



**COMPARACIÓN DE CELDAS FOTOVOLTAICAS MONOCRISTALINA Y
POLICRISTALINA EN CONDICIONES CLIMÁTICAS DE BOGOTÁ.**

Jeferson Stiven Guarin Contreras

Sergio Andrés Sandoval Caro

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electromecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2022

**COMPARACIÓN DE CELDAS FOTOVOLTAICAS MONOCRISTALINA Y
POLICRISTALINA EN CONDICIONES CLIMÁTICAS DE BOGOTÁ.**

Jeferson Stiven Guarín Contreras

Código 10431522144

Sergio Andrés Sandoval Caro

Código 10431422463

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electromecánico

Director (a):

MsC. Jorge Enrique Romero R.

Codirector (a):

PhD. Andrés L. Jutinico A

Línea de Investigación:

Gestión de energía basada en computación en la nube para la interoperabilidad entre un grupo de microrredes aisladas", código: 70172.

Grupo de Investigación:

Grupo en Bio Instrumentación y Control (GIBIO)

Research in Energy and Materials (REM)

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electromecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá D.C. Colombia junio de 2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado:
COMPARACIÓN DE CELDAS FOTOVOLTAICAS
MONOCRISTALINA Y POLICRISTALINA EN
CONDICIONES CLIMÁTICAS DE BOGOTÁ., Cumple
con los requisitos para optar
Al título de Ingenieros Electromecánicos.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Dedicatoria

Este libro va dedicado a mis padres a mi hija y mis hermanos, todos ellos me acompañaron durante este largo, pero gratificante camino, mi madre que siempre soñó ver a sus hijos profesionales, mi padre que me alentaba y me apoyaba tanto para que pudiera lograr esta meta y mi hija que quiero que siempre esté orgullosa de mí y motivarla siempre para que logre cualquiera que sea su meta en el futuro, ha ellos le dedico este proyecto, que sé que siempre se alegraran de cada logro que realice.

Agradecimientos.

Agradecido siempre con Dios, por que todo lo que me proponga a el siempre se lo contare primero, por darme tanta fortaleza en los momentos dificiles, por que se que el me guiara en todo, como lo hizo en mi carrera y formacion como profesional y persona.

Agradecer a mis padres, que siempre se preocuparon, me motivaron y siempre estuvieron pendientes cuando los necesité, me escucharon y se alegraron con migo, por mis resultados y todas esas experiencias que puede vivir y compartir con ellos.

Tambien quiero agradecer a mis dos tutores de mi trabajo de grados, al MsC. Jorge Enrique Romero R. y al PhD. Andrés L. Jutinico A, quienes aparte de guiarme en este último proceso, me enseñaron, me motivaron y me resaltaron muchas cualidades como persona y futuro profesional.

Agradecerle a todas las personas que conocí en la facultad, a todos los profesores, mis compañeros y ahora colegas, por que gracias a cada experiencia vivida con ellos, aprendí, recapacité y me motive a convertirme en mejor pesona cada día.

Resumen.

Este trabajo de grado tiene como objetivo comparar dos paneles fotovoltaicos: uno con tecnología monocristalina y el otro con tecnología policristalina, considerando las curvas características, corriente – voltaje (I-V) y potencia – voltaje (P-V). Inicialmente, se realizaron simulaciones de la generación eléctrica de los paneles teniendo en cuenta el modelo teórico con los parámetros internos y las variables radiación, temperatura, voltaje corriente y potencia. Seguidamente se realizó la instrumentación electrónica necesaria para medir la irradiancia y la temperatura sobre los paneles, así como las variables eléctricas. Finalmente se realizó una prueba de concepto a partir de un montaje experimental que permitió comparar el comportamiento de las dos tecnologías. A partir de las pruebas experimentales, se concluyó que el panel de tecnología monocristalina presento mayor eficiencia con respecto al panel de tecnología policristalina.

Palabras clave: panel solar, monocristalino, policristalino, variables eléctricas, radiación temperatura, voltaje, corriente y potencia.

Abstract.

This project aims to compare two photovoltaic panels: one with monocrystalline technology and another with polycrystalline technology, considering the characteristic curves, current - voltage (I-V) and power - voltage (P-V). Initially, simulations of the electrical generation of the panels were carried out taking into account the theoretical model with the internal parameters and the variables radiation, temperature, current, voltage and power. Following, the necessary electronic instrumentation was carried out to measure the irradiance and temperature on the panels, as well as the electrical variables. Finally, a proof of concept was carried out based on an experimental set-up that allowed comparing the behavior of the two technologies. From the experimental tests, it was concluded that the monocrystalline technology panel presented a higher efficiency with respect to the polycrystalline technology panel.

Keywords: photovoltaic panels, monocrystalline, polycrystalline, electrical variables, radiation temperature, voltage, current and power.

Tabla de contenido

Contenido

Dedicatoria.....	11
Agradecimientos.....	12
Resumen.....	13
Abstract.....	14
Tabla de contenido.....	15
Lista de Figuras.....	17
Lista de Tablas.....	20
Lista de Símbolos y Abreviaturas.....	20
1 Introducción.....	21
1.1 Planteamiento del problema.....	23
1.2 Justificación.....	24
1.3 OBJETIVOS.....	25
1.3.1 Objetivo General.....	25
1.3.2 Objetivos específicos.....	25
2 Marco Teórico.....	26
2.1 Energía solar.....	26
2.2 Energía solar Fotovoltaica.....	27
2.3 Tecnologías fotovoltaicas basadas en silicio.....	27
2.4 Paneles solares fotovoltaicos monocristalinos.....	28
2.5 Paneles solares fotovoltaicos policristalinos.....	29
2.6 Características propias de los paneles solares.....	30
2.7 Funcionamiento de los paneles solares fotovoltaicos.....	31
2.8 Movimiento del sol respecto a la superficie de la tierra.....	33
2.9 Tiempo solar de irradiación.....	35
2.10 Componentes Electrónicos.....	36
2.10.1 Microcontrolador Arduino mega 2065.....	36

2.10.2	Piranómetro.....	37
2.10.3	Sensor de temperatura LM 35.....	38
2.10.4	Sensor de Voltaje FZ0430.....	38
2.10.5	Sensor de Corriente ACS 712 de 5 A.....	39
3	Modelo físico de las celdas fotovoltaicas.	40
4	Simulación de las curvas características (I-V) y (P-V).....	44
4.1	Explicación del diagrama de bloques para las curvas características.....	44
4.2	Simulaciones de los paneles solares.	47
4.2.1	Parámetros generales de los paneles MONOCRISTALINO, POLICRISTALINO.....	48
4.3	Comparación de paneles solares.....	48
4.4	Panel solar Germani A grade Solarworld solar cell (MONO CRISTALINO).....	49
4.4.1	Curva característica I-V.	49
4.4.2	Curva característica PV.	50
4.5	Panel Solar SOLARTECH Modelo DXP50-36P 50 W (POLICRISTALINO).....	51
4.5.1	Curva característica IV panel Solar Policristalino.	51
4.5.2	Curva característica PV panel Solar Policristalino.	53
4.6	Comparación de las simulaciones con los datos del fabricante para los paneles solares monocristalino y policristalino con potencia 50 W.	54
5	Instrumentación.....	55
5.1	Recolección de datos.....	56
5.2	Adquisición de las variables Irradiancia y la temperatura.	57
5.3	Cargas resistivas de prueba.....	60
5.4	Toma de resultados de las variables eléctricas generadas por los paneles. ...	60
6	Resultados experimentales.	64
6.1	Prueba 1.....	68
6.2	Prueba 2.....	71
6.3	Prueba 3.....	75
7	Conclusiones.....	79
8	BIBLIOGRAFÍA.....	81

Lista de Figuras.

Figura 2-1: Etapas del proceso de fabricación de las celdas a base de silicio (Monocristalina y Policristalina), tomada de [18].	28
Figura 2-2, Panel Solar Monocristalino. Elaboración propia.	29
Figura 2-3: Panel Solar Policristalino. Elaboración propia.	29
Figura 2-4: Efecto de la radiación solar sobre un semiconductor de silicio, tomada de [21].	32
Figura 2-5: Representación de la Unión (p-n), tomada de [21].	33
Figura 2-6: movimiento de la tierra con respecto al sol, tomada de [25].	34
Figura 2-7: Líneas imaginarias del planeta tierra, Respecto al plano de la Elíptica, tomada de [28].	34
Figura 2-8: Distribución de Radiación pico del sol durante un día, fuente tomada de [32].	36
Figura 2-9: Arduino Omega 2560. Elaboración propia.	37
Figura 2-10: Piranómetro PYR, en dos ángulos diferentes. Fuente Propia.	37
Figura 2-11: Modulo de temperatura LM35. Fuente propia.	38
Figura 2-12: Modulo del sensor de voltaje FZ0430. Fuente propia.	39
Figura 2-13: Modulo del sensor de Corriente ASC712 de 5 A. Fuente propia.	39
Figura 3-1: Curva característica (I-V). Fuente Propia.	40
Figura 3-2: Curva característica (P-V). Fuente propia.	40
Figura 3-3: Circuito Equivalente de una celda Solar, tomada de [43].	41
Figura 3-4: Características de las curvas características de corriente (I-V) y potencia (P-V). Fuente tomada de [45].	43
Figura 4-1: Diagrama de bloques para la simulación de curvas características de paneles solares. Fuente propia.	44
Figura 4-2: Parametrización del Bloque Solar Cell. Fuente propia.	45
Figura 4-3: Simulación de la Curva característica (I-V) de panel Monocristalino, con diferente radiación. Fuente propia.	50
Figura 4-4: Simulación de la Curva característica (I-V) de panel Monocristalino, con diferente temperatura. Fuente propia.	50
Figura 4-5: Simulación de la Curva característica (P-V) de panel Monocristalino, con diferente radiación. Fuente propia.	51
Figura 4-6: Simulación de la Curva característica (P-V) de panel Monocristalino, con diferente temperatura. Fuente propia.	51
Figura 4-7: Simulación de la Curva característica (I-V) de panel Policristalino, con diferente temperatura. Fuente propia.	52
Figura 4-8: Simulación de la Curva característica (I-V) de panel Policristalino, con diferente radiación. Fuente propia.	52

Figura 4-9: Simulación de la Curva característica (P-V) de panel Policristalino, con diferente temperatura. Fuente propia.....	53
Figura 4-10: Simulación de la Curva característica (P-V) de panel Policristalino, con diferente radiación. Fuente propia.....	53
Figura 4-11: comparación de la simulación de la curva característica (P-V) de los paneles solares. Fuente propia.....	54
Figura 4-12: Comparación de la simulación de la curva característica (I-V) de los panles solares. Fuente propia.....	54
Figura 5-1: Mapa satelital de la ubicación del panel solar, recortada de la aplicación Maps. Elaboración propia.....	55
Figura 5-2: Ubicación del experimento, con ambos paneles solares en el techo de la vivienda. Fuente propia.....	56
Figura 5-3: Diagrama de Bloques, datos resultantes. Elaboración propia.....	57
Figura 5-4: Ubicación del piranómetro. Elaboración propia.....	57
Figura 5-5: Diagrama de Bloques en simulink, para la adquisición de datos del piranómetro. Elaboración propia.....	58
Figura 5-6: Distribución de los sensores de adquisición de variables eléctricas de los paneles solares, los sensores de los extremos corresponden al de corriente ASC712 y los 2 sensores del centro son los de voltaje FZ0430. Elaboración propia.....	61
Figura 5-7: Esquema de conexión de sensores de corriente ASC712 y de Voltaje FZ0430, en Protoboard y posteriormente al microcontrolador Arduino 2050, realizado en el programa Fritzing. Elaboracion propia.....	61
Figura 5-8: Diagrama de Bloques elaborado en simulink, para la adquisición de datos del sensor de corriente ASC712. Elaboración propia.....	63
Figura 5-9: Diagrama de Bloques elaborado en simulink, para la adquisición de datos del sensor de Voltaje FZ0430. Elaboración propia.....	63
Figura 6-1: Montaje final de los paneles Solares, instrumentación electrónica y almacenamiento de datos. Fuente propia.....	65
Figura 6-2: Radiación captada durante la toma de datos para las tres pruebas de los paneles solares. Rojo prueba 1, Azul prueba 2 y Morado prueba 3. Fuente propia.....	66
Figura 6-3: Temperaturas tomadas durante cada prueba realizada a los paneles solares. Azul prueba 1, Roja prueba 2 y Verde prueba 3. Fuente propia.....	67
Figura 6-4: Simulación teórica vs experimental respecto a la curva característica (I-V), panel Policristalino. Fuente propia.....	68
Figura 6-5: Simulación teórica vs experimental respecto a la curva característica (I-V), panel Monocristalino. Fuente propia.....	68
Figura 6-6: Simulación teórica vs experimental respecto a la curva característica (P-V), panel Policristalino. Fuente propia.....	69
Figura 6-7: Simulación teórica vs experimental respecto a la curva característica (P-V), panel monocristalino. Fuente propia.....	69

Figura 6-8: Simulación teórica vs experimental, respecto a la curva característica (I-V), panel Policristalino. Fuente propia.	72
Figura 6-9: Simulación teórica vs experimental, respecto a la curva característica (I-V), panel Monocristalino. Fuente propia.	72
Figura 6-10: Simulación teórica vs experimental respecto a la curva característica (P-V), panel Policristalino. Fuente propia.	73
Figura 6-11: Simulación teórica vs experimental respecto a la curva característica (P-V), panel Monocristalino. Fuente propia.	73
Figura 6-12: Simulación teórica vs experimental, respecto a la curva característica (I-V), panel Monocristalino. Fuente propia.	76
Figura 6-13: Simulación teórica vs experimental, respecto a la curva característica (I-V), panel Policristalino. Fuente propia.	76
Figura 6-14: Simulación teórica vs experimental respecto a la curva característica (P-V), panel Policristalino. Fuente propia.	77
Figura 6-15: Simulación teórica vs experimental respecto a la curva característica (P-V), panel Monocristalino. Fuente propia.	77

Lista de Tablas.

Tabla 1: Parámetros generales de los dos paneles solares (monocristalino y policristalino): Fuente propia.	48
Tabla 2: Resultados de las características de las variables de la prueba 1, teórica y experimental, para los paneles solares de tecnología monocristalina y policristalina. ..	70
Tabla 3: Resultados de las características de las variables de la prueba 2, teórica y experimental, para los paneles solares de tecnología monocristalina y policristalina. ..	74
Tabla 4: Resultados de las características de las variables de la prueba 3, teórica y experimental, para los paneles solares de tecnología monocristalina y policristalina. ..	77

Lista de Símbolos y Abreviaturas.

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
FF	Factor de forma	%	$FF = P_{max}/V_{oc} * I_{sc}$
η	Eficiencia	%	$\eta = \frac{FF * I_{sc} * V_{oc}}{G * Area}$
G	Radiación	W/m ²	Ec. 2
P_{MAX}	Potencia Máxima	W	$P_{MAX} = (I_{MPP} * V_{MPP})$
I_{MPP}	Tensión Máxima	A	Figura 3-4
V_{MPP}	Voltaje Máximo	V	Figura 3-4
I_{sc}	Corriente de corto circuito	A	Ec. 7
V_{oc}	Voltaje de circuito abierto	V	Ec. 5
R_s	Resistencia en serie	Ohm	Figura 3-3
R_p	Resistencia en paralelo	Ohm	Figura 3-3
Exp	Expresión matemática	1	Ec. 6
IIR	Respuesta infinita al impulso	1	Transformada Z
ADC	resolución del conversor análogo a digital		Sección 5

1 Introducción.

Actualmente en Colombia, se busca generar energía eléctrica de manera limpia y eficaz para depender en menor medida de fuentes contaminantes como las derivadas del petróleo y carbón [1]. Los sistemas fotovoltaicos dependen de la radiación emitida por el sol, la cual es un recurso natural inagotable. Los sistemas fotovoltaicos son parte de la solución de los problemas energéticos del futuro [2], que están relacionados con la escases de recursos, debido a la sobrepoblación del planeta que pueden llevar a un aumento constante en la demanda de energía [3].

Los sistemas fotovoltaicos de tecnología monocristalina y policristalina, ambos a base de silicio son los más comúnmente ofrecidos en el mercado. Sin embargo, los parámetros que definen el funcionamiento de estos no siempre son presentados en su totalidad en las especificaciones técnicas dadas por los fabricantes [4]. Por lo tanto, en este proyecto se pretende comparar estas dos tecnologías en las condiciones climáticas de Bogotá, para dar una guía a los lectores sobre los parámetros internos de los paneles, su eficiencia y su comportamiento en general.

Existen condiciones externas que afectan la eficiencia de las tecnologías, siendo la temperatura y el polvo las más comunes y de alto impacto [5]. En el sureste de Irán, se realizó un estudio comparativo de estas dos tecnologías, concluyendo que la eficiencia promedio mensual varia, así la tecnología monocristalino tiene una tendencia decreciente gradual en los meses con mayor irradiación solar y temperatura, siendo más eficiente en temporadas diferentes al verano, mientras que la tecnología policristalina muestra un

comportamiento inverso, que es más adecuado para ser utilizado en los meses de verano [6]. Otra comparación realizada en la ciudad de Manizales, en el SENA Regional Caldas – Colombia, muestra por medio de un estudio comparativo de paneles solares de diferentes tecnologías, que el panel solar policristalino tuvo un comportamiento similar al monocristalino, ya que la temperatura no tuvo un impacto significativo en la eficiencia del panel pues no supero los 25°C [7]. A pesar de lo anterior, el estado del arte indica que la efectividad de los paneles esta correlacionada con las variaciones de la temperatura en el lugar de operación. En este sentido, se considera relevante realizar pruebas experimentales del comportamiento de paneles solares en Bogotá. El montaje experimental usado en este proyecto cuenta con dos paneles solares de tecnología monocristalina y policristalina, respectivamente, cada uno con capacidad de generar 50 W en condiciones ideales. Estos paneles solares, han sido instrumentados con sensores de corriente, voltaje, temperatura y radiación, para obtener las gráficas características de las variables potencia - voltaje (P-V) y corriente-voltaje (I-V) [8]. Estos resultados experimentales son contrastados con simulaciones basadas en modelos físicos teóricos de los paneles. Las simulaciones realizadas utilizan diagramas de bloques del software Simulink de Mathworks. Finalmente se realiza un análisis comparativo y cualitativo en relación de los resultados de las curvas características experimentales y las curvas características teóricas de cada tecnología.

1.1 Planteamiento del problema.

A medida que pasa el tiempo, el uso de paneles solares a nivel mundial aumenta, crece el deseo de contribuir con el medio ambiente, al mismo tiempo se busca calidad, sostenibilidad, reducción en costos y consumo de energía. En el mercado existe una variedad de productos, que por medio de un proceso fotovoltaico, convierten la radiación solar en energía eléctrica [9]. En el estado del arte se encuentra que los paneles basados en celdas de tipo monocristalino por su proceso de fabricación son de mayor calidad frente a los basados en celdas policristalinas. Sin embargo, pruebas realizadas han demostrado que las propiedades eléctricas de las celdas solares varían frente a factores como temperatura, humedad polvo e irradiancia que inciden sobre estas [6][7][10][11]. En este sentido es posible que estos factores propios de Bogotá, por su variación de temperatura [12], representen una variación relevante frente al rendimiento de las celdas.

1.2 Justificación.

- ❖ Desde un punto de vista académico, las mediciones y comparaciones de las dos tecnologías de celdas fotovoltaicas permitirán identificar, caracterizar y obtener mayor conocimiento sobre los sistemas fotovoltaicos. Además, los estudios desarrollados en este proyecto se encuentran en el marco de proyectos actualmente en desarrollo de los grupos de investigación REM y GIBIO de la universidad. En particular este proyecto se ha desarrollado en el marco del proyecto "Gestión de energía basada en computación en la nube para la interoperabilidad entre un grupo de microrredes aisladas", código: 70172, el cual es un proyecto financiado por Min ciencias.
- ❖ A partir de análisis teóricos, de simulaciones y de pruebas experimentales se pretende encontrar de forma experimental indicios acerca de la tecnología más apropiada para las condiciones propias en un lugar establecido.
- ❖ El estudio de los elementos que conforman los sistemas fotovoltaicos es de gran relevancia para el desarrollo del país en materia energética, con este proyecto se pretende sumar en esta línea y así acercar cada vez más la academia a la industria y la sociedad en general

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 Objetivo General.

Comparar el comportamiento de un panel fotovoltaico de tecnología monocristalina con respecto a uno de tecnología policristalina ambos de 50 W en condiciones climáticas de Bogotá a partir de las curvas Potencia - Voltaje (P-V) y corriente - voltaje (I-V).

1.3.2 Objetivos específicos.

- ❖ Determinar a partir del estado del arte el modelo físico de las celdas fotovoltaicas de tecnologías monocristalino y policristalina, el cual permita establecer una comparación en términos de eficiencia.
- ❖ Simular el comportamiento de las celdas fotovoltaicas con respecto a las curvas de Potencia - Voltaje (P-V) y corriente-voltaje (I-V).
- ❖ Realizar la instrumentación que permita medir la irradiancia y la temperatura sobre el panel, así como, el voltaje, la corriente y la potencia generadas.
- ❖ Realizar una prueba de concepto a partir de un montaje experimental que permita comparar el comportamiento de las dos tecnologías, realizando las mediciones de corriente, voltaje, potencia, radiación global y temperatura en condiciones similares.

2 Marco Teórico.

Para el presente trabajo se realizó la comparación de dos diferentes paneles fotovoltaicos, uno de tecnología monocristalino y la otro de tecnología policristalino, respecto a las mediciones de corriente, voltaje y potencia, radiación solar y temperatura. A continuación, se presentan los conceptos que son relevantes para el desarrollo del proyecto.

2.1 Energía solar.

La energía solar es el recurso más abundante de la energía renovable. Es la energía que, en forma de radiación procedente del Sol, llega a la superficie terrestre y se puede utilizar para procesos energéticos. El sol emite cerca de $3.8 \times 10^{23} \text{ kW}$, y aproximadamente el $1.8 \times 10^{14} \text{ kW}$ incide el planeta, aun así, a escala humana representa una fuente inagotable, fiable, limpia, segura que no genera residuos [13], La energía que el sol emite no incide totalmente en a la superficie terrestre, debido a complejos fenómenos de absorción, reflexión y difusión que ocurren en la atmosfera. La radiación directa es la que atraviesa la atmósfera en línea recta sin sufrir cambio alguno (radiación que causa sombra) mientras que la radiación dispersa (también denominada radiación difusa), es debida a la dispersión por parte de los gases existentes en la atmósfera [14]. La irradiancia es variable, el promedio el diario multianual en la mayor parte del país es cercano al $4,5 \text{ kWh/m}^2$, [1] [15].

Para los cálculos, la irradiancia es el flujo de la radiación solar que incide sobre una unidad de superficie en un determinado tiempo sus unidades son W/m^2 , y la Irradiación

solar se define como la energía por unidad de superficie, se expresa en J/m^2 donde *julios(J)* es unidad de energía, también se puede expresar por medio de conversión de unidades como Wh/m^2 [16].

2.2 Energía solar Fotovoltaica.

La energía solar fotovoltaica convierte la irradiación solar en energía eléctrica, mediante el efecto fotovoltaico. Los paneles solares están compuestos por celdas solares o celdas fotovoltaicas, que convierten la luz solar en forma de flujo de fotones, los cuales inciden en materiales fabricados con elementos semiconductores cristalinos, los enlaces entre los electrones de valencia y su núcleo se rompen quedando libres para circular en una misma dirección llenando espacios vacíos, y a su vez generando un flujo de electrones [17]. Un módulo fotovoltaico tiene cierta cantidad de celdas solares, múltiples módulos al conectarse pasan a hacer un arreglo y estos pueden ser conectados entre sí, ya sea en paralelo o en serie [13].

2.3 Tecnologías fotovoltaicas basadas en silicio.

Las tecnologías a base de silicio son las más abundantes en el mercado, son diseñadas para generar electricidad directamente desde la luz solar mediante un proceso electrónico que se presenta naturalmente. La Figura 2-1 muestra el proceso de fabricación de los paneles solares a base de silicio (Monocristalina y Policristalina), estas tecnologías tienen procesos rigurosos de acuerdo a los estándares internacionales, agrupando celdas para posteriormente ser conectadas, ya sea en paralelo o en serie

[18]. El silicio representa casi un 30% de su masa, además de ser el material con el cual se fabrican la mayoría de los elementos de aplicaciones electrónicas y microelectrónicas [19]. Estas tecnologías de silicio, se pueden fabricar por medio de obleas monocristalinas, policristalinas o películas delgadas amorfas e híbridas [20].



Figura 2-1: Etapas del proceso de fabricación de las celdas a base de silicio (Monocristalina y Policristalina), tomada de [18].

2.4 Paneles solares fotovoltaicos monocristalinos.

Los paneles solares monocristalinos son las tecnologías más antiguas y utilizadas actualmente, su estructura ordenada se forma a partir de un sólido de silicio puro con boro cristalino intacto, como se muestra en la Figura 2-2, su fabricación requiere de mucho tiempo y energía, se cortan a partir de cristales individuales grandes que han sido cuidadosamente construidos bajo condiciones controladas, teniendo a si un valor

económico mayor respecto a otras tecnologías. La eficiencia de las celdas puede ser de 14%, 16% e incluso de un 18 % [21][22], aunque se prevé una pérdida de eficiencia a medida que la temperatura supere los 25°C, lo que genera que en lugares de elevadas temperaturas, se recurra a equipos de refrigeración debajo de los paneles monocristalinos [23].

2.5 Paneles solares fotovoltaicos policristalinos.

Las tecnologías basadas en celdas policristalinas se forman esencialmente por una red cristalina, en la Figura 2-3 se observa su color y forma característica, el tamaño de su estructura puede variar en milímetros, llegando incluso a micras de cristales, estos son separados por un borde de grano defectuoso, en la industria estos materiales no exigen alto grado de pureza, aprovechando así el sobrante de la producción en la fabricación de paneles fotovoltaicas monocristalinas, siendo más económicas respecto a otras tecnologías, el tamaño y calidad determinarán el desempeño de la celda [20] [24].



Figura 2-2, Panel Solar Monocristalino. Elaboración propia.



Figura 2-3: Panel Solar Policristalino. Elaboración propia.

2.6 Características propias de los paneles solares.

Las características propias de las tecnologías de los paneles solares monocristalino y policristalino, están relacionadas con las variables (Corriente, voltaje y potencia) generadas por cada tecnología, estas propiedades son afectadas por defectos internos de su estructura que ocurren en el momento de su fabricación, también factores como efectos de flexión y cambio de temperatura, afectando directamente su rendimiento, provocando saturación de corriente, reduciendo la eficiencia y acelerando el deterioro del panel fotovoltaico [25].

Tensión en circuito abierto (V_{oc}): Es el voltaje máximo que se logra obtener del panel solar, bajo condiciones definidas de temperatura e iluminación, corresponde a una corriente igual a cero [25][26].

Corriente en cortocircuito (I_{sc}): Es la intensidad de corriente máxima que genera el panel Solar, en ausencia de cargas externas y con las terminales en cortocircuito, bajo ciertas condiciones de iluminación y temperatura, con un voltaje correspondiente a cero [25][26].

Potencia máxima (P_{max}): Es la máxima de potencia que produce un panel Solar bajo ciertas condiciones de temperatura e iluminación ya definidas, de acuerdo a la relación máxima de I-V [25][26] .

Rendimiento o eficiencia del panel: se define como el porcentaje de potencia de la energía solar al convertirse en energía eléctrica [25].

Factor de forma (FF): Corresponde a la ecuación 1, siendo la fracción entre la potencia máxima y el producto del voltaje en circuito abierto y la corriente en corto circuito. Este factor da una idea de la calidad del panel solar, siendo éste tanto mejor cuánto más alto sea su factor de forma expresado en porcentaje (%) [26],

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad 1$$

Eficiencia (η): La eficiencia de un panel solar se calcula con la ecuación 2, en esta ecuación se realiza el producto de factor de forma (FF), con la corriente en corto circuito (I_{sc}), y el voltaje en circuito abierto (V_{oc}), dividido el producto de la radiación (G) y el Area de incidencia del panel solar

$$\eta = \frac{FF * I_{sc} * V_{oc}}{G * Area} \quad 2$$

2.7 Funcionamiento de los paneles solares fotovoltaicos.

En la Figura 2-4, se observa como la radiación actúa cuando incide en un semiconductor, causando el desprendimiento de electrones dejando espacios llamados huecos, los cuales generan la circulación de electrones, ya que en el momento que se desprenden van ocupando el espacio dejado por otro, circulando en la misma dirección y restableciendo el enlace que había sido roto, recorriendo el semiconductor en la misma

dirección pero sin poder generar corriente eléctrica, para que esto ocurra se tiene que generar un campo magnético dentro, así los electrones empezaran a circular en sentidos opuestos, generando así corriente eléctrica [21].

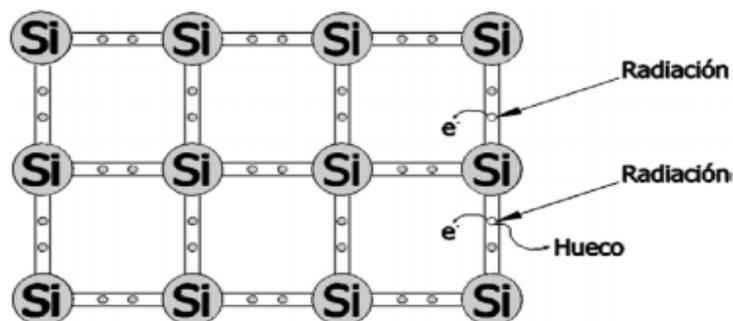


Figura 2-4: Efecto de la radiación solar sobre un semiconductor de silicio, tomada de [21].

Los paneles solares de este tipo de semiconductores están conformados por dos regiones de silicio, estas han sido tratadas químicamente para así modificar su estructura atómica y formar una unión (p-n), para ambos hay una sustitución de átomos del material, para el tipo n, se sustituyen por el elemento Fósforo el cual contiene cinco electrones de valencia, para formar el enlace se necesitan solamente cuatro electrones de valencia quedando así uno libre. Para el tipo p, se sustituye también átomos de la región opuesta, pero esta será por el elemento Boro, que posee tres electrones de valencia, igual al caso anterior a la forma el enlace, hay un electrón que queda libre, en otras palabras, dejando un hueco disponible [27].



Figura 2-5: Representación de la Unión (p-n), tomada de [21]

Para la unión (p-n), los electrones libres de la región tratada con Fosforo, tipo n, proceden a ocupar los huecos de la región tratada con boro, tipo p, de esa manera se crea el campo eléctrico, a medida que los electrones circulen o se desplacen continuamente en las dos direcciones de las regiones, el campo eléctrico cada vez será más grande [27].

2.8 Movimiento del sol respecto a la superficie de la tierra.

El planeta Tierra tiene dos desplazamientos respecto a la órbita del sol, el primero de ellos es la rotación sobre su propio eje, el cual se denomina eje polar y tiene una inclinación aproximada de 23.5° , tomada como referencia del "plano eclíptico". El segundo movimiento de la Tierra respecto al sol es el movimiento de traslación [17][28].

En la Figura 2-6, podemos observar el movimiento del planeta tierra respecto al sol y la distancia promedio en sus cuatro posiciones referentes durante el año. El punto de la órbita que se encuentra más alejado del sol se denomina afelio y el más cercano Perihelio, el tiempo de traslación del sol dura aproximadamente un año, más

exactamente 365 Días, 5 horas y 48 minutos, el planeta gira sobre su eje una vuelta por día, [29].

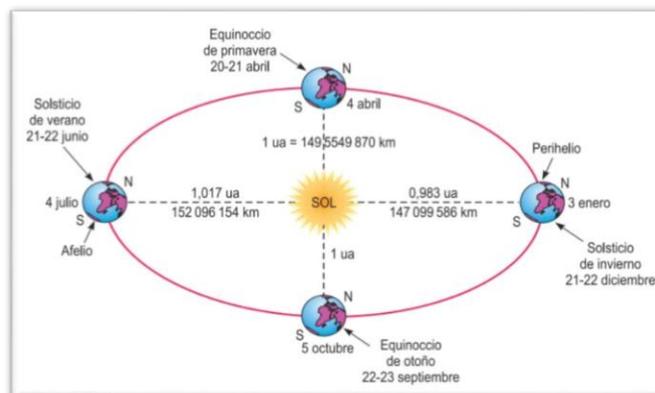


Figura 2-6: movimiento de la tierra con respecto al sol, tomada de [25].

La cantidad de energía recibida del Sol depende de varios factores como la época del año, donde la mayor energía recibida es en verano que en invierno, el ángulo en el cual se reciben los rayos solares, la superficie de irradiación, la ubicación geográfica (latitud y longitud) [30] [31].

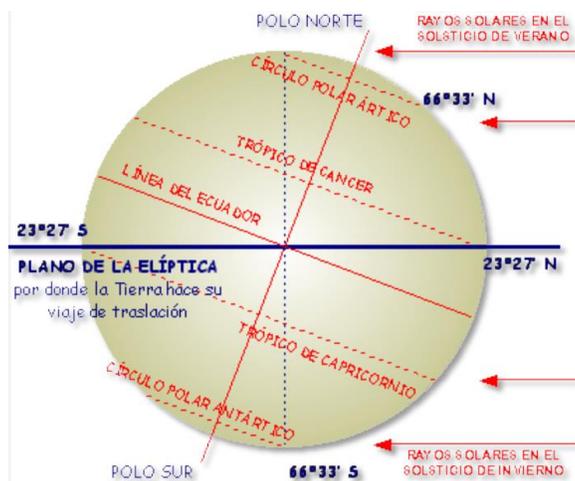


Figura 2-7: Líneas imaginarias del planeta tierra, Respectu al plano de la Elíptica, tomada de [28].

En la figura 2-7 se pueden observar las líneas imaginarias representativas de la posición del planeta respecto al plano de la elíptica, clave para los cuatro momentos de referencia del año, que son: solsticio de invierno, equinoccio de primavera, equinoccio de otoño y solsticio de verano.

El solsticio de invierno inicia el 22 de diciembre de cada año, en esta época el sol se encontrará posicionado sobre el trópico de capricornio. El equinoccio de primavera comienza el 21 de marzo, en esta época el sol se sitúa sobre el Ecuador, por lo tanto, los días y las noches tienden a tener la misma duración en el planeta. El equinoccio de otoño comienza el 22 de septiembre, en esta época del año inicia el otoño en el hemisferio norte y la primavera en el hemisferio sur. El solsticio de verano comienza el 21 de junio. En esta época el hemisferio norte se inclina hacia el sol, quedando más perpendicular de la incidencia de los rayos del sol, al situarse el Sol en la vertical del trópico de Cáncer, generando así los días más calurosos del año en el hemisferio norte; en el hemisferio sur se producirá el invierno [28].

2.9 Tiempo solar de irradiación.

El tiempo solar es una medida del tiempo fundamentada en el movimiento aparente del Sol sobre el horizonte del lugar [28]. Las horas pico de irradiación son el número de horas al día en la que suponemos una irradiancia pico de 1000 W/m^2 (Aprovechamiento Energético) [16]. Se puede notar que cuando la irradiancia se expresa en W/m^2 , junto al factor de pérdidas se puede estimar la potencia producida por los paneles fotovoltaicos

[32] [33] . La distribución de la radiación a lo largo del día se muestra en la Figura siguiente:

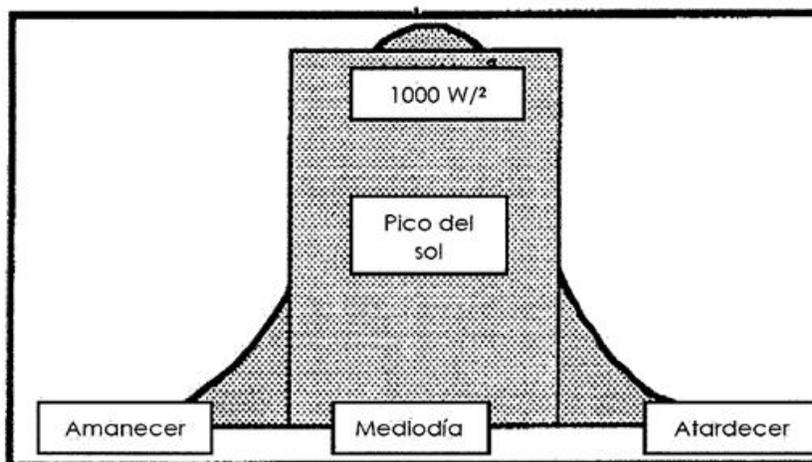


Figura 2-8: Distribución de Radiación pico del sol durante un día, fuente tomada de [32].

2.10 Componentes Electrónicos.

2.10.1 Microcontrolador Arduino mega 2065.

El Arduino Mega 2560 es una placa de microcontrolador conformado por 54 pines de entrada y salida digital, de los cuales 15 se pueden usar como salidas PWM, 16 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), un oscilador de cristal de 16 MHz, un conector de alimentación, un encabezado ICSP, y un botón de reinicio, como se muestra en la Figura 2-9, La comunicación entre la computadora y Arduino se produce a través del puerto serie, sin embargo, posee un convertidor USB-SERIE, por lo que sólo se necesita conectar el dispositivo a la computadora utilizando un cable USB como el que utilizan las impresoras [34] [35].

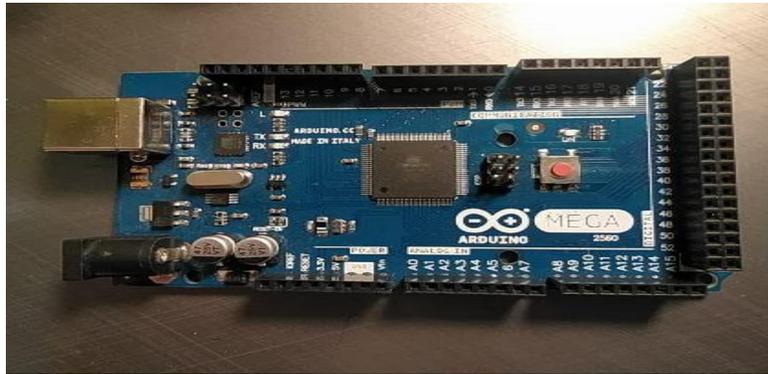


Figura 2-9: Arduino Omega 2560. Elaboración propia.

2.10.2 Piranómetro.

En la Figura 2-10 se observa el piranómetro o sensor de radiación solar, es un instrumento termoelectrico o termopila que convierten la radiación solar en una señal eléctrica de voltaje [36]. Son clasificados por la ISO 9060 [37].



Figura 2-10: Piranómetro PYR, en dos ángulos diferentes. Fuente Propia

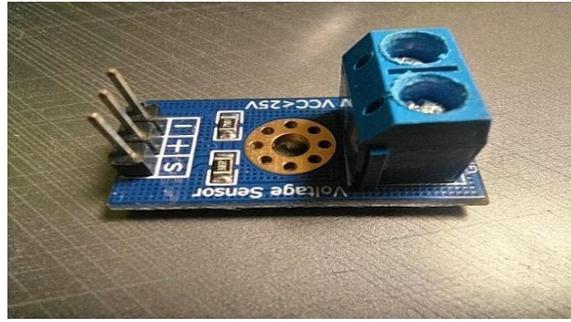


Figura 2-12: Modulo del sensor de voltaje FZ0430.
Fuente propia.

2.10.5 Sensor de Corriente ACS 712 de 5 A.

El integrado que se observa en la Figura 2-13, consta de un circuito de sensor Hall lineal, la corriente aplicada que fluye a través de esta ruta de conducción de cobre genera un campo magnético que es detectado por el Hall IC integrado y convertido en un voltaje proporcional [40], la conexión para la toma de datos es: conectar la tensión del circuito a medir respetando la polaridad, los tres pines de salida se conectan directamente al Arduino, pin de alimentación del módulo, la salida análoga y el pin de tierra [39].

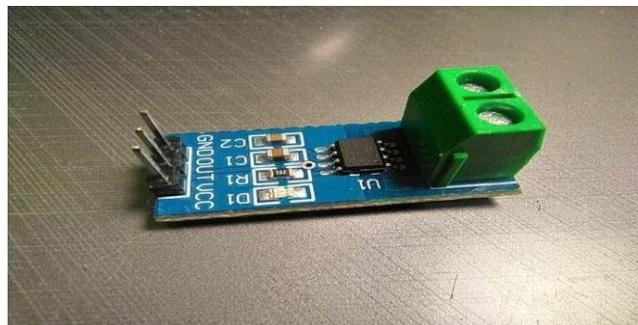


Figura 2-13: Modulo del sensor de Corriente ASC712 de 5 A.
Fuente propia.

3 Modelo físico de las celdas fotovoltaicas.

El modelo físico de un panel fotovoltaico se refiere a la representación de las variables físicas, como se observa en la Figura 3-1 voltaje – corriente y la Figura 3-2 potencia – voltaje, que son directamente dependientes a factores de temperatura, irradiación solar, sistemas resistivos en serie, paralelo, factor de forma, entre otras variables, las curvas características son el resultado de las variaciones de la carga, al cual el panel se encuentre conectado [41].

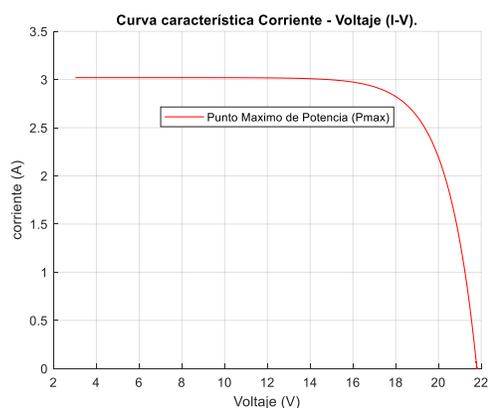


Figura 3-1: Curva característica (I-V).
Fuente Propia.

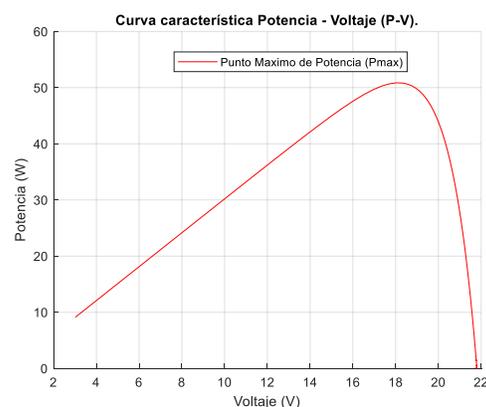


Figura 3-2: Curva característica (P-V).
Fuente propia.

En la Figura 3-3 se muestra el circuito equivalente de una celda solar un dispositivo de unión p-n que cuenta con una fuente de corriente, un diodo que está polarizado directamente, una resistencia en serie (R_s) y una resistencia en paralelo (R_p) [42]. La

energía fotónica resultado de la radiación solar, genera un portador de carga o el par electrón-hueco en la celda, la unión p-n del circuito, recolecta estas cargas, la corriente se desvía en el diodo de polarización y la corriente restante sale al circuito externo, de igual manera se produce voltaje de polarización directa por el efecto fotovoltaico [43].

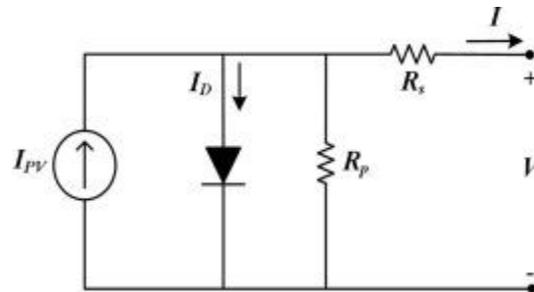


Figura 3-3: Circuito Equivalente de una celda Solar, tomada de [43].

Teniendo en cuenta el anterior circuito se puede modelar de la siguiente manera.

$$I = I_l - I_0 \left[\exp \left(\frac{q (V + IR_s)}{nKT} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right) \quad 3$$

donde I_l es la corriente generada por la radiación, I_0 es la corriente de saturación inversa del diodo, q es la carga del electrón ($1.60217646 \times 10^{-19} C$), K es la constante de Boltzmann ($1.3806503 \times 10^{-23} J / K$), T es la temperatura (K) de la unión p-n, n es el factor de calidad del diodo ($1 \leq n \leq 2$), R_s es la resistencia en serie (Ω) que representa las pérdidas en los enlaces de soldadura de la celda, caja de conexiones, interconexión, etc; y R_p (Ω) es la resistencia de derivación que representa la fuga de corriente a través de las derivaciones de alta conductividad a través de la unión p - n [42].

La siguiente expresión matemática representa el comportamiento de una celda solar fotovoltaica mediante la corriente generada por la radiación I_l y un solo diodo que representa el fenómeno de difusión atravesado por una corriente I_d . La corriente de fuga de la resistencia de derivación R_{sh} es la corriente I_{sh} que es causada por el defecto de fabricación distribuido dentro de la estructura de cada celda solar [44].

$$I = I_{sc} - I_d - I_{sh} \quad 4$$

Se modela el comportamiento del módulo fotovoltaico en relación entre la corriente y el voltaje, expresada por la siguiente ecuación matemática :

+

$$I = I_{sc} \left(1 - \left(\frac{v}{V_{oc}} \right)^S \right) \quad 5$$

donde I_{sc} es la corriente de corto circuito, v_{oc} voltaje de circuito abierto, S representa el parámetro de forma, en relación de la corrientes y voltaje del modelo.

$$I_d = I_s \left(\exp \left(\frac{v + R_s I}{n V_t} \right) - 1 \right) \quad 6$$

La corriente I_{sh} representa la corriente de fuga causada por la resistencia en derivación R_{sh} , y su relación con el voltaje V a través de la celda [42], de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$I_{sh} = \left(\frac{v + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad 7$$

La ecuación 3 permite establecer el mismo comportamiento de la característica I-V de una celda, cuando se refiere a la ecuación característica y los parámetros fundamentales del panel solar.

En la Figura 3-4, se observan las dos curvas características de corriente (I-V) y de potencia (P-V), con sus respectivas características propias y en común: muestra el punto máximo de potencia (P_{MAX}) o (MPP), el cual se relaciona para las tres variables eléctricas de las gráficas, corriente en su punto máximo (I_{MPP}), voltaje en su punto máximo (V_{MPP}), y potencia en su punto máximo (P_{MPP}), las variables cambian respecto a la irradiación que inciden en los paneles solares, otras características expresadas son tensión en circuito abierto (V_{oc}) y corriente en cortocircuito (I_{sc}) o (I_{sh}) [45], los cuales son el voltaje máximo que se logra obtener y la intensidad de corriente máxima cuando exista ausencia de cargas externas y con las terminales en cortocircuito variables generadas por el panel Solar, respectivamente [25] [26].

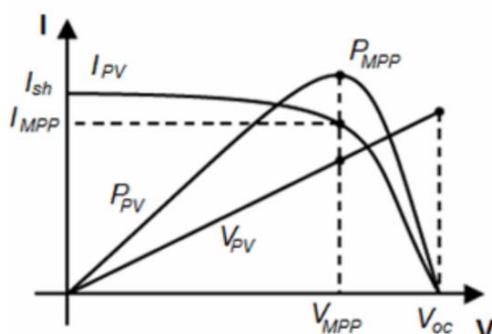


Figura 3-4: Características de las curvas características de corriente (I-V) y potencia (P-V). Fuente tomada de [45].

4 Simulación de las curvas características (I-V) y (P-V)

En este capítulo se explicará cómo por medio del software de Mathworks (MATLAB SIMULINK), se realiza un diagrama de bloques, el cual permite simular las curvas características de Potencia - Voltaje (P-V) y corriente-voltaje (I-V) por medio de datos del fabricante de cada una de las celdas fotovoltaicas monocristalinas y policristalina.

4.1 Explicación del diagrama de bloques para las curvas características.

Se realizó en el programa Simulink de Mathworks, un diagrama de bloques que simula el comportamiento de paneles solares, se observa en la Figura 4-1 cómo se organizó el diagrama de bloques, con el fin de dar un orden y consistencia a los objetivos propuestos.

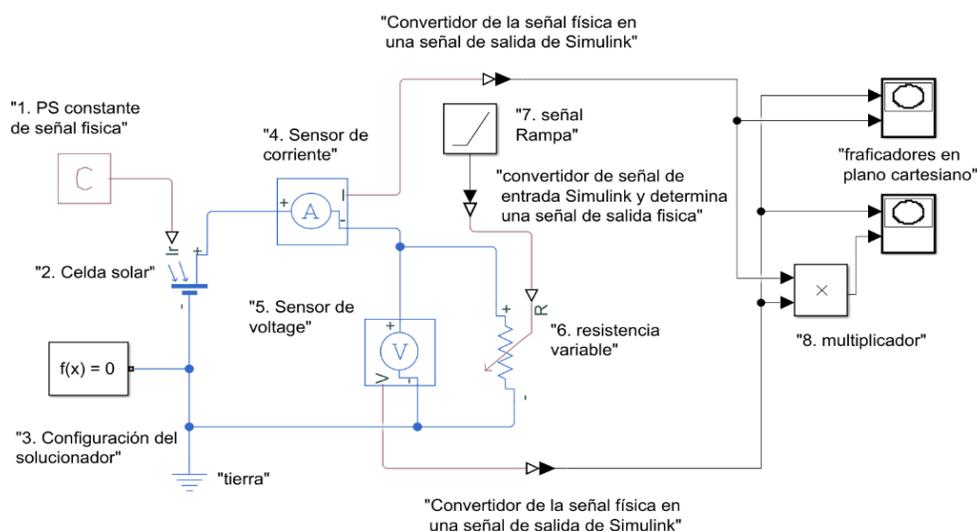


Figura 4-1: Diagrama de bloques para la simulación de curvas características de paneles solares. Fuente propia.

El bloque 1. PS constante de señal física tiene como función crear una señal física, para la simulación será el bloque referente de la radiación solar estándar de prueba del panel solar, con un valor igual a 1000 w/m^2 .

El bloque 2. Celda solar, modela una celda solar como una combinación en paralelo de una fuente de corriente, dos diodos y una resistencia en paralelo, R_p , que están conectados en serie con una resistencia R_s . Este bloque es el más importante en el momento de la modelación de cada una de las celdas, ya que en él son establecidos los parámetros y características del fabricante de cada panel como se muestra en la Figura 4-2.

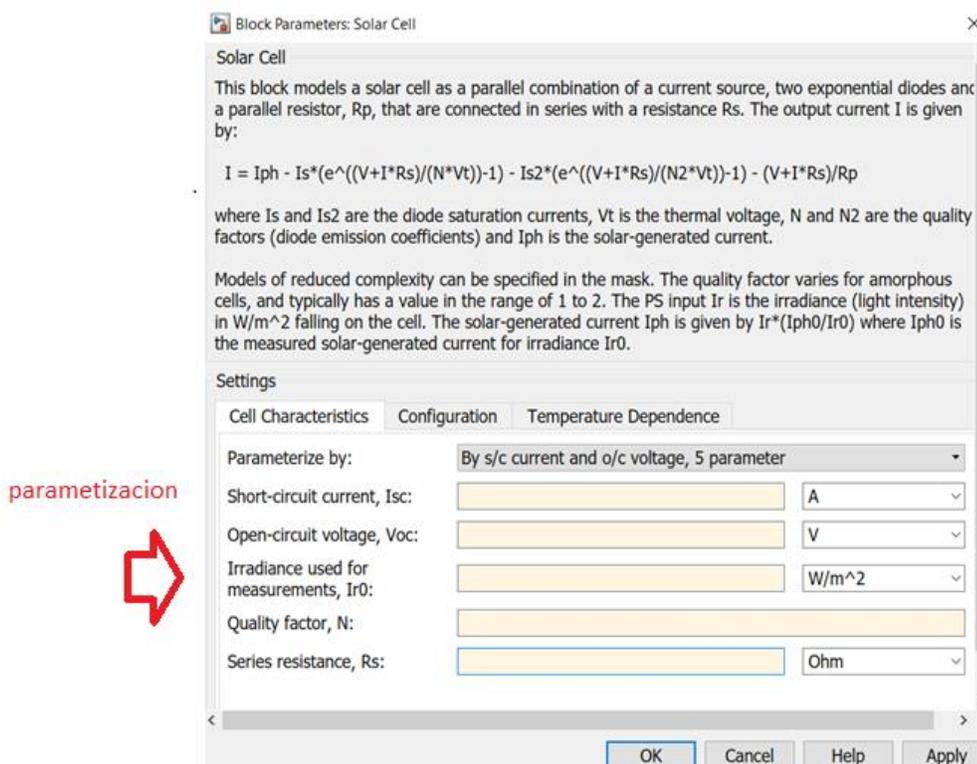


Figura 4-2: Parametrización del Bloque Solar Cell. Fuente propia.

El bloque 3. define la configuración del solucionador que se utiliza para la simulación (consistencia de tolerancia, tipo corrección, tiempo de muestra, interacciones, método). Para la simulación se usan valores estándar del bloque. Siguiendo con los bloques de medición. El bloque número 4. Sensor de corriente ideal, representa cualquier medida de corriente proveniente de algún tipo de señal, y se representa en una expresión física de la variable corriente, las conexiones + y - conservan los puertos eléctricos a través de los cuales se inserta el sensor en el circuito, éste a su vez está conectado en serie con la salida del bloque (celda solar) y otro bloque (sensor de voltaje) con el fin de registrar la corriente producida con parámetros de prueba del panel solar.

El bloque 5. sensor de voltaje como su nombre lo dice representa un sensor de voltaje ideal, es decir, un dispositivo que convierte el voltaje medido entre cualquier conexión eléctrica en una señal física proporcional al voltaje. Las conexiones + y - conservan los puertos eléctricos a través de los cuales se conecta el sensor al circuito, este será conectado en paralelo en la salida del bloque (sensor de corriente) y posterior cerrando el circuito a tierra.

La salida física de los dos bloques del sensor de corriente y sensor de voltaje pasan por un bloque convertidor de señal física en señal de salida simulink, estos resultados de corriente y voltaje, respectivamente de los sensores son los puntos de las curvas a las cuales queremos llegar.

El bloque 6. La Resistencia variable, representa la modelación de una resistencia variable lineal. La relación entre el voltaje V y la corriente I es $V = I * R$ donde R es el valor numérico presentado en el puerto de señal física R . El parámetro de resistencia

mínima evita valores negativos. La conexión positiva (+) y negativa (-) conservan los puertos eléctricos correspondientes a las terminales de la resistencia respectivamente. La corriente positiva es la que fluye de manera positivo a negativo, y el voltaje a través de la resistencia viene dado por $V (+)$ y $V (-)$. Este a su vez está conectado en serie con el bloque Ramp número 7. el encargado de enviar una señal de rampa comenzando a la hora especificada estableciendo una pendiente de 1 para la prueba, en ambos casos, la salida de este pasara primero por el convertidor de señal de entrada Simulink y determina una señal de salida física la cual parametrizara el bloque de la resistencia variable.

Finalmente, el bloque 8 multiplicador, se encarga de realizar el producto entre la salida ya convertida del bloque sensor de corriente y sensor de voltaje, tomando la ley de watt, el producto de la corriente con el voltaje es igual a la potencia, como referente para tener así la potencia de la simulación de los paneles.

4.2 Simulaciones de los paneles solares.

Con las especificaciones de fábrica que se encuentran en la Tabla 1 de cada uno de los paneles solares respectivamente, se realizó la ejecución del programa ya mencionado anteriormente.

4.2.1 Parámetros generales de los paneles MONOCRISTALINO, POLICRISTALINO.

En la tabla 1, se describe los parámetros más relevantes para la simulación, establecidos por los catálogos de los fabricantes.

Tabla 1: Parámetros generales de los dos paneles solares (monocristalino y policristalino): Fuente propia.

Parámetros generales	VIP solar modelo: Germani A grade Solarworld solar cell (MONO CRISTALINO)	SOLARTECH Modelo DXP50-36P 50 W (POLICRISTALINO)
Potencia Máxima	50 W	50 W
Tensión en el punto máximo (V_{mp})	17,8 V	17,5 V
Corriente de Max. Potencia (I_{pm})	2,81 A	2,90 A
Tensión de circuito abierto (V_{oc})	22,3 V	21,8 V
Corriente de corto circuito (I_{sc})	3,06 A	3,02 A
Valor máximo recomendado del fusible	10,0 A	10,0 A
Módulo de eficiencia	18,43%	14,10%
Configuración	36 celdas 3x12 matriz	36 celdas 3x12 matriz

4.3 Comparación de paneles solares.

Se introducen los parámetros correspondientes de la Tabla 1, en el bloque número 2 (celda solar), respectivamente como se muestra en la figura 4-2, lo cual permite simular el comportamiento de las curvas características de Potencia - Voltaje (P-V) y corriente-

voltaje (I-V), con diferentes variables (radiación y temperatura) y comportamientos propios de cada uno de los paneles.

4.4 Panel solar Germani A grade Solarworld solar cell (MONO CRISTALINO).

4.4.1 Curva característica I-V.

La simulación de la curva característica de corriente (I-V), del panel monocristalino de VIP solar, muestra el comportamiento de las variables eléctricas (corriente – Voltaje), cuando se establece una temperatura fija 25°C , y se varia la irradiancia, para la investigación se realizó en cuatro diferentes estados 400 W/m^2 , 700 W/m^2 , 1000 W/m^2 , 1300 W/m^2 , respectivamente. La corriente es la variable que más cambia respecto al voltaje, cuando la irradiancia aumenta, así es mayor la corriente generada por el panel solar como lo muestra en la Figura 4-3. Para el caso donde la variable radiación solar se deja fija en 1000 W/m^2 , y la variable que cambia es la temperatura, se realiza la simulación con las siguientes diferentes temperaturas 45°C , 35°C , 25°C , 15°C , respectivamente, como se observa en la Figura 4-4. En esta figura vemos como a medida que baja la temperatura, el panel solar produce un mayor voltaje, esto conlleva a mejorar la eficiencia respecto a la potencia generada.

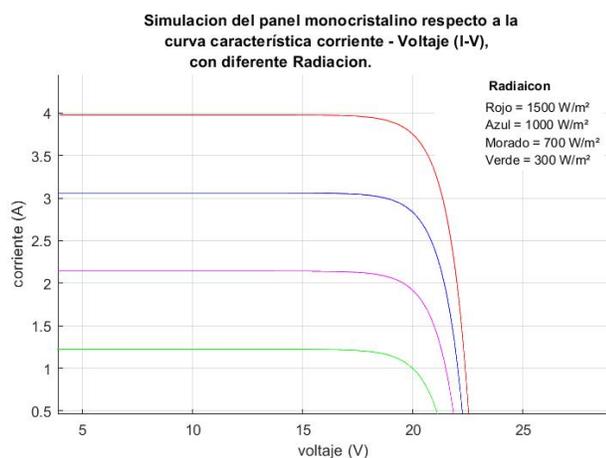


Figura 4-3: Simulación de la Curva característica (I-V) de panel Monocristalino, con diferente radiación. Fuente propia.

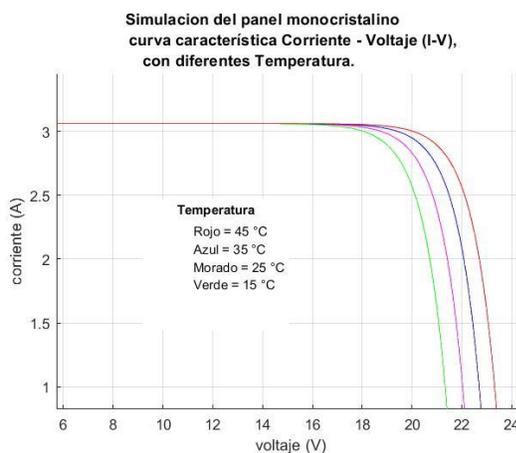


Figura 4-4: Simulación de la Curva característica (I-V) de panel Monocristalino, con diferente temperatura. Fuente propia.

4.4.2 Curva característica PV.

Para la simulación de la curva característica de (P-V), del panel monocristalino de VIP solar, se observa en la Figura 4-5, la prueba con una condición fija de temperatura de 25 °C y una irradiancia que varía 1300 W/m², 1000 W/m², 700 W/m², 400 W/m² respectivamente. Los resultados muestran como la irradiancia es directamente proporcional a la potencia capaz de generar el panel solar, a mayor irradiancia de sol mayor será la corriente y por ende mayor será la potencia.

En la Figura 4-6, también relacionada a la simulación de la curva característica de potencia (P-V), esta vez la variable fija es la radiación con el valor estándar igual a 1000 W/m², y una temperatura que varía 15°C, 25°C, 35°C, 45°C, en la gráfica podemos observar el comportamiento de la potencia cuando la temperatura baja, la eficiencia del

panel aumenta, generando más potencia y voltaje, cuando hallan días con mucha temperatura el panel actuara inversamente, la eficiencia respecto variables de potencia y voltaje disminuirán.

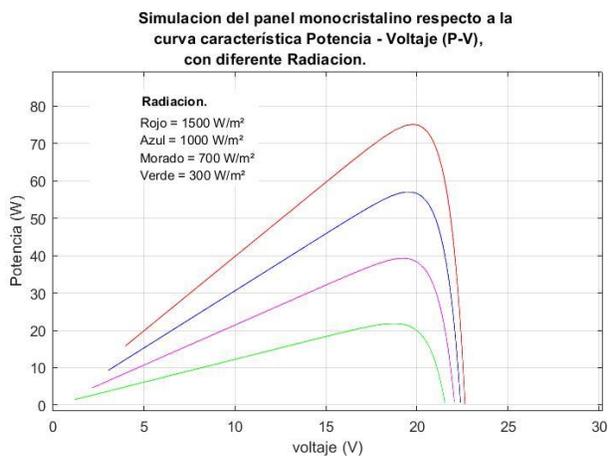


Figura 4-5: Simulación de la Curva característica (P-V) de panel Monocristalino, con diferente radiación. Fuente propia.

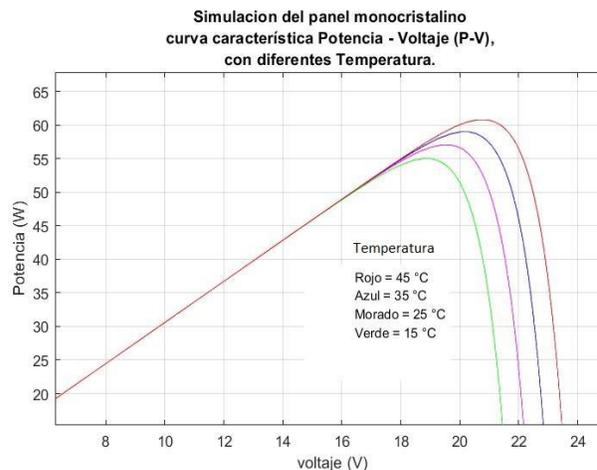


Figura 4-6: Simulación de la Curva característica (P-V) de panel Monocristalino, con diferente temperatura. Fuente propia.

4.5 Panel Solar SOLARTECH Modelo DXP50-36P 50 W (POLICRISTALINO).

Para el panel solar policristalino, se realizaron las mismas simulaciones con las mismas variaciones de radiación y temperatura como se realizó con el panel solar monocristalino, pero en los parámetros del diagrama de bloques, las variables a simular son las correspondientes a la tecnología del policristalina.

4.5.1 Curva característica IV panel Solar Policristalino.

La Figura 4-7, muestra el comportamiento de la curva característica (I-V) del panel policristalino SOLARTECH Modelo DXP50-36P 50W, la simulación se repite con temperatura fija de 25°C , variando la irradiancia en cuatro diferentes situaciones 1300 W/m^2 , 1000 W/m^2 , 700 W/m^2 , 400 W/m^2 , con colores, rojo, azul, morado y verde, respectivamente. Ratificando la corriente como la variable que más varía respecto a la irradiancia, así cuando el estado de la irradiancia sea alta, mayor será la corriente generada por el panel solar. En la Figura 4-8 se observa los resultados de la simulación, estableciendo una irradiancia fija de 1000 W/m^2 , y variado la temperatura de incidencia en cuatro estados diferente 45°C , 35°C , 25°C , 15°C , con colores, rojo, azul, morado y verde, respectivamente. En el estado donde la temperatura es mayor la eficiencia respecto a la variable de voltaje disminuye y viceversa cuando la temperatura es menor, el panel tiende a comportarse con un mayor rendimiento.

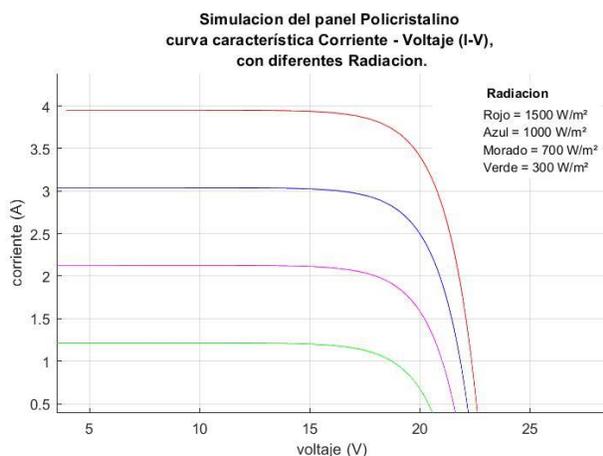


Figura 4-8: Simulación de la Curva característica (I-V) de panel Policristalino, con diferente radiación. Fuente propia.

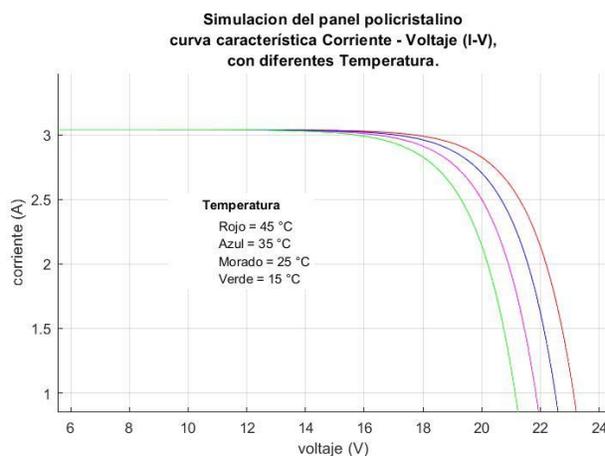


Figura 4-7: Simulación de la Curva característica (I-V) de panel Policristalino, con diferente temperatura. Fuente propia.

4.5.2 Curva característica PV panel Solar Policristalino.

Por último, se realiza una simulación de los datos del panel solar policristalino con la variable de temperatura fija de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una irradiancia variable de 1300 W/m^2 , 1000 W/m^2 , 700 W/m^2 , 400 W/m^2 , con colores, rojo, azul, morado y verde, respectivamente, como se muestra en la Figura 4-9, observando de que el panel policristalino también se comporta directamente proporcional, a medida que la radiación recibida por los paneles solares es mayor, las variables eléctricas generadas aumentarán.

Para la curva característica de potencia (P-V), estableciendo la irradiancia fija de 1000 W/m^2 , y una temperatura que varía en los mismos estados de la simulación del panel monocristalino, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ con colores, rojo, azul, morado y verde, respectivamente en la Figura 4-10. Aquí se observa, que la curva se comporta de la misma manera, es decir si la temperatura disminuye y la eficiencia del panel aumenta.

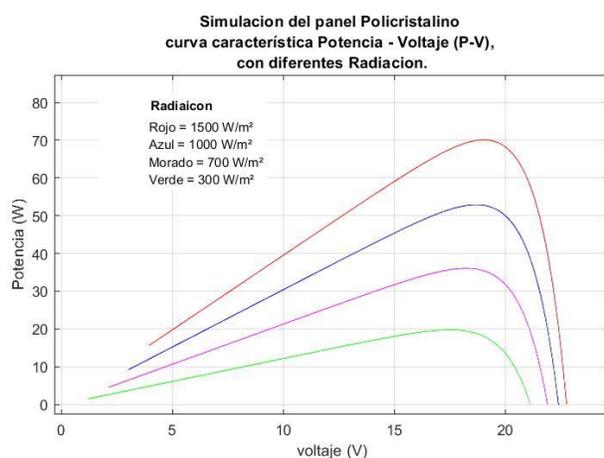


Figura 4-10: Simulación de la Curva característica (P-V) de panel Policristalino, con diferente radiación. Fuente propia.

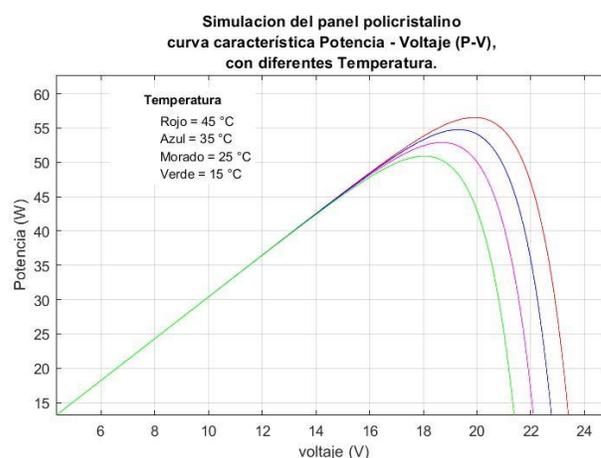


Figura 4-9: Simulación de la Curva característica (P-V) de panel Policristalino, con diferente temperatura. Fuente propia.

4.6 Comparación de las simulaciones con los datos del fabricante para los paneles solares monocristalino y policristalino con potencia 50 W.

Se realiza la simulación de los dos paneles solares (VIP solar modelo: Germani A grade Solarworld solar cell MONO CRISTALINO y SOLARTECH Modelo DXP50-36P 50 W POLICRISTALINO) en el diagrama de bloques de Simulink de Mathworks, estableciendo en el bloque de celda solar los parámetros propios de cada uno a condiciones fijas de irradiancia 1000 W/m^2 y temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

En las Figura 4-11 y la Figura 4-12, se observa la diferencia de los dos paneles solares con relación de la corriente respecto al voltaje (I-V) y potencia respecto al voltaje (P-V) en condiciones específicas, la curva roja denota el comportamiento del panel policristalino, y la línea Azul el del panel monocristalino, el cual por medio de esta simulación se puede observar que teóricamente la tecnología monocristalina, tiene levemente mejor eficiencia.

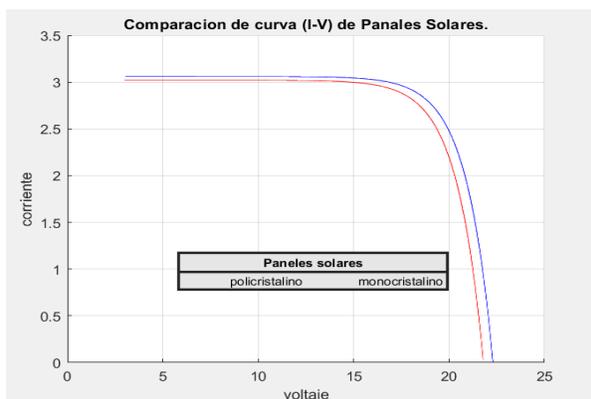


Figura 4-12: Comparación de la simulación de la curva característica (I-V) de los paneles solares. Fuente propia

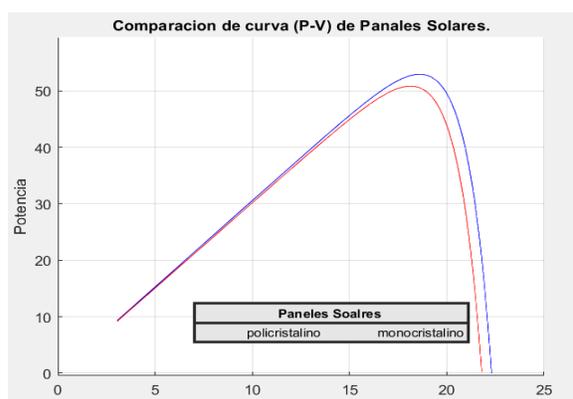


Figura 4-11: comparación de la simulación de la curva característica (P-V) de los paneles solares. Fuente propia.

5 Instrumentación

El montaje de los paneles solares y su respectiva instrumentación electrónica se realizó en la localidad Bosa (barrio Chicalá), localidad 7 de Bogotá que se encuentra ubicada en el suroccidente de la ciudad y con unas coordenadas geográficas de Latitud: 4.626387 Norte y Longitud: -74.178600 Oeste, como se muestra en la Figura 5-1.

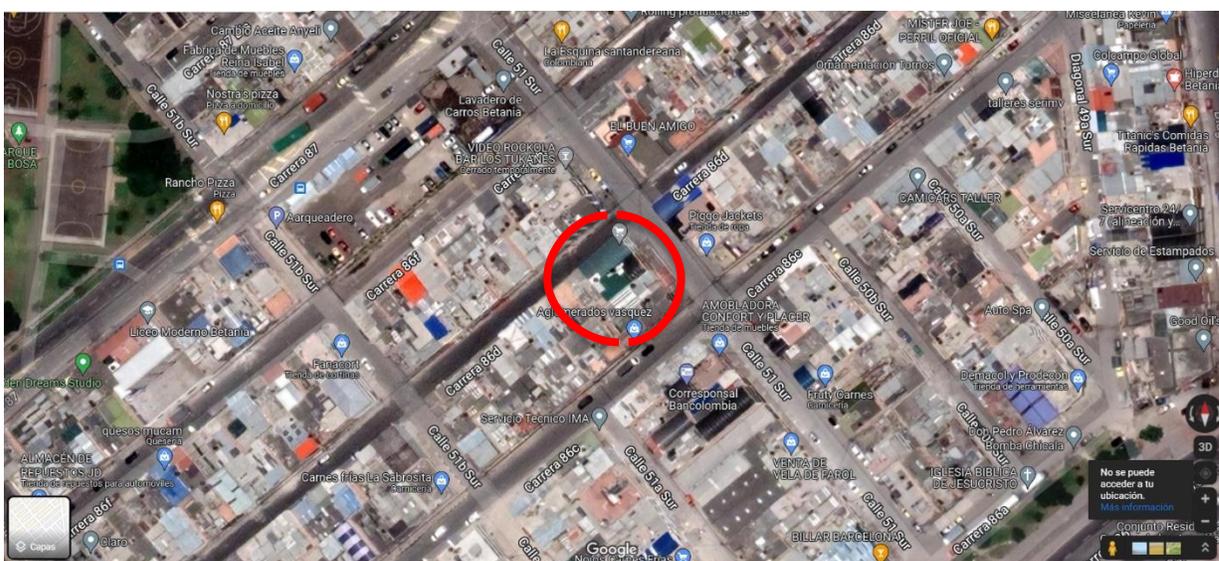


Figura 5-1: Mapa satelital de la ubicación del panel solar, recortada de la aplicación Maps. Elaboración propia.

El lugar de la instalación está ubicado en el hemisferio norte del planeta. Por lo tanto, para obtener el máximo aprovechamiento de la radiancia procedente del sol, los paneles solares se posicionan orientándolos hacia el sur, con una inclinación concordante con la latitud de la ubicación, como se muestra en la Figura 5-2. Lo anterior, con el fin de

aprovechar la mayor cantidad de irradiación recibida por los paneles, teniendo en cuenta que la luz solar no es constante durante el día y varía en función de la latitud del lugar y la época del año [46].



Figura 5-2: Ubicación del experimento, con ambos paneles solares en el techo de la vivienda. Fuente propia.

5.1 Recolección de datos.

Para la recolección de datos se toman mediciones de los sensores de las variables eléctricas, la irradiancia y la temperatura. Se realizaron las conexiones consultando sus características específicas en los manuales de especificaciones técnicas. La conversión análoga a digital y el muestreo se realizó por medio del microcontrolador Arduino Mega 2560, con el cual se realiza la transferencia de datos. Se usaron diagramas de bloques del programa Matlab Simulink de Mathworks donde se obtienen los resultados de los datos, de esta forma para ver el comportamiento de las variables se utilizan los siguientes

bloques para todos los componentes electrónicos involucrados. El bloque scope que muestra las señales de las variables en el dominio del tiempo, un bloque llamado display que muestra el valor de los datos de entrada y un bloque llamado to workspace el cual registra los datos resultantes de un modelo de simulink y los escribe en el espacio de trabajo cuando la simulación se detiene.

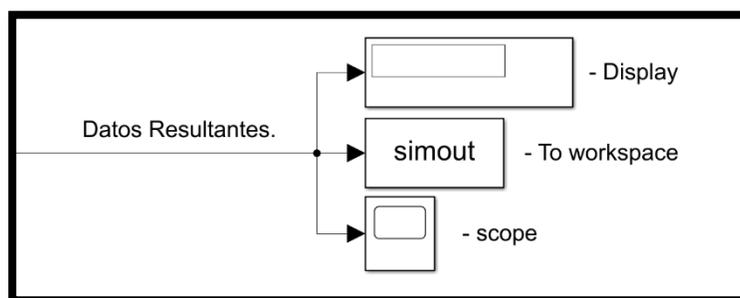


Figura 5-3: Diagrama de Bloques, datos resultantes. Elaboración propia.

5.2 Adquisición de las variables Irradiancia y la temperatura.

Se utilizó el piranómetro PYR20, instalado sobre la estructura que sostiene los paneles, en posición horizontal, como se muestra en la Figura 5-4. Este sensor mide la radiación global, tiene un rango de medición de 0-2000W/m² y un rango espectral de 400-1100 nm [47].



Figura 5-4: Ubicación del piranómetro. Elaboración propia.

La toma de lectura de la radiación solar por medio del piranómetro se interpretará por medio del Diagrama de bloques de Matlab Simulink de Mathworks como se ve en la Figura 5-5, el cual comprende un bloque de entrada análoga, que recibe la señal por el pin de entrada análogo número 8, la señal se multiplica por una constante interna, y el resultado es el valor de la irradiancia en W/m^2 . Debido al ruido que genera el circuito físico y las condiciones de instalación del piranómetro, se realizó un filtro digital de respuesta infinita al impulso (IIR). Este filtro se representa mediante una función de transferencia usando Transformada Z [48].

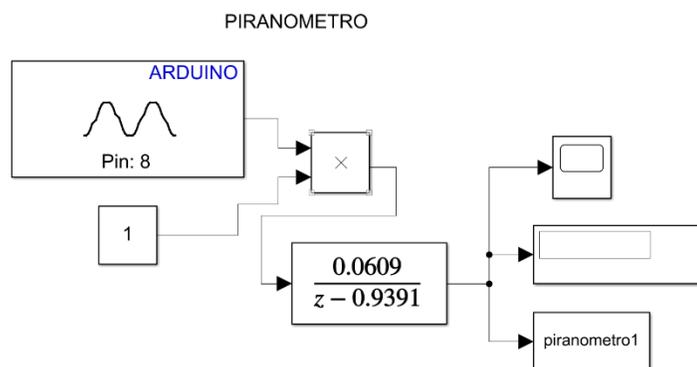


Figura 5-5: Diagrama de Bloques en simulink, para la adquisición de datos del piranómetro. Elaboración propia.

El comportamiento de la temperatura es un factor fundamental en el rendimiento de los paneles solares, dado que a mayor temperatura disminuye el voltaje afectando directamente la potencia [49]. Por lo tanto, se mide la temperatura por medio de dos sensores LM35 de iguales características que se instalaron detrás de cada uno de los paneles (ver Figura 5-6).



Figura 5-6: Ubicación del sensor de temperatura LM35 de tras del panel. Elaboración Propia.

Las mediciones que se captan por medio del sensor de temperatura LM35, se envían al Arduino Omega 2050, este recibe la señal análoga de los sensores, y codifica las señales en un diagrama de bloques del programa Matlab Simulink de Mathworks, (ver Figura 5-7). La señal análoga se multiplica por un constante de referencia de 500.0, que corresponde a 5.0V, el voltaje de referencia, y se multiplica por 100.0 para convertir la señal al equivalente en grados Celsius, esta multiplicación se divide por 1023.0 que es la resolución del conversor análogo a digital (ADC) con 10 bits, y así se tendrá la temperatura que le panel tiene en el momento determinado del día.

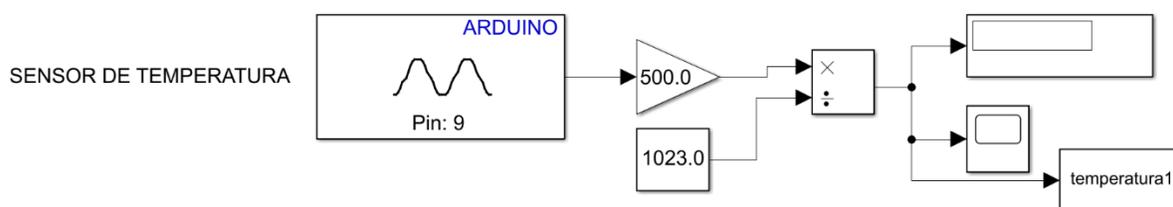


Figura 5-7: Diagrama de Bloques para la adquisición de datos, para el módulo ML35. Elaboración Propia.

5.3 Cargas resistivas de prueba

Para llevar a cabo las pruebas experimentales, fue necesario llevar los paneles solares a sus características críticas (corriente en corto circuito (I_{sc}) y voltaje en circuito abierto (V_{oc})), para lograrlo se conecta la salida de cada panel a un arreglo de resistencias. Este arreglo se realizó utilizando bombillos incandescentes de 100W. En la Figura 5-8 se observa la conexión de 10 bombillos en paralelo con su respectivo interruptor llevando así a cada panel a su corriente máxima, se conecta un interruptor en serie al arreglo de resistencias (bombillos de 100 W), el cual, al abrir el interruptor, abre el circuito y permite medir la tensión máxima generada por el panel solar conectado.

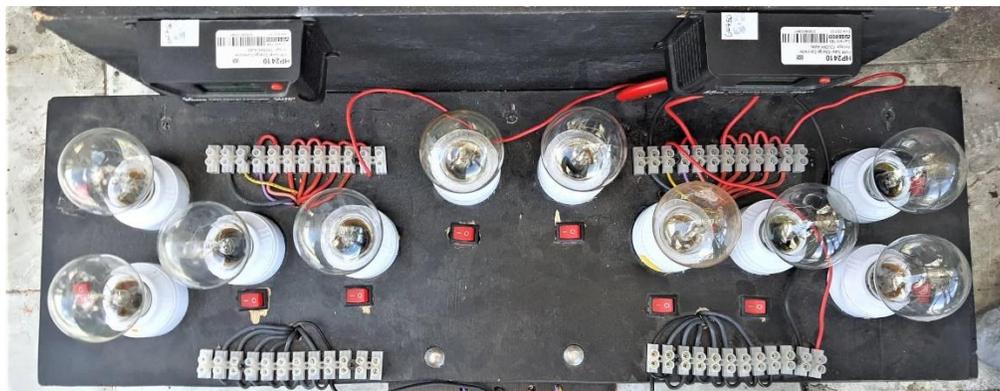


Figura 5-8: Banco experimental resistivo. Fuente propia.

5.4 Toma de resultados de las variables eléctricas generadas por los paneles.

Para la recolección de datos de las variables eléctricas de los paneles solares, se implementa un circuito con sensores de iguales características en ambos paneles, los cuales están conformados por sensores de corriente ASC 712 de 5 Amperios y sensores

de voltaje FZ0 430 como se muestra en la Figura 5-9, cada sensor toma lectura de los paneles correspondiente mente, en las mismas condición y tiempo.



Figura 5-6: Distribución de los sensores de adquisición de variables eléctricas de los paneles solares, los sensores de los extremos corresponden al de corriente ASC712 y los 2 sensores del centro son los de voltaje FZ0430. Elaboración propia.

En la Figura 5-10, se observa el esquema del circuito de control para la toma de variables eléctricas generadas por los dos paneles de tecnologías diferentes (esquema realizado en el programa Fritzing).

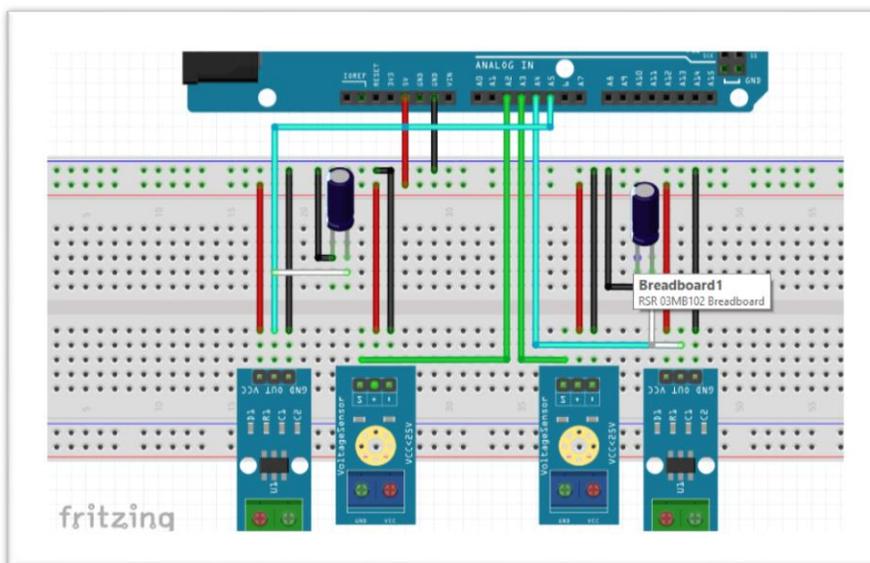


Figura 5-7: Esquema de conexión de sensores de corriente ASC712 y de Voltaje FZ0430, en Protoboard y posteriormente al microcontrolador Arduino 2050, realizado en el programa Fritzing. Elaboracion propia.

La corriente de corto circuito de ambos paneles solares en su correspondiente catálogo, no supera los 4 A, por esta razón se seleccionó el sensor de corriente más acorde a la necesidad (ASC 712 de 5 Amperios) [40]. El sensor se alimenta con 5 V, a la entrada del Arduino Omega 2050, así la entrada análoga del sensor queda en paralelo con un condensador de 250 μf , se instala con el objetivo de minimizar ruido externo.

El diagrama de bloques implementado consta de los siguientes bloques: entrada análoga del sensor al microcontrolador, donde el valor de la señal es de 2.5 V para una corriente de 0 A, partiendo de ese valor se incrementa proporcionalmente el voltaje de acuerdo con la sensibilidad del sensor para la cual corresponde $1.85 \frac{mV}{A}$ [39]. Para lo anterior, se consideran las siguientes ecuaciones:

$$V = \text{sensibilidad} * I + 2.5 \quad 8$$

despejando se obtiene la corriente a partir de la lectura del sensor,

$$I = \frac{V-2.5}{\text{sensibilidad}} \quad 9$$

El diagrama de bloques en la Figura 5-11, consta de un voltaje de referencia de 5.0 V, dividido 1023.0 que es la resolución del ADC, por el producto del valor de la señal análoga del sensor se tiene un valor de la lectura en voltios, por medio del bloque "Sum" de Simulink, se resta la señal de referencia y posteriormente se divide por la sensibilidad cumpliendo con la ecuación 9. De igual manera se adiciona un filtro digital para reducir el ruido.

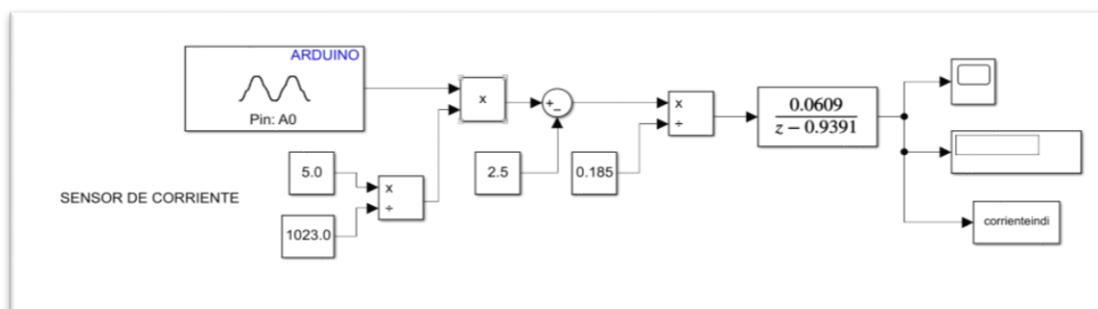


Figura 5-8: Diagrama de Bloques elaborado en simulink, para la adquisición de datos del sensor de corriente ASC712. Elaboración propia.

La medición de los valores de voltaje que los paneles generan es adquirida por el sensor de voltaje FZ0430 de 25 V, las dos tecnologías de paneles el monocristalino y el policristalino, tienen una tensión máxima de 22.32 V y 22.4 V respectivamente en circuito abierto. El sensor es capaz de medir tensión de hasta 25 V, a temperaturas de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ [50], el diagrama de bloques de la Figura 5-12, está conformado por el bloque de entrada analógica, donde, la tensión de entrada al sensor no debe ser superior a 25V, el bloque “Product” multiplica la señal analógica de entrada por la división de $(25/1023.0)$, por lo que el mínimo valor de tensión a detectar es de 0.02445 V [51].

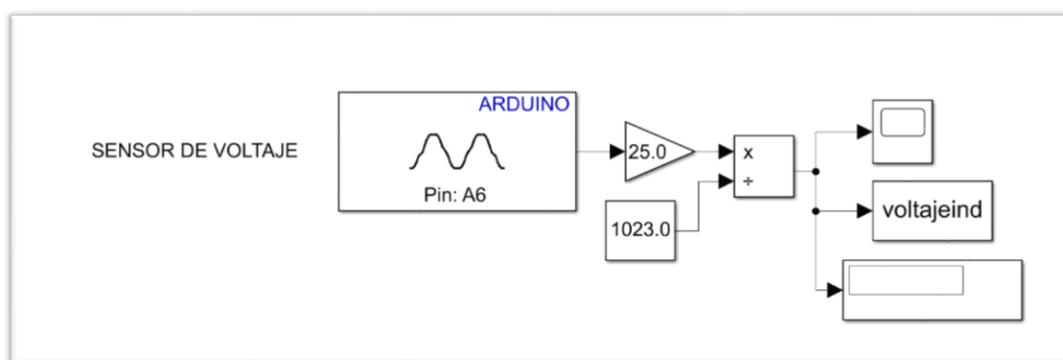


Figura 5-9: Diagrama de Bloques elaborado en simulink, para la adquisición de datos del sensor de Voltaje FZ0430. Elaboración propia.

6 Resultados experimentales.

En el presente capítulo se muestran los resultados de la toma de datos de la temperatura, la radiación, las variables eléctricas y su comportamiento respecto a la eficiencia de cada uno de los paneles solares, (VIP solar modelo: Germani A grade Solarworld solar cell, MONOCRISTALINO) y (SOLARTECH Modelo DXP50-36P 50W POLICRISTALINO), los dos de 50W. Se realizan tres pruebas en diferente franja del día en las cuales los niveles de radiación y la temperatura varían, los resultados experimentales se compararán con simulaciones teóricas, verificando su comportamiento individual para cada una de las tecnologías.

Las variables medidas radiación, voltaje, corriente y temperatura, son necesarias para el objetivo de la investigación, recopiladas por medio de sensores conectados a un microcontrolador (ARDUINO 2050), la interfaz del mismo al programa MATLAB SIMULINK, de esta manera se realiza la interpretación de las señales de salida, los resultados de los sensores y la representación gráfica de las mismas, todo con el fin de comparar los comportamientos y la eficiencia de las dos tecnologías de paneles solares propuestas para el proyecto.

En la Figura 6-1, se observa el montaje final del experimento, la posición y la inclinación de los paneles, la forma física de la instrumentación para la adquisición de datos y las cargas utilizadas para la variación de las propiedades eléctricas de las dos tecnologías.



Figura 6-1: Montaje final de los paneles Solares, instrumentación electrónica y almacenamiento de datos. Fuente propia

Las dos variables que no son generadas por los paneles, pero si son necesarias para la comparación, son la irradiación recibida del sol y la temperatura a la cual los paneles están expuestos.

Para la irradiación se utilizó el piranómetro PYR, ya mencionado en los capítulos anteriores. En la Figura 6-2 se muestran los resultados obtenidos en las tres pruebas: para la irradiancia se obtuvo 108 W/m^2 , 560 W/m^2 y 790 W/m^2 , las cuales se realizan en diferentes horas del día, estos resultados corresponden al 10.8 %, 56.0% y 89.0%,

respectivamente, de las condiciones ideales de radiación a $1000 \text{ w}/\text{m}^2$, en las que los paneles son medidos y verificados respecto de la información técnica de cada tecnología.

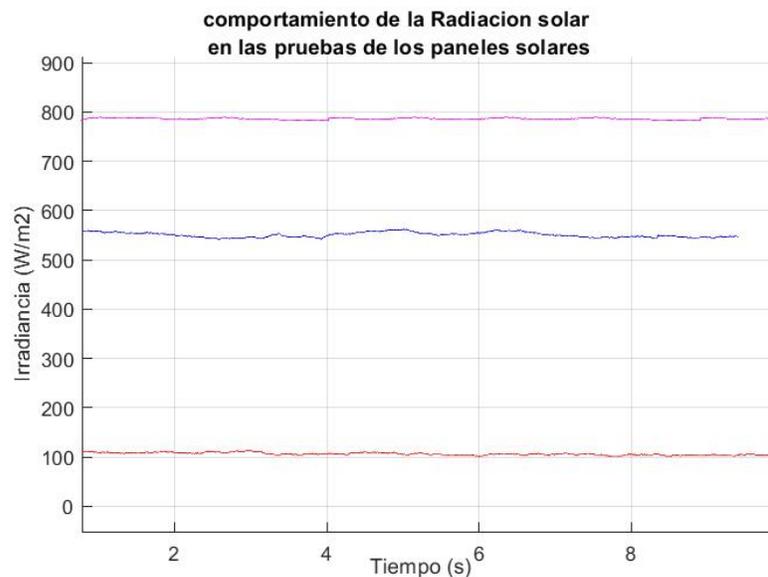


Figura 6-2: Radiación captada durante la toma de datos para las tres pruebas de los paneles solares. Rojo prueba 1, Azul prueba 2 y Morado prueba 3. Fuente propia

La siguiente variable es la temperatura a la cual los paneles están expuestos en el momento de cada una de las pruebas, la irradiación es la energía emitida del sol, por la superficie en contacto [16], una de las formas que llega esa energía es en forma de calor, la cual es importante para la eficiencia de los panel solares, en la Figura 6-3, se observa gráficamente el resultados de las temperaturas que inciden al momento de realizar cada una de las pruebas. Las temperaturas comprenden entre los 17C° y 20C° , su variación no es significativa, a pesar de que cada prueba se realiza en diferente hora del día, se recuerda que las tecnologías fueron fabricadas bajo diferentes procesos, lo que teóricamente hace que reaccionen en forma diferente a la temperatura.

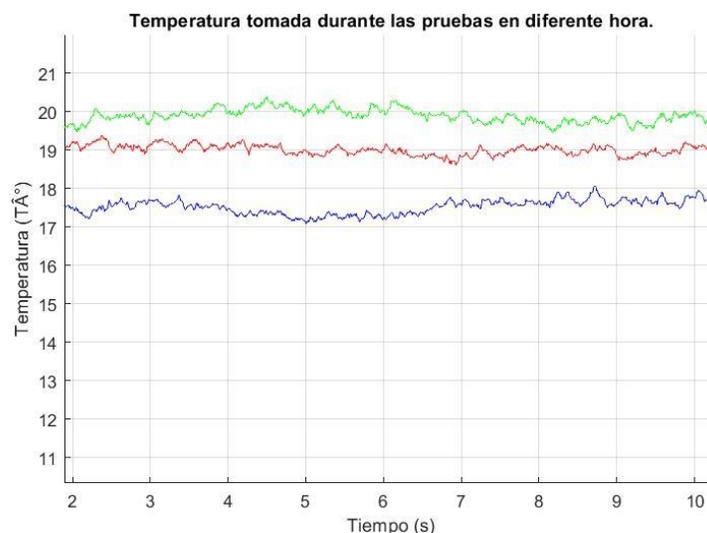


Figura 6-3: Temperaturas tomadas durante cada prueba realizada a los paneles solares. Azul prueba 1, Roja prueba 2 y Verde prueba 3. Fuente propia.

Las variables generadas (corriente y voltaje), son tomadas por medio de sensores iguales para cada una, pero individual para cada una de las tecnologías, la variable de potencia se calcula con la ley de Watt, realizando el producto del voltaje con la intensidad eléctrica resultante. El procedimiento se llevó a cabo por medio de un banco de bombillos que cumplen la función de resistencias, las cuales simulan los valores pico de cada panel solar, obteniendo las curvas características experimentales corriente – voltaje (I-V) y potencia – voltaje (P-V). En la siguiente sección se muestran los resultados de las pruebas realizadas, comparadas con las simulaciones teóricas, contrastando las diferencias entre las mismas.

En cada prueba se presenta una tabla con los resultados de potencia máxima, voltaje en circuito abierto y corriente en corto circuito, con las variables mencionadas se calcula el factor de forma (ecuación 1), teniendo en cuenta la irradiación incidente y el área de cada

panel solar: Monocristalino (*ancho* 0.54 m * *alto* $0.7\text{ m} = 0.378\text{ m}^2$) y Policristalino (*ancho* 0.55 m * *alto* $0.675\text{ m} = 0.3713\text{ m}^2$), finalmente se muestran los resultados en términos de eficiencia para cada una de las pruebas. Estos datos son los mas representativos para cada uno de los horarios de la mañana, medio día y tarde.

6.1 Prueba 1.

La primera prueba realizada fue en horas de la tarde, cuando la intensidad de la irradiación es baja y no genera niveles altos de corriente y voltaje, los resultados respecto a las variables externas son Irradiancia de 108 W/m^2 y una temperatura de 18 C° .

En las Figuras 6-4 y Figura 6-5, se representa la curva característica (I-V), observando que la línea de color rojo es la prueba experimental y la línea de color azul es a la simulación teórica, las dos generadas respecto a las mismas variables externas de irradiación y temperatura para ambos paneles solares.

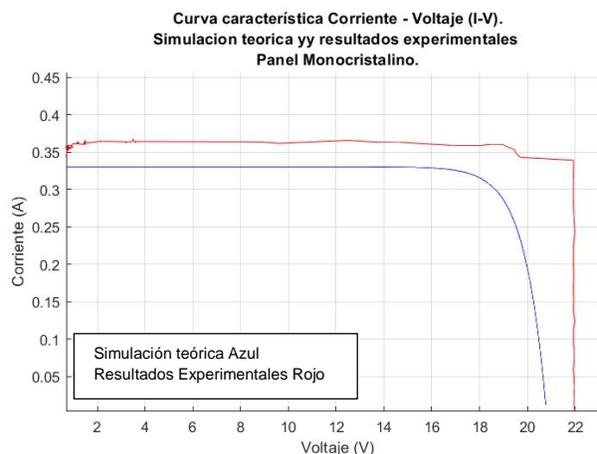
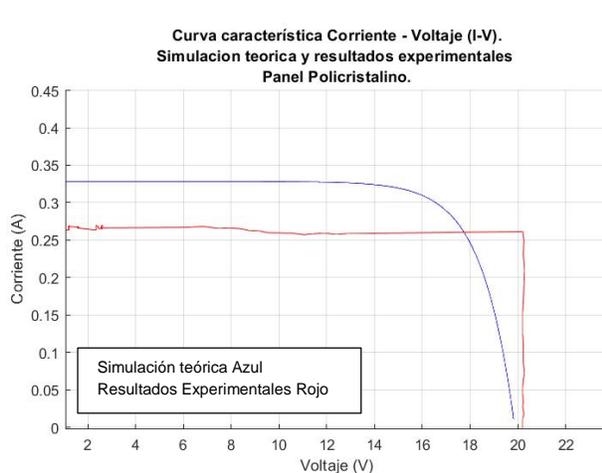


Figura 6-4: Simulación teórica vs experimental respecto a la curva característica (I-V), panel Policristalino. Fuente propia.

Figura 6-5: Simulación teórica vs experimental respecto a la curva característica (I-V), panel Monocristalino. Fuente propia.

EL panel solar Monocristalino Figura 6-4, tuvo resultados mas cecanos en su representacion experimental respecto a la representacion teorica, con una corriente I_{sc} : $0.34A$, a diferencia del panel solar policristalino con corriente I_{sc} : $0.28A$, aproximados, el panel monocristalino obtubo una generacion de corriente mayor que el policristalino.

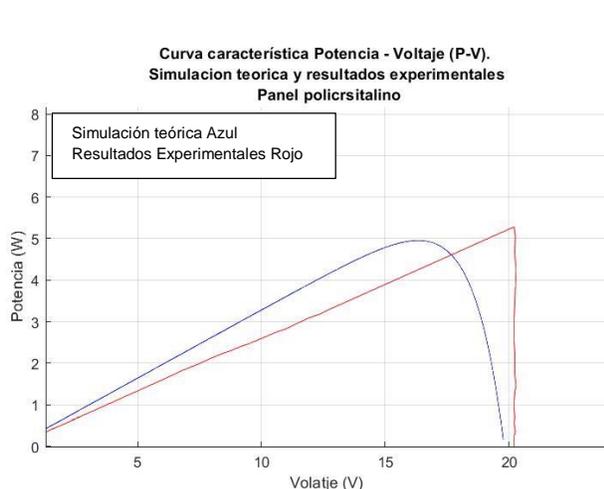


Figura 6-6: Simulación teórica vs experimental respecto a la curva característica (P-V), panel Policristalino.
Fuente propia.

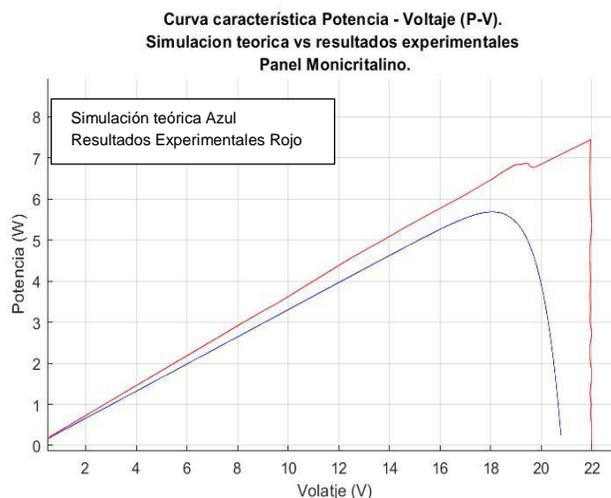


Figura 6-7: Simulación teórica vs experimental respecto a la curva característica (P-V), panel monocristalino.
Fuente propia.

Para la Figuras 6-6 y la Figura 6.7, ocurre algo diferente respecto a la potencia generada, la prueba teórica, de color azul tiene una potencia maxima ($P_{max} = 5 W$) para la tecnología policristalina una potencia maxima ($P_{max} = 5.6 W$) aproximadamente, el panel policristalino tiene la menor variacion de ambos paneles solares, en cambio el panel solar monocristalino tiene una pendiente mas elevada con una P_{max} aproximado de $7.3W$ siendo este mejor en comparacion de potencia pero saliendo de los parametros teóricos.

En la Tabla 2, se observa los resultados de las características de la simulación teórica y experimental, así como el área de cada panel solar y las variables a las cuales estuvieron expuestas durante la prueba 1.

Tabla 2: Resultados de las características de las variables de la prueba 1, teórica y experimental, para los paneles solares de tecnología monocristalina y policristalina.

Prueba 1					
variables	Panel Policristalino		Panel Monocristalino		Unidades
	Experimental	Teórico	Experimental	Teórico	
Irradiación	108	108	108	108	W/m^2
I_{PMM}	0,27	0,3	0,348	0,32	A
V_{PMM}	20	17	21,8	18	V
I_{sc}	0,28	0,34	0,356	0,33	A
V_{oc}	20,2	20	22	21	V
FF	0,955	0,773	0,969	0,831	%
Área	0,37	0,37	0,38	0,38	M^2
η	13,468	12,720	18,583	14,109	%

De los resultados de la eficiencia (η) en la simulación teórica, se observa que el panel monocristalino cuenta con 14.109%, comportándose mejor respecto a los resultados de la simulación del panel policristalino con eficiencia de 12,720% respecto a las condiciones de 108 W/m^2 y una temperatura ambiente de 17C°. En la prueba experimental se reafirma la superioridad de la tecnología monocristalina pero con valores

mas altos, para el monocristalina la eficiencia experimental es de 18.583% en cambio para el policristalino es de 13.168%.

6.2 Prueba 2.

La prueba 2 se realiza en horas de la mañana cuando la intensidad de irradiación solar está en un punto intermedio, los resultados de las variables de radiación solar y temperatura son aproximadamente de $560 W/m^2$ y $19C^{\circ}$ respectivamente, las variables generadas por los paneles aumentaron respecto a la prueba 1.

En las Figuras 6-8 y Figura 6-9, podemos observar el comportamiento de las tecnologías respecto a una radiación intermedia a una condición estándar de $1000W/m^2$. Para la prueba experimental el panel policristalino reveló $1.4 A$ de corriente en corto circuito, se observa que se aleja $19 mA$ de la simulación teórica, que tiene una corriente en corto circuito de $1.59 A$ aproximados, a diferencia del panel Monocristalino la cual mostró una intensidad aproximada de $1.55 A$, siendo la tecnología que más produce corriente bajo esas condiciones y alejándose solamente de la prueba teórica $5 mA$. Respecto al voltaje en circuito abierto, la tecnología monocristalina arroja aproximadamente $23 V$, un voltio más que las simulaciones teóricas de ambos paneles y los $22 V$ de corto circuito que genera el panel policristalino, reafirmando que es superior.

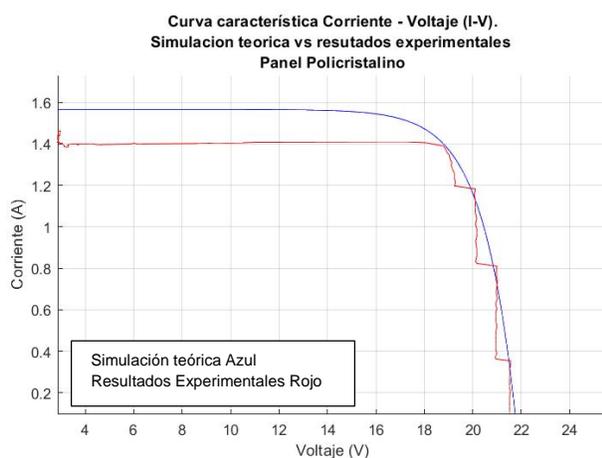


Figura 6-8: Simulación teórica vs experimental, respecto a la curva característica (I-V), panel Policristalino. Fuente propia.

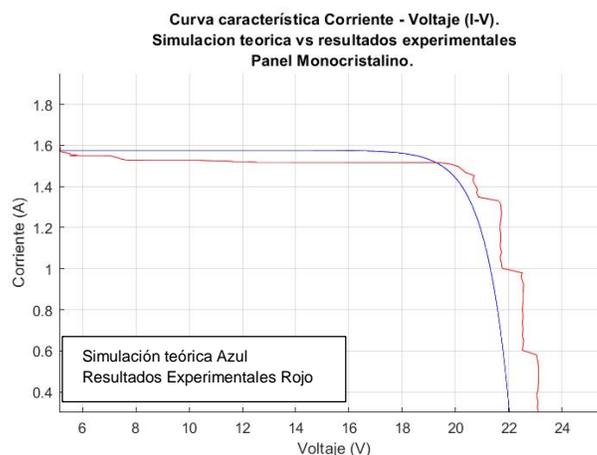


Figura 6-9: Simulación teórica vs experimental, respecto a la curva característica (I-V), panel Monocristalino. Fuente propia.

Los resultados en torno a la potencia de las tecnologías del panel policristalino y el panel monocristalino se muestran en la Figura 6-10 y la Figura 6-11 respectivamente. Se ve que existen diferencias marcadas, la prueba experimental comprende una potencia entre $26W$ y $27W$, el panel solar policristalino genera una potencia de $25.4W$ estando por debajo de la simulación teórica pero más cercana y respecto a los resultados teóricos de panel monocristalino es inferior el cual genera casi $30W$, siendo el panel que mejor se comporta en esas condiciones pero el que menos se acerca a la curva teórica por $3W$.

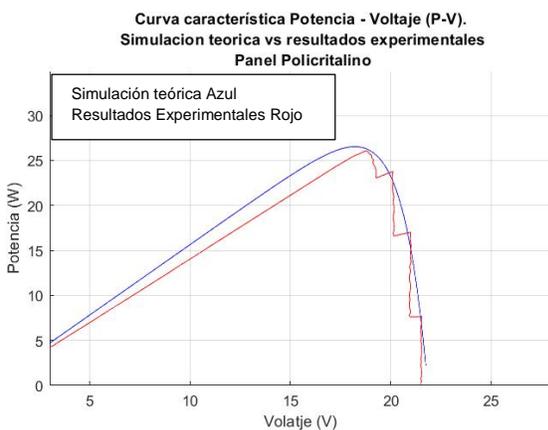


Figura 6-10: Simulación teórica vs experimental respecto a la curva característica (P-V), panel Policristalino.
Fuente propia.

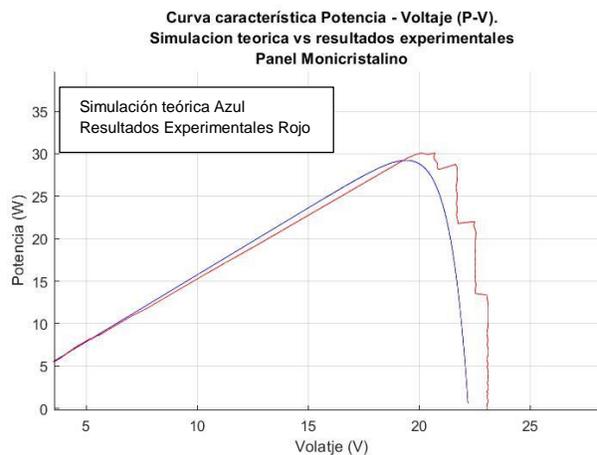


Figura 6-11: Simulación teórica vs experimental respecto a la curva característica (P-V), panel Monicristalino.
Fuente propia.

Para la prueba 2, los resultados de las características de las cuatro curvas resultantes de la simulación y la prueba experimental se expresan en la Tabla 3. En la tabla se observa las diferencias entre las dos tecnologías tanto teórica como experimentalmente y su eficiencia respecto a los resultados.

Tabla 3: Resultados de las características de las variables de la prueba 2, teórica y experimental, para los paneles solares de tecnología monocristalina y policristalina.

Prueba 2					
variables	Panel Policristalino		Panel monocristalino		Unidades
	Experimental	Teórico	Experimental	Teórico	
Radiación	560	560	560	560	W/m^2
I_{PMM}	1,39	1,4	1,55	1,5	V
V_{PMM}	18,3	18	20	19,3	V
I_{sc}	1,42	1,58	1,6	1,6	A
V_{oc}	21,5	21,8	23	22	A
FF	0,825	0,732	0,842	0,822	%
Área	0,37	0,37	0,38	0,38	M^2
η	12,235	12,121	14,645	13,676	%

Los resultados respecto a la eficiencia de la simulación teórica y la prueba experimental de cada una de las tecnologías son más acertados que en la prueba 1, para el policristalino la eficiencia tanto experimental como teórica esta entre 12.2 % y 12.1% respectivamente, siendo inferior respecto al panel solar monocristalino con una eficiencia teórica de 13.67% y experimental de 14.6%, tiende a comportarse mejor en ambas situaciones, pero no es tan significativa como la prueba 1.

6.3 Prueba 3.

La última prueba es la más cercana a los valores estándar de paneles solares, ($1000W/m^2$ $25 C^\circ$), con los cuales definen las características de cada tecnología, los resultados de la prueba 3 son: irradiación de $790 W/m^2$, con una temperatura local de $20C^\circ$, donde la adquisición de datos se realizó sobre el medio día.

En la prueba 3, se tienen como resultados una corriente de $2.4 A$ y un voltaje de corto circuito de $22 V$, para ambas tecnologías. De la prueba experimental del panel policristalino Figura 6-12, los resultados son: una corriente generada de $2.5 A$ y una tensión de $21.8 V$, la prueba es similar respecto a la teoría, su variación es baja respecto a otras pruebas. El panel monocristalino (Figura 6-13), nuevamente es el que genera más, en al menos una de las variables eléctricas, respecto a la otra tecnología y a la simulación experimental, en esta prueba los resultados respecto al voltaje no superan $1 V$ de diferencia, para una corriente generada de $2.5 A$.

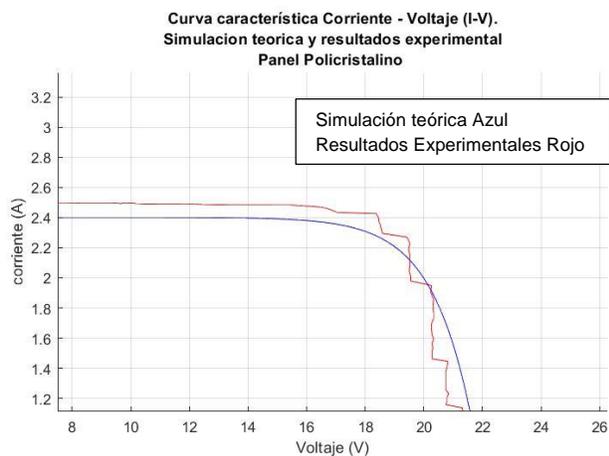


Figura 6-13: Simulación teórica vs experimental, respecto a la curva característica (I-V), panel Policristalino. Fuente propia.

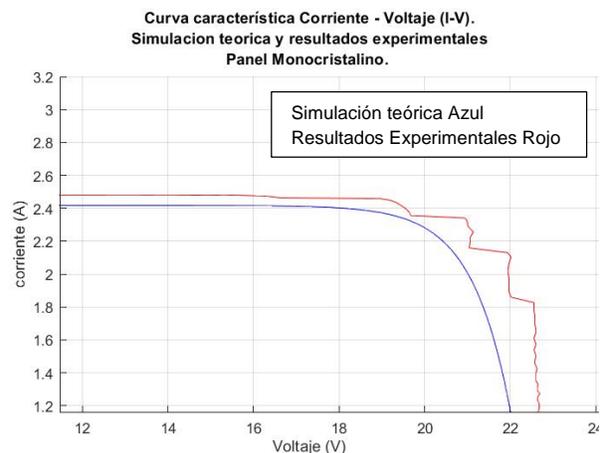


Figura 6-12: Simulación teórica vs experimental, respecto a la curva característica (I-V), panel Monocristalino. Fuente propia.

Para las curvas características de potencia (P-V), la simulación teórica tiene como resultados para el panel policristalino una potencia de $42W$ y para el panel monocristalino $45.5W$. En esta prueba las simulaciones teóricas de cada tecnología tuvieron una variación importante respecto a las otras, en las que la irradiancia fue menor. Los resultados obtenidos en la prueba experimental del panel policristalino muestran que su potencia supera por al menos $3W$ a la simulación teórica. Mientras que el comportamiento del panel monocristalino fue mejor en ambos casos: en el caso experimental presentó una potencia máxima de $48W$, en tanto que la teórica arrojó $45.1W$ siendo así el panel con mejores resultados respecto a la potencia de la prueba 3.

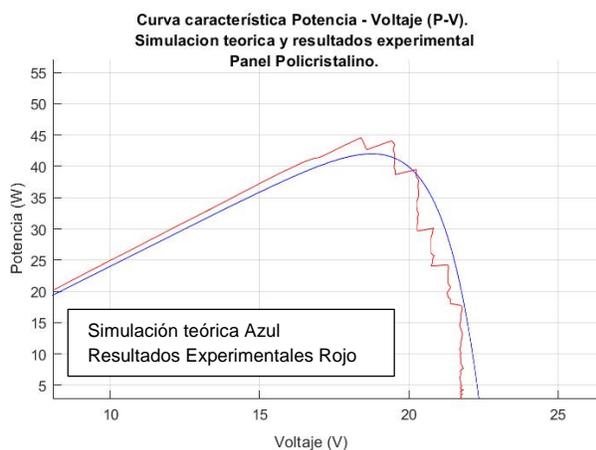


Figura 6-14: Simulación teórica vs experimental respecto a la curva característica (P-V), panel Policristalino. Fuente propia.

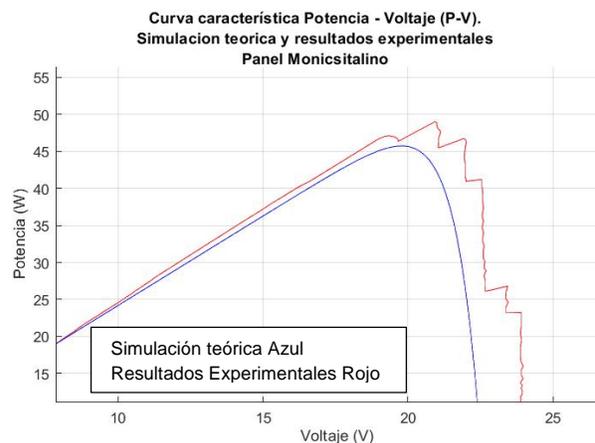


Figura 6-15: Simulación teórica vs experimental respecto a la curva característica (P-V), panel Monocristalino. Fuente propia.

Tabla 4: Resultados de las características de las variables de la prueba 3, teórica y experimental, para los paneles solares de tecnología monocristalina y policristalina.

Prueba 3					
variables	Panel Policristalino		Panel monocristalino		Unidades
	Experimental	Teórico	Experimental	Teórico	
Radiación	790	790	790	790	W/m^2
I_{PMM}	2,38	2,2	2,4	2,3	V
V_{PMM}	19	19	20	22	V
I_{SC}	25	24	2,48	2,41	A
V_{OC}	21,8	22	22,8	24	A
FF	0,083	0,079	0,849	0,875	%
Área	0,37	0,37	0,38	0,38	M^2
η	15,418	14,252	16,074	16,945	%

En la última prueba los valores respecto a la eficiencia se observan en la Tabla 4, donde la diferencia entre la prueba experimental y la teórica, son bastantes cercanas, los resultados respecto a las condiciones de las prueba 3, radiación de $790 W/m^2$ y temperatura ambiente de $20C^{\circ}$, son: para el panel monocristalino experimentalmente tiene una eficiencia de 16.01 % y teóricamente 16.94% teniendo un comportamiento superior respecto al panel solar policristalino con resultados de eficiencia experimental 15.41% y teóricamente 14.252 %, ratificando la tecnología monocristalina como la que mejor desempeño tiene en las condiciones climáticas de Bogotá.

7 Conclusiones.

Después de realizar las simulaciones teóricas, con valores ideales y características estándar de cada una de las tecnologías de paneles solares ambos de 50 W de potencia, se concluye que al analizar los resultados de cada una de las curvas características (I-V) (P-V), que el panel solar monocristalino (VIP solar modelo: Germani A grade Solarworld solar cell) tiende levemente mejor comportamiento generando variables eléctricas (corriente, voltaje), respecto al panel solar policristalino (SOLARTECH Modelo DXP50-36P 50 W).

En la prueba experimental en la cual se pusieron a prueba las dos tecnologías, con las mismas cargas que modelarían las características de corriente en corto circuito (I_{sc}) y voltaje en circuito abierto (V_{oc}), además con la misma condición de ubicación e inclinación en los cuales los diferentes paneles solares fueron ubicados, los resultados simulados muestran que el panel solar monocristalino (VIP solar modelo: Germani A grade Solarworld solar cell), tiene un comportamiento mejor respecto a la generación de voltaje y por ende genera más potencia que el panel solar policristalino (SOLARTECH Modelo DXP50-36P 50 W), al momento de ponerlos a prueba con las mismas condiciones reales en Bogotá.

Respecto a la eficiencia de los paneles solares, teóricamente las tecnologías monocristalinas por su estructura y su forma de fabricación son más eficientes que las tecnologías policristalinas, pero son más afectadas respecto a las variables de

temperatura, los resultados de las tres diferentes pruebas relevaron que los paneles monocristalinos siempre fueron superiores respecto a la generación de variables por ende su potencia siempre fue superior al panel monocristalino y su eficiencia es acertada respecto a la teoría, con eficiencia del 14% hasta un 18% a comparación del panel policristalino donde su eficiencia fue del 12% hasta un 14%, en menor temperatura es más marcada su diferencia de eficiencia y a mayor temperatura los paneles tienden a generar variables con menor diferencia.

8 BIBLIOGRAFÍA.

- [1] J. Gómez-Ramírez, J. D. Murcia-Murcia, and I. Cabeza-Rojas, “LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA: POTENCIALES, ANTECEDENTES Y PERSPECTIVAS.”
- [2] M. D. R. H. CELEMÍN, “Fuentes de Energía para el Futuro,” *Minist. Educ. POLÍTICA Soc. Y Deport. Secr. ESTADO Educ. Y Form. Dir. Gen. Form. Prof. Inst. Super. Form. y Recur. para el Profr. Ed.*, vol. NIPO: 660-, 2001, [Online]. Available: <https://sede.educacion.gob.es/publiventa/PdfServlet?pdf=VP12427.pdf&area=E%5Cnhttps://sede.educacion.gob.es/publiventa/PdfServlet?pdf=VP12427.pdf&area=E>.
- [3] A. Sánchez Juárez *et al.*, “Aplicaciones fotovoltaicas de la energía solar en los sectores residencial, servicio e industrial.”
- [4] O. NOGUERA, “FACTORES FÍSICOS Y DE DISEÑO QUE INTERVIENEN EN LA EFICIENCIA DE LOS PANELES SOLARES CONSTRUIDOS CON NUEVOS MATERIALES FOTOVOLTAICOS,” *Univ. Nisant. PGRI Kediri*, vol. 01, pp. 1–7, 2017, Accessed: Apr. 10, 2021. [Online]. Available: <http://www.albayan.ae>.
- [5] M. Mani and R. Pillai, “Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9. Elsevier Ltd, pp. 3124–3131, Dec. 01, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.07.065.
- [6] M. Mirzaei and M. Z. Mohiabadi, “A comparative analysis of long-term field test of monocrystalline and polycrystalline PV power generation in semi-arid climate conditions,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 38, pp. 93–101, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.esd.2017.01.002.

- [7] L. F. Mulcué-Nieto, L. F. Echeverry-Cardona, A. M. Restrepo-Franco, G. A. García-Gutiérrez, F. N. Jiménez-García, and L. Mora-López, “Energy performance assessment of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic modules in the tropical mountain climate: The case for Manizales-Colombia,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 2828–2835, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2020.09.036.
- [8] M. Fuentes, G. Nofuentes, J. Aguilera, D. L. Talavera, and M. Castro, “Application and validation of algebraic methods to predict the behaviour of crystalline silicon PV modules in Mediterranean climates,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 11, pp. 1396–1408, Nov. 2007, doi: 10.1016/j.solener.2006.12.008.
- [9] L. Ahmad, N. Khordehgah, J. Malinauskaite, and H. Jouhara, “Recent advances and applications of solar photovoltaics and thermal technologies,” *Energy*, vol. 207, p. 118254, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118254.
- [10] M. Taraba, J. Adamec, M. Danko, P. Drgona, and T. Urica, “Properties measurement of the thin film solar panels under adverse weather conditions,” in *Transportation Research Procedia*, Jan. 2019, vol. 40, pp. 535–540, doi: 10.1016/j.trpro.2019.07.077.
- [11] F. H.-R. internacional and undefined 2020, “El efecto de la estructura de material monocristalino y policristalino en el rendimiento de las células solares,” *academia.edu*, Accessed: Mar. 07, 2021. [Online]. Available: <https://www.academia.edu/download/64191919/ijeter87872020.pdf>.
- [12] S. Natarajan, J. Rodriguez, and M. Vellei, “A field study of indoor thermal comfort in the subtropical highland climate of Bogota, Colombia,” *J. Build. Eng.*, vol. 4, pp. 237–246, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.jobbe.2015.10.003.
- [13] S. Salamanca-Avila, “Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica.

- Caso de aplicación en la ciudad de Bogotá,” *Rev. científica*, vol. 3, no. 30, p. 263, Sep. 2017, doi: 10.14483/23448350.12213.
- [14] La Energía Solar, “La Energía Solar,” *La Energía Sol.*, pp. 1–33, 2020.
- [15] E. Renovables Alumno and C. Alberto Toledo Arias, “Evaluación de la energía solar fotovoltaica como solución a la dependencia energética de zonas rurales de Colombia,” 2013.
- [16] M. Pareja Aparicio, *Radiación solar y su aprovechamiento energético*, S.A., 2010. Barcelona, 2010.
- [17] G. De Nuevas and A. Profesionales, *Energía Solar Fotovoltaica*. .
- [18] F. H. Menjívar, “Estudio comparativo de los sistemas fotovoltaicos con inyección a la red monocristalino, policristalino y amorfo instalados en CEL,” p. 126, 2011.
- [19] N. Budini, R. D. Arce, and J. A. Schmidt, “Universidad Nacional del Litoral Silicio policristalino para dispositivos fotovoltaicos,” 2012.
- [20] F. J. Eraso, O. F. Erazo, and E. Escobar, “Model for electric power estimation in photovoltaic silicon modules,” *Ingeniare*, vol. 27, no. 2, pp. 188–196, 2019, doi: 10.4067/S0718-33052019000200188.
- [21] J. Romero, “Análisis del Funcionamiento de Paneles Fotovoltaicos y su Utilización en las Regiones de la Costa y Sierra del Ecuador. Caso Estudio: Biblioteca Pompeu Fabra de Mataró (Tesis de Maestría),” *Univ. Politec. Catalunya*, p. 98, 2015, [Online]. Available: <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1911/1/T-SENESCYT-01011.pdf>.
- [22] C. A. Nova, F. C. Simarro, J. Antonio, and R. Martínez, “tecnología fotovoltaica. fabricación de paneles solares.”

- [23] A. Z. F. DIANA CAROLINA CORREA SOTO, “ESTUDIO NORMATIVO PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO CASA VERDE UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO DE BOGOTÁ (SEDE SUR) FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA,” Antonio Nariño de Colombia, 2013.
- [24] C. López, “Caracterización óptica de celdas de silicio policristalino,” 2018.
- [25] C. A. ZIPA and BERMUDEZ YESICA LORENA, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO DE CONTROL AUTOMÁTICO DE POSICIÓN ANGULAR PARA OPTIMIZACIÓN DE CAPTURA DE RADIACIÓN SOLAR EN UN PANEL SOLAR,” p. 6, 2021.
- [26] J. Fernández, “Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil,” *U carlos III Madrid*, pp. 1–156, 2016, [Online]. Available: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6037/PFC_Julio_Fernandez_Ferichola.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [27] R. C. G. Javier Maria Mndez Muñiz, *ECA INSTITUTO DE LA TECNOLOGÍA Y FORMACIÓN, ENERRGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA 2a Edición*, FUNDACION. Madris España.
- [28] R. M. Lamaison, “El Potencial de la Radiación Solar,” *Radiac. Sol.*, pp. 26–54, 2004, [Online]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A5.pdf?sequence=5>.
- [29] M. Moro Vallina, *Instalaciones solares fotovoltaicas 2a edicion*, CORYRIGHT. Madris España, 2018.
- [30] Sergio Balaguer Zueco, “Seguidor Solar De Dos Ejes,” p. 179, 2016, [Online]. Available:

- http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/165625/TFG_2016_BalaguerZuecoSergio.pdf?sequence=1.
- [31] A. S. T. H.1, R. J. Moreno1, and y A. L. J. Alarcón1, “Diseño e implementación de un prototipo para el seguimiento de variables en un sistema de energía solar.,” Bogotá, Colombia, 2012.
- [32] W. Clemente de la Cruz, “Optimización del sistema solar fotovoltaico para la generación de energía eléctrica en viviendas aisladas altoandinas,” *Repos. digital la Univ. Nac. del Cent. del Perú*, p. 27, 2014, [Online]. Available: http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/296/TEMEC_15.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [33] P. Valdiviezo, “Diseño De Un Sistema Fotovoltaico Para El Suministro De Energía Eléctrica a 15 Computadoras Portátiles En La PUCP (TESIS DE PREGRADO),” *Pontif. Univ. Católica del Perú*, p. 74, 2014, [Online]. Available: http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/5447%0Ahttp://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/5447/VALDIVIEZO_PAULO_DISEÑO_SISTEMA_FOTOVOLTAICO_ENERGIA_ELECTRICA_PUCP.pdf?sequence=1.
- [34] “MB0014: OEM ARDUINO MEGA 2560.” Accessed: Apr. 06, 2021. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>.
- [35] “Arduino Mega 2560 Rev3 | Tienda oficial Arduino.” <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3> (accessed Apr. 06, 2021).
- [36] E. T. Co, “Solar Radiation / Pyranometer Sensor User Manual,” pp. 1–21.
- [37] N. E. van Deusen, “MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR, Apendice C,” *Entre lo sagrado y lo mundano*, pp. 268–269, 2016, doi: 10.4000/books.ifea.5638.

- [38] “LM35 LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors,” 1999. Accessed: Apr. 07, 2021. [Online]. Available: www.ti.com.
- [39] C. A. A. Calva, *Sistema de Seguimiento Solar y Monitoreo de Energía*. .
- [40] F. Integrated, H. E. Linear, and C. Sensor, “ACS712,” pp. 1–12.
- [41] J. Arredondo and J. E. Luyo, “Methods of Extracting the Point of Maximum Power (MPPT) in Photovoltaic Systems, an Evaluation with the Entropy of Shannon,” 2018 *IEEE ANDESCON, ANDESCON 2018 - Conf. Proc.*, pp. 0–3, 2018, doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564664.
- [42] N. Boutana, A. Mellit, S. Haddad, A. Rabhi, and A. M. Pavan, “An explicit I-V model for photovoltaic module technologies,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 138, pp. 400–412, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2017.02.016.
- [43] T. A. Chandel, M. Y. Yasin, and M. A. Mallick, “Modeling and simulation of photovoltaic cell using single diode solar cell and double diode solar cell model,” *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 8, no. 10, pp. 558–565, 2019, doi: 10.35940/ijitee.J8863.0881019.
- [44] F. Masmoudi, F. Ben Salem, and N. Derbel, “Single and double diode models for conventional mono-crystalline solar cell with extraction of internal parameters,” *13th Int. Multi-Conference Syst. Signals Devices, SSD 2016*, pp. 720–728, 2016, doi: 10.1109/SSD.2016.7473725.
- [45] A. O. Castro, “TRABAJO TEORICOEXPERIMENTAL Modelado y simulación de un panel fotovoltaico empleando técnicas de inteligencia artificial Modeling and simulation of a photovoltaic panel using artificial intelligence techniques,” vol. XXXV, pp. 225–233, 2014.

- [46] A Buchari ·2018, *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PANELES SOLARES EN LAS CARRERAS DE SISTEMAS COMPUTACIONALES Y TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN DE LA UNIVERSIDAD ESTATAL DEL SUR DE MANAB. JIPIJAPA – MANABÍ – ECUADOR*, 2018.
- [47] U. A. N. Abel Enrique Casas Yates, Andrés Leonardo Jutinico Alarcón, Robinson Jiménez Moreno, “Pyranometer, Design and construction of a,” no. Fifth International Symposium on Energy, Puerto Rico Energy Center-Laccei,.
- [48] Z. Transformada, D. S. De, and C. J. Silvio, “Transformada Z en el diseño de Sistemas de tiempo Discretos,” 2013.
- [49] P. R. Roqueta, *Procedimiento de cálculo para la ubicación de paneles fotovoltaicos*. Santa Clara.
- [50] A. Abaurrea Rodríguez and A. Robledillo García, “Unidad de monitorización para el sistema de alimentación fotovoltaico de una vivienda unifamiliar aislada de la red,” 2015, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2117/80095>.
- [51] U. Polit and C. D. E. Val, “componentes del sistema hardware.”

