura de operación, integrando varias tecnologías de captura, almacenamiento, transmisión de datos y visualización en tiempo real.

Analizar los datos recolectados medidos para evaluar la eficiencia energética de las tecnologías fotovoltaicas teniendo en cuenta su correlación con las variables meteorológicas IN SITU.

### **7. Delimitación de la Investigación**

EL presente estudio se llevó a cabo por un lapso de catorce días en el cual todas las mediciones de tensión y corriente de los paneles solares serán tomadas en condiciones normales de operación. No se efectúan mediciones con carga constante conectada a cada una de las tecnologías fotovoltaicas. Tampoco se observaran condiciones de sombreado parciales ni acumulación prolongada de material particulado, Los datos fuera del rango 06:00-18:00 no serán considerados y los de interés serán analizados y graficados en Python mediante las librerías matplotlib y seaborn.

## 8. Aspectos metodológicos

Este proyecto empleó una metodología de investigación aplicada mediante la cual se analiza la eficiencia energética de tecnologías fotovoltaicas IN SITU, lo cual permite generar recomendaciones para la implementación de proyectos fotovoltaicos en la Región Caribe Colombiana.

Para el desarrollo de esta investigación se estableció una serie de pasos los cuales se enumeran a continuación:

1. Selección de las tecnologías fotovoltaicas a evaluar.
2. Medición de la irradiación solar y datos meteorológicos.
3. Medición de la temperatura de operación del panel.
4. Medición de la densidad de material particulado.
7. Medición de la corriente (I) y la tensión (V) en circuito abierto de los paneles fotovoltaicos.
8. Obtención curvas I-V.
9. Análisis de datos obtenidos.

Es importante resaltar que para el proceso de aprovechamiento de la energía solar mediante paneles fotovoltaicos existen factores que afectan la eficiencia y para determinar esta incidencia se llevó a cabo una correlación de estos factores en condiciones reales de operación lo cual permite dar un concepto fundamentado sobre la eficiencia real de las tecnologías comprometidas en este estudio, para lo cual se tomó como referencia algunos apartes de procedimientos contenidos en estándares internacionales dirigidos a la industria de fabricantes de paneles solares y sus comercializadores, que a su vez a nivel nacional algunos de ellos se encuentran como normas homologadas relacionados en la tabla 1.

**Tabla 1***Estándares internacionales y nacionales de referencia.*

Estándar internacional	Estándar nacional	Descripción
IEC 60904-1	NTC5513	Dispositivos fotovoltaicos. Parte 1: Medida de la característica corriente-tensión de dispositivos fotovoltaicos
IEC 60904-3		Fundamentos de medida de dispositivos solar FV de uso terrestre con datos de irradiancia espectral de referencia
IEC 60891	NTC5679	Procedimiento de corrección con la temperatura y la irradiancia de la característica I-V de dispositivos fotovoltaicos.
IEC 61724		Monitoreo del rendimiento de instalaciones fotovoltaicas – Directrices para la medición, intercambio de datos y análisis.
IEC 61853-1	NTC 6017-1	Ensayos del rendimiento de módulos fotovoltaicos (FV) y evaluación energética. Parte 1: Medidas del funcionamiento frente a temperatura e irradiancia y determinación de las características de potencia.

---

NTC4405	Eficiencia energética. Evaluación de la eficiencia de los sistemas solares fotovoltaicos y sus componentes
---------	--

---

*Fuente:* Elaboración propia

### **8.1 Emplazamiento de equipos**

La plataforma (figura 1) diseñada para el soporte de los paneles solares y equipos electrónicos encargados de las mediciones está ubicada en la azotea del bloque cinco de la Universidad de la Costa a una altura aproximada de 15 m sobre el nivel del terreno, es una estructura metálica de 2m que sostiene los tres paneles solares; en el mismo lugar se encuentra una estación meteorológica Davis Vantage PRO sobre un soporte monopolo a 1 m de altura sobre los paneles. La inclinación de los paneles solares es fija a 15 grados con orientación Norte-Sur.

Se usó un piranómetro marca Hukseflux SR05-D1A3 ubicado en el mismo plano inclinado de los paneles solares, este instrumento puede entregar los datos en dos formatos Modbus sobre RS-485 ó tensión de 0-1VDC, este último fue el empleado para el procesamiento de la medición de radiación solar en este proyecto. De acuerdo a la norma IEC61724-1:2017 este instrumento se encuentra clasificado como clase C, el cual se encuentra diseñado para uso en pequeñas instalaciones con una precisión básica. A este instrumento se le efectuó mantenimiento diario después de las 18:00 durante el tiempo que se efectuaron las mediciones.

**Figura 1***Plataforma de medición*

*Fuente:* Elaboración propia.

Los equipos adicionales como el data logger, carga electrónica, unidad de procesamiento y transmisión de datos, así como los sensores de tensión y corriente se encuentran ubicados en un contenedor en el mismo sitio, estos serán detallados en capítulos posteriores. Un equipo remoto de cómputo es el encargado de recibir la trama de datos para su respectivo procesamiento y visualización.

**8.2 Técnicas de recolección de datos**

Los niveles de tensión entregados por el piranómetro son procesados por un registrador de datos diseñado para tomarlos cada dos segundos, esta lectura de irradiancia se puede visualizar en el sitio donde ese encuentra instalado el instrumento, y el promedio de cada 30 lecturas es enviado

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

por radiofrecuencia al equipo encargado de recopilar todos los datos. La temperatura de los paneles se midió mediante sensores con una precisión de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .

Las tensiones y las corrientes se midieron utilizando circuitos diseñados con componentes de precisión y sus medidas fueron comparadas con instrumentación electrónica especializada para verificar un margen de error del 0.2% de la tensión de circuito abierto y de la corriente de corto circuito. Para la toma de datos correspondientes a las curvas de potencia de los paneles se tuvo en cuenta que la irradiación solar no fluctuara más del  $\pm 1\%$  en el transcurso de una medida.

Las medidas para el trazado de las curvas I-V se efectúan a solicitud del usuario desde la interfaz gráfica este procedimiento demora aproximadamente 1 minuto tomando 108 muestras de la tensión y corriente, los datos obtenidos en niveles de radiación inferiores de  $50\text{W}/\text{m}^2$  fueron excluidos del análisis.

Durante la medición se verificó que la temperatura de operación fuera estable con un margen de variación de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , los sensores se ubicaron en 4 posiciones de acuerdo a la norma NTC5679 (asegurándose que cada una estuviera directamente detrás de una célula, figura 2.) se tomaron 16 lecturas por minuto y su promedio se envió por radiofrecuencia al equipo encargado de recibir y almacenar la información.

### **Figura 2**

Ubicación sensores de temperatura en el panel solar.



*Fuente:* NTC5679:2011

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

Para efectos de control de calidad de las mediciones se efectuó una verificación diaria de los datos obtenidos filtrando aquellos que se encontraran fuera de los límites del rango de lecturas. Para el registro de las mediciones se sincronizaron los relojes del registrador de datos del piranómetro y del microcontrolador encargado de procesar los demás datos.

La estación meteorológica tiene una consola en la que se pueden visualizar y descargar en tiempo real los datos de las diferentes variables y además se puede recuperar un registro de valores promediados de diferentes lapsos de tiempo, las variables que registra son: presión atmosférica, punto de rocío, humedad, precipitación, temperatura, velocidad del viento y dirección del viento.

### **8.3 Fases de la investigación**

Esta investigación estuvo estructurada en varias fases que guardan coherencia con los objetivos del proyecto y se agrupan en una serie de actividades puntuales las cuales se aprecian en la tabla 2.

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

**Tabla 2***Matriz de actividades*

Objetivo General	Objetivos específicos	No	Actividad	Descripción
	Construir una		Selección y análisis	
Evaluar la eficiencia energética de tecnologías Fotovoltaicas de paneles solares operando Situ las condiciones meteorológicas	la plataforma experimental para la medición de parámetros característicos de módulos fotovoltaicos como la tensión, corriente y temperatura de operación, integrando varias tecnologías de captura, almacenamiento, transmisión de datos y visualización en tiempo real.	1	del Hardware y Software que será empleado en la red de sensores, circuitos de medición y red de transmisión de datos, de acuerdo a sus características y el medio donde operarán.	Selección de componentes discretos que harán parte de los circuitos de medición, sensores y módulos de transmisión de datos, placas base de desarrollo y módulos complementarios como RTC, ADC, display y conversores de datos.

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

---

<p>locales para establecer cual tecnología tiene el mejor rendimiento.</p>	<p>Diseño de circuitos de medición, configuración y pruebas en laboratorio de sensores, microcontroladores y dispositivos de transmisión de datos.</p>	<p>Diseño general preliminar de la configuración del sistema de medición, integración de sensores, módulos, dimensionamiento de soportería contenedores, cableado y conectores.</p>
<p>2</p>	<p>Instalación de los paneles fotovoltaicos y equipos asociados como montantes y sistema de energía de soporte seleccionados para las condiciones</p>	<p>Ubicación en sitio de los paneles C-Si, Poli-Si y CIGS, estación meteorológica, sensores de temperatura de los paneles, data logger, sistema de medición y procesamiento de señales y sistema de transmisión de datos.</p>
<p>3</p>		

---

---

	propias del lugar de ubicación.	
4	Instalación y realización de pruebas de la red de sensores IN SITU.	Pruebas preliminares de medición, registro de datos, transmisión de datos, comprobación de la integridad de datos y desviaciones en las mediciones y correcciones a que haya lugar.
5	Diseño de plataforma en Labview para la visualización de los datos de las variables energéticas de cada una de las tecnologías de paneles solares	Diseño interfaz gráfica encargada de presentar la información meteorológica, temperaturas de operación de los paneles, densidad de polvo y curvas I-V.

---

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

---

<p>Analizar los datos recolectados medidos para evaluar la eficiencia energética de las tecnologías fotovoltaicas teniendo en cuenta su correlación con las variables meteorológicas y medio ambientales IN SITU.</p>	<p>2</p> <p>1</p> <p>2</p>	<p>Elaboración de la base de datos con las mediciones obtenidas de las variables meteorológicas y ambientales.</p> <p>Aplicación de la caracterización energética: Punto o estado de operación de referencia o línea base.</p> <p>Análisis e interpretación de medición de las variables del sistema</p>	<p>Almacenamiento del registro histórico de los datos recolectados de todo el sistema instalado.</p> <p>Gráfico del registro histórico de los datos recolectados y definición de la caracterización energética de cada tecnología.</p> <p>Análisis de los datos recolectados y selección de variables representativas en la incidencia de la eficiencia energética de los paneles solares.</p>
---	----------------------------	--	--

---

---

	de generación y de la	
	caracterización	
	energética.	
	Comparación de	
	resultados de los	
3	sistemas fotovoltaico	Correlación de los factores más relevantes con el
	bajo estudio con los	desempeño de los paneles y evaluación de la
	valores medidos IN	eficiencia de cada tecnología.
	SITU.	

---

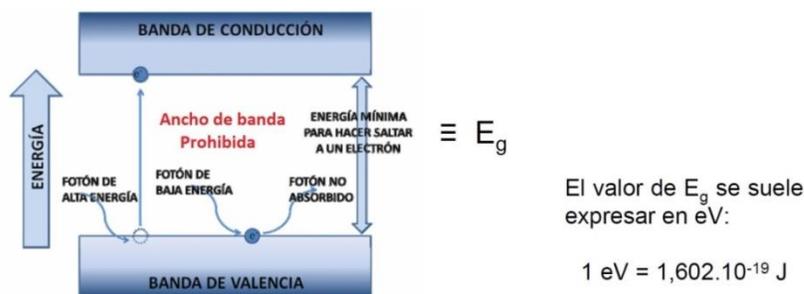
*Fuente:* Elaboración propia.

## 9. Capítulo 1: Estudio documental sobre la física de semiconductores en las tecnologías fotovoltaicas

La generación de energía eléctrica en los paneles solares se debe al movimiento dirigido dentro de un material semiconductor bajo el efecto de la luz al liberar las cargas y generar un flujo de corriente, esto por la acción de los niveles de energía de los fotones sobre los electrones de la banda de valencia que al incidir sobre el material semiconductor rompen los enlaces y pasan desde la banda de valencia a través de la banda prohibida de energías ( $E_g$ ) hacia la banda de conducción donde quedan libres para circular a través de él (Smets, Klaus, Olindo, Van Swaaij, & Zeman, 2015). En la tabla 3 se encuentran los valores de energía de banda prohibida de algunos semiconductores. Por cada electrón que se libera, aparece un hueco, estos huecos se comportan como partículas de carga positiva. Cuando en el material semiconductor se generan pares electrón-hueco al absorber la luz solar se dice que hay una fotogeneración de cargas negativas y positivas (figura 3), es así como el cristal de silicio a una temperatura de 300 K presenta ruptura de enlaces lo cual da una concentración de portadores intrínsecos de huecos p, y electrones n de  $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^3$ .

**Figura 3**

*Niveles de energía material semiconductor*



*Fuente:* Martínez, 2011

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

Al no ser un dispositivo ideal es importante mencionar que durante el proceso se pueden presentar pérdidas que limitan la conversión de la energía solar en electricidad: el exceso de energía de los fotones se transforma en calor y otros fotones que no alcanzan a ser absorbidos por el material, al no tener un nivel energía suficiente.

**Tabla 3**

*Energía de banda prohibida de algunos semiconductores*

Material	Energía de banda prohibida (Ev)
Silicio Cristalino (Si)	1.12
Silicio Amorfo (Si-a)	1.65
Germanio (Ge)	0.66
Fosfuro de Galio (GaP)	2.26
Arseniuro de Galio (GaAs)	1.42
Fosfuro de Indio (InP)	0.92/1.35
Arseniuro de Indio (InAs)	0.3
Sulfuro de Cadmio (CdS)	2.6
Telurio de Cadmio (CdTe)	1.4

*Fuente:* Kaushika, Mishra, & Rai, 2018.

Estos materiales semiconductores están ubicados en la tabla periódica de elementos en el grupo IV como el Silicio (Si) y el Germanio (Ge) (semiconductores intrínsecos) o también pueden ser el resultado de combinaciones de los grupos III-V, II-VI como el CdTe, CuAlS<sub>2</sub>, CuInS<sub>2</sub>, CIGS entre otros (tabla 4). Estos materiales a muy bajas temperaturas se comportan como aislantes, mientras que a altas temperaturas se pueden llegar a comportar como metales. Algunos de estos elementos se encuentran relacionados en la tabla 3.

**Tabla 4***Elementos empleados para fabricación de células fotovoltaicas*

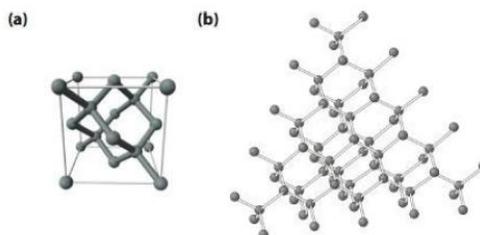
I	II	III	IV	V	VI
		B	C	N	O
		AL	Si	P	S
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te

*Fuente:* Luque & Hegedus, 2011

La unión de estos elementos mediante enlaces covalentes donde los átomos comparten y tratan de llenar de electrones su última orbita determinan las propiedades químicas, eléctricas y ópticas del material conformado. Para el Silicio y el germanio este enlace es bastante débil y algunos electrones podrán moverse libremente cuando exista la suficiente energía térmica (Smets et al., 2015). Para el caso del Silicio que posee cuatro electrones de valencia, al crear enlaces con otros cuatro átomos de silicio forma estructuras cristalinas manteniéndose ordenados en formas periódicas tridimensionales (figura 4).

**Figura 4.**

*Representación de una red cristalina de Silicio (Izq). Estructura atómica de una sección de cristal de silicio (Der).*

*Fuente:* Smets et al., 2015

Los principales parámetros que determinan el diseño y rendimiento de una célula solar son:

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

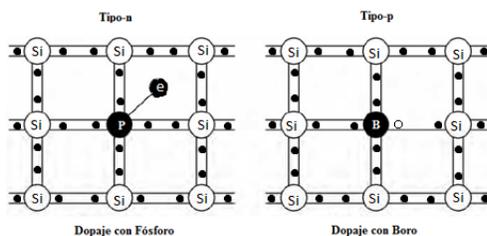
1. Concentración de átomos de dopaje, como portadores libres (electrones o huecos), es decir átomos que aportan electrones libres o que aceptan electrones libres.
2. La movilidad y el coeficiente de difusión de los portadores de carga, usado para caracterizar la transmisión de los portadores debido a la corriente de arrastre y la difusión respectivamente.
3. El tiempo de vida y la longitud de difusión de los portadores sobrantes caracterizan los procesos de recombinación y generación.
4. La energía de la banda de separación  $E_g$ , y el índice complejo de refracción  $n - ik$ , donde  $k$  es vinculado al coeficiente de absorción  $\alpha$ , y caracterizan la capacidad de un semiconductor para absorber la radiación electromagnética.

### 9.1 Dopaje

En el proceso de dopaje se acondiciona un compuesto fotosensible para variar su número de electrones y huecos, es así como se pueden crear materiales de tipo N los cuales tendrán cuatro enlaces covalentes y un electrón libre para el proceso de conducción y se forman cuando materiales del grupo IV se dopan con materiales del grupo V o de tipo P cuando se crean solamente tres enlaces covalentes quedando un hueco disponible, este último formado cuando se dopan materiales del grupo IV con átomos del grupo III (figura 5).

### Figura 5

*Silicio dopado con impurezas para producir material tipo N y tipo P.*



*Fuente:* Adaptado de (Wenham, Green, Watt, & Corkish, 2013)

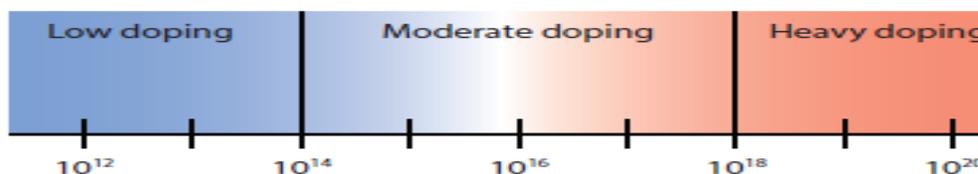
## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

Estas estructuras dopadas permiten controlar la conductividad eléctrica del material semiconductor dependiendo de la concentración de los electrones, huecos libres y su movilidad; esta concentración depende de la cantidad de impurezas introducidas.

Para el caso del Si cristalino en la figura 6 es posible observar una escala de la concentración del dopaje que se puede aplicar a este material y cuando una de estas cargas portadoras (electrones o huecos) tiene una mayor concentración que la otra se dice que son los portadores mayoritarios (huecos para material tipo-p y electrones para material tipo-n) y portadores minoritarios para el caso contrario (electrones en materiales tipo-p y huecos en material tipo-n).

### Figura 6

Concentración de dopaje ( $cm^{-3}$ ). (Smets *et al.*, 2015)



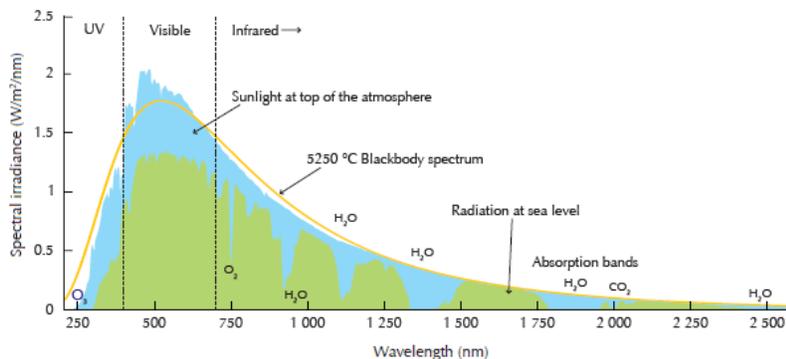
Fuente: Smets *et al.*, 2015

### 9.2 Irradiancia y respuesta espectral

La irradiancia efectiva es aquella porción del espectro electromagnético de la radiación solar (figura 7) en forma de luz que es aprovechada por el material fotovoltaico para convertirlo en una corriente de energía eléctrica y durante este proceso se deben considerar la respuesta espectral del material semiconductor como uno de los factores de pérdida más importante.

**Figura 7**

*Espectro de la radiación solar. (IEA) International Energy Agency, 2011)*

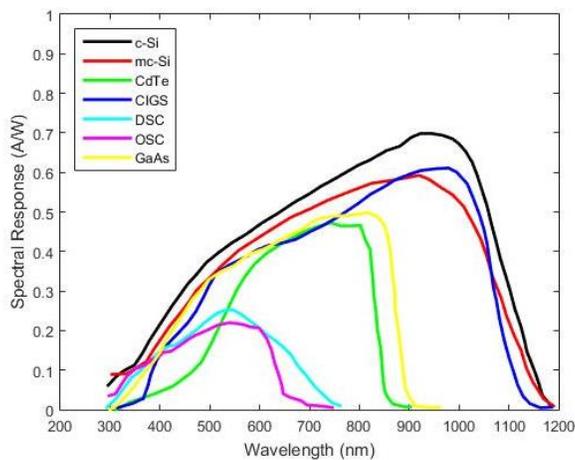


Fuente: (IEA) International Energy Agency, 2011

Cada material semiconductor tiene un coeficiente de absorción diferente el cual determina la respuesta de estos ante los fotones y su capacidad de aprovechar esa energía para excitar los electrones hacia la banda de conducción, este coeficiente basado en la respuesta de los materiales a las longitudes de ondas de la radiación solar (figura 8) y su capacidad de absorción de energía de los fotones incidentes sobre el mismo es un parámetro esencial en el diseño de células (Smets et al., 2015).

**Figura 8**

*Curvas de respuestas espectral para diferentes tecnologías fotovoltaicas.*



Fuente: <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/effective-irradiance/spectral-response/>

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

Esta relación entre la corriente generada por la célula solar y la potencia incidente también está directamente relacionada con la eficiencia cuántica (QE) la cual representa el número de electrones producidos que se mueven desde la banda de valencia hasta la banda de conducción en comparación con el número de fotones que inciden sobre la célula solar, de esta manera es posible determinar la respuesta espectral mediante la ecuación 1:

$$SR_{\lambda} = QE_{\lambda} * \frac{e}{hc} \quad (1)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz,  $e$  es la carga del electrón ( $1.602176565 \cdot 10^{-19}$  Coulomb),  $h$  es la constante de Plank ( $6.62606957 \cdot 10^{-34}$  J\*s) y  $c$  es la velocidad de la luz ( $2.99792458 \cdot 10^8$  m/s).

### 9.3 Temperatura de Operación

La temperatura de un panel solar puede depender de factores como la temperatura ambiente, velocidad del viento, humedad, su ubicación y tipo de montaje, para efectuar un cálculo estimado de la temperatura de operación de una celda solar se puede tomar como referencia el valor denominado NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) en la ficha técnica del panel, este valor corresponde a la temperatura de la celda bajo una radiación de  $800 \text{ W/m}^2$ , temperatura ambiente de  $20^{\circ} \text{ C}$  y velocidad del viento de  $1 \text{ m/s}$  (Luque & Hegedus, 2011), donde,

$T_a$  = Temperatura ambiente

$G_M$  =Radiación solar

$$T_{Celda} = T_a + \frac{T_{NOCT} - 20^{\circ} \text{ C}}{800 \text{ W} * \text{m}^{-2}} G_M \quad (2)$$

Si se desea hacer una estimación más aproximada el modelo Duffie–Beckman agrega una extensión a la anterior ecuación de manera empírica para considerar la velocidad del viento,

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

donde,

$w$  = velocidad del viento a la altura del módulo

$T$  = Transmitancia de la capa frontal del módulo

$\alpha$  = Absortividad del módulo

$\eta$  = Eficiencia del módulo

Usualmente  $T*\alpha$  es asumido con valor de 0.9

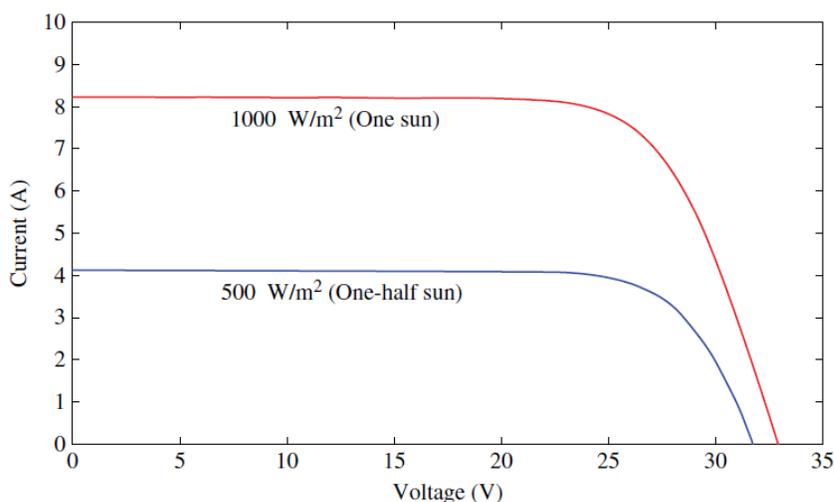
$$T_{Celda} = T_a + \frac{T_{NOCT}-20^{\circ}}{800} G_M \left( \frac{9.5}{5.7+3.8*w} \right) \left( 1 - \frac{n}{T*\alpha} \right) \quad (3)$$

### 9.3.1 Efectos de la Irradiancia y la temperatura en la eficiencia del panel solar

La eficiencia de la celda tiene una relación directa con los niveles de radiación recibidos (figura 9) los cuales influyen en la corriente entregada por el módulo es decir con un nivel de irradiancia de 500 W/m<sup>2</sup> la corriente entregada por el módulo fotovoltaico será aproximadamente la mitad del que entregaría el mismo módulo expuesto a 1000 W/m<sup>2</sup> (Khatib & Elmenreich, 2016a).

#### Figura 9

Curva I-V a dos niveles de radiación. (Khatib & Elmenreich, 2016b)



Fuente: Khatib & Elmenreich, 2016b

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

La eficiencia de una celda solar se ve afectada por su temperatura de operación (figura 10), un módulo fotovoltaico tiene mejor rendimiento a bajas temperaturas, a temperaturas altas su potencia se verá reducida al incidir directamente en la reducción de la tensión por cada 1°C que se eleve la temperatura. Estas pérdidas dependen de los coeficientes de temperatura correspondientes al material de fabricación de cada celda (tabla 5). Siendo los módulos de capa fina los que mejor respuesta tienen ante las altas temperaturas. Este coeficiente quiere decir que por cada grado de temperatura por encima de los 25° Celsius el módulo va a tener una pérdida correspondiente a su coeficiente de temperatura para el caso del silicio monocristalino sería entre 0.45 – 0.54 %.

**Tabla 5**

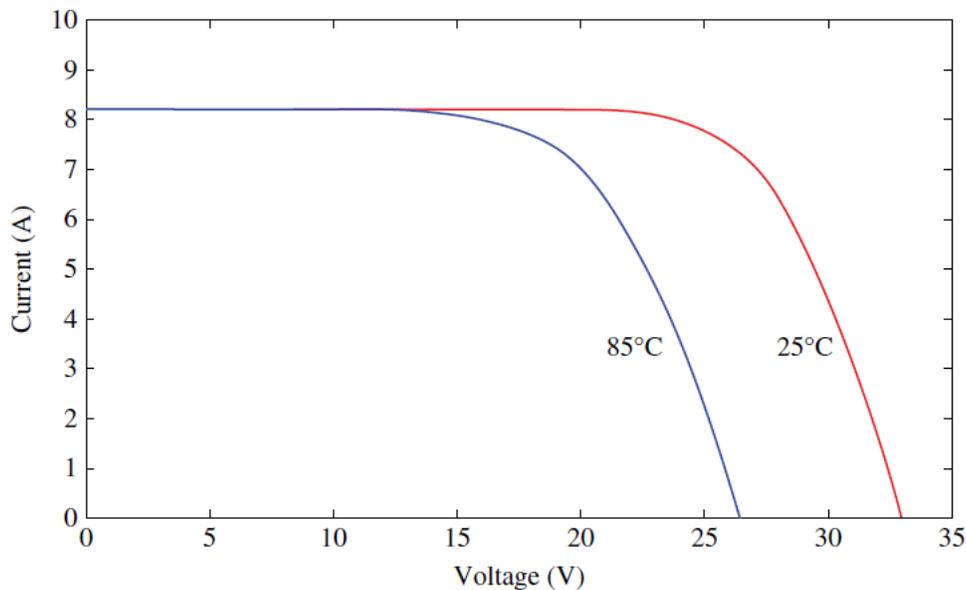
*Coeficiente de temperatura de Diferentes módulos fotovoltaicos*

Tecnología	Coeficiente Temperatura %C
Silicio monocristalino	-0.4 ~ -0.54
Silicio Policristalino	-0.45
Silicio Amorfo	-0.12 ~ -0.3
Capa fina CdTe	-0.31
Capa fina CIGS	-0.36 ~ -0.45
Celdas de tinta sensibilizada (DSSCs)	-0.26 ~ 0.33

*Fuente:* Paranthaman, Wong-Ng, & Bhattacharya, 2015

**Figura 10**

*Efecto de la temperatura sobre un panel fotovoltaico.*



*Fuente:* Khatib & Elmenreich, 2016b

El cálculo de la afectación de los parámetros del módulo a partir de las condiciones STC se puede efectuar si se tienen los diferentes coeficientes de temperatura para  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{mpp}$  proporcionados generalmente por el fabricante, donde,

$T_M$  = Temperatura del módulo

$\alpha/\beta T$  = Coeficiente de temperatura

$A_M$  = Área del módulo

$$V_{oc}(T_M, G_{STC}) = V_{oc} + \frac{\alpha V_{oc}}{\beta T} (STC)(T_M - T_{STC}) \quad (4)$$

$$I_{sc}(T_M, G_{STC}) = I_{sc} + \frac{\alpha I_{sc}}{\beta T} (STC)(T_M - T_{STC}) \quad (5)$$

$$P_{mpp}(T_M, G_{STC}) = P_{mpp} + \frac{\alpha P_{mpp}}{\beta T} (STC)(T_M - T_{STC}) \quad (6)$$

Finalmente, una aproximación al valor de la eficiencia se puede obtener considerando los coeficientes de temperatura definidos en la tabla 5 e incorporando la ecuación (3) de acuerdo a la

TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

tecnología a evaluar y definido como la relación de reducción de la eficiencia del módulo por cada °C de incremento de la temperatura de celda (Tiwari & Swapnil, 2010):

$$\eta(T_{celda}, G) = \eta(STC) * (1 - \beta / \eta T (T_{celda} - 25^\circ C)) \quad (7)$$

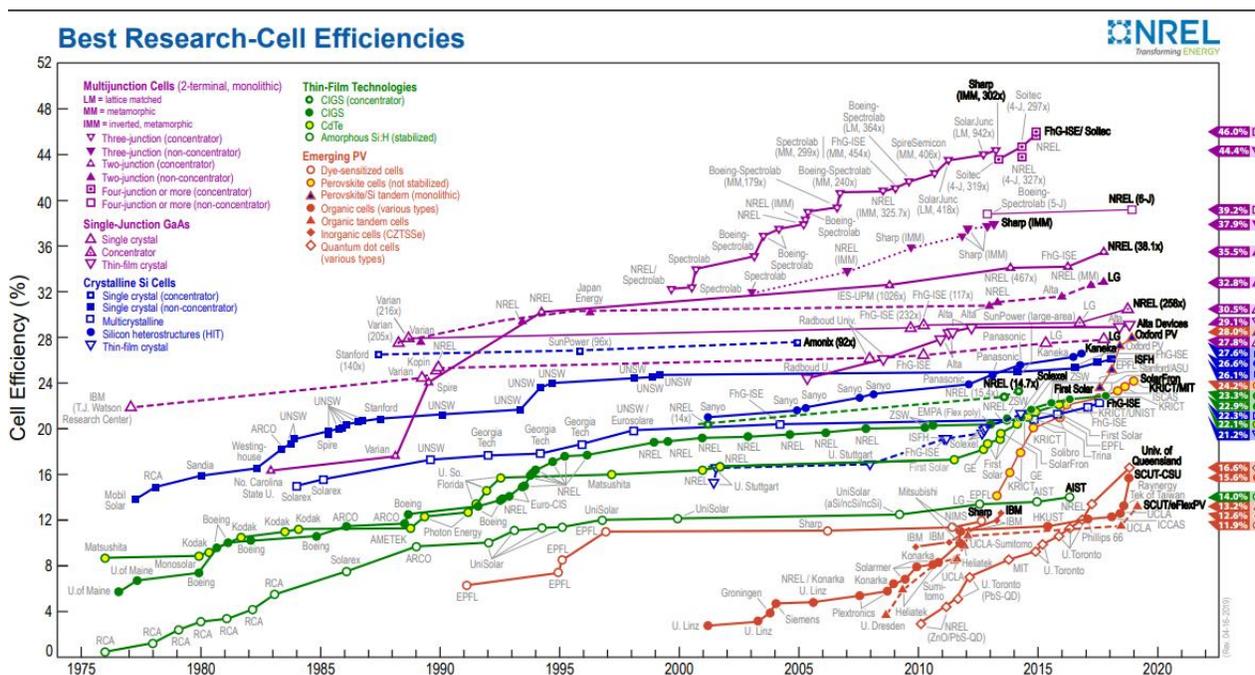
La dependencia de la irradiancia está implícita en  $T_{celda}$ .

9.4 Tipos de Celdas.

El desarrollo tecnológico en la manufactura de celdas fotovoltaicas ha sido promovido por la investigación en nuevas estructuras y métodos de fabricación, lo cual ha llevado al uso de nuevos compuestos y técnicas hasta llegar a una fase experimental de cuarta generación mediante el uso de nanotecnología y materiales especiales, en la figura 11 se puede observar la evolución y el desarrollo de células fotovoltaicas y sus eficiencias y en la tabla 6 se detalla en resumen las opciones para su diseño y construcción.

Figura 11

Eficiencia de conversión de tecnologías fotovoltaicas (2020).



Fuente: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

**Tabla 6**

*Resumen opciones de diseño y construcción de celda solares de Silicio.*

Proceso	Opciones
Producción de lingotes de Silicio	Reactor Siemens Reactor de lecho fluidizado (FBR) Grado metalúrgico actualizado (UGM)
Dopaje	Tipo n Tipo P
Cristalización	Proceso/material -mono-FZ (método zona-flotante monocristalino) -mono-Cz (método Czochralski monocristalino) -Crecimiento mono epitaxial (sobre sustrato temporal o permanente) -Polifundido (policristalino) poli EFG (crecimiento de película con borde definido) -Crecimiento de cintas sobre soporte)
Formación de oblea	Corte Crecimiento alimentado por película Desprendimiento
Formación de los emisores	Formato: cuadrado, pseudo-cuadrado, rectangular.
Pasivación	Difusión, implantación de iones, deposición de finas capas dopadas.  – Campo posterior superficial (BSF e.g. aluminio) – PERC (Célula posterior de emisor pasivado) – PERT (Emisor pasivado y parte posterior totalmente difusa) – PERL (Emisor pasivado y parte posterior con difusión local) – Tecnología multijuntura (HJT)
	Procesos: difusión, implantación de iones, deposición de capas dopaje fino

---

	Materiales: AlSi, SiNx, SiOx, aSi, Al2O3
Textura antirreflejos	-Piramidal aleatoria (por grabado alcalino de células mono) -Isotrópico (por grabado ácido de obleas poli) -Piramidal invertido (por grabado enmascarado) -puntas aleatorias (por grabado de iones reactivos)
Revestimiento antirreflejo	Diseño: Simple/doble revestimiento Materiales: SiNx, SiOx
Metalizado	Diseño: contactos frontales y traseros (fbc) o contactos traseros (bc) Aplicación: serigrafía, galvanizado, deposición al vapor
Lados activos	Una sola cara o bifacial

---

Fuente: Adaptado de (Wirth, Harry, et al., 2016).

#### **9.4.1 Celdas de primera generación.**

Son fabricadas mediante un proceso de difusión con obleas de silicio el cual tiene una banda de energía indirecta de 1.12 eV (electron-voltio), La fabricación de células monocristalinas implica un alto costo debido al proceso de purificación del silicio en cristales únicos. Para purificar el silicio, la grava de cuarcita (silicio de alta pureza), se funde y se reduce utilizando un lecho de carbono a una temperatura superior a 1800 °C; este proceso hace que el silicio tenga una pureza del 98 - 99% y se denomina silicio de grado metalúrgico (MGS). El MGS se muele y reacciona con ácido clorhídrico a 300 °C para producir triclorosilano (TCS). El TCS se calienta a 1100 °C en una atmósfera de hidrógeno para hacer silicio de grado electrónico (EGS); este proceso final hace que el silicio tenga una pureza del 99,9999999% (Smets et al., 2015).

Para la producción de silicio monocristalino se usa un proceso llamado Czochralski, donde una pequeña semilla de silicio monocristalino se inserta en EGS fundido a una

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

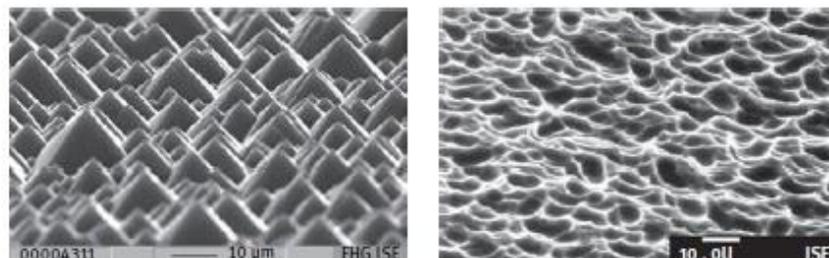
temperatura superior a 1700 °C. La semilla se retuerce continuamente y se extrae lentamente del silicio fundido, lo que permite que los átomos de silicio se adhieran a la semilla y se dispongan en una sola red cristalina; esto forma un lingote uniforme y único de silicio cristalino. Las obleas de silicio se cortan del lingote. Estas obleas se alisan a partir del corte puliéndolas química y mecánicamente. El silicio policristalino se fabrica vertiendo silicio fundido en un molde y dejándolo enfriar. El silicio resultante no tiene una estructura reticular general, pero el lingote producido tiene grandes granos de cristalinidad en columna. El lingote se sigue cortando y tratando como el lingote de silicio monocristalino, excepto que la parte inferior y superior del lingote se eliminan antes de cortarlo debido a la escasa cristalinidad en los bordes. El proceso de fundición es mucho más barato y simple que el método Czochralski utilizado para el crecimiento de un solo cristal.

Esta primera generación es actualmente la tecnología dominante en la producción mundial. Dependiendo de la calidad cristalina del Silicio (figura 12), se clasifica como:

- Si Monocristalino: Silicio de muy alta calidad cristalina, al ser una sola pieza. Eficiencia entre 15-26%.
- Si Policristalino: Silicio de menor calidad generado en un proceso más económico. Está constituido por diferentes cristales, lo que da lugar a la denominada frontera de granos que son zonas defectuosas. Eficiencia entre el 10-22%
- Si Amorfo: Silicio no cristalino, de mucha menor calidad estructural. Eficiencia 5-14%.

**Figura 12**

*Textura anisotropica obtenida por grabado alcalino sobre oblea de Si-Cristalino (Izq) y textura isotropica de grabado acido sobre obleas de Silicio-policristalino.*

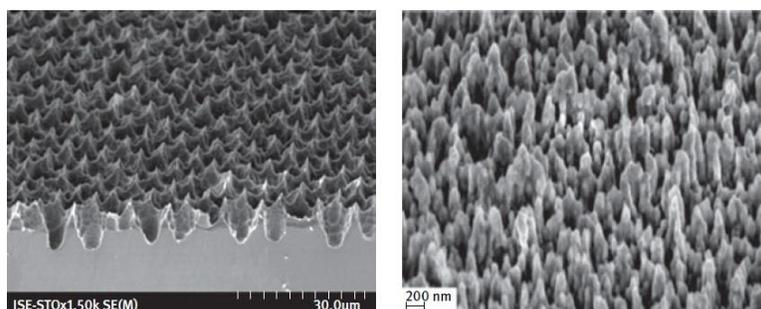


*Fuente:* Wirth, Weiß, & Weismeier, 2016

Se han utilizado nuevos procedimientos de fabricación que mejoran la textura de las celdas policristalinas para hacerlas más antirreflejantes, como el texturizado de plasma (seco), la textura de panal y el grabado reactivo de iones (figura 13). La textura de panal utilizando fotolitografía, la litografía de nano impresión o el enmascaramiento de inyección de tinta reduce la reflectancia de la superficie en un 6% aproximadamente. El grabado de iones puede llegar a reducir la reflectancia por debajo del 20% creando una estructura a nano escala tipo aguja que dispersa los rayos entrantes extendiendo sus trayectorias y mejorando su absorción.(Wirth, Weiß, et al., 2016).

**Figura 13**

*Textura panal sobre obleas de Si-poli por litografía de nano impresión (Izq). Grabado reactivo de Iones (Der).*



*Fuente:* Wirth, Weiß, & Weismeier, 2016

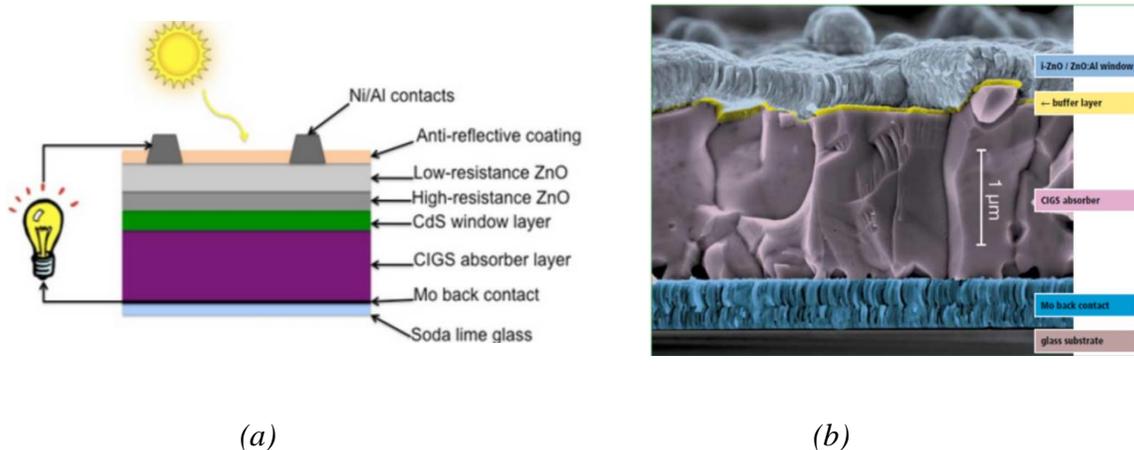
#### **9.4.2 Celdas de segunda generación.**

Una diferencia fundamental entre estas celdas y las de Silicio de primera generación es su estrecha banda de energía directa, estas celdas se fabrican a partir de capas epitaxiales o capas delgadas, mucho más finas que la celda de Si, entre los 2-100 micrómetros. Esta característica se debe a que ciertos materiales pueden absorber la radiación solar usando espesores mucho más pequeños, una de las grandes ventajas de este tipo de celdas es su flexibilidad. En esta generación se encuentran las celdas de capa delgadas de silicio amorfo, CdTe (Teluro de Cadmio), CIS (Cobre, Indio, Selenio). y CIGS (Cobre, Indio, Galio, Selenio). Las celdas de CIGS tiene banda de energía directa la cual se puede ajustar de acuerdo a la relación de Cu respecto al (In + Ga) y a la relación de In al Ga (Smets et al., 2015).

En la figura 14 se muestra la estructura básica de este tipo de celda la cual tiene un sustrato de vidrio típicamente vidrio sodocálcico debido a que el sodio se difunde en la capa de CIGS y aumenta la conductividad y reduce la formación de defectos en la red. El molibdeno (Mo) se utiliza como contacto posterior para el flujo de energía. La capa de CIGS se deposita en el Mo mediante deposición física por evaporación (PVD, es una tecnología de recubrimientos de capas finas de decenas de nanómetros a micras que se obtienen por evaporación en vacío). Una fina capa de CdS se deposita entonces en la capa de CIGS por deposición química en baño (CBD). Tanto la PVD como la CBD deben realizarse a temperaturas superiores a 350 °C para asegurar la cristalinidad. Una bicapa de ZnO de alta y baja resistencia se pulveriza en la célula como óxidos conductores transparentes. Finalmente, se añaden contactos de níquel/aluminio (Ni/Al) para el flujo de energía. Por último, se agrega una capa antirreflectante de MgF<sub>2</sub> para maximizar la absorción de los fotones que golpean la célula.

**Figura 14**

(a) Estructura de una celda solar de CIGS. (b) Imagen de laboratorio estructura CIGS.



Fuente: Barron A. R., Oliva-Chatelain B. L. Second generation thin film solar cell (2019).

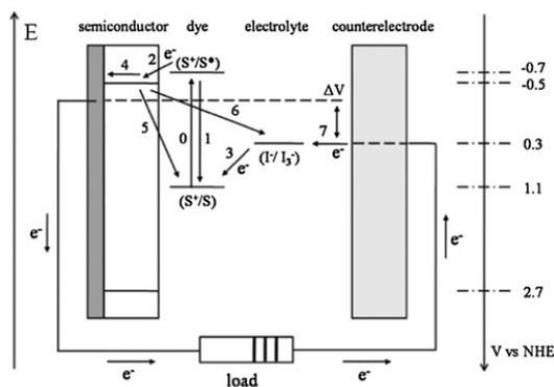
<http://cnx.org/content/m41217/latest/>. Praveen & Vijaya Ramaraju, 2017

### 9.4.3 Celda de tercera generación.

Difieren de las celdas base de materiales semiconductor de generaciones anteriores, ya que realmente no presentan la tradicional unión P-N para separar los portadores de carga fotogenerados. Entre ellas aún en desarrollo están las celdas solares de tintas sensibilizadas (Dye solar cells): Su estructura se basa en dos electrodos (compuesto y simple) y un tinte que genera electrones al contacto con la luz (figura 15). El electrodo simple es un vidrio conductor y el compuesto está constituido por nanocristales de dióxido de titanio (nc-TiO<sub>2</sub>). La luz pasa a través del electrodo simple y el tinte del electrodo compuesto absorbe la luz excitando los electrones para pasar desde el tinte a la banda de conducción del TiO<sub>2</sub>.

**Figura 15**

*Principio de funcionamiento de celda de tinta sensibilizada.*



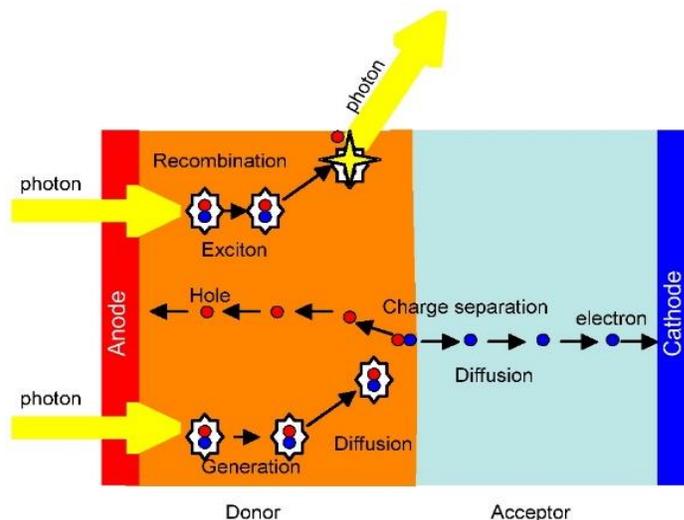
*Fuente:* Yang, 2017

Celdas solares orgánicas o de Polímeros que fueron desarrolladas para ser aún más flexibles y compuestas completamente de materiales orgánicos, estas pueden tener una estructura de dos capas o una estructura de gran volumen y heterogeneidad. La figura 16 ilustra el mecanismo de una célula solar orgánica. La capa activa podría estar compuesta por unos pocos materiales diferentes: pequeñas moléculas orgánicas, polímeros conjugados o combinaciones de moléculas y polímeros.

La célula está hecha de un electrodo de aluminio y vidrio conductor ITO con la capa activa entre los dos materiales con amortiguadores para mejorar el transporte de la carga. Los fotones son generalmente absorbidos en el material donante para producir excitones singlete. Estos excitones migran hacia el material receptor y se separan en electrones y agujeros en la interfaz. Los electrones y los agujeros se difunden a través del material receptor y el material donante respectivamente hasta que llegan a los electrodos. Los materiales típicos para estas células son: ftalocianinas, fullereno (C60), oliotrofenos o polímeros.

**Figura 16**

*Principio de funcionamiento celda solar orgánica.*



*Fuente:* Barron A. R., Oliva-Chatelain B. L. Second generation thin film solar cell (2019).

<http://cnx.org/content/m41217/latest/>

#### **9.4.4 Celdas Multijuntura o en Tandem.**

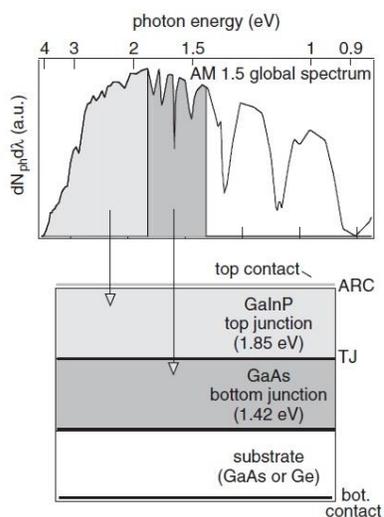
Una célula tándem, por definición, consiste en al menos dos uniones p-n con células compuestas de materiales que absorben diferentes energías fotónicas. La célula superior absorbería las energías más altas mientras que la inferior absorbería las energías más bajas que no fueron absorbidas por la célula superior Figura 17. La célula tándem tendría entonces una mayor eficiencia ya que podría absorber más fotones del espectro solar para la conversión de energía. Esta tecnología ya se está utilizando en las células solares en aplicaciones de soporte de energía en el espacio. Las células solares tándem están típicamente hechas de compuestos de elementos de los grupos III y V de la tabla periódica. Ejemplos de estos compuestos son: arseniuro de galio (GaAs), fosfuro de indio (InP), antimonio de galio (GaSb), fosfuro de galio-indio (GaInP) y arseniuro de galio-indio (GaInAs). Estas células solares tienen la eficiencia más alta reportada, 43%, cuando se usa una célula solar de tres células, pero usan metales raros y son

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

extremadamente costosas de fabricar, por lo que no son prácticas para su uso en la Tierra (Smets et al., 2015).

**Figura 17**

*Principio de funcionamiento celda solar Multijuntura.*



*Fuente:* Luque & Hegedus, 2011

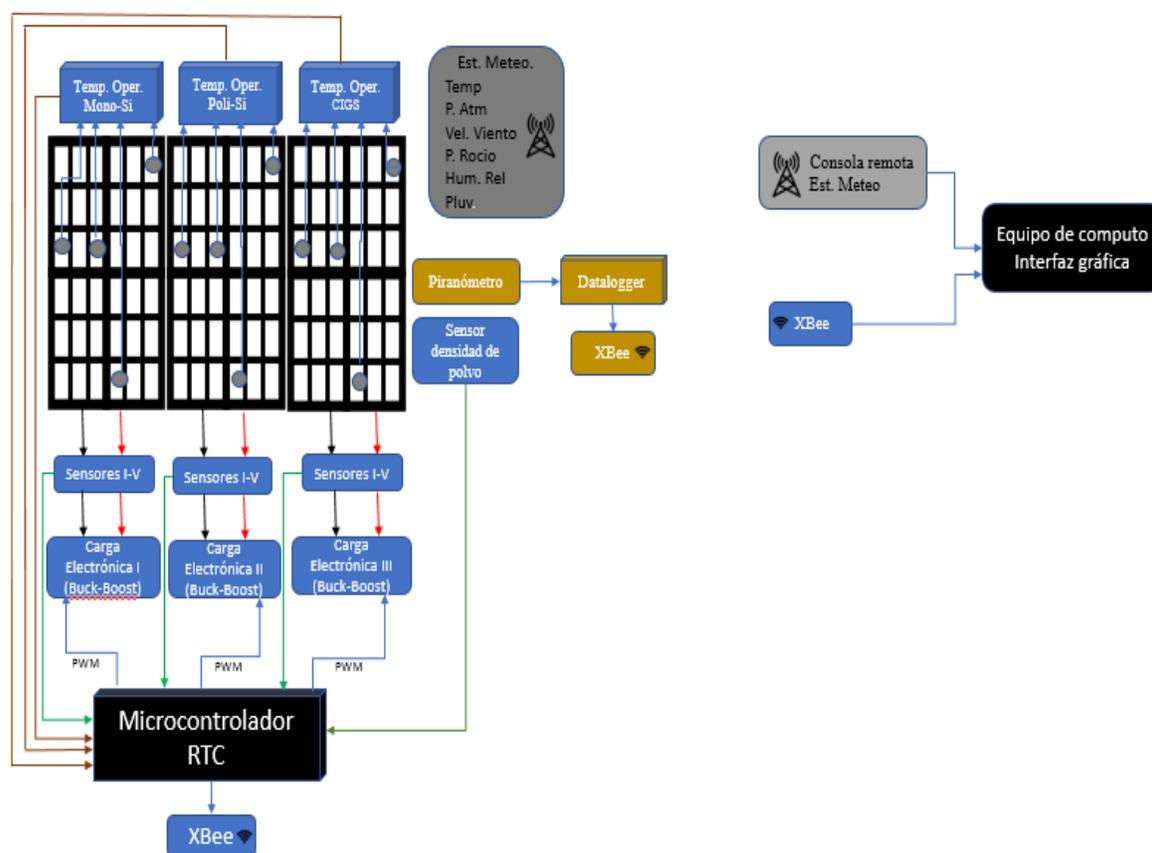
## 10. Capítulo 2: Diseño del sistema de mediciones IN SITU

### 10.1 Generalidades del sistema de medición

Este sistema de medición de tecnologías fotovoltaicas fue diseñado de tal manera que se pudieran monitorear y registrar la mayor cantidad de variables a las que se encuentra expuesta una planta solar en operación, de tal manera se dividieron las funciones de medición como se observa en la figura 18.

#### Figura 18

*Diagrama de bloques sistema de medición.*



*Fuente:* Elaboración propia.

Las tecnologías fotovoltaicas seleccionadas para este estudio se encuentran descritas a continuación en la tabla 7 de acuerdo a fichas técnicas de los fabricantes:

**Tabla 7***Características técnicas paneles solares*

	RNG-100D-S	KD135SX-1PU	STO-135
Fabricante	Renogy	Kyocera	Stion
Solar Cell Type	Si-Monocristalino	Si-Policristalino	Cu-In-Ga-Se
Number of Cells	33	36	N.A
Dimensions (mm)	1190 X 500 X 35	1500 X 668 X 46	1656 X 656 X 35
Weight (kg)	7.5	12.5	16.8
Maximum Power at STC* (W)	100	135	135
Optimum Operating Voltage (Vmp)	16	17.7	58.2
Optimum Operating Current (Imp)	6.25	7.63	2.32
Open Circuit Voltage (Voc)	20	22.1	77.4
Short Circuit Current (Isc)	6.45	8.37	2.62
Module Efficiency (%)	16.81	13.47	12.4
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	47 +- 2 C	47.9 C	45.6 C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.44% / C	-6.14x10 <sup>-1</sup> (W/C)	-0.26% / C
Temperature Coefficient of Voc	-0.30% / C	-0.80x10 <sup>-1</sup> (V/C)	-0.24% / C
Temperature Coefficient of Isc	0.04 % / C	5.02x10 <sup>-3</sup> (A/C)	-0.004% / C

*Fuente:* Elaboración propia

## 10.2 Medición de la radiación solar y data logger

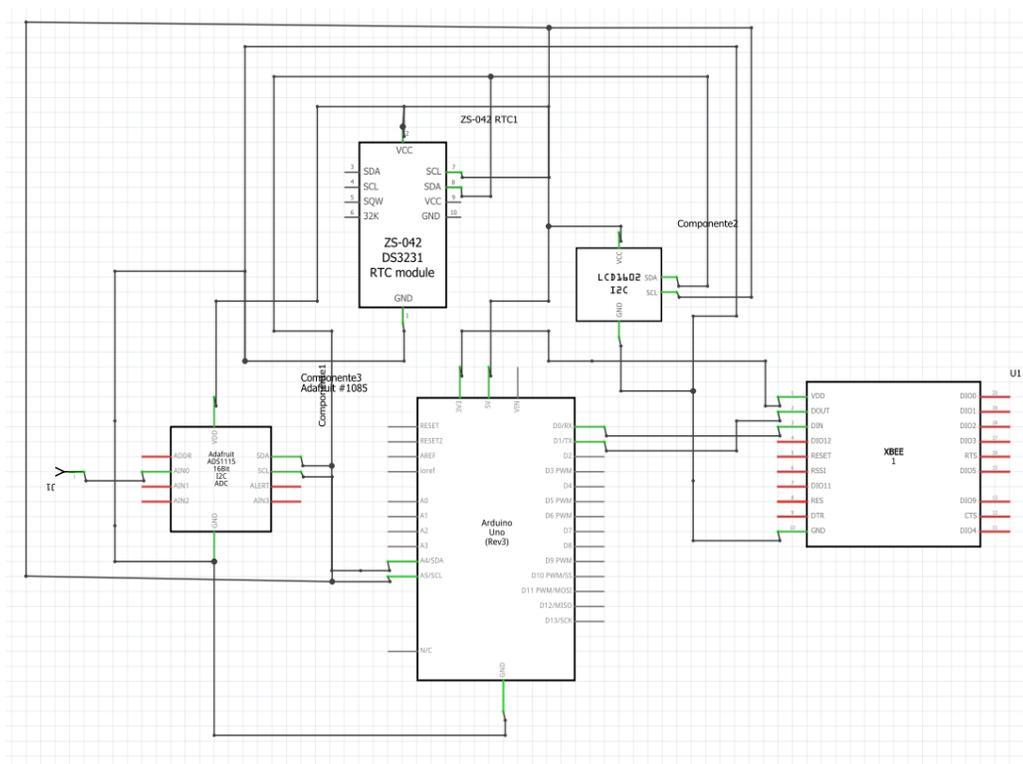
La medición de radiación solar sobre el plano inclinado de los paneles se efectuó con un instrumento Hukseflux SR05-D1A3 el cual entrega niveles de tensión de 0-1VDC para un rango de medición de 0-1600 W/m<sup>2</sup> esta señal análoga fue procesada mediante un registrador de datos

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

diseñado a partir de una placa arduino UNO, integrando un convertidor Análogo/digital de 16 bits, un reloj en tiempo real, un display LCD de 2X16 y un módulo Xbee para la transmisión de los datos. Este registrador de datos tiene la capacidad de presentar la irradiancia solar localmente sin necesidad de acudir al computador remoto o a conexiones externas. Además de estos módulos fue incluido en el diseño un circuito de regulación de voltaje y control de temperatura (figura 19).

**Figura 19**

*Diagrama esquemático Data Logger.*



*Fuente:* Elaboración propia.

La trama ensamblada entrega los siguientes datos: Fecha, hora, nivel de radiación promedio por minuto, nivel máximo y mínimo de radiación y desviación estándar del mismo periodo de tiempo.

### 10.3 Estación meteorológica

La estación meteorológica empleada es una Davis Vantage PRO 2 (figura 20) la cual se encarga de recolectar los datos de temperatura ambiente, velocidad de viento, dirección de viento, pluviosidad, presión barométrica, punto de rocío y humedad. Estos datos son transmitidos inalámbricamente por la misma estación hasta una consola remota que se conecta con una interfaz USB al computador.

#### Figura 20

Estación meteorológica Davis VUE. <https://www.davisinstruments.com/solution/vantage-vue/>.



Fuente: <https://www.davisinstruments.com/solution/vantage-vue/>

Mediante el software WeatherLink de DAVIS es posible configurar el intervalo de tiempo de registro de los datos y tiene una capacidad de almacenamiento de hasta seis meses. Estos datos se pueden descargar en archivos planos de texto para su posterior procesamiento.

### 10.4 Circuitos y sensores

#### 10.4.1 Medición de tensión y corriente

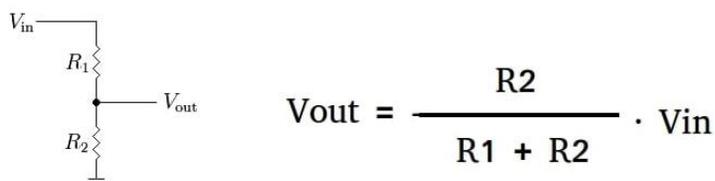
La medición de los parámetros de tensión y corriente se efectuaron mediante el diseño de otra placa donde se integraron sensores de voltaje y corriente para cada uno de los paneles de

muestra.

Para la medición de tensión se usó divisor de voltaje (figura 21) con el fin de acondicionar los niveles de tensión a los límites de los puertos de entrada del microcontrolador  $V_{out} = 5VDC$ .

### Figura 21

*Divisor de voltaje*



*Fuente:* Elaboración propia.

Para la medición de corriente se usaron sensores de corriente de efecto Hall ACS712-5 A (figura 22) para el panel de CIGS y para los paneles mono-Si y Poli-Si se usaron sensores ACS712-10 A.

### Figura 22

*Sensor de corriente ACS712.* [http://www.hotmcu.com/wiki/ACS712\\_Current\\_Sensor](http://www.hotmcu.com/wiki/ACS712_Current_Sensor)



*Fuente:* [http://www.hotmcu.com/wiki/ACS712\\_Current\\_Sensor](http://www.hotmcu.com/wiki/ACS712_Current_Sensor)

#### 10.4.2 Carga electrónica variable y Curva I-V

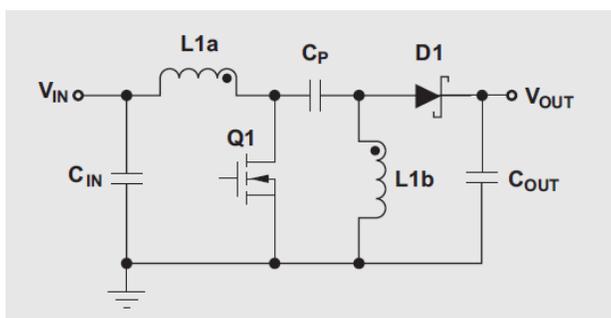
Para trazar la curva de potencia de cada panel fotovoltaico se diseñó una carga electrónica variable de tipo convertor DC-DC Buck-Boost SEPIC de inductor acoplado operando en modo continuo de conducción, esta carga electrónica tiene el propósito de emular una resistencia variable, la cual es controlada por una señal PWM. Considerando los parámetros de la ficha técnica de cada uno de los paneles se determinó que para el panel mono-Si y poli-Si se podía

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

implementar el mismo diseño electrónico y un diseño distinto para el panel de CIGS teniendo en cuenta que las variables de  $I_{cs}$  y  $V_{oc}$  son muy diferentes a las otras dos tecnologías.

**Figura 23**

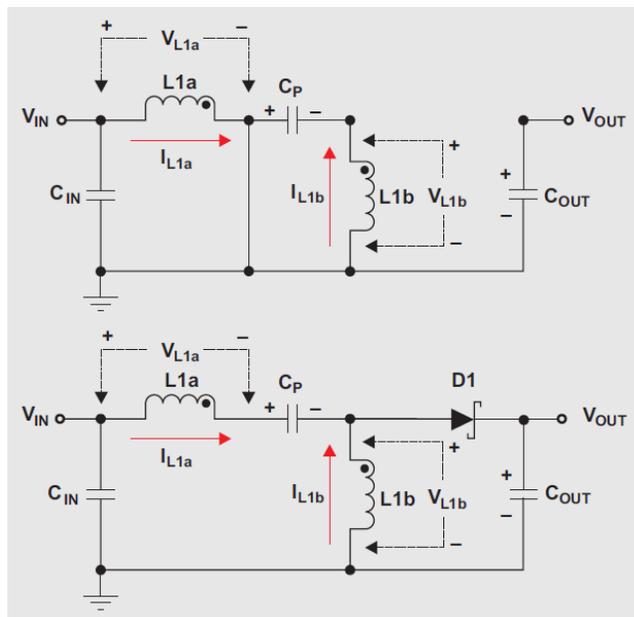
*Topología SEPIC.*



*Fuente: Texas instrument (2013)*

**Figura 24**

*Flujo de corriente conversor SEPIC. Arriba Q1 encendido, Abajo Q1 Apagado.*



*Fuente: Texas instrument (2013)*

El diseño con inductor acoplado proporciona ventajas como la disminución de tamaño y peso al emplear un solo núcleo para las dos inductancias además de la mejora del rendimiento

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

del sistema al reducir el rizado de la corriente de entrada debido al acoplamiento magnético entre las dos inductancias del convertidor ( $L_{1a}$  y  $L_{1b}$  en la figura 23).

Su funcionamiento se debe considerar en dos momentos cuando el interruptor  $Q_1$  se encuentra encendido y apagado; las corrientes que fluyen a través del circuito y sus componentes se muestran en la parte superior e inferior respectivamente de la figura 24. Cuando  $Q_1$  está apagado, el voltaje en  $L_{1b}$  debe ser  $V_{OUT}$ . Dado que  $C_{IN}$  se carga al nivel de  $V_{IN}$ , el voltaje en  $Q_1$  cuando  $Q_1$  está apagado es  $V_{IN} + V_{OUT}$ , por lo que el voltaje en  $L_{1a}$  es  $V_{OUT}$ . Cuando  $Q_1$  está encendido, el condensador  $C_P$ , cargado a  $V_{IN}$ , está conectado en paralelo con  $L_{1b}$ , por lo que el voltaje en  $L_{1b}$  es  $-V_{IN}$ . Cuando  $Q_1$  está encendido, la energía se almacena en  $L_{1a}$  desde la entrada y en  $L_{1b}$  desde  $C_P$ . Cuando  $Q_1$  esta apagado, la corriente de  $L_{1a}$  continúa fluyendo a través  $C_P$  y  $D_1$ , y en  $C_{OUT}$  y la carga. Ambos  $C_{OUT}$  y  $C_P$  se recargan para que puedan proporcionar la corriente de carga y cargar  $L_{1b}$ , respectivamente, cuando  $Q_1$  se vuelve a encender.

La variación del ciclo de trabajo de la señal PWM es la que permite emular una resistencia variable para efectuar un barrido desde  $V_{oc}$  hasta  $I_{sc}$ , haciendo uso del Timer/Counter2 (TC2) del microcontrolador ATmega328p el cual es un timer de propósito general de 8 bits, así se tienen un total de 256 pasos para la modificación del ciclo de trabajo, en el presente proyecto se configuraron incrementos de dos pasos para obtener 108 pasos del ciclo de trabajo, estos corresponden a los puntos donde se efectúan las medidas de tensión y corriente para posteriormente ser graficadas. Los registros TCC2A/B permiten configurar el modo de operación y preescaler para definir la frecuencia de la señal a 31.372 Khz y mediante el registro OC2B se configura el ciclo de trabajo determinando un inicio y un fin y su respectivo incremento de paso.

En la tabla 8 se encuentran relacionados los elementos pasivos y activos de la placa de la

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

figura 25 empleados para el circuito de la carga electrónica estos se encuentran ajustados para soportar los niveles de tensión, corriente y modo de operación del convertidor.

**Tabla 8**

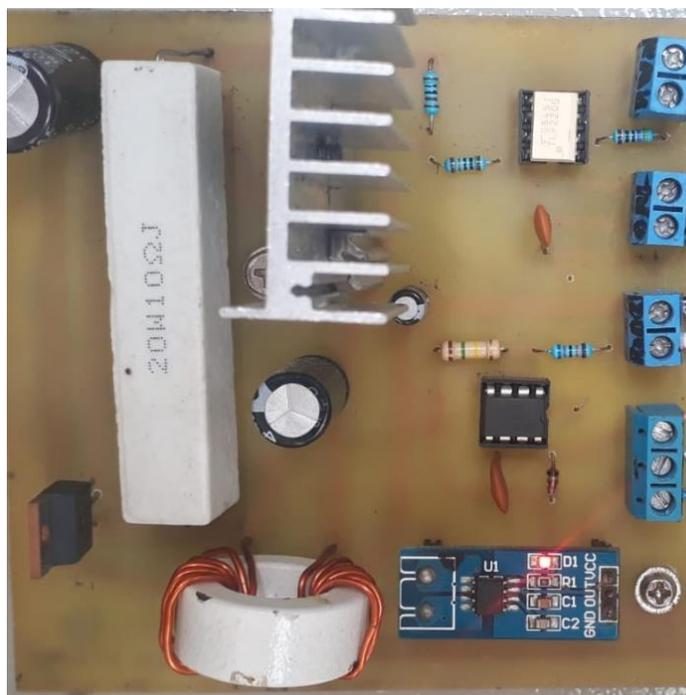
*Componentes empleados en los conversores SEPIC.*

COMPONENTE	MONO & POLI	CIGS
Cin	10 uF	10 uF
Q1	IRF640	IRF640
L1-L2	350 uH	2.3 mH
Cs	470 uF	470 uF
D1	MBRB20150CT	MBRB20150CT
Cout	1000 uF	2000 uF
R1	10 $\Omega$	50 $\Omega$

*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 25**

*Placa de la carga electrónica para el panel Si-C*



*Fuente:* Elaboración propia.

### 10.4.3 Temperatura de operación

Para monitorear la temperatura de cada panel se instalaron en cada uno de ellos cuatro

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

sensores de temperatura DS18B20 (figura 26) los cuales fueron fijados en la parte posterior en las ubicaciones mencionada en la figura 2 con cinta de cobre con el fin de permitir la mayor transferencia de calor hacia las sondas. Esta sonda maneja una resolución configurable de 9 a 12 bits, con diferentes modos de suministro de energía y con la ventaja de tomar la lectura e interpretarla directamente en el punto de medición entregando los valores medidos mediante bus 1-wire.

### **Figura 26**

*Sensor de temperatura DS18B20*



*Fuente:* [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sensor\\_DS18B20.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sensor_DS18B20.jpg)

Estas señales se integraron en un contenedor por cada panel donde se encuentra un circuito que se encarga de energizar las cuatro sondas y recibir los datos de temperatura para entregárselos al microcontrolador.

#### **10.4.4 Densidad de polvo**

La medición de densidad de polvo se efectuó mediante el sensor de polvo GP2Y1010AU0F (figura 27) el cual tiene como principio de funcionamiento un diodo led emisor y un detector el cual transforma la intensidad de luz recibida por la reflexión de las partículas que atraviesan el rayo de luz y se encarga de entregar un valor análogo proporcional a la cantidad de luz incidente.

### **Figura 27**

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

Sensor de polvo.



*Fuente:* <https://www.digikey.es/product-detail/es/sharp-socle-technology/GP2Y1010AU0F/1855-1012-ND/720164>

### 10.5 Trasmisión y procesamiento de datos

El microcontrolador al recibir los datos provenientes de los diferentes sensores, ensambla una trama de datos seriales que son entregados a un módulo Xbee S2C PRO (figura 28) de alta potencia el cual se encarga de transmitir los datos hasta el módulo receptor un Xbee S2C el cual entrega los datos mediante un puerto USB al computador donde se visualizan mediante la interfaz gráfica desarrollada en Labview.

#### Figura 28

*Xbee 2SC PRO.*



*Fuente:* <https://www.digi.com/products/models/xbp24cdmsit-001>

### 10.6 Diseño interfaz Gráfica

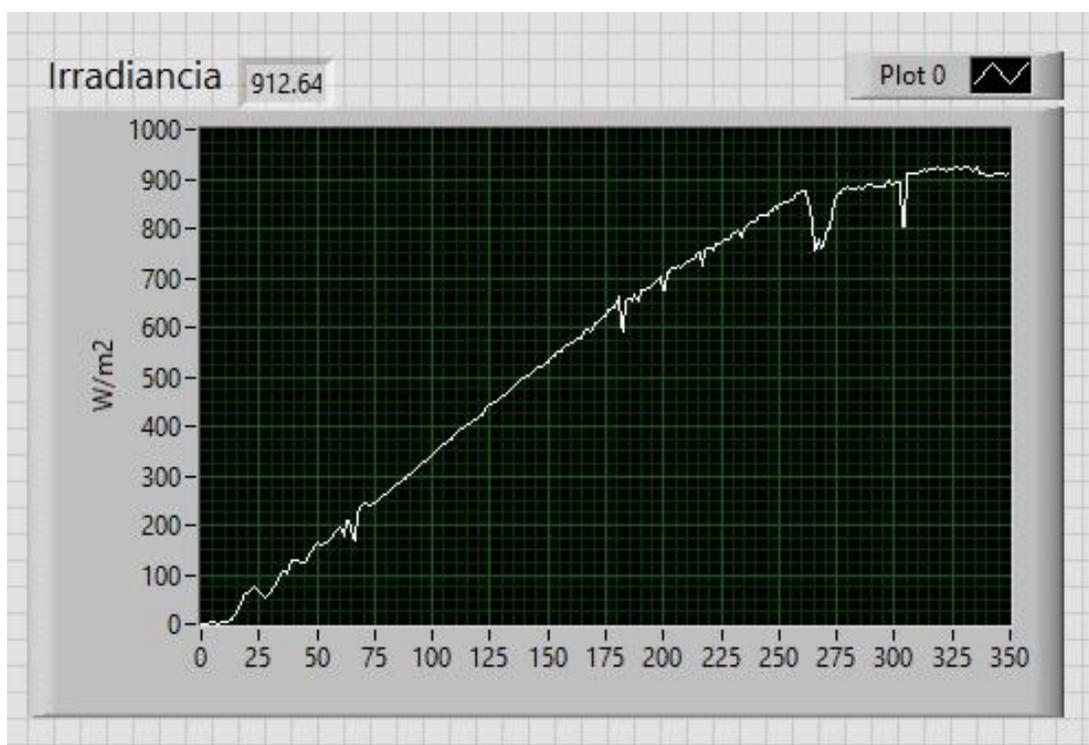
La interfaz gráfica se desarrolló sobre LabVIEW, el panel de presentación de datos se encuentra dividido en tres secciones así: la primera donde se visualizan los datos recibidos del piranómetro los cuales son transmitidos constantemente desde el Xbee asociado a este subsistema, estos datos son el promedio de 30 muestras por minuto y están

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

conformados por la fecha, la hora, la irradiancia, el valor máximo de la irradiancia, el valor mínimo de la irradiancia y la desviación estándar esta información pueden ser usados para su posterior análisis, en el panel (figura 29) solo se presenta el valor de la irradiancia cada minuto, así mismo son almacenados en el disco duro y como respaldo también se graban en una tarjeta SD en el lado remoto en el registrador de datos.

**Figura 29**

*Interfaz gráfica Irradiancia.*

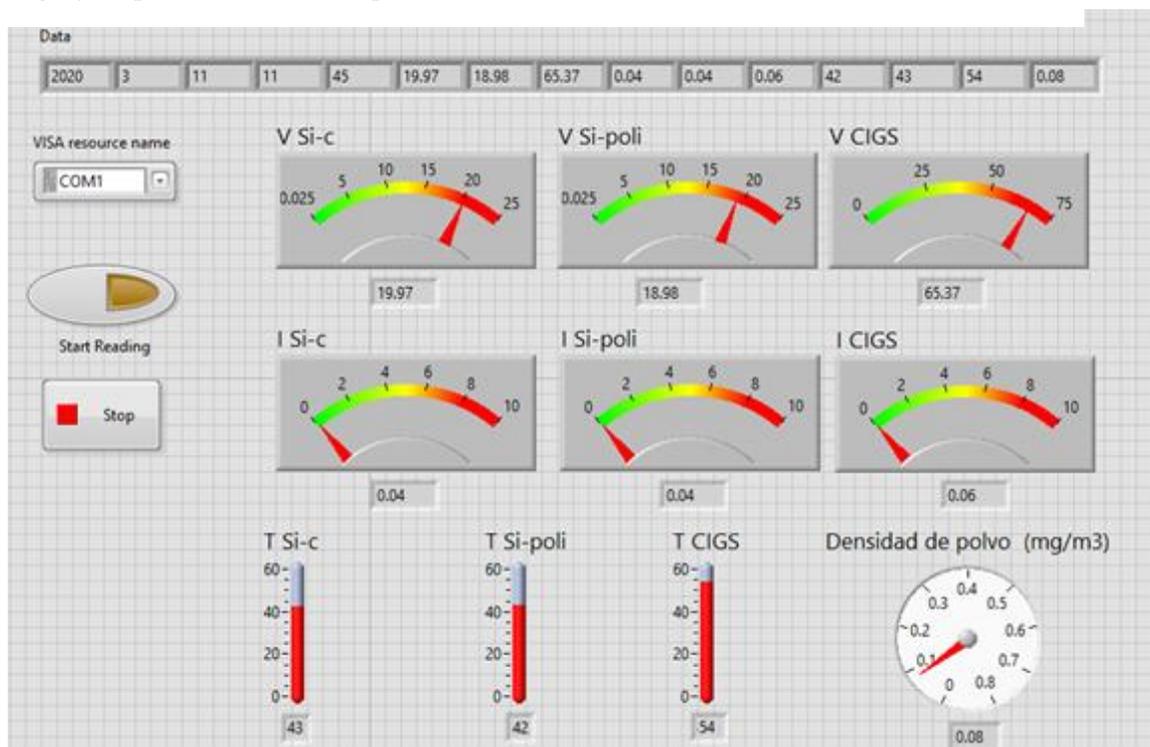


*Fuente:* Elaboración propia.

Una segunda sección (figura 30) donde se visualizan los datos enviados desde el Xbee asociado al subsistema de medición de variables en circuito abierto, cada minuto son transmitidos la fecha, la hora y el valor promedio de 30 muestras de la tensión, temperatura y densidad de polvo cada una de las tecnologías de paneles solares.

**Figura 30**

*Interfaz gráfica parámetros de los paneles en circuito abierto*



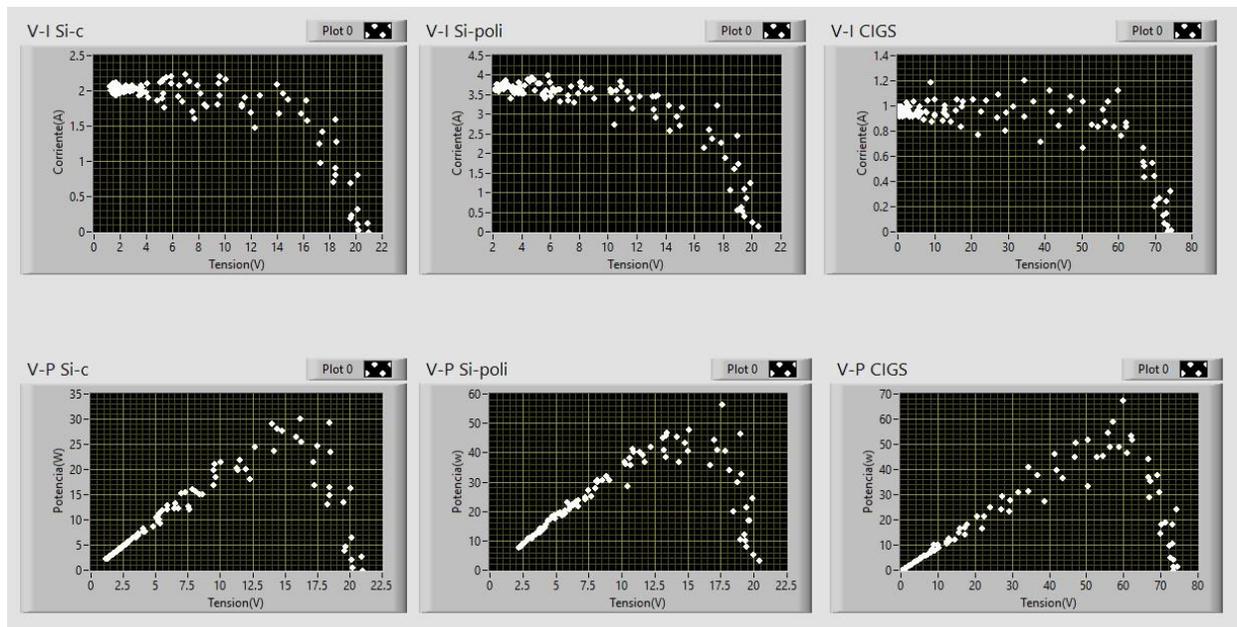
*Fuente:* Elaboración propia.

En el último panel (figura 31) se presentan las curvas V-I y V-P donde primero se capturan los datos se almacenan, luego son procesados y visualizados en esta interfaz gráfica.

El proceso empieza con la orden de “inicio” desde el Xbee remoto al microcontrolador encargado de ejecutar el programa de la carga electrónica detallado anteriormente en la sección 10.2.4, mediante estos gráficos se puede observar el comportamiento de cada uno de los paneles.

**Figura 31**

*Interfaz gráfica curvas I-V / P-V desarrollada en LabVIEW.*



*Fuente:* Elaboración propia.

La estación meteorológica cuenta con su propia consola de presentación de datos. Estos datos también pueden ser descargados mediante el software propietario de la estación meteorológica para su posterior análisis.

## 11. Capítulo 3: Análisis y evaluación de la eficiencia de los paneles fotovoltaicos

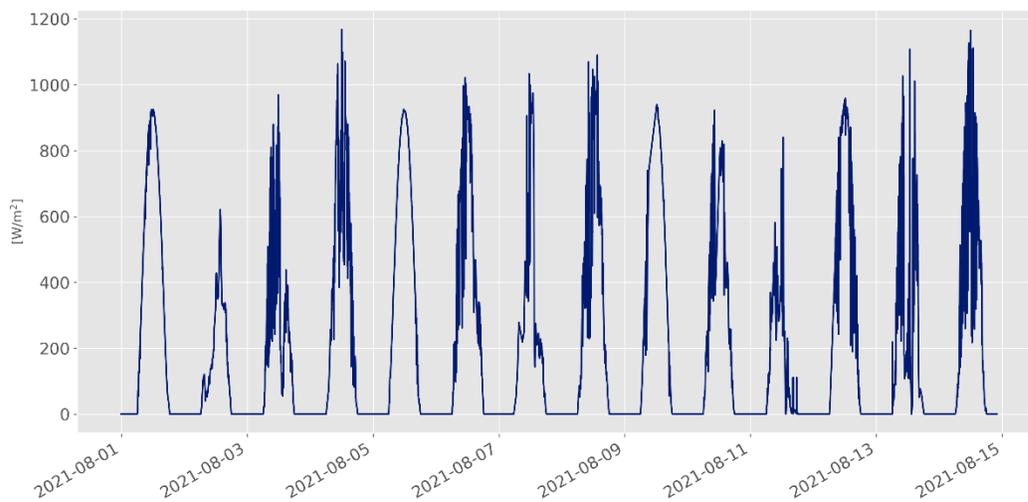
### 11.1 Datos meteorológicos recolectados

Los datos y gráficos presentados a continuación corresponden al lapso comprendido entre 01-08-2021 00:00 hasta el 14-08-2021 22:00:00.

Los niveles de irradiancia presentados en este periodo de tiempo (figura 32) registraron valores máximos de hasta  $1196 \text{ W/m}^2$ . También se puede Fuentar que durante este lapso hubo bastante nubosidad lo cual se manifiesta en las oscilaciones dentro del área de la curva característica.

#### Figura 32

*Irradiancia.*

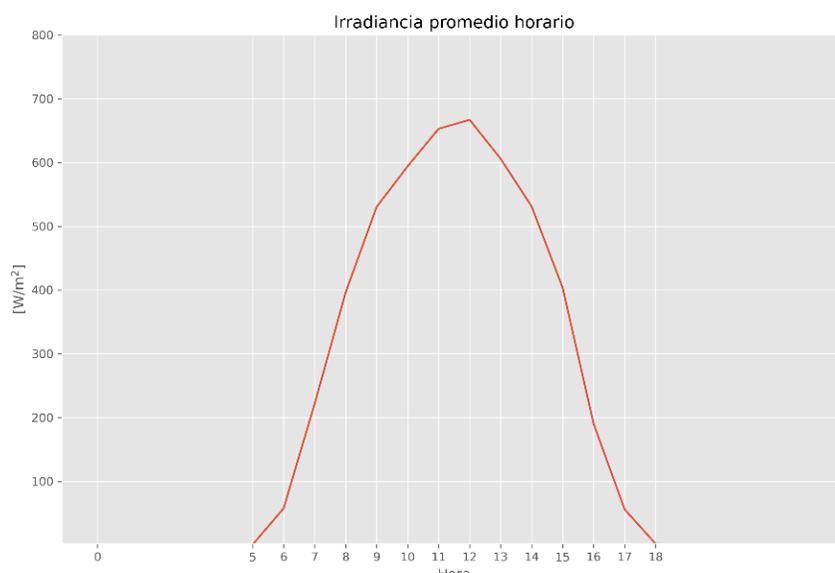


*Fuente:* Elaboración propia.

En cuanto a los valores promedio horarios en la figura 33 se observa el comportamiento característico con un valor promedio de  $667 \text{ W/m}^2$  registrando valores desde las 05:00 hasta las 18:00.

**Figura 33**

*Irradiancia promedio horario.*

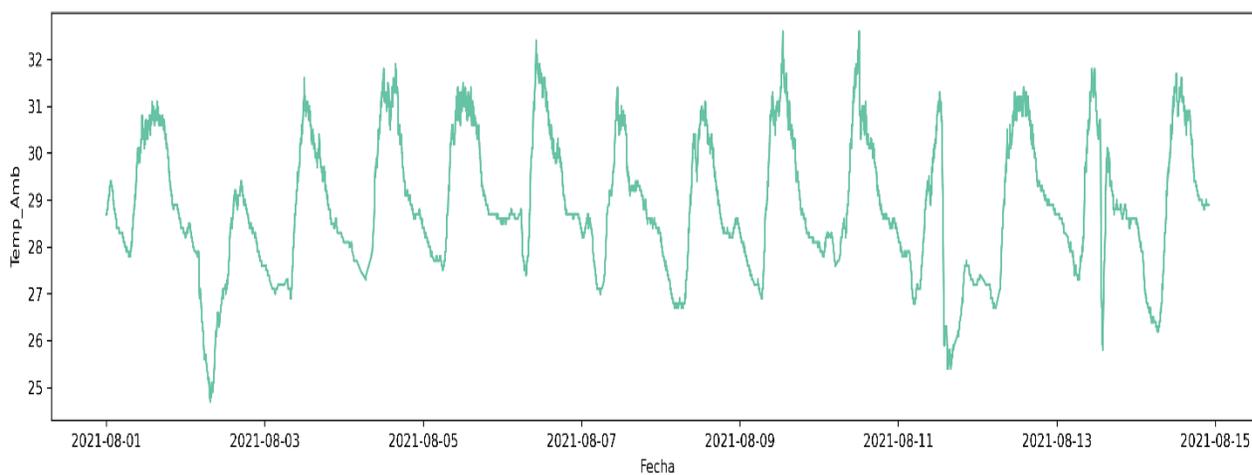


*Fuente:* Elaboración propia.

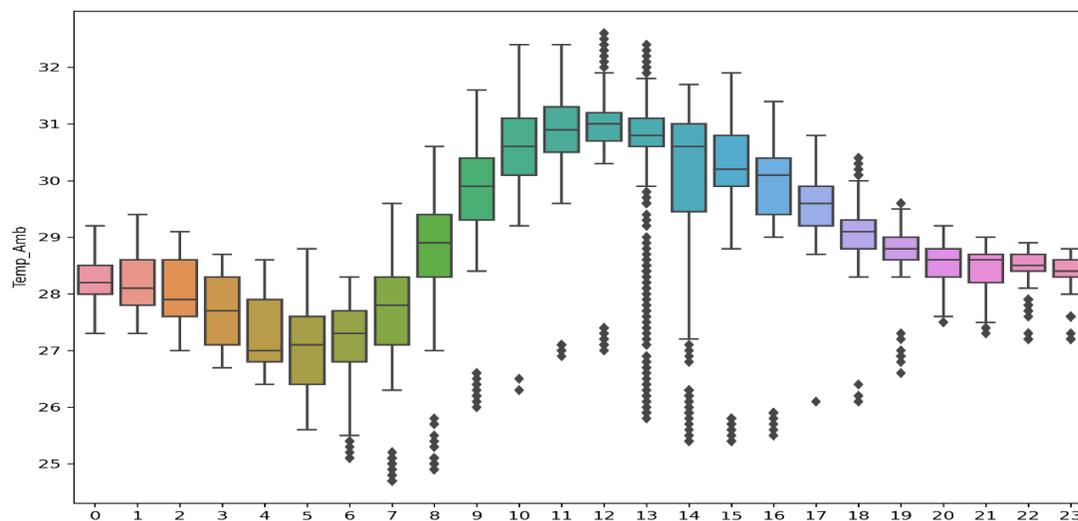
La temperatura ambiente (figura 34) muestra un comportamiento cíclico con un valor promedio general de 29°C y una variación entre los 24°C y los 33°C (figura 35), registrándose los valores más altos entre las 12:00 – 13:00.

**Figura 34**

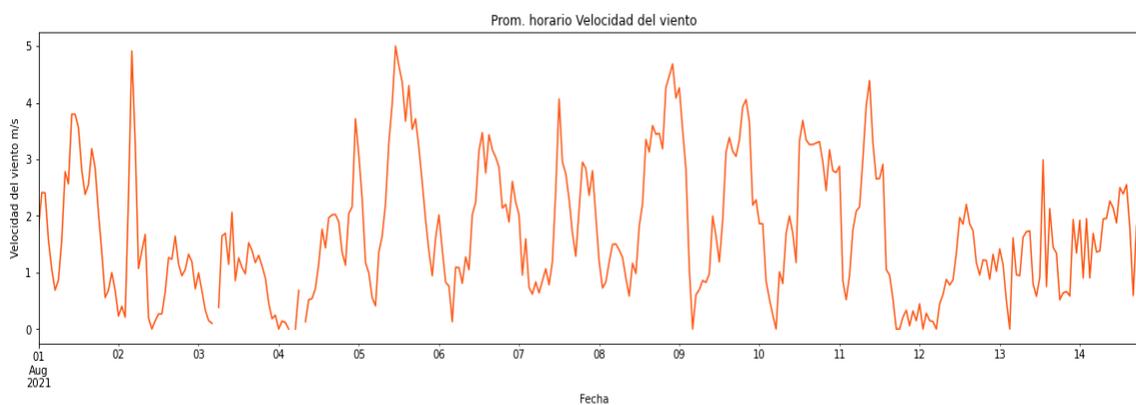
*Temperatura ambiente.*



*Fuente:* Elaboración propia.

**Figura 35***Temperatura ambiente promedio horario.**Fuente: Elaboración propia.*

En cuanto a la velocidad del viento (figura 36) se registraron valores instantáneos en el rango de los 0 a 7.6 m/s, donde los valores promedio más altos se dieron entre las 12:00 y las 18:00.

**Figura 36***Velocidad del viento promedios horarios.**Fuente: Elaboración propia.*

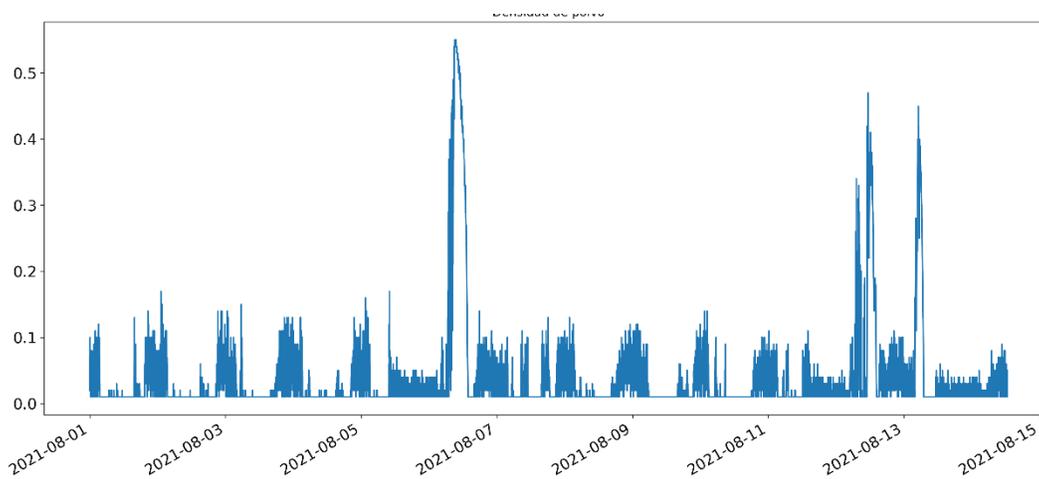
En cuanto a la densidad de polvo (figura 37) para el lapso estudiado los datos recolectados muestran poca variabilidad manteniéndose en niveles muy bajos, con unos pocos eventos

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

significativos considerando que el sensor puede registrar valores de hasta  $0.8 \text{ mg/m}^3$ . Por el breve tiempo de monitoreo de esta variable la condición de acumulación de polvo sobre los paneles no representó un cambio considerable en las variables eléctricas por estudiar.

### Figura 37

*Densidad de polvo.*



Fuente: Elaboración propia.

### 11.2 Datos recolectados de los paneles en circuito abierto

El monitoreo de la tensión en circuito abierto se efectuó continuamente entregando valores promedio cada minuto, en la figura 38 se observa la diferencia entre las tecnologías de Si y la de CIGS donde los niveles máximos de tensión de los paneles de silicio están alrededor de los 20VDC y la tensión del panel de capa fina de CIGS se encuentra sobre los 78VDC (tabla 9). Las oscilaciones presentadas son correspondientes con los niveles de irradiancia y temperatura.

### Tabla 9

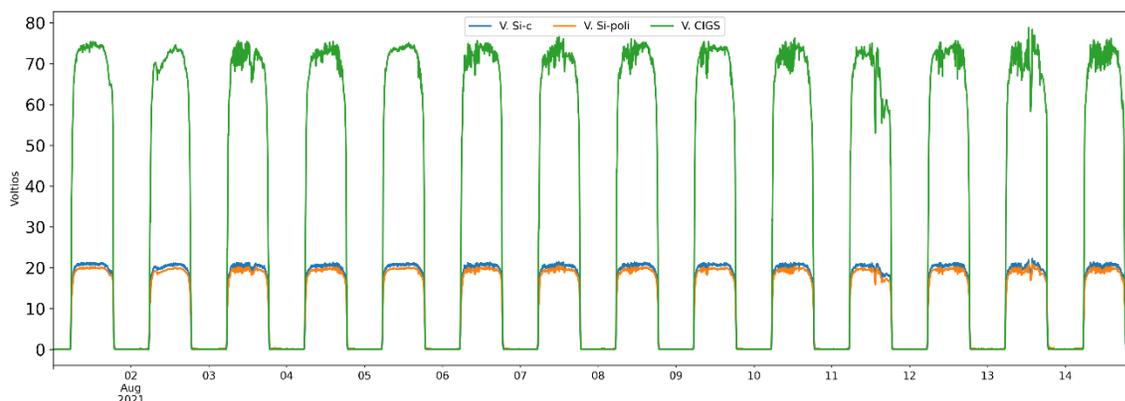
*Máxima tensión de circuito abierto*

VOC Max.		
Si-c	Si-poli	CIGS

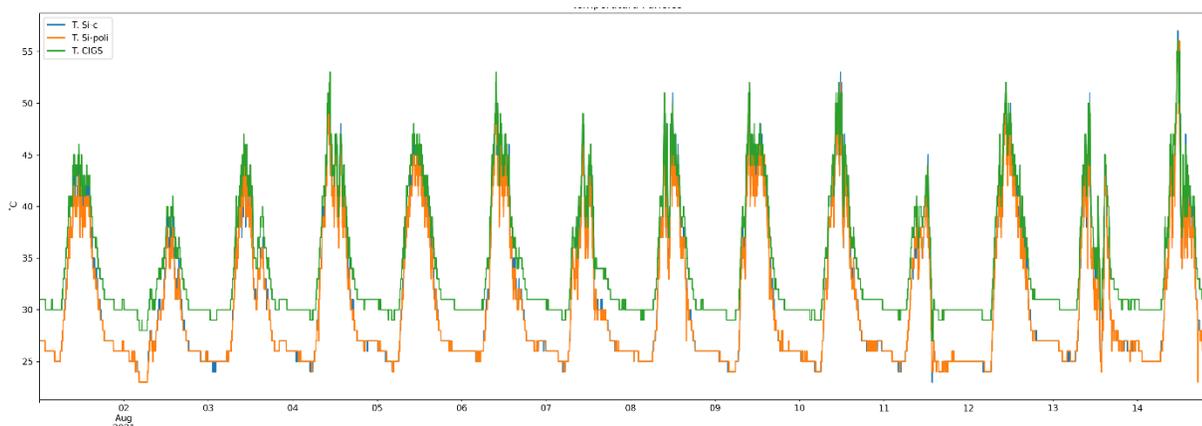
22.23

21.04

78.80

**Figura 38***Tensión de circuito abierto.**Fuente:* Elaboración propia.

De las tecnologías de Silicio, el panel monocristalino registró un valor de tensión más alto que el panel policristalino, en las fichas técnicas se indica que en condiciones STC el panel de Si-poli tiene un mayor nivel de tensión en circuito abierto, entonces, este comportamiento debe estar relacionado con la mayor tolerancia del panel de Si-C a la alta temperatura.

**Figura 39***Temperatura de operación de los paneles solares.**Fuente:* Elaboración propia.

La temperatura de operación de los paneles mostro un comportamiento similar en las

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

tecnologías de silicio las cuales se mantuvieron a temperatura cercanas con un grado de diferencia, en el caso del panel de CIGS la diferencia de temperatura siempre estuvo por encima aproximadamente en promedio 4 °C (figura 39) esto puede deberse a la construcción de este último donde el material encargado de soportar las capas superiores del panel es una estructura similar a un espejo y posiblemente debido a la luz reflejada por el manto asfáltico que cubre el piso donde se encuentra ubicada la plataforma de medición este panel retuvo más calor y registró niveles más altos. El comportamiento general de las temperaturas es correspondiente con las variaciones de la temperatura ambiente y los niveles de radiación a los que estaban expuestos.

Filtrando los datos para analizar solamente la franja horaria entre las 06:00 y las 18:00 se obtuvieron los valores de temperatura máxima y promedio relacionados en la tabla 10.

**Tabla 10**

*Temperatura máxima y promedio*

	<b>Si-c</b>	<b>Si-poli</b>	<b>CIGS</b>
<b>Max °C</b>	57	56	56
<b>Promedio °C</b>	35.36	34.94	38.12

*Fuente:* Elaboración propia.

Para analizar el comportamiento de las tecnologías estudiadas y la influencia de la temperatura y la irradiancia se filtraron los datos considerando todos los registros con un nivel de irradiancia entre los 900 a 920 W/m<sup>2</sup> el cual está representado por el diámetro y color del marcador dentro del gráfico, la tensión en circuito abierto sobre el eje X y la temperatura sobre el eje Y.

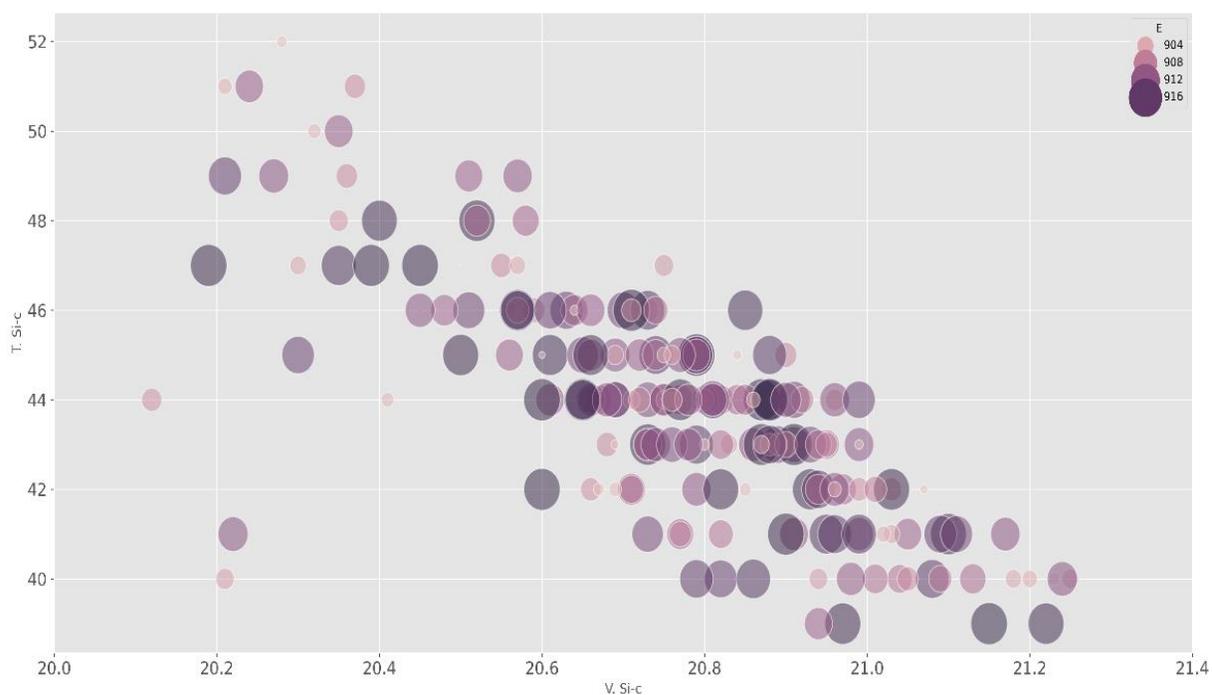
En los gráficos 40, 41 y 42 se puede observar una correlación negativa entre la temperatura de operación del panel y la tensión de circuito abierto es decir con el incremento de

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

la temperatura de operación se disminuye la tensión de circuito de abierto. Se observa como marcadores similares es decir con niveles de radiación idénticos o muy cercanos pueden estar ubicados en el segmento superior izquierdo del grafico indicando una mayor temperatura de operación y una menor tensión de circuito abierto que los ubicado en el segmento inferior derecho.

**Figura 40**

*Tensión del panel de Si-poli por variación de la temperatura*

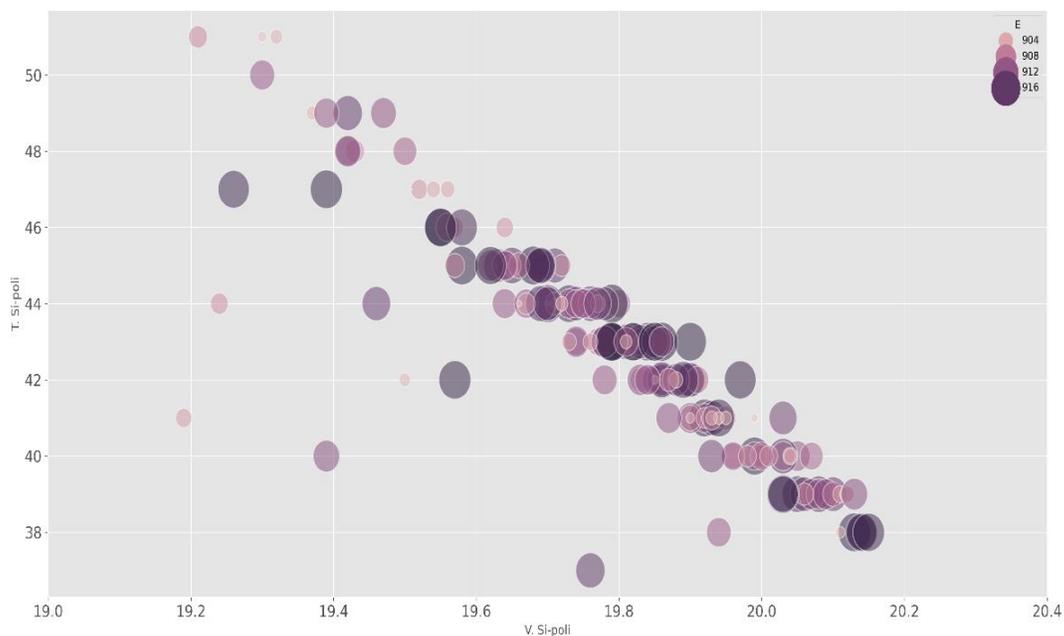


*Fuente:* Elaboración propia.

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

**Figura 41**

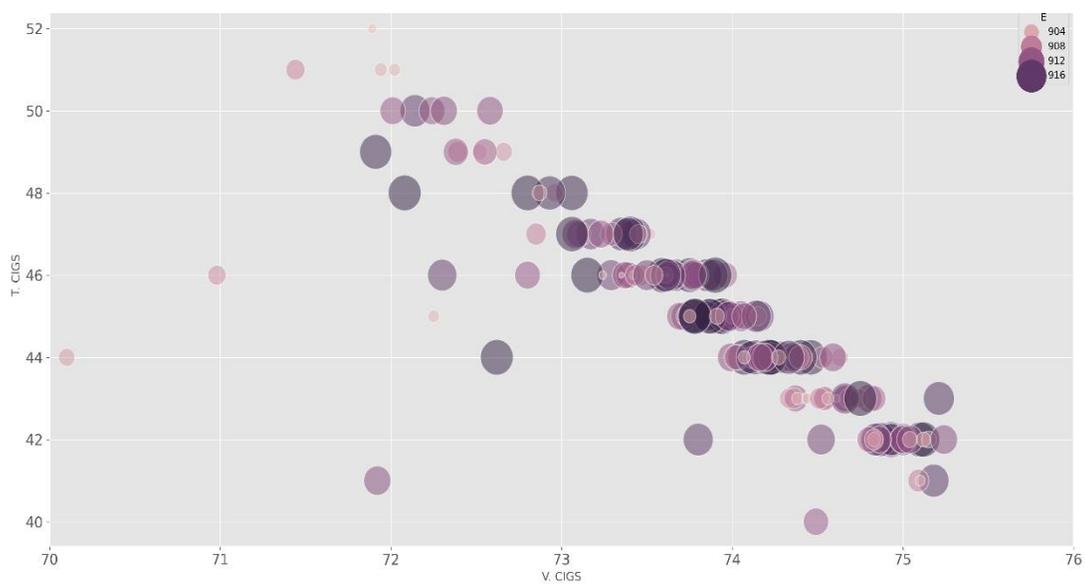
*Tensión del panel de Si-c por variación de la temperatura.*



*Fuente:* Elaboración propia.

**Figura 42**

*Tensión del panel de CIGS por variación de la temperatura.*



*Fuente:* Elaboración propia.

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

En las tecnologías de silicio la pérdida de tensión se encuentra alrededor de 1 VDC y en el panel de CIGS se tiene una disminución de aproximadamente 3 VDC, pero se ha de considerar que el panel de capa fina está sometido a una temperatura más alta de operación y su rango de tensión de circuito abierto es mucho mayor que las tecnologías de silicio. Desde la observación experimental en sitio determinar cuál tecnología presenta una mayor afectación por la temperatura de operación es complejo debido a las condiciones no controladas de las variables meteorológicas.

Para visualizar con más detalle el comportamiento de la tensión en circuito abierto en un rango específico de tiempo se tomó el periodo comprendido del 2021-08-01 desde las 11:50 hasta las 12:20 en la tabla 11 se encuentran los datos estadísticos correspondientes.

**Tabla 11**

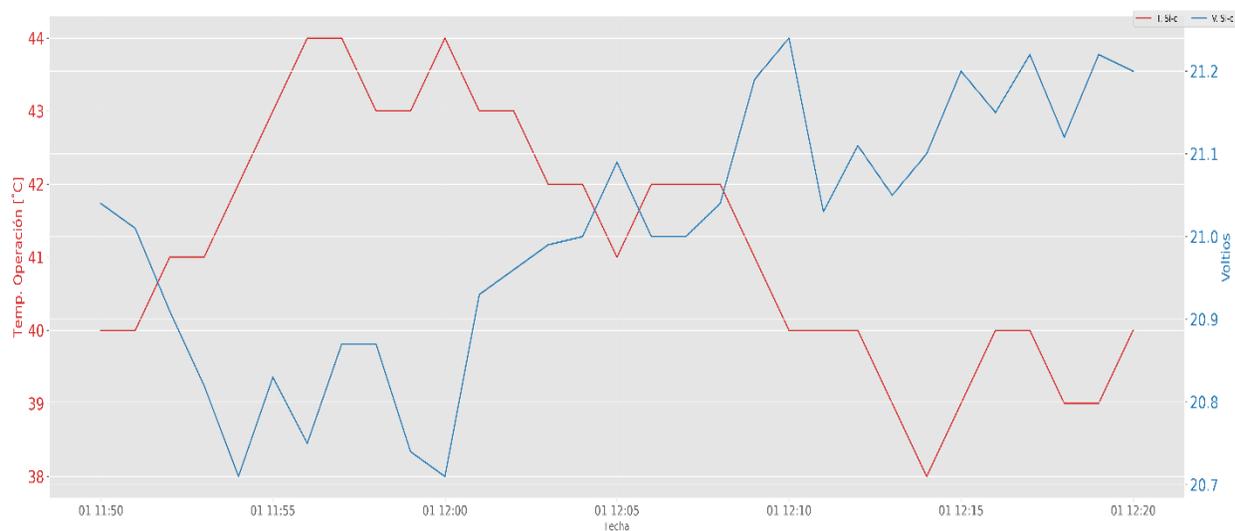
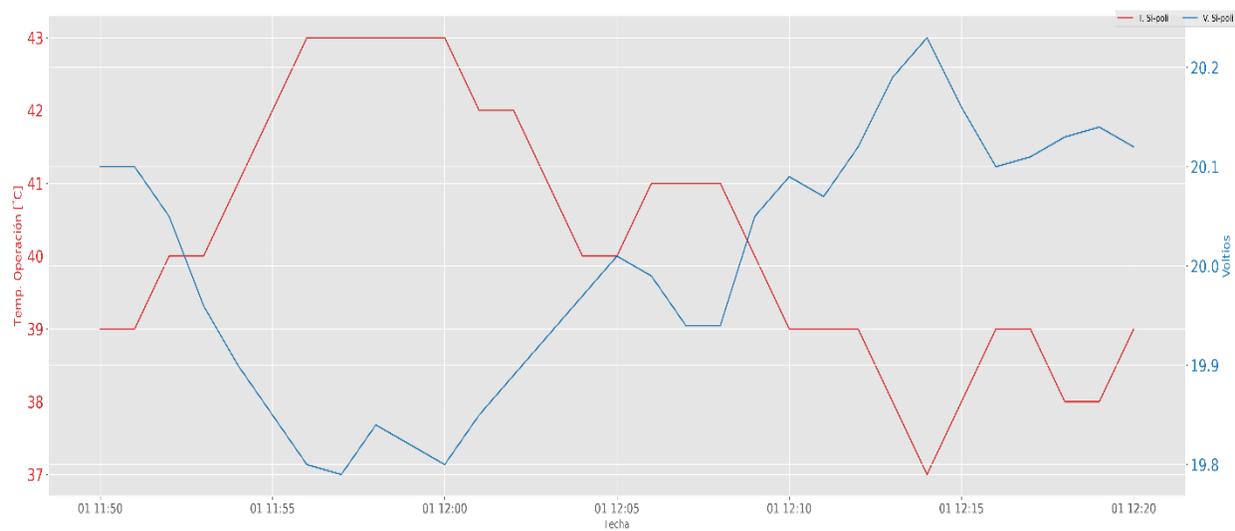
*Condiciones de operación 2021-08-01 11:50-12:20*

	T_Amb	T. Si-c	T. Si-poli	T. CIGS	E	V. viento	V. Si-c	V. Si-poli	V. CIGS
Promedio	30.48	41.27	40.31	43.00	919.47	3.63	20.99	19.99	74.62
min	30.30	38.00	37.00	41.00	904.68	1.30	20.71	19.79	73.91
max	30.70	44.00	43.00	45.00	925.52	5.40	21.24	20.23	75.47

*Fuente:* Elaboración propia.

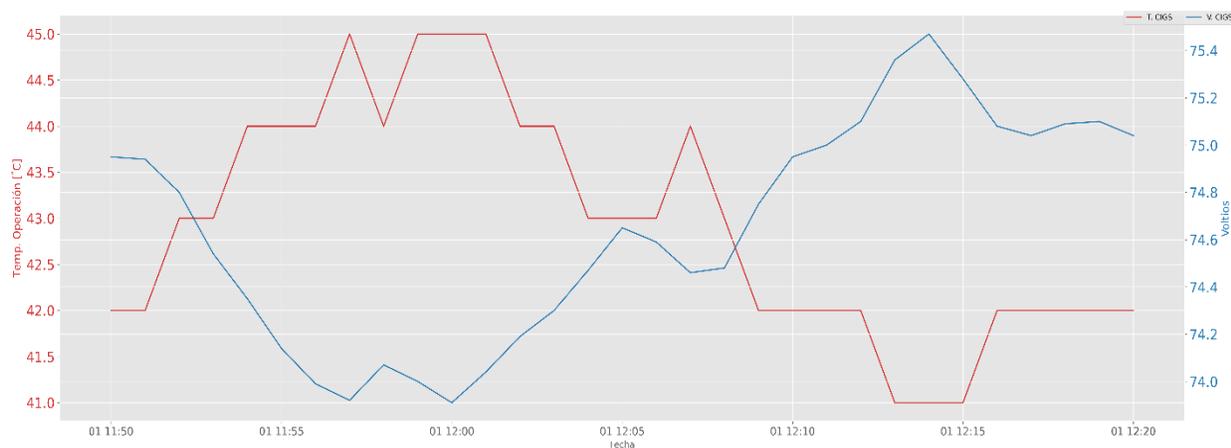
Las figuras 43, 44 y 45 muestran como la temperatura de operación afecta directamente la tensión de circuito abierto, para este lapso la variación de la temperatura ambiente fue de solamente 0.4 °C, la irradiancia varió 6.05 W/m<sup>2</sup> y el viento tuvo una diferencia entre su mínimo y máximo de 4.1 m/s. El panel de CIGS fue el que presentó menor pérdida de tensión de circuito abierto.

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

**Figura 44***Temperatura de operación vs Tensión de circuito abierto Si-c.**Fuente:* Elaboración propia.**Figura 43***Temperatura de operación vs Tensión de circuito abierto Si-poli.**Fuente:* Elaboración propia.

**Figura 45**

*Temperatura de operación vs Tensión de circuito abierto CIGS*



*Fuente:* Elaboración propia.

### 11.3 Eficiencia de los paneles Monocristalino, Policristalino y CIGS

Debido a que la eficiencia está dada en función de la conversión de energía teniendo en cuenta el área de los paneles solares, y la irradiancia recibida en unidades de  $W/m^2$ , se puede establecer la relación del área de los paneles empleados en este estudio y efectuar una comprobación de la eficiencia de los tres tipos de paneles en condiciones STC (Condiciones de Pruebas Estándar).

Para el caso del panel monocristalino se determina su área total según las especificaciones técnicas de sus dimensiones:

$$1.19 \text{ m} * 0.5 \text{ m} = 0.595 \text{ m}^2 \quad (8)$$

Como la magnitud de la Irradiancia medida por el sensor está dada para un área de  $1m^2$ , se obtiene la relación  $\gamma$  con el área del panel:

$$\gamma = \frac{1 \text{ m}^2}{0.595 \text{ m}^2} = 1.680 \quad (9)$$

De acuerdo a las especificaciones técnicas del panel monocristalino la eficiencia es de

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

16.81% y la potencia máxima de salida de 100W en STC. Es decir que los 100W serán entregados con una Irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>, por lo tanto, podemos comprobar este valor de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{P_{out} * 100}{P_{in}} = \frac{P_{max} * k * 100}{P_{in}} = \frac{100 \text{ W} * 1,680 * 100}{1000 \text{ W/m}^2} = \frac{16800}{1000} = 16.8\% \quad (10)$$

De la misma manera para el panel policristalino se determina su área total y se verifica la eficiencia según sus especificaciones técnicas:

$$1.5 \text{ m} \times 0.668 \text{ m} = 1.002 \text{ m}^2 \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{1 \text{ m}^2}{1.002 \text{ m}^2} = 0.998 \quad (12)$$

$$\eta = \frac{P_{out} * 100}{P_{in}} = \frac{P_{max} * k * 100}{P_{in}} = \frac{135 \text{ W} * 0.998 * 100}{1000 \text{ W/m}^2} = \frac{13473}{1000} = 13.47\% \quad (13)$$

Y por último se efectúa el mismo cálculo para el panel de CIGS, se determina su área total y se verifica la eficiencia según sus especificaciones técnicas:

$$1.656 \text{ m} \times 0.656 \text{ m} = 1.086 \text{ m}^2 \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{1 \text{ m}^2}{1.086 \text{ m}^2} = 0.920 \quad (15)$$

$$\eta = \frac{P_{out} * 100}{P_{in}} = \frac{P_{max} * k * 100}{P_{in}} = \frac{135 \text{ W} * 0.920 * 100}{1000 \text{ W/m}^2} = \frac{12420}{1000} = 12.42\% \quad (16)$$

Los anteriores cálculos están referidos a condiciones controladas de laboratorio STC, para el presente estudio mediante las cargas electrónicas diseñadas se efectuarán mediciones de tensión y corriente con diferentes niveles de irradiancia los resultados se encuentran resumidos en la tabla 12.

**Tabla 12***Potencia a diferentes niveles de irradiancia*

E (W/m <sup>2</sup> )	Si-c (100W)		Si-poli (135W)		CIGS (135W)	
	P (W)	T <sub>ope</sub> (°C)	P (W)	T <sub>ope</sub> (°C)	P (W)	T <sub>ope</sub> (°C)
422	16.1	33	30.1	32	31.8	39
600	30.2	36	56.6	36	67.6	40
700	32.5	40	65.5	40	62.4	44
815	36.1	38	77.7	38	68.3	42
900	36.8	41	67.7	42	65.5	45

*Fuente:* Elaboración propia.

Con los resultados de la Tabla 12 cuando se compara el panel de Si-poli y el panel de CIGS los cuales tienen la misma potencia de salida en condiciones STC, se pudo apreciar como la potencia del panel de CIGS fue superior en dos de las mediciones, en otras dos estuvo muy cercana con una diferencia de 1-2 W por debajo y en una sola fue inferior 9.4 W, en general comparando las tecnologías de Si con la de CIGS se puede decir que esta última tuvo un mejor rendimiento considerando que estuvo sometida a una mayor temperatura de operación y de acuerdo a su ficha técnica su eficiencia era la menor de los tres paneles; también se puede apreciar cómo se tiene un incremento de potencia cuando la irradiancia es menor y la temperatura de operación es más baja comparado con niveles de irradiancia superior pero con temperaturas de operación más altas, esto se puede observar claramente en los gráficos posteriores de P-V.

#### **11.4 Curvas I-V / P-V**

Para cada uno de los paneles y simultáneamente en condiciones atmosféricas estables se efectuaron cinco ciclos desde la tensión de circuito abierto hasta el punto cercano de corriente de corto circuito para graficar las correspondientes curvas I-V y P-V. Los marcadores azules circulares trazan las curvas I-V y los marcadores triangulares rojos trazan las curvas P-V.

En el nivel más bajo de irradiancia la respuesta de los paneles no es tan consistente como

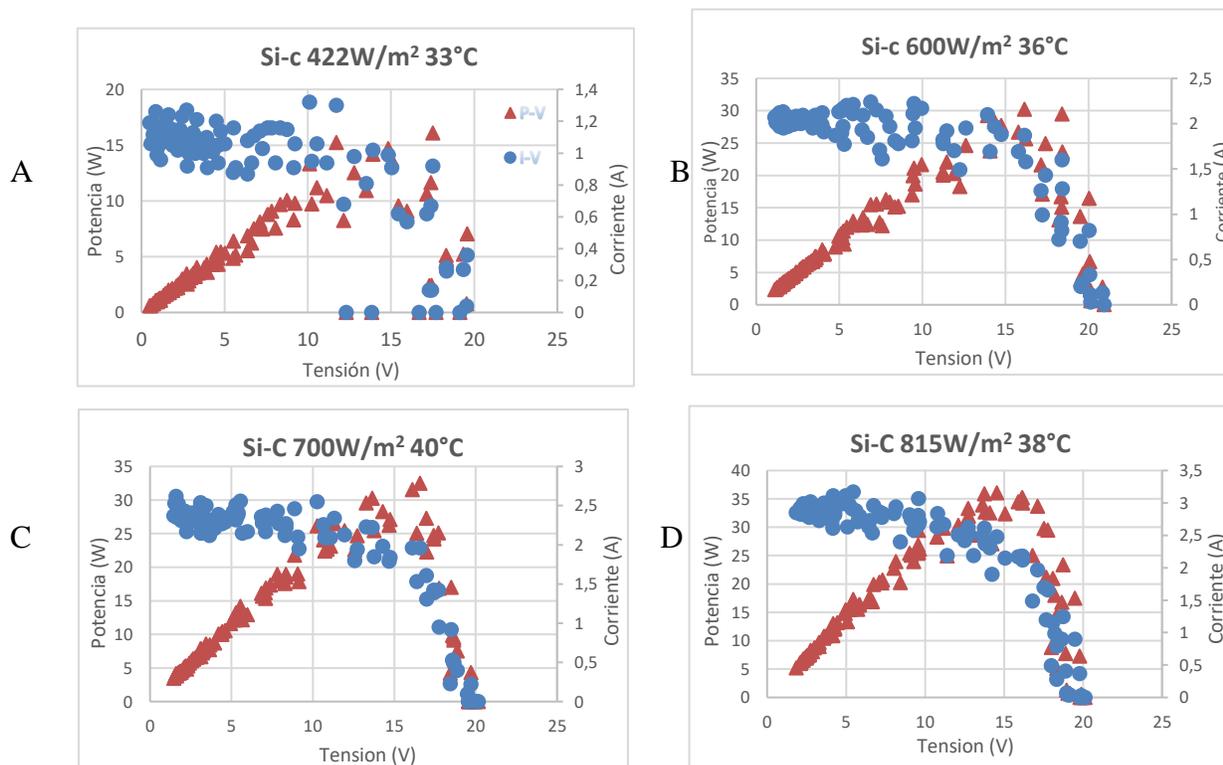
## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

en niveles superiores y los datos recolectados tienden a mostrar unas curvas menos definidas, en los demás niveles de irradiancia que se tomaron de referencia los datos obtenidos permiten graficar mejor el comportamiento de acuerdo a la cantidad de energía fotovoltaica captada y su respuesta ante la carga variable y su temperatura de operación.

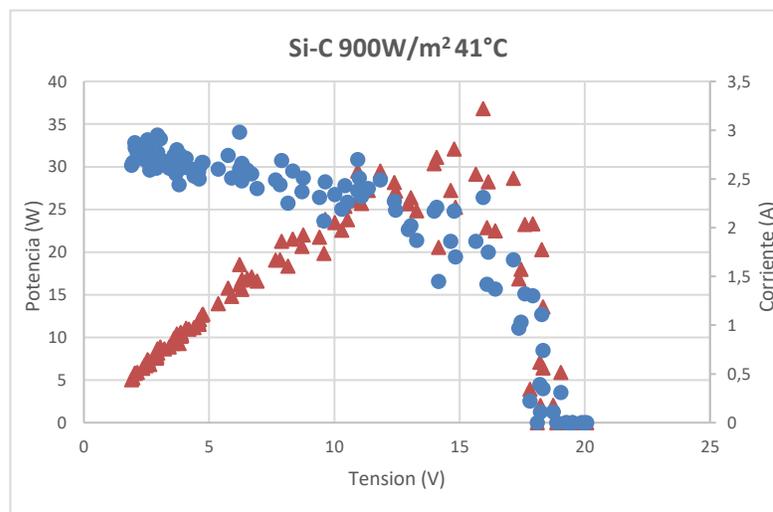
En las figuras 46, 47 y 48 se presenta el resultado del muestreo en condiciones reales de las tres tecnologías evaluadas, las condiciones de irradiancia y de temperatura ambiente fueron diferentes para cada uno de los cinco muestreos efectuados, además se determinó después de efectuar varios muestreos que el nivel óptimo de irradiancia para lograr obtener unas gráficas definidas debía ser sobre los  $400\text{W/m}^2$ .

**Figura 46**

*Curvas I-V / P-V Panel Si-c, (A) Si-c  $422\text{W/m}^2$ , (B) Si-c  $600\text{W/m}^2$ , (C) Si-c  $700\text{W/m}^2$ , (D) Si-c  $815\text{W/m}^2$ , (E) Si-c  $900\text{W/m}^2$*



E



Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos correspondientes a la figura 46 presentan el comportamiento del panel Si-C de 100W RENOXY RNG-100D-S en las condiciones de radiación y temperatura especificadas en el título de cada gráfico, se puede observar cómo los niveles de radiación marcan el cambio en la escala de la corriente y consecuentemente con la potencia capaz de generar el panel. En la figura 41(A) con  $422 \text{ W/m}^2$  en el punto de máxima potencia la corriente fue de 0.92 A, y a  $900 \text{ W/m}^2$  la corriente alcanzó los 2.31 A. Las curvas de potencia también son consistentes con los niveles de radiación donde se logra una diferencia de 20.7 W entre el nivel menor de radiación y el de mayor radiación de acuerdo a las muestras tomadas.

Los gráficos de la figura 47 representan el comportamiento del panel de Si-poli KD135SX-1PU de 135W, en la figura 47(A) con  $422 \text{ W/m}^2$  la corriente en el punto de máxima potencia fue de 1.69 A y a  $900 \text{ W/m}^2$  la corriente alcanzó los 4.76 A. Las curvas de potencia también son consistentes con los niveles de radiación donde se logra una diferencia en la  $P_{max}$  de 37.6 W entre el nivel menor de radiación y el de mayor radiación.

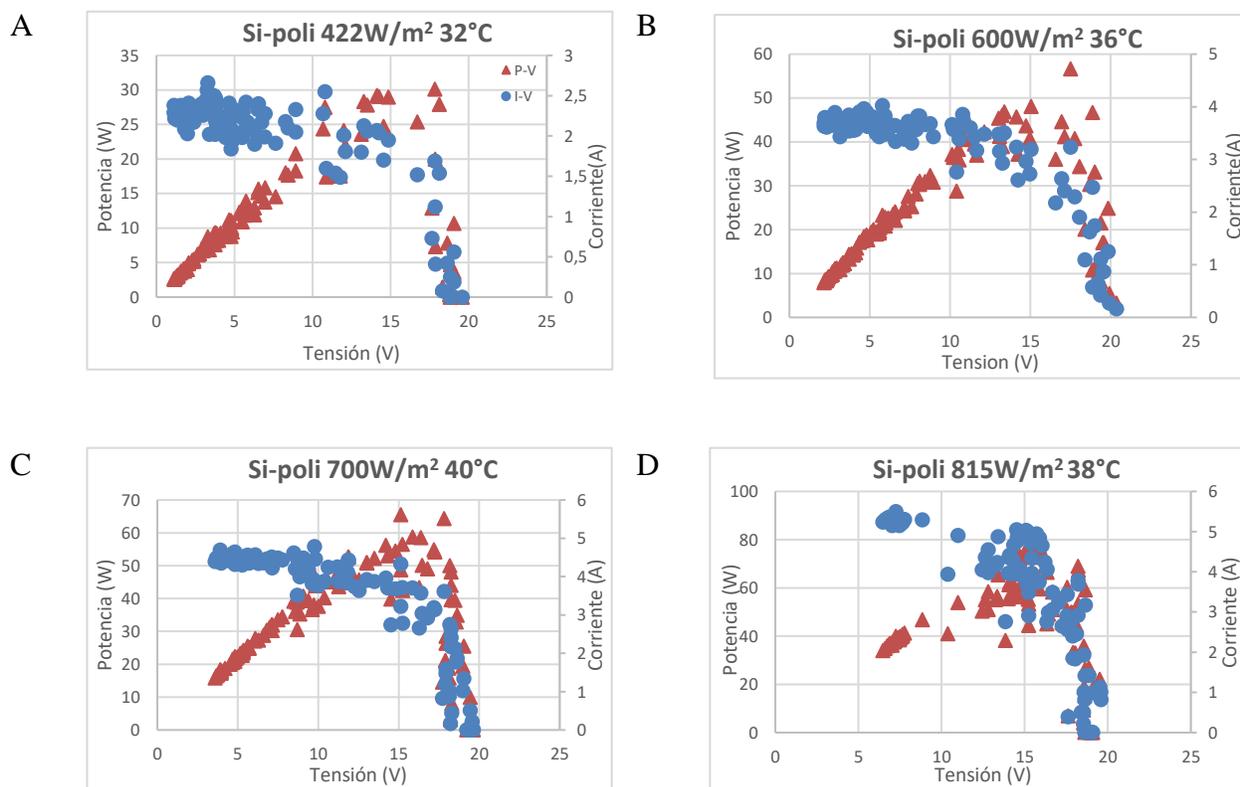
En la figura 48 se encuentran las curvas del panel CIGS de 135W STION STO-135. En la figura 48(A) con  $422 \text{ W/m}^2$  la corriente en el punto de máxima potencia fue de 0.53 A y a 900

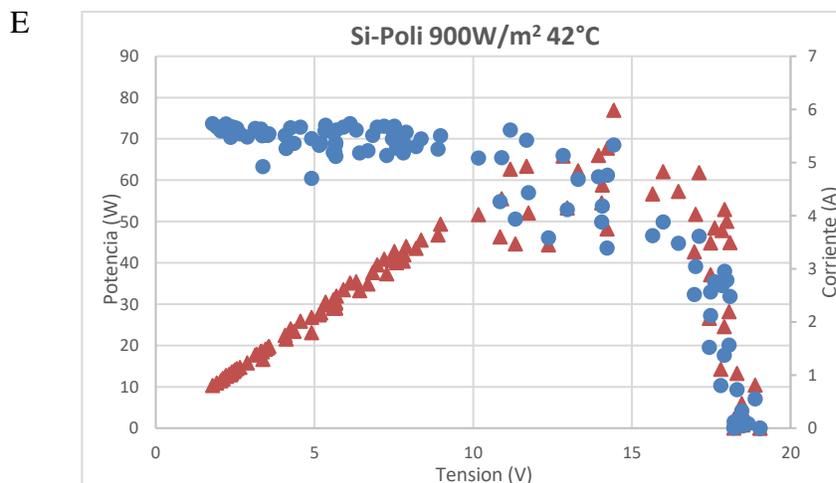
## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

$\text{W/m}^2$  la corriente llegó a un valor de 1.3 A. Las curvas de potencia también son consistentes con los niveles de radiación donde se logra una diferencia en la  $P_{\text{max}}$  de 33.78 W entre el nivel menor de radiación y el de mayor radiación.

**Figura 47**

Curvas I-V / P-V Panel Si-poli, (A) Si-poli  $422\text{W/m}^2$ , (B) Si-poli  $600\text{W/m}^2$ , (C) Si-poli  $700\text{W/m}^2$ , (D) Si-poli  $815\text{W/m}^2$ , (E) Si-poli  $900\text{W/m}^2$

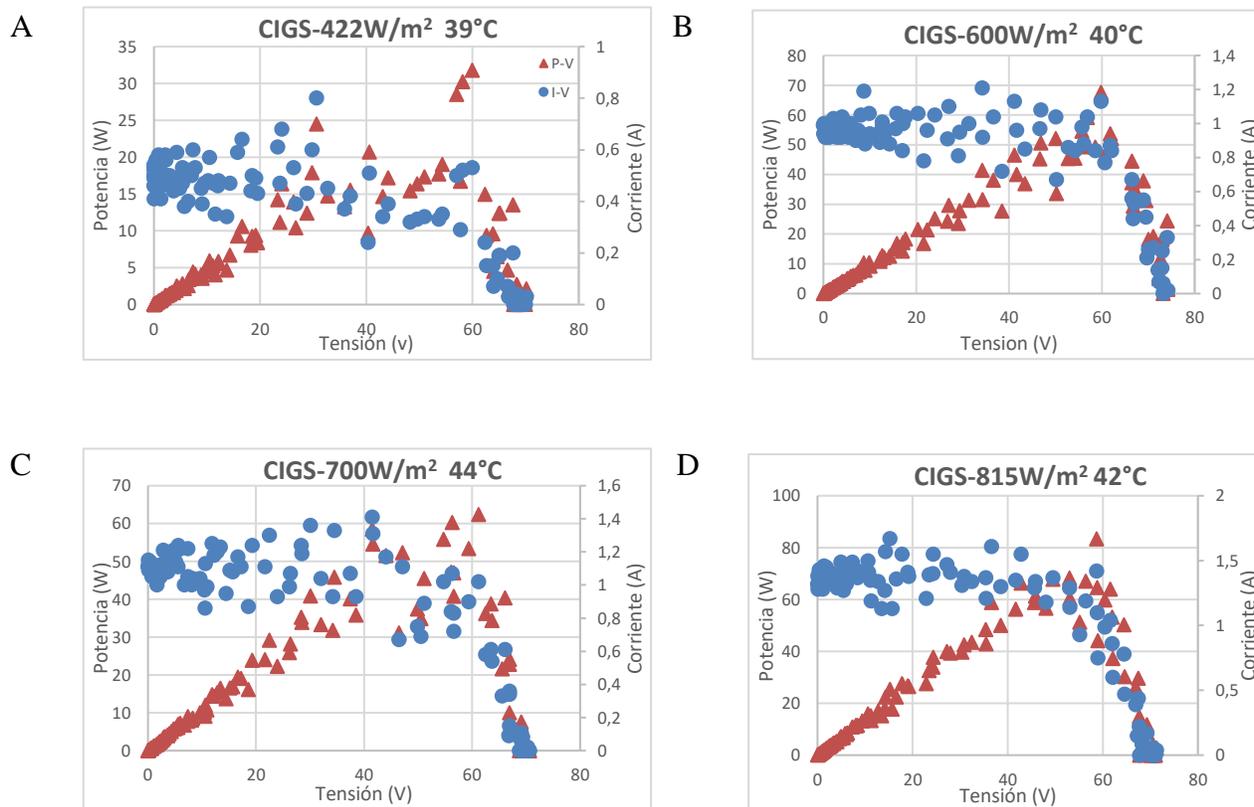


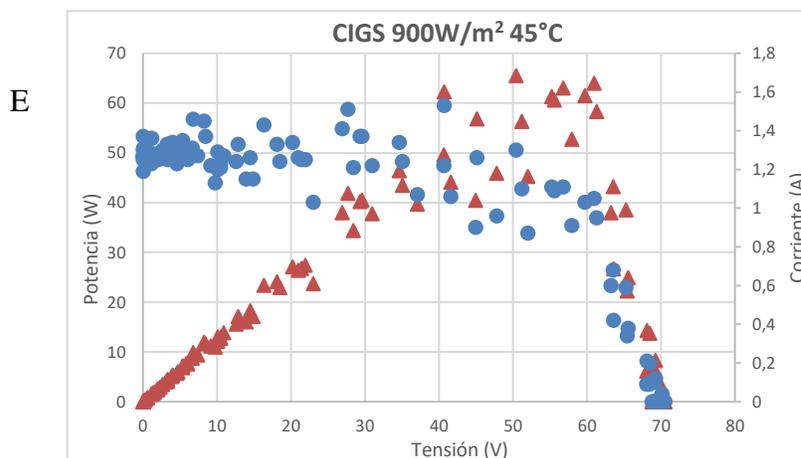


Fuente: Elaboración propia.

### Figura 48

Curvas I-V / P-V Panel CIGS, (A) CIGS 422W/m<sup>2</sup>, (B) CIGS 600W/m<sup>2</sup>, (C) CIGS 700W/m<sup>2</sup>, (D) CIGS 815W/m<sup>2</sup>, (E) CIGS 900W/m<sup>2</sup>



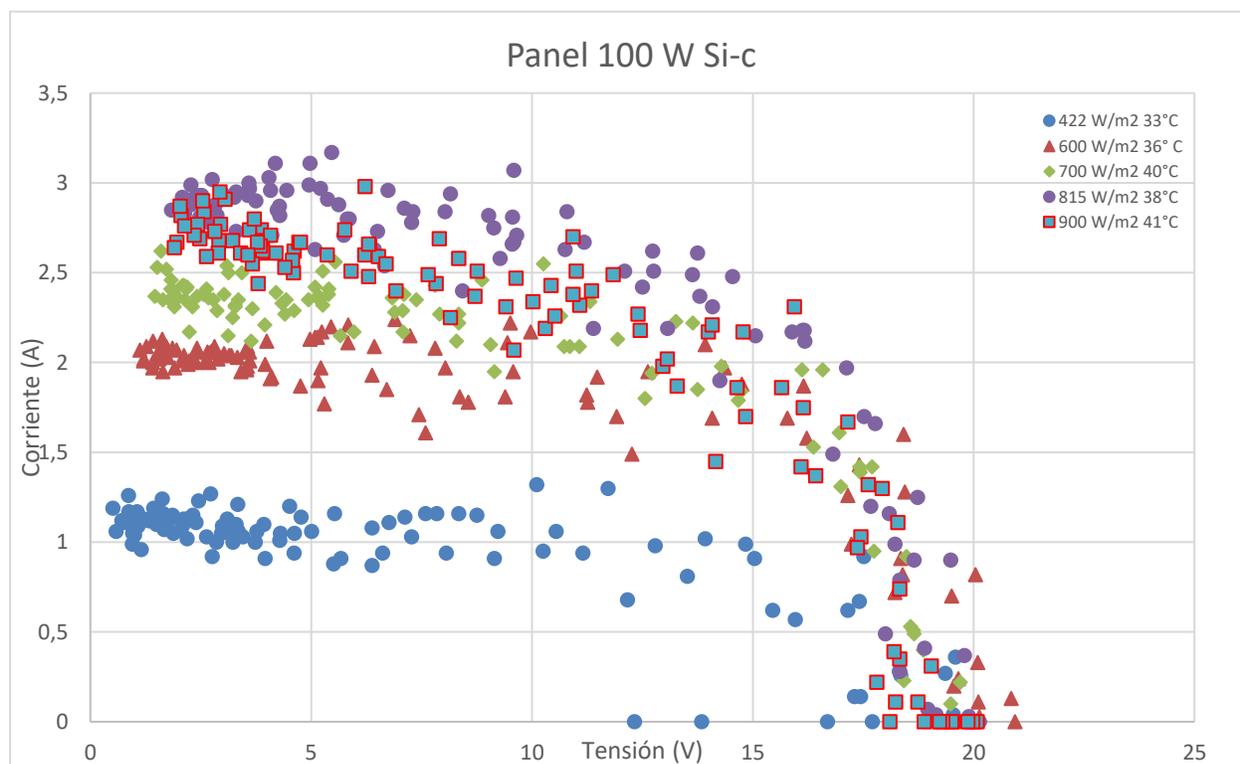


*Fuente:* Elaboración propia.

### 11.5 Curvas I-V

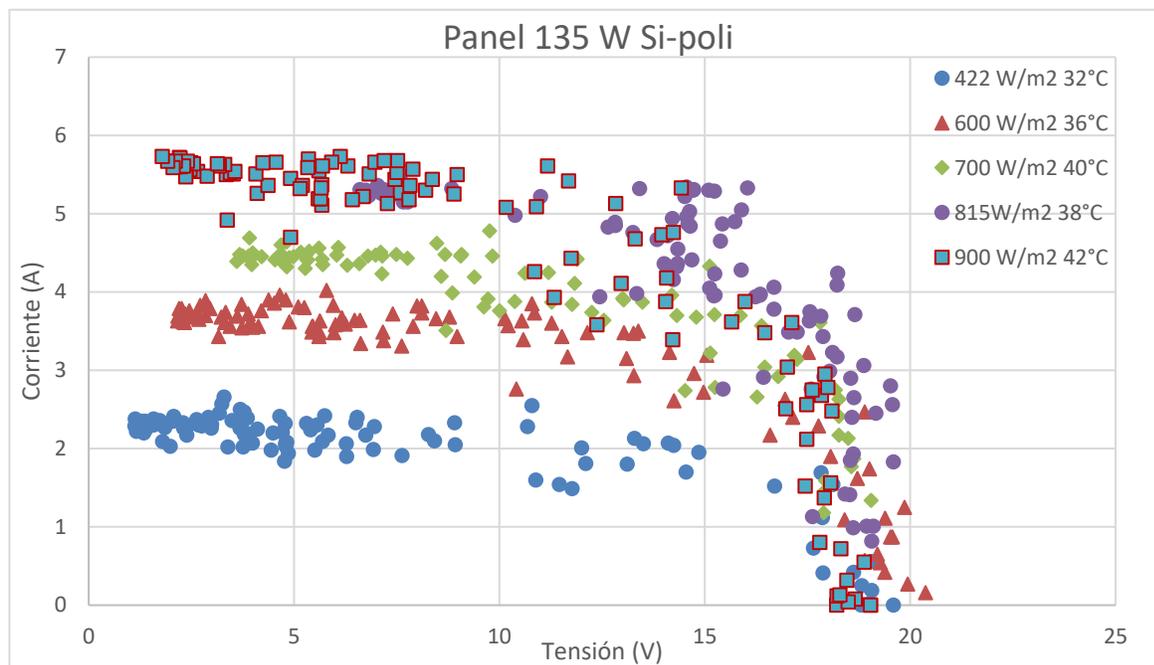
Las figuras 49, 50 y 51 presentan las curvas I-V agrupadas por tecnología en los diferentes niveles de irradiancia, en estos gráficos se puede apreciar como los niveles de irradiancia dirigen los marcadores en el eje de la corriente y como la temperatura de operación los dirige en el eje de la tensión.

Para las tres tecnologías de fabricación de paneles se evidencia como las curvas registradas en  $815 \text{ W/m}^2$  se encuentran ligeramente sobre las curvas de  $900 \text{ W/m}^2$ , siendo más notorio en las figuras 49 y 50 correspondientes a los paneles de Si-c y Si-poli, este comportamiento estaría relacionado con el efecto de la diferencia de temperatura de  $3^\circ\text{C}$  siendo la menor temperatura la registrada en la curva de  $815 \text{ W/m}^2$ . La potencia máxima generada por el panel de Si-c (figura 49), se registró en el nivel de irradiancia de  $900 \text{ W/m}^2$  con un valor de  $36.8 \text{ W}$ . Considerando los valores de la tensión máxima en circuito abierto cuando inicia el ciclo la carga electrónica se dio una variación positiva de  $0.49\text{V}$  ante una diferencia de  $8^\circ\text{C}$  entre el menor nivel de irradiancia y el mayor.

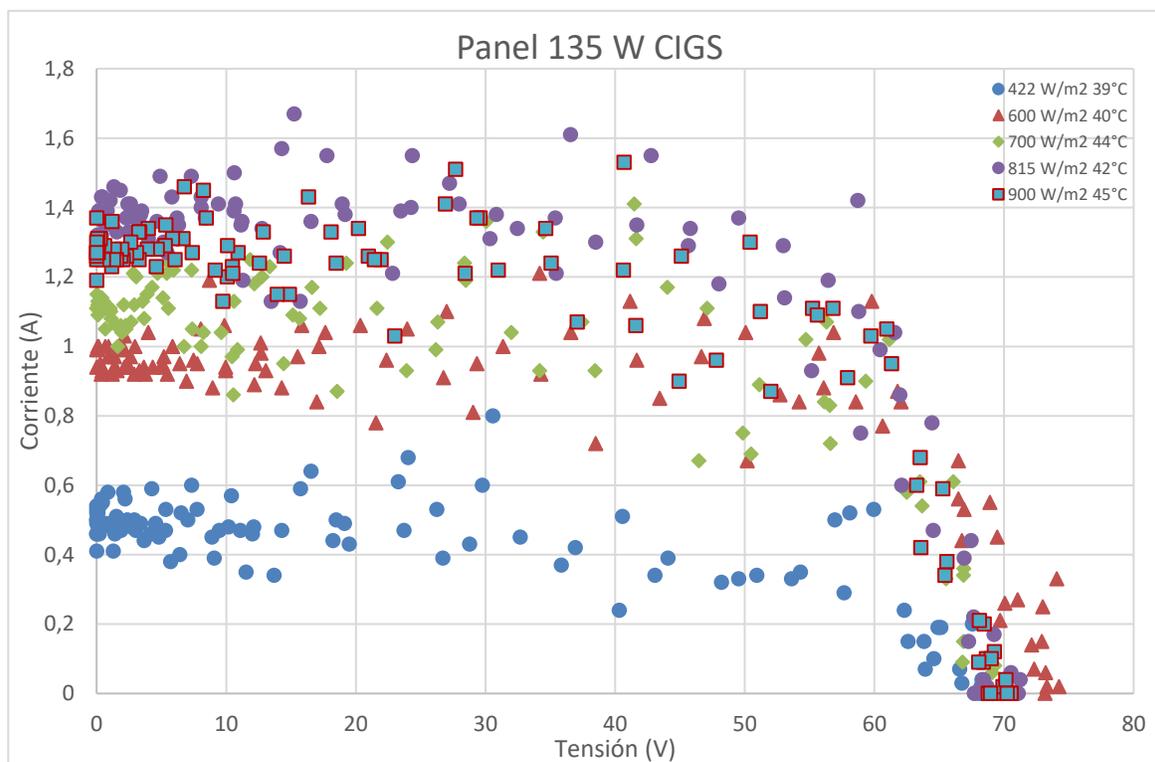
**Figura 49***Curvas I-V panel Si-c*

*Fuente:* Elaboración propia.

Las curvas del panel Si-poli en la figura 50 presentan una segmentación más diferenciada dentro del gráfico en la escala de corriente en cada uno de los muestreos efectuados cuando la carga electrónica está en su fase final registrando los valores de la corriente en corto circuito. La potencia máxima registrada se presentó en el muestreo tomado a 815 W/m<sup>2</sup> con un valor de 77.7 W. Este panel mostro una pérdida del nivel de tensión en circuito abierto de 0.03V entre el nivel de menor radiación con una temperatura del panel de 32°C y el de mayor radiación con una temperatura del panel de 42°C.

**Figura 50***Curvas I-V panel Si-poli**Fuente:* Elaboración propia.

En la figura 51 el panel de CIGS alcanzó una potencia máxima fue de 68.3W registrada en el muestreo a 815 W/m<sup>2</sup>. La tensión máxima de circuito abierto tuvo una variación positiva de 0.45 V teniendo en cuenta el incremento de la temperatura de operación de este panel en los diferentes niveles de radiación con valores superiores entre los 3 a 7 ° C comparado con las otras tecnologías, este panel no tuvo pérdidas en la tensión y tuvo una variación positiva de 0.45V

**Figura 51***Curvas I-V panel CIGS**Fuente:* Elaboración propia.

## 12. Conclusiones

El mercado fotovoltaico en Colombia se encuentra limitado a los paneles de Silicio y desarrollar proyectos con diferentes tecnologías presenta una mayor dificultad ya que no son comercializadas localmente y se requiere contactar directamente al fabricante o distribuidores en el extranjero. Como alternativas al Silicio los paneles de CdTe y CIGS son las opciones actuales de mayor desarrollo y oferta para proyectos solares, de las cuales el panel de capa fina de CIGS empleado para esta investigación demostró ser una tecnología de rendimiento óptimo para las condiciones propias de la Región Caribe.

Se observó para todas las tecnologías estudiadas una mayor generación de potencia cuando la temperatura de operación del panel solar es menor comparado con una temperatura mayor en un mismo nivel de irradiancia, mostrando una mayor tolerancia ante este incremento el panel de CIGS, este comportamiento debe ser tenido en cuenta en la selección del panel solar y su ubicación. Estos cambios en la temperatura de operación son influenciados por factores medio ambientales como la temperatura ambiente, velocidad del viento y la humedad, en cuanto a su instalación se debe tener en cuenta la existencia de superficies reflejantes y la distancia de separación sobre la estructura de soporte.

La tecnología CIGS tuvo el mejor rendimiento de las tecnologías evaluadas, su temperatura de operación estuvo por encima de los paneles de Silicio, alcanzando valores de potencia muy cercanos o superiores al panel de Silicio policristalino que tiene la misma potencia en condiciones STC.

El uso de tecnologías fotovoltaicas de capa fina como el CIGS requieren de mayores áreas por potencia instalada, en este estudio el panel de CIGS ocupa un 8.35 % más de área que el panel de Si-policristalino, siendo estos dos los que tienen la misma potencia de salida en

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

condiciones STC.

Los niveles de irradiancia con registros próximos a los  $1200 \text{ W/m}^2$  y la cantidad de horas de luz solar son muestra del potencial de energía disponible para ser aprovechada en proyectos fotovoltaicos en la Región Caribe Colombiana.

Los altos niveles de irradiancia sobre los  $1000 \text{ W/m}^2$  de las condiciones STC deben ser considerados en los dimensionamientos de los sistemas fotovoltaicos con el fin de evitar posibles daños en los dispositivos empleados o condiciones de riesgo para sus usuarios.

Aunque la región Caribe cuenta con un alto potencial de energía solar se debe tener presente las altas temperaturas en los dimensionamientos para garantizar la producción estimada, por lo tanto, se puede considerar este aspecto como una razón para incorporar tecnologías como el CIGS en proyectos de gran escala dada su mayor tolerancia a las altas temperaturas.

Las tecnologías de Silicio ofrecen un gran respaldo debido a su larga trayectoria de manufactura donde su rendimiento se ha incrementado progresivamente por mejoras introducidas en su estructura, asociadas al soporte de las celdas como las capas PERC o la conexión interna de las mismas como es el caso de los paneles Half-cell esta evolución y su relación costo beneficio sigue siendo determinantes en el mercado nacional.

### 13. Referencias

- Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management - Gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, *19*(6–7), 667–679.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.011>
- Cabello Eras, J. J., Sagastume Gutiérrez, A., García Lorenzo, D., Cogollos Martínez, J. B., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2015). Bridging universities and industry through cleaner production activities. Experiences from the Cleaner Production Center at the University of Cienfuegos, Cuba. *Journal of Cleaner Production*, *108*(2015), 1–10.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.063>
- Cagno, E., & Trianni, A. (2014). Evaluating the barriers to specific industrial energy efficiency measures: An exploratory study in small and medium-sized enterprises. *Journal of Cleaner Production*, *82*, 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.057>
- Christoffersen, L. B., Larsen, A., & Togeby, M. (2006). Empirical analysis of energy management in Danish industry. *Journal of Cleaner Production*, *14*(5), 516–526.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.03.017>
- European Commission (EC). (2014). *Communication from the commission to the European parliament and the council energy efficiency and its contribution to energy security and the 2030 Framework for climate and energy policy*. Brussels.
- Giacone, E., & Mancò, S. (2012). Energy efficiency measurement in industrial processes. *Energy*, *38*(1), 331–345. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.054>
- Gielen, D., & Taylor, P. (2009). Indicators for industrial energy efficiency in India. *Energy*,

## TECNOLOGIAS DE PANELES SOLARES

34(8), 962–969. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.11.008>

Hens, L., Cabello-Eras, J. J., Sagastume-Gutiérrez, A., Garcia-Lorenzo, D., Cogollos-Martinez, J. B., & Vandecasteele, C. (2017). University–industry interaction on cleaner production. The case of the Cleaner Production Center at the University of Cienfuegos in Cuba, a country in transition. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 63–68.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.105>

International Energy Agency. (2021). Global Energy Review 2021. *Global Energy Review 2020*, 1–36. Retrieved from <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d0031107-401d-4a2f-a48b-9eed19457335/GlobalEnergyReview2021.pdf>

(IEA) International Energy Agency. (2011). Solar energy perspectives. In *Solar Energy Perspectives*. <https://doi.org/10.1787/9789264124585-en>

ISO. (2014). *ISO 50004: Energy management systems - Guidance for the implementation, maintenance and improvement of an energy management system*. 2014(50), 1–45.

Kaushika, N. D., Mishra, A., & Rai, A. K. (2018). Solar photovoltaics: Technology, system design, reliability and viability. In *Solar Photovoltaics: Technology, System Design, Reliability and Viability*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72404-1>

Khatib, T., & Elmenreich, W. (2016a). Modeling of Photovoltaic Source. *Modeling of Photovoltaic Systems Using MATLAB®*, 39–85.

<https://doi.org/10.1002/9781119118138.ch2>

Khatib, T., & Elmenreich, W. (2016b). *Modelling of Photovoltaic System using Matlab*. John Wiley & Sons.

Luque, A., & Hegedus, S. (2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (Second

edi; John Wiley & Sons, ed.). <https://doi.org/10.1002/9780470974704>

Ospino-Castro, A. (2010). Análisis del potencial energético solar en la Región Caribe para el diseño de un sistema fotovoltaico. *INGECUC*, 6(6), 0–8.

Palamutcu, S. (2010). Electric energy consumption in the cotton textile processing stages. *Energy*, 35(7), 2945–2952. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.029>

Paranthaman, M. P., Wong-Ng, W., & Bhattacharya, R. N. (2015). Semiconductor materials for solar photovoltaic cells. In *Semiconductor Materials for Solar Photovoltaic Cells*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20331-7>

Posch, A., Brudermann, T., Braschel, N., & Gabriel, M. (2015). Strategic energy management in energy-intensive enterprises: A quantitative analysis of relevant factors in the Austrian paper and pulp industry. *Journal of Cleaner Production*, 90, 291–299. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.044>

Praveen, J., & Vijaya Ramaraju, V. (2017). Materials for Optimizing Efficiencies of Solar Photovoltaic Panels. *Materials Today: Proceedings*, 4(4), 5233–5238. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.05.032>

Rudberg, M., Waldemarsson, M., & Lidestam, H. (2013). Strategic perspectives on energy management: A case study in the process industry. *Applied Energy*, 104, 487–496. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.027>

Smets, A., Klaus, J., Olindo, I., Van Swaaij, R., & Zeman, M. (2015). Solar energy. In *Solar Energy. The physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems*. <https://doi.org/10.1201/b10163>

Tiwari, G. N., & Swapnil, D. (2010). *Fundamentals of Photovoltaic Modules and their Applications*. <https://doi.org/10.1039/9781849730952>

- Vine, E. (2005). An international survey of the energy service company ESCO industry. *Energy Policy*, 33(5), 691–704. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.09.014>
- Weinert, N., Chiotellis, S., & Seliger, G. (2011). Methodology for planning and operating energy-efficient production systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(1), 41–44. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.015>
- Wenham, S. R., Green, M. A., Watt, M. E., & Corkish, R. (2013). Applied Photovoltaics. In *Applied Photovoltaics, Second Edition* (Second Edi). <https://doi.org/10.4324/9781849770491>
- Wirth, H., Weiß, K.-A., & Weismeier, C. (2016). *Photovoltaic Modules. Part I: Crystalline Silicon Module Technology*.
- Wirth, Harry, Weiß, Karl-Anders, Wiesmeier, & Cornelia. (2016). Photovoltaic Modules. Part I: Crystalline Silicon Module Technology. In *Photovoltaic Modules : Technology and Reliability*.
- Yang, N. (2017). *The preparation of Nano Composites and their applications in solar Energy Conversion*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35133-4>