UNIVERSIDAD DON BOSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TRABAJO DE GRADUACIÓN:

COMPARACIÓN ENTRE PANELES SOLARES MONOCRISTALINOS Y POLICRISTALINOS EN ZONA COSTERA DE EL SALVADOR

PARA OPTAR AL GRADO DE:

MAESTRO EN GESTIÓN ENERGÉTICA Y DISEÑO AMBIENTAL

POR:

LUIS ROBERTO MORAN ORTIZ

ASESOR:

Mtr. ÁLVARO FLAMENCO

ANTIGUO CUSCATLÁN, LA LIBERTAD EL SALVADOR CENTROAMÉRICA

JUNIO 2022

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por culminar un logro académico más, por darme la fuerza y los recursos para hacerlo posible.

Gracias a mis padres, hermanos, abuela, tíos y primos, por apoyarme en cada paso que he dado, por la comprensión, consejos y palabras de ánimo y todo tipo de ayuda brindada durante este proceso.

Gracias a mi novia por apoyarme y ayudarme en cada momento, tanto durante el periodo de estudio como durante el proceso siguiente.

Le doy gracias a todos los profesores que se esforzaron por compartir sus conocimientos conmigo y permitirme crecer profesionalmente.

Agradezco también a Enersys Solar y su equipo por permitirme usar uno de sus proyectos para el desarrollo de esta investigación.

Índice

1. Planteamiento del Estudio 8
1.1. Planteamiento del Problema 8
1.1.1 Descripción del Problema 8
1.1.2 Formulación del Problema 9
1.2. Hipótesis 11
1.2.1 Hipótesis General 11
1.2.1 Hipótesis Específica 11
1.2.3 Hipótesis Nula 11
1.3. Objetivos 12
1.3.1 Objetivo General 12
1.3.2 Objetivos Específicos 12
1.4. Justificación 12
2. Marco de Referencia 13
2.1. Marco Histórico 13
2.1.1 Historia Energía Renovable en el Mundo 13
2.1.2 Energía Renovable en El Salvador 15
2.2. Marco Conceptual 17
2.2.1 Clasificación de Paneles Solares Según su Composición 17
2.2.2 Ventajas y Desventajas de los Paneles Solares Policristalinos y Monocristalinos 18
2.2.3 Proceso de Fabricación de Paneles Solares 19
2.2.4 Eficiencia de Paneles Solares 25
3. Metodología de la Investigación 26
3.1. Valor de Tensión y Corriente por *String* 30
3.2. Recolección de Datos de Irradiancia y Temperatura en Sitio 31
3.2.1 Equipo Utilizado 31
3.3. Recolección de Datos de Irradiancia y Temperatura desde Plataforma Virtual 35
3.4. Obtención de Curva I-V 35
4. Análisis de Resultados 37
4.1. Modelado de Paneles Solares 37
4.2. Procesamiento de Variables 40
4.3. Comparación del Rendimiento entre Paneles Solares 43

4.4. Comparación entre Mediciones en Sitio vs Estación Meteorológica 44
5. Conclusiones 45
6. Recomendaciones 48
7. Limitaciones 49
8. Referencias 50
9. Anexos 53

índice de Figuras.

Fig. 1 Capacidad Instalada Energía Renovable, Re.: IRENA, 2022 16

Fig. 2 Variación de la capacidad instalada en FV en El Salvador, ref.: IRENA, 2022. 17

Fig. 3 Proceso de Fabricación de Paneles Solares, Adaptado de proceso de fabricación de paneles solares (p.10). (Hernández, 2011) 19

Fig. 4 Proceso de Fabricación del Panel, Ref.: Adaptado de Fabricación de paneles solares fotovoltaicos, por Barrera et al. (s.f). 24

Fig. 5 Paneles Solares Policristalinos (JKM 315P-72) Instalados en la planta Solar en la Costa del Sol, Ref.: elaboración propia. 27

Fig. 6 Paneles Monocristalinos (JAM60S02-300/PR) Instalados en la planta Solar de la Costa del Sol, Ref.: elaboración propia. 28

Fig. 7 Diagrama Unifilar de la Conexión de la Planta, ref. Elaboración propia. 29

Fig. 8 Mapa de Ubicación de las Estaciones Meteorológicas, ref.: Google Maps y Adaptado de Instituto Privado de Investigaciones sobre Cambio Climático (ICC,2020). 30

Fig. 9 Adaptación de Lámina de Aluminio a Termocupla para ampliación de Área de Contacto, ref.: Elaboración propia. 32

Fig. 10 Montaje de Piranómetro en Sitio del Proyecto, ref.: elaboración propia. 32

Fig. 11 Diagrama representa la interconexión entre Arduino y los elementos de medición utilizados para la recolección de los datos en sitio Diagrama Esquemático de Equipo de Medición, ref.: elaboración propia. 33

Fig. 12 Diagrama del Modelo Utilizado en Simulink. 37

Fig. 13 Datos Ingresados para Modelado de Panel Solar Monocristalino 38

Fig. 14 Gráfica I-V y P-V de los Paneles Monocristalinos 38

Fig. 15 Datos Ingresados para Modelado de Panel Solar Policristalino. 39

Fig. 16 Grafica I-V y P-V de Paneles Policristalinos 39

Fig. 17 Diagrama de Interconexión de Bloques de Simulación Dentro de Simulink. 40

Fig. 18 Comparación de Irradiación solar medida en sitio contra estación meteorológica Agua Santa (ICC), para el día 15 de mayo de 2022, Ref.: Elaboración propia. 45

Índice de tablas

Tabla 1 Características de módulos fotovoltaicos a comparar durante en la investigación (Ref.: Elaboración propia con datos del fabricante de los equipos)..... 10

Tabla 2 Capacidad Instalada de energía renovable y no renovable para 2020 en El Salvador (IRENA,2022). 15

Tabla 3 Cambio de Capacidad Instalada en El Salvador (IRENA, 2022) 16

Tabla 4 Resumen de Datos Medidos en Sitio de Proyecto, ref.: elaboración propia. 41

Tabla 5 Resultado de Simulación de Conjunto de Paneles Solares en Simulink, ref.: elaboración propia. 42

Tabla 6 Eficiencia Obtenida a Partir de Datos de Estación Meteorológica e Inversores, ref.: Elaboración propia. 43

Tabla 7 Comparación de Eficiencias Obtenidas Versus Datos de Fabricante, ref.: elaboración propia. 43

Resumen

La elección al momento de utilizar paneles fotovoltaicos monocristalinos o policristalinos se puede ver influenciada por la eficiencia de éstos. En condiciones generales, los fabricantes recomiendan el uso de los paneles monocristalino por su alta eficiencia en comparación a los policristalinos. Sin embargo, las condiciones del medio ambiente del sitio en donde se construirá la planta no son tomadas en cuenta frecuentemente. Por esa razón, en la presente investigación se pretende determinar, si las condiciones ambientales de una zona costera, como la Costa del Sol ubicada en El Salvador, influyen significativamente en la eficiencia de ambos tipos de paneles solares. De forma experimental, durante un periodo de 38 días, desde el 24 de abril hasta el 1 de junio de 2022, se utilizaron los datos de producción de una planta solar, que cuenta con un conjunto de paneles solares monocristalinos y policristalinos de similar capacidad. Se midieron, la radiación solar, temperatura ambiente y temperatura de célula, para utilizarlas como variables de entrada de un modelo teórico construido con la herramienta Simulink de MatLab. A partir de éste modelo, se construyen gráficas I-V y P-V. Además, se obtienen valores de tensión y corriente de operación, para conocer el nivel de eficiencia al cual se encuentran trabajando cada conjunto de paneles. Al comparar los valores de producción fue posible estimar preliminarmente qué tecnología tiene el mejor rendimiento para las condiciones ambientales de la zona en estudio.

Palabras claves: Eficiencia, paneles solares, monocristalino, policristalino.

1. Planteamiento del Estudio

1.1. Planteamiento del Problema

1.1.1 Descripción del Problema

Las energías renovables en la actualidad presentan un gran peso dentro de la generación de energía eléctrica a nivel mundial y países como El Salvador, cuentan con estos tipos de generadores que permiten tener una matriz energética diversa. Una de las energías no convencionales más utilizadas dentro del país es la energía solar fotovoltaica, en gran parte debido a la evolución significativa que este ha tenido en sus últimos años, tanto en precio como en la tecnología de construcción, principalmente de los paneles solares.

La energía solar fotovoltaica está compuesta por diferentes elementos dentro de los cuales resaltan principalmente los paneles solares y los inversores. En los últimos años los fabricantes de paneles solares, como *Ja Solar o Jinko Solar*, han buscado utilizar diferentes tecnologías para mejorar la eficiencia de las celdas solares, elemento primordial para la construcción de un panel solar. La Escuela Politécnica Federal de Lausana, ha logrado construir paneles solares utilizando la Perovskita como elemento de fabricación. (Papageorgiou, 2021)

Actualmente los paneles solares construidos a partir del silicio cubren el 90% del mercado y según Rodríguez (2014) con este elemento se pueden construir tres tipos de paneles solares: monocristalinos, policristalinos y amorfos. En términos generales, las celdas solares construidas por cristales monocristalinos tienden a tener un mayor costo de fabricación y una mayor eficiencia debido a la calidad del silicio y la capacidad de únicamente contar con un cristal. En cuanto al policristalino, este se fabrica a partir de un conjunto de cristales, resultado de la disminución de trabajo y costo de producción. En términos generales se conoce que los paneles monocristalinos

llegan a ser más eficientes que los policristalinos, debido a la calidad del elemento químico presente en las celdas solares. Barrera et al. (s.f)

A pesar de conocer esta información, la correcta elección del tipo de panel solar a utilizar depende de diversos aspectos, como el clima habitual, es decir temperatura ambiente en donde serán instalados los paneles solares y la cantidad de radiación solar en la zona como principales variables a estudiar, así como también, la misma temperatura de los paneles solares. Los climas fríos y con tendencia relativa a tormentas y neblina son ideales para la instalación de paneles fotovoltaicos con tecnología monocristalina, ya que estos tienen la capacidad de absorber la radiación solar de forma más eficiente en climas templados o fríos, mientras que los paneles fotovoltaicos policristalinos son ideales para zonas con climas cálidos o tropicales, ya que tienen las características especial de poder absorber rápidamente el calor y ser menos afectados por el incremento de temperatura de la célula por la irradiancia y temperatura ambiente. (ASTRUM, 2020).

1.1.2 Formulación del Problema

El país de El Salvador es categorizado como un país con clima tropical debido a las altas temperaturas y vientos de velocidades considerables que de forma simultánea cubren el país. En la actualidad existe un alto impacto en cuanto a la instalación de sistemas solares fotovoltaicos y al momento de diseñar uno de estos sistemas, específicamente al momento de la elección del tipo de paneles solares, usualmente se toman en cuenta aspectos poco técnicos como el precio de estos y la idea que el comerciante vende, sobre que “Los paneles monocristalinos son mejores que los policristalinos”. Debido a eso en el presente trabajo se propone realizar una investigación técnica para conocer el desempeño de cada una de las tecnologías antes mencionadas, paneles

monocristalinos y paneles policristalinos, considerando un ambiente especial dentro del país; como lo es la zona costera.

Con la colaboración del equipo de operación y mantenimiento (O&M) de la empresa Enersys Solar. Se utilizará como elemento de estudio una planta solar fotovoltaica ubicada en las cercanías de la Costa del Sol en El Salvador. En dicha planta solar se encuentran instalados dos clases de paneles solares, paneles policristalinos de 315Wp de capacidad y compuesto por 72 celdas, construido bajo el fabricante Jinko Solar. La misma planta cuenta con paneles solares monocristalinos de 300Wp de capacidad, compuestos por 60 celdas y fabricado por la empresa Ja Solar.

Tabla 1 Características de módulos fotovoltaicos a comparar durante en la investigación (Ref.: Elaboración propia con datos del fabricante de los equipos).

Características	Panel Monocristalino	Panel Policristalino
Fabricante	JA Solar	JINKO
Modelo	JAM60S07 280-300	Eagle Plus 72, 315-335
Potencia	300 W	315 W
Volt. de Máxima Potencia	32.26 V	37.2 V
Volt. de OC	39.85 V	46.2 V
Corriente de Pmáx	9.30 A	8.48 A
Isc	9.75 A	9.01 A
Coeficiente de Voc	-0.3 %/°C	-0.3 %°C
Coeficiente de Pmáx	-0.39 %/°C	-0.4 %/°C

En este aspecto se tomaron valores de voltaje de generación y corriente de los paneles solares a través de su interconexión con dos inversores marca Huawei de 5kW cada uno, tomando datos mediante la plataforma de recolección de información del fabricante de los inversores.

Con lo anterior, se obtendrán valores de voltaje y corriente en punto de máxima potencia de las cadenas de paneles y también valores de temperatura y de irradiancia por parte de la estación meteorológica de Agua Santa o de la base de datos de Solargis, se utilizará el software Matlab para poder procesar estas variables. A través de Matlab y Simulink, se buscará obtener las gráficas I-V de cada tecnología de panel solar, para poder posteriormente conocer la eficiencia de cada una.

1.2. Hipótesis

1.2.1 Hipótesis General

La calidad de silicio presente en la celda solar afecta a la eficiencia del panel solar. A mayor pureza del silicio mayor es la eficiencia del panel solar.

1.2.1 Hipótesis Específica.

Al comparar la composición química de la célula fotovoltaica, de la celda monocristalina versus la policristalina, se conoce que la monocristalina presenta eficiencia de conversión de energía solar a eléctrica.

En un ambiente tropical como el de la Costa del Sol en El Salvador, el panel policristalino presenta un mejor desempeño de generación en comparación al panel monocristalino.

1.2.3 Hipótesis Nula

En un clima tropical, a mayor pureza del silicio, menor es la eficiencia del panel solar.

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Realizar un análisis comparativo en cuanto a la conversión de energía de paneles solares monocristalinos y policristalinos de un generador fotovoltaico ubicado en la zona costera de El Salvador, para determinar qué tecnología es la óptima para zonas con un ambiente similar.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Medición de variables meteorológicas in situ como: Irradiancia, temperatura ambiente y de célula, así como también variables operativas como: corriente, voltaje y potencia.
- Comprobación de la variación de valores de radiación solar entre una medición dentro de la planta solar y una estación meteorológica cercana a la ubicación del proyecto.
- Obtención de las gráficas I-V de cada panel solar a través de un simulador virtual.
- Comparación de las gráficas de desempeño (I-V y P-V) de los diferentes tipos de paneles solares para determinar qué tecnología es más eficiente en ambientes tropicales ubicados en zonas costeras.

1.4. Justificación

El método de elección del tipo de panel solar, entre monocristalino y policristalino, debería ser liderado por aspectos técnicos de la ubicación en donde se pretender realizar la instalación de los paneles fotovoltaicos. Usualmente, el ambiente en la zona de instalación e incluso los valores de radiación solar, no son considerados como variables importantes al momento de elegir el panel solar a utilizar dentro de un sistema solar fotovoltaico. Los aspectos más considerados suelen ser la potencia, con la cual paneles de menor tamaño puedan

generar un mayor impacto en cuanto a la capacidad de generación, mientras que el desempeño del panel es categorizado en un segundo o hasta tercer plano.

El presente trabajo pretende demostrar de forma experimental el desempeño de los paneles fabricados con celdas monocristalinas y policristalinas, y poder tener un parámetro técnico que aporte al momento de la elección del tipo de tecnología a utilizar al momento de la construcción de una planta solar con un clima similar al que cuenta la Costa del Sol en El Salvador.

2. Marco de Referencia

2.1. Marco Histórico

2.1.1 Historia Energía Renovable en el Mundo

Para comprender bien lo que son las placas fotovoltaicas lo mejor es retroceder unos años (incluso algún siglo). “Hablamos de una energía del siglo XXI, aunque en realidad se descubrió a finales del siglo XIX. Y fue durante el siglo XX cuando empezó a desarrollarse”, explica a BBVA Carlos Montoya, jefe del Departamento Solar del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). “En 1920, Albert Einstein ya descubrió el efecto fotovoltaico y por ello se llevó el Nobel un año después”. (BBVA, s.f.)

En 1873 el científico británico *Willoughby Smith* observó que el selenio era sensible a la luz. Smith concluyó que la capacidad del selenio de conducir electricidad aumentaba en proporción directa con su exposición a la luz. Esta observación del efecto fotovoltaico llevó a muchos científicos a experimentar con ese elemento relativamente excepcional, con la esperanza de usarlo para generar electricidad. (Solar Energy Internacional, 2015, P.2)

1883: Se crea la primera célula solar. El inventor neoyorquino *Charles Fritts* produjo las primeras células solares cubriendo selenio con una fina capa de oro, razón por la que algunos historiadores atribuyen a *Fritts* la invención de las células solares. Esta célula alcanzó una tasa de conversión de energía de 1-2%.

1887: Se observa el efecto fotoeléctrico. El físico alemán *Heinrich Hertz* observó por primera vez el efecto fotoeléctrico, en el que la luz se utiliza para liberar electrones de una superficie sólida (generalmente metal) para crear energía. Contrario a los resultados esperados, *Hertz* encontró que este proceso producía más potencia cuando se exponía a la luz ultravioleta, en lugar de luz visible más intensa. Las células solares modernas dependen del efecto fotoeléctrico para convertir la luz solar en energía. (JAB, 2018)

Hasta 1905, cuando Albert Einstein ofreció su explicación del efecto fotoeléctrico, no había una amplia aceptación de la FV como fuente de energía. Las teorías de Einstein condujeron a un mayor entendimiento del proceso físico de generación de electricidad a partir de la luz solar. A pesar de su baja eficiencia y altos costos de producción, los científicos continuaron sus investigaciones sobre la celda solar de selenio durante los años 30 del siglo XX. (Solar Energy Internacional, 2015)

Las primeras células fotovoltaicas se desarrollaron en 1954. Daryl Chapin, ingeniero electrónico; Gerald Pearson, físico, y Calvin Fuller, químico, los tres investigadores de los laboratorios estadounidenses Bell, presentaron al mundo su gran descubrimiento: se trataba de la primera célula que captaba energía del sol y con ella se podía hacer funcionar un transistor. Aquella célula tenía una particularidad: era de silicio. (BBVA, s.f.)

En la última década la energía solar fotovoltaica se ha convertido en una parte importante de la matriz energética del mundo. Según datos de la Agencia Internacional de Energías Renovables,

IRENA por sus siglas en inglés, en los últimos 10 años la energía solar ha aumentado en 770,870 MW la capacidad instalada. La capacidad instalada para el 2021 alcanzó los 843,086 MW.

2.1.2 Energía Renovable en El Salvador

Al igual que en el mundo, en El Salvador la energía fotovoltaica está tomando fuerza, tanto empresas como hogares están invirtiendo en este tipo de proyectos. Generando cambios significativos en la matriz energética en el país.

Según datos de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) la matriz energética de El Salvador estaba conformada por 33% de energía no renovable y 67% de energía renovable como se muestra en la Tabla 1. Dentro de la energía renovable el 19% de la capacidad instalada en el país para el año 2020 corresponde a energía solar.

Tabla 2 Capacidad Instalada de energía renovable y no renovable para 2020 en El Salvador (IRENA,2022).

Capacidad en 2020	**MW**	**%**
No renovable	**757**	**33**
Renovable	**1,506**	**67**
Hidro/marina	573	25
Solar	428	19
Viento	0	0
Bioenergía	300	13
Geotermal	204	9
Total	**2,262**	**100**

En la Tabla 3 se muestra el porcentaje de cambio en la capacidad instalada de energía en El Salvador desde el año 2015 al 2020, siendo la energía solar la que representa el mayor cambio en la matriz energética, a lo largo de los últimos años.

Tabla 3 Cambio de Capacidad Instalada en El Salvador (IRENA, 2022)

Cambio de Capacidad	2015-20	2019-20
No renovable	0	0
Renovable	**+63**	**+1.3**
Hidro/marina	+16	+0
Solar	+1,713	+6
Viento	0	0
Bioenergía	+49	-1.6
Geotermal	0	0
Total	**+35**	**+0.9**

Para el año 2020 la energía solar representa el 28% de la energía renovable del país, como se muestra en la Fig. 1.

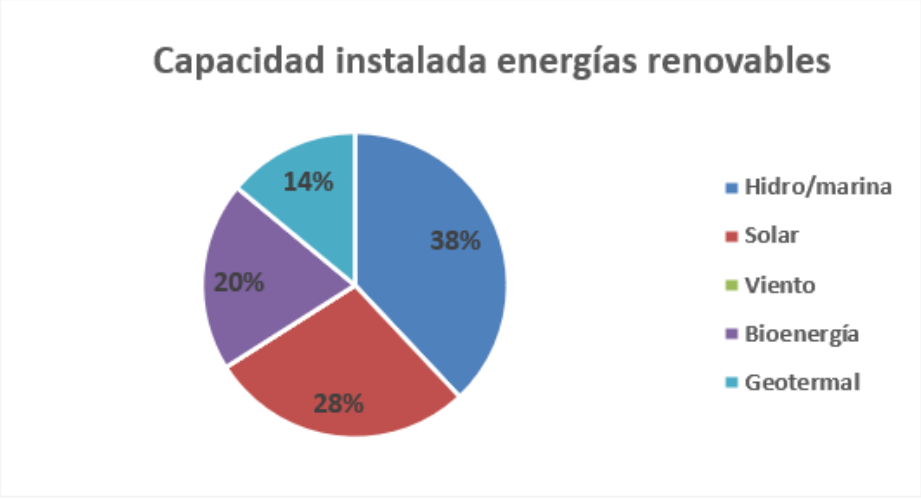


Fig. 1 Capacidad Instalada Energía Renovable, Re.: IRENA, 2022

En El Salvador, desde el año 2019 la energía solar fotovoltaica ha tenido un crecimiento significativo, llegando a una capacidad instalada de 478.4 MW en el año 2021, según datos de IRENA.

En la Fig. 2 se muestran los datos por año variación de la capacidad instalada en MW de la energía fotovoltaica en El Salvador.

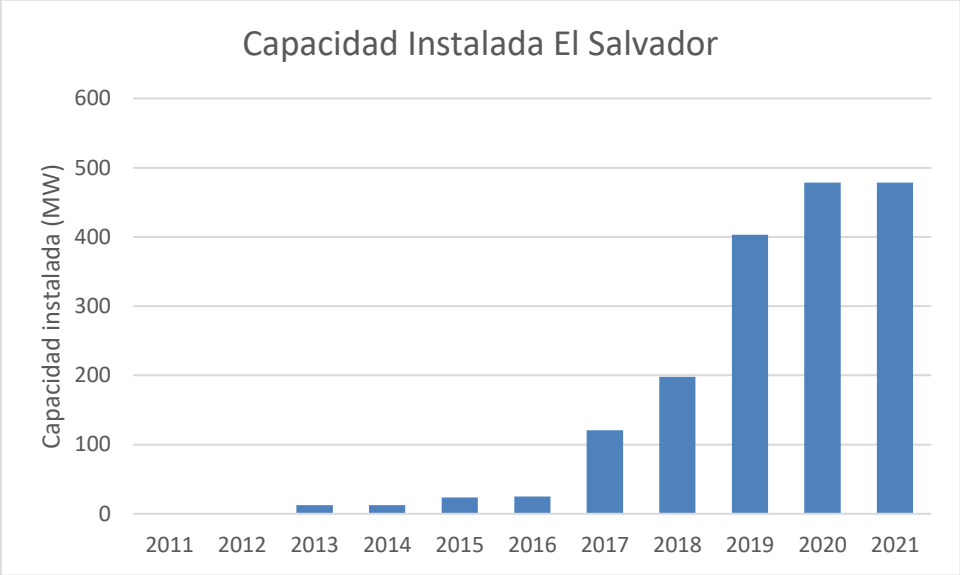


Fig. 2 Variación de la capacidad instalada en FV en El Salvador, ref.: IRENA, 2022.

2.2. Marco Conceptual

2.2.1 Clasificación de Paneles Solares Según su Composición.

- Silicio Monocristalino, las celdas son fabricadas en base a láminas de un único cristal de muy alta pureza y estructura cristalina casi perfecta, siendo este un proceso costoso. La eficiencia de estas celdas ha llegado hasta el 24,7% en laboratorio y a un 16% en paneles comerciales. (Rodriguez Sáchez, 2014).
- Silicio Policristalino, las láminas policristalinas son fabricadas a través de un proceso de moldeo. El proceso de moldeo es menos costoso, pero son menos eficientes. La eficiencia

de conversión alcanza valores alrededor del 19,8% en laboratorio y de 14% en paneles comerciales. (Rodriguez Sáchez, 2014).

- Silicio Amorfo, es una tecnología de lámina delgada y se fabrica depositando silicio sobre un substrato de vidrio de un gas reactivo. La tecnología de fabricación ha cambiado rápidamente, lo que ha generado un aumento de su eficiencia, llegando a valores entre 5 y 10% para paneles comerciales y de 13% en laboratorios. (Rodriguez Sáchez, 2014).

2.2.2 Ventajas y Desventajas de los Paneles Solares Policristalinos y Monocristalinos

- *Ventajas paneles solares monocristalinos.* Este tipo de paneles pueden durar hasta más de 25 años de operación, debido a su alta pureza de silicio, el cual es muy estable e inerte. Tiene una eficiencia del 15 al 22%. Torres et al. (2018)
- *Desventajas paneles solares monocristalinos.* El costo de estos paneles es muy elevado en comparación a los otros dos tipos de paneles. Estos paneles son muy frágiles, por eso no es recomendado utilizar este tipo de paneles en zonas donde abunda la nieve.
- *Ventajas paneles solares policristalinos.* Su manufactura es simple, esto los hace más rentables que los paneles policristalinos. Debido al gran desarrollo tecnológico que se tiene en este tipo de paneles, su durabilidad es de 25 años. Es muy similar a los paneles monocristalinos. Torres et al. (2018)
- *Desventajas paneles solares policristalinos.* Requiere mucho espacio para producir la misma cantidad de energía eléctrica, que se tendría con solamente un panel solar monocristalino. Debido a que estos paneles contienen una menor cantidad de silicio puro, su eficiencia es baja y ronda entre los 13 y 17%. Torres et al. (2018)

2.2.3 Proceso de Fabricación de Paneles Solares

El silicio se obtiene principalmente de la sílice (óxido de silicio), de la que, por el método de reducción, se extrae el silicio llamado de grado metalúrgico, que dispone de una pureza del 98%. Que, al no ser suficiente, ha de volverse a purificar hasta el extremo de llegar a un valor del 99.9999%. Este silicio puro, al que se le da el nombre de silicio de grado electrónico, es el comúnmente utilizado para la fabricación de células. Barrera et al. (s.f)

Con el silicio puro, comienza el proceso de fabricación de las células fotovoltaicas y los paneles, como se muestra en la Fig. 3.

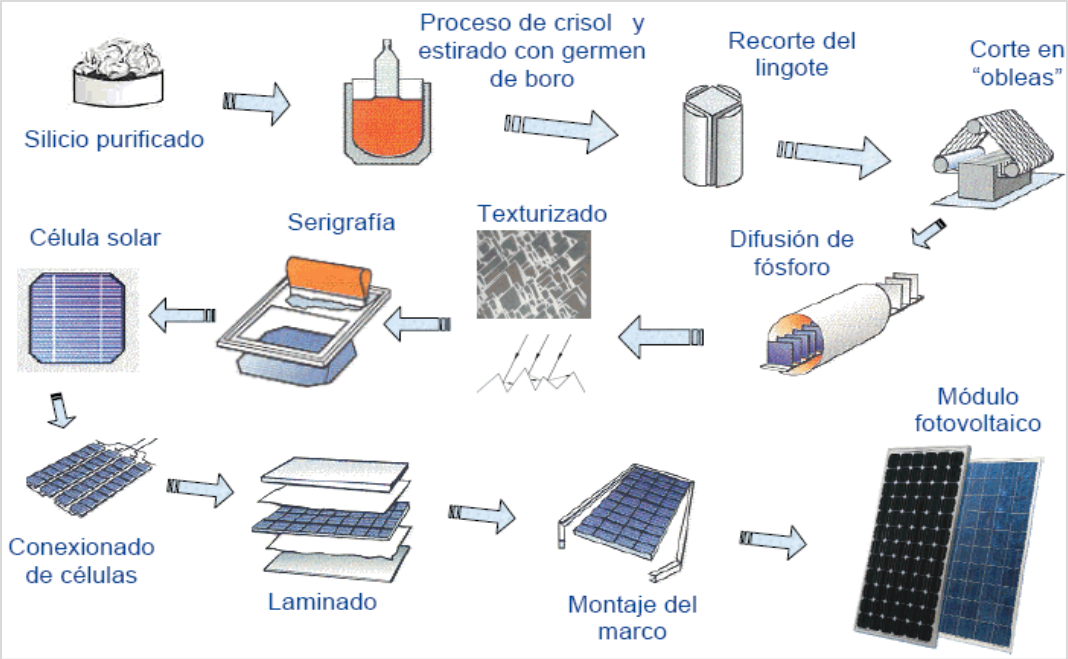


Fig. 3 Proceso de Fabricación de Paneles Solares, Adaptado de *proceso de fabricación de paneles solares (p.10). (Hernández, 2011)*

2.2.3.1 Obtención del Lingote. Para la obtención de los lingotes de silicio se siguen los siguientes métodos.

Métodos de cristalización del silicio monocristalino. Consiste en fundir el silicio policristalino en crisoles de alta pureza de cuarzo, que rotan dentro de una atmósfera de argón a presión reducida, e ir formando el cristal mediante un cristal semilla que se pone en contacto con el silicio fundido y se va rotando en sentido contrario a la rotación del crisol cuarzo y elevando, a la misma vez, a una velocidad determinada arrastrando al silicio fundido que, al salir de la colada se va enfriando y cristalizando con la misma orientación que la semilla, dando lugar a un lingote monocristalino cilíndrico de diferentes diámetros y longitudes.

El segundo método de obtención de silicio monocristalino, más difundido, es el método de zona flotante (ZF). El método de zona flotante se basa en hacer pasar una zona fundida a lo largo de una barra de silicio policristalino en forma vertical de aproximadamente las mismas dimensiones que el lingote final, encerrado en una atmósfera de gas inerte. La parte inferior se funde con un anillo de radiofrecuencia y se pone en contacto con una semilla de silicio orientada en la dirección deseada.

El anillo se va moviendo lentamente hacia arriba de manera que la zona fundida se desplaza a lo largo del lingote y el silicio va recristalizando en forma de monocristal. Al moverse la zona flotante, las impurezas disueltas no se incorporan en la misma concentración que tienen en el líquido, acumulándose en esta última fase. Por lo tanto, resulta evidente que el silicio ZF (zona flotante) permita alcanzar niveles de pureza mucho más elevados que el silicio CZ (método Czochralski) y con menos defectos reticulares. Barrera et al. (s.f)

Método de Cristalización del Silicio Policristalino. La obtención de silicio policristalino se realiza básicamente mediante la fundición del material inicial a temperatura de enfriamiento controlada, permitiendo así que solidifique en una dirección determinada (DS) dentro del molde, normalmente de grafito/cuarzo y sección
cuadrada.

La cristalización del Silicio policristalino provoca que su calidad sea muy pobre inicialmente provocado por la introducción en el proceso de defectos cristalinos e impurezas, por lo que se introduce normalmente un paso intermedio en el cual se realiza una extracción de impurezas mediante una capa de óxido formada por Fósforo, o también incluyendo una capa de Aluminio en la parte trasera de la oblea que cree un campo eléctrico repulsivo. Barrera et al. (s.f)

2.2.3.2 Corte del Lingote en Obleas (Wafers). El lingote se corta en finas obleas (250-400 µm) con hilos de acero inoxidable de 150 hasta 500 km. rociándolos con un abrasivo, lo que conlleva a una pérdida de 200-300 µm de espesor en forma de polvo inservible, es decir se pierde alrededor del 50% del silicio de altísima calidad. Barrera et al. (s.f)

2.2.3.3 Limpieza y Tratamiento Químico (Decapado) de las Obleas. El corte mediante sierra de multi-hilo de los lingotes en obleas provoca la presencia de restos, metálicos principalmente, en las superficies de estas. Para pulir dichas imperfecciones se utilizan pulidoras con adición de ácidos con gran capacidad de disolver metales, como HCl, HNO_3 o combinaciones tipo $HCl+H_2O_2$.

Una vez pulidas dichas imperfecciones, se procede a eliminar las posibles tensiones, irregularidades y defectos superficiales remanentes tras el corte en obleas. El proceso

consiste en un decapado mediante inmersión de las obleas en una disolución acuosa de NaOH en caliente. Barrera et al. (s.f)

2.2.3.4 Texturización. Consiste en crear en la superficie unas micropirámides para conseguir reducir las pérdidas por reflexión del 30 al 10%, obligando a que se produzca una segunda absorción de la luz reflejada. La formación de las micropirámides se consigue atacando la superficie de las obleas cristalizadas en una orientación, con una disolución acuosa de NaOH y de KOH al 2%, dejando al descubierto los planos cristalográficos. El uso de las soluciones NaOH y KOH para la texturización del silicio policristalino se siguen utilizando aun conociendo, que ofrecen resultados muy pobres. Barrera et al. (s.f)

2.2.3.5 Adición del Dopante. Previa limpieza de los posibles óxidos superficiales formados en las etapas anteriores, mediante inmersión en HF diluido, aclarado con agua y secado rápido, se procede a proyectar un dopante tipo n (el más comúnmente utilizado es el Fósforo) ya que las obleas suelen ser normalmente de tipo p debido a la introducción de Bromo antes de la etapa de cristalización. Barrera et al. (s.f)

En general se introducen los átomos dopantes en dos etapas de difusión separadas. La primera etapa se conoce como etapa de deposición en la que se pretende depositar una cantidad controlada de átomos de dopante en la superficie de silicio. La segunda etapa, conocida comúnmente como etapa de “drive-in”, se emplea en introducir los átomos de dopantes en el interior del substrato provocando la reducción de la concentración cerca de la superficie.

Los dopantes más utilizados son: el fósforo para los dopantes tipo n y el boro para los dopantes tipo p. (Cascant, 2013, pp22-24)

Existen otros procesos además de la difusión con fuente líquida para realizar el dopaje de la superficie de una oblea, tal como la difusión con una fuente sólida o la implantación iónica entre otras. En la difusión con fuente sólida, el dopante (Boro o Fósforo) viene en una pastilla de un compuesto que lo contiene y se coloca ubicado al lado de la oblea, a alta temperatura y en un ambiente adecuado se produce la reacción que descompone el compuesto y libera el dopante que se deposita en la superficie de la oblea y, así, por temperatura difunde.

El otro método mencionado para la realización de juntura es la implantación iónica que consta del bombardeo con partículas energéticas sobre la superficie de la oblea que, debido a la energía que traen, se introducen en la red del silicio dopándolo igual que en la difusión. (Martinez, 2011, pp 22-23)

2.2.3.6 Formación de la Unión P-N. Pre depositado el dopante sobre la superficie de la oblea, se debe inducir la sustitución de los átomos de silicio por los del dopante n en la red cristalina. Para ello, se introducen las obleas en hornos a altas temperaturas (900-1000 °C), añadiendo durante el proceso productos químicos como fuente adicional de fósforo: Oxicloruro de Fósforo, Pentaóxido de Fósforo y Fosfina. Al final del proceso también se realiza normalmente una limpieza mediante baños ácidos con HF, HCl, para así eliminar posibles restos introducidos en el proceso de difusión en los hornos. Barrera et al. (s.f)

2.2.3.7 Adición Capa Anti Reflectante. Consiste en la deposición de una capa fina de material transparente con índice de refracción óptimo n=2,3 para adaptar los índices de refracción del silicio (n=3,6 promedio) y el vidrio (n=1,5). Barrera et al. (s.f) **2.2.3.8 Inserción de los Contactos Frontal y Posterior.** Se fijan los contactos de la parte frontal

y posterior de la oblea, con una capa de contacto que contiene Plata y Aluminio, ya que cumplen con los requisitos para el óptimo funcionamiento. Barrera et al. (s.f)

2.2.3.9 Test de Clasificación Final de las Células Fotovoltaicas. Finalizado el proceso de fabricación de las células, se procede a retirar las defectuosas y clasificar las correctas en función de sus características de voltaje y corriente suministrados. Barrera et al. (s.f)

2.2.3.10 Ensamblado del Panel Fotovoltaico

El ensamble de paneles solares sigue el proceso detallado a continuación.

- Formación de cadenas y matriz de células fotovoltaicas.
- Colocación de laminado.
- Instalación de cubierta exterior.
- Instalación de protección posterior.
- Enmarcado del módulo fotovoltaico.
- Inserción de los contactos eléctricos
- Test final de funcionamiento. Barrera et al. (s.f)

El proceso listado puede es como se representa en la Fig. 4.

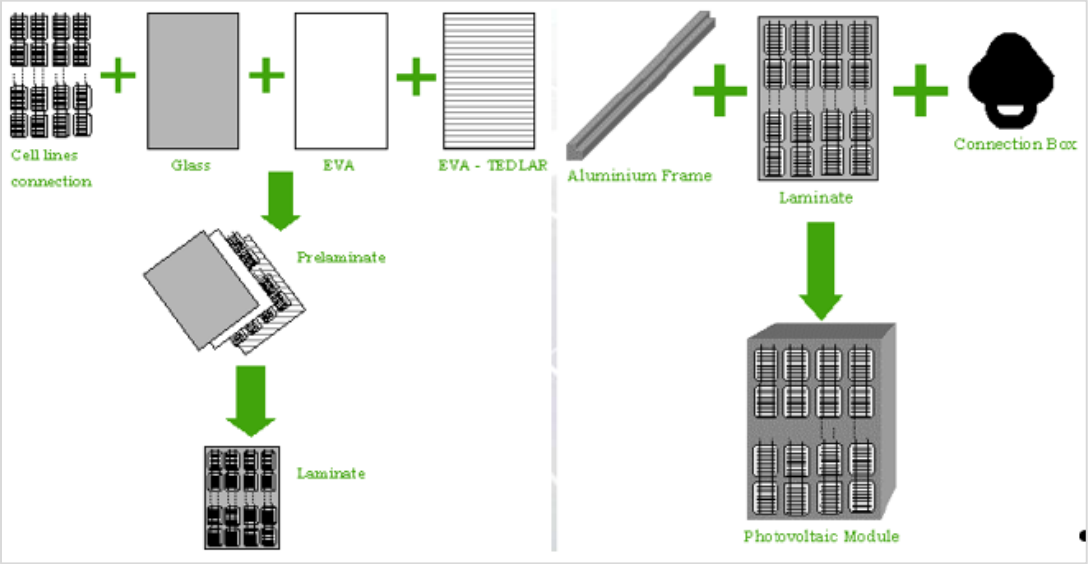


Fig. 4 Proceso de Fabricación del Panel, Ref.: Adaptado de Fabricación de paneles solares fotovoltaicos, por Barrera et al. (s.f).

2.2.4 Eficiencia de Paneles Solares

La eficiencia de los paneles solares es un punto importante por considerar al momento de seleccionar el tipo de panel a utilizar ya que un panel con mayor eficiencia producirá más energía eléctrica. Por lo anterior, en el mercado de los paneles solares se toma como prioridad la eficiencia, ya que muchas personas e industrias consideran a la eficiencia como el criterio más importante y también como punto para determinar la calidad del panel, en pocas palabras, la eficiencia del panel solar se considerará la habilidad del panel solar de convertir energía solar en energía eléctrica, no obstante, también la eficiencia es sinónimo de un alto costo. Torres et al., (2018).

A continuación, se describen algunos de los criterios antes mencionados según el presenta detalle:

Eficiencia de Paneles Monocristalinos y Policristalinos: Hoy en día a los paneles solares se les busca que sea lo más eficientes y baratos posibles, sobre todo a los paneles de silicio (mono-Si o poli-Si) ya que tiene un alto grado de ventas en el mercado.

Es por eso por lo que cada vez se está acercando la eficiencia del panel de silicio al añorado 30-31%. La eficiencia que se tiene hasta el día de hoy en los paneles de silicio es del **24%** a una radiación solar de AM 1.5.

A diferencia de las células de laboratorio, las células comerciales son aquellas que se encuentran en el mercado. La eficiencia de conversión de células hechas en laboratorio son las siguientes: 24% para células Silicio monocristalino, 20.4% para células de Si cristalinas. La eficiencia de conversión de células en los últimos 10 años de uso comercial es: 12- 16%. Torres et al., (2018)

Factor Forma (FF): El factor de forma es un dato para poder determinar la eficiencia del panel. Se refiere a “la relación entre la potencia máxima teórica y a la potencia real, medidos de forma

simultánea “. De acuerdo con Torres et al., (2018), la ecuación para determinar dicho factor de forma es la que se presenta a continuación.

$$FF = \frac{Vmp \times Imp}{Voc \times Isc} \qquad (1)$$

Donde:

FF: factor de forma; Vmp y Imp: Voltaje de máxima potencia; Voc y Isc: voltaje de circuito abierto y corriente de corto circuito.

Para el caso de la eficiencia del panel, esta queda determinada con la ecuación número dos.

$$\eta = \frac{FF \times Voc \times Isc}{G \times Area} \qquad (2)$$

Donde:

n: eficiencia de conversión de energía; G: Irradiancia sobre el plano (W/m^2) y A: área de superficie de captación de la radiación solar.

3. Metodología de la Investigación

Ubicado en un lugar de la Costa del Sol en El Salvador, se encuentra una planta solar fotovoltaica con una capacidad instalada de 10kWn y 12.8kWp sobre una cubierta de techo con orientación sur y 5° de inclinación. Cuenta con dos inversores marca Huawei de 5kW cada uno, con 14 paneles policristalinos de 315Wp de 72 celdas marca Jinko Solar y 28 paneles monocristalinos de 300Wp de 60 celdas marca JA Solar. Esta pequeña planta solar fue seleccionada por su peculiar característica de tener ambos tipos de tecnologías ubicadas bajo un mismo ambiente, que se encuentran afectadas bajo las mismas condiciones ambientales y de suciedad y sombra. Dicha planta entró en operación a partir de agosto del 2021. La empresa

instaladora y el dueño de la planta permitieron tener acceso a los datos recolectados por los inversores desde su momento de acondicionamiento en el mes de agosto del 2021 hasta el día que se tomaron los últimos datos, el 1 de junio del 2022. Así mismo se permitió la posibilidad de instalar equipos de medición de temperatura y de radiación solar dentro de la planta solar.

En la Fig. 5 y Fig. 6 se muestra la instalación de los paneles solares divididos por cada tipo.

Fig. 5 Paneles Solares Policristalinos (JKM 315P-72) Instalados en la planta Solar en la Costa del Sol, Ref.: elaboración propia.

Fig. 6 Paneles Monocristalinos (JAM60S02-300/PR) Instalados en la planta Solar de la Costa del Sol, Ref.: elaboración propia.

Se estudió la configuración de la instalación solar fotovoltaica, descrita gráficamente en el diagrama unifilar mostrado en la Fig. 7. Ya que cada inversor cuenta con dos entradas MPPT, se puede acceder a cuatro entradas individuales, las cuales cuentan con un *string* (cadena) cada una. Dentro de estos cuatro *strings* se cuenta con un *string* de 11 paneles solares monocristalinos, un segundo *string* de 11 paneles solares policristalinos, los cuales serán los strings de estudio. En la plataforma de Huawei llamada "*FusionSolar*" se puede obtener el valor de tensión y de corriente de cada uno de los *strings* de estudio, en periodos de cada 15 minutos por cada mes. Estos valores de tensión y de corriente serán utilizados como parte de los valores necesarios para construir el modelo de cada uno de los paneles solares.

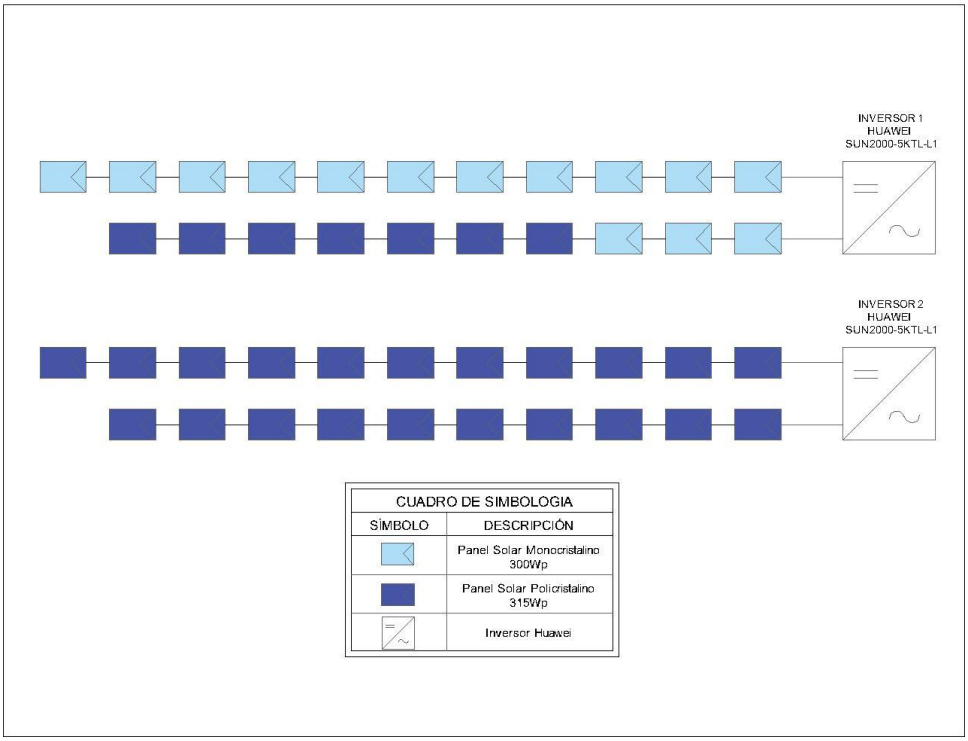


Fig. 7 Diagrama Unifilar de la Conexión de la Planta, ref. Elaboración propia.

Con el objetivo de obtener valores en tiempo real sobre la temperatura de los paneles, la temperatura del medio ambiente y la radiación solar que recibe el local en donde se encuentra instalada la planta solar, se utilizó un conjunto de equipos de medición y un microprocesador de datos para poder almacenar la información cada 15 minutos durante un mes. En paralelo a dichas mediciones, se obtuvo información de estas variables a través de la plataforma del Instituto Privado de Investigación Sobre Cambio Climático (ICC), el cual cuenta con una estación meteorológica ubicada en Agua Santa, Zacatecoluca, que es la estación más cercana a la planta solar.

Las estaciones meteorológicas son de tipo automático, lo cual significa que monitorean y transmiten de manera remota información a cada quince minutos, sobre: temperatura ambiente, radiación solar, humedad relativa, precipitación, mojadura de hoja, velocidad y dirección del viento (ICC, 2020), por lo que estos parámetros cubren las necesidades de la investigación.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la ubicación de cada estación m eteorológica en El Salvador.

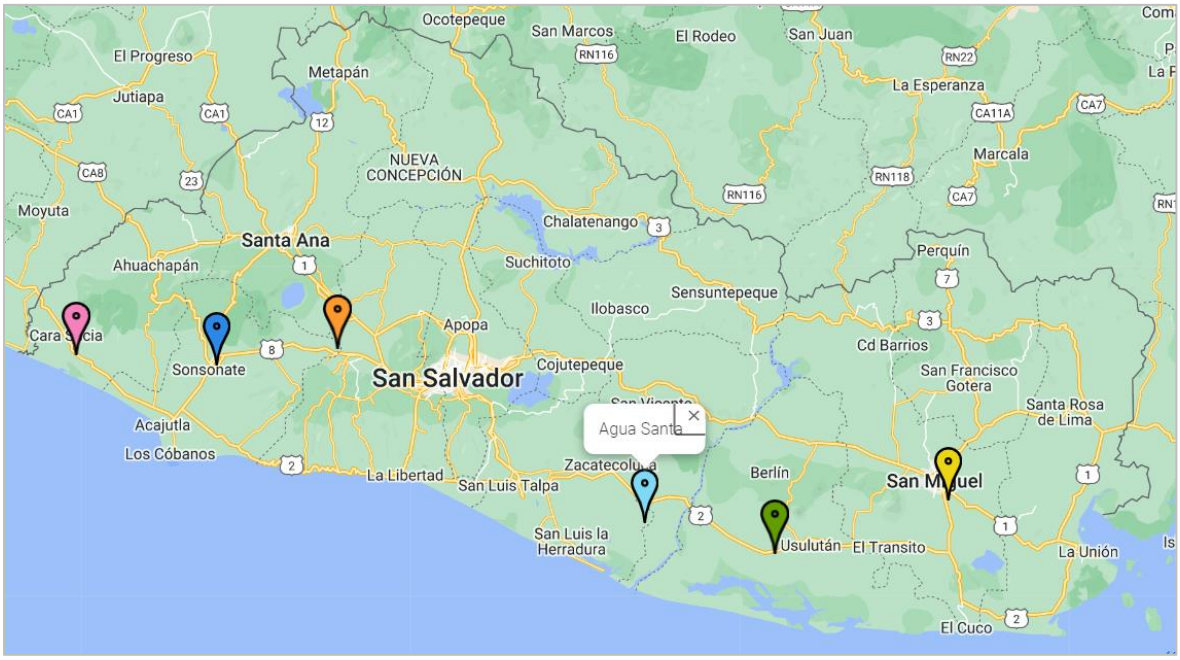


Fig. 8 Mapa de Ubicación de las Estaciones Meteorológicas, ref.: Google Maps y Adaptado de Instituto Privado de Investigaciones sobre Cambio Climático (ICC,2020).

Una vez obtenidos los datos de las variables en estudio, se utilizará un software *MatLab* para realizar una simulación del comportamiento de la generación de energía de los paneles solares bajo las condiciones que se presentaron al momento de la toma de dichos datos, todo a través de un modelo matemático de paneles solares que utiliza *Matlab* con su herramienta *Simulink* para obtener la curva I-V de cada panel solar, y se podrán comparar entre sí de forma técnica.

A continuación, se realiza una descripción más detallada de cada una de las etapas a seguir.

3.1. Valor de Tensión y Corriente por *String*

Los inversores utilizados en la planta solar en estudio son de la marca HUAWEI y su modelo es SUN2000-5KTL-L1. Estos inversores se encuentran conectados a una plataforma virtual a través de una conexión a internet, dicha plataforma tiene como nombre "*FusionSolar*".

Teniendo acceso a la plataforma virtual y específicamente a los datos de la planta, se obtuvieron los valores de tensión y corriente por cada uno de los *strings* identificados previamente. Dichos datos son tabulados en un cuadro dentro de un archivo **.csv* en donde muestra la tensión y la corriente medida cada 15 minutos durante el período de operación de cada inversor, a su vez dentro de la plataforma se puede seleccionar los días o meses de los cuales se quiera obtener la información.

En la presente investigación se obtendrá información de los meses de enero hasta mayo del 2022, obtenidos de la plataforma "*FusionSolar*", el mismo periodo de tiempo del cual se provee información por parte de la medición en sitio. Con esta información se podrá realizar un modelado del comportamiento de los paneles en estudio y realizar una comparación respecto a los diversos medios de obtención de información.

3.2. Recolección de Datos de Irradiancia y Temperatura en Sitio

La planta solar en investigación no cuenta con sistema de monitoreo propio, por lo cual se recurrió a la instalación de un equipo externo a la planta solar para poder realizar el monitoreo necesario para conocer la irradiancia y la temperatura de los paneles y del medio ambiente, directamente en el lugar de la planta.

3.2.1 Equipo Utilizado

Se utilizaron tres termocuplas tipo K para tomar tres variables de temperatura: Temperatura del panel monocristalino, temperatura de panel policristalino y temperatura ambiente.

Para que las termocuplas tuvieran una mayor área de contacto con la parte trasera del panel, se añadió un trozo de aluminio en el bulbo de la termocupla, como se observa en la Fig. 9.

Fig. 9 Adaptación de Lámina de Aluminio a Termocupla para ampliación de Área de Contacto, ref.: Elaboración propia.

Se instaló un piranómetro de la Serie CMP, como se muestra en la Fig. 10, que mide la irradiancia con una precisión de 15.66 µV/W/m^2. El equipo fue nivelado de tal forma que este quede perpendicular en la zona de instalación

Fig. 10 Montaje de Piranómetro en Sitio del Proyecto, ref.: elaboración propia.

Para guardar la información tomada en la zona, se utilizó un microcontrolador ARDUINO UNO programado como *Datalogger* para almacenar la información en una memoria SD. En este caso se utilizó un módulo MAX6675 como apoyo del procesamiento de lectura de cada una de las termocuplas, como se muestra en la Fig. 11. El programa construye un archivo con extensión *.svc que indica la fecha y el periodo dentro del cual toma los datos, los adjunta diferenciándolos con una "," entre datos y los almacena en una memoria SD. El código desarrollado se muestra en el Anexo A.

El equipo fue instalado dentro de una caja plástica para su aislamiento al medio ambiente, ubicada por debajo de la estructura que sostienen los paneles solares.

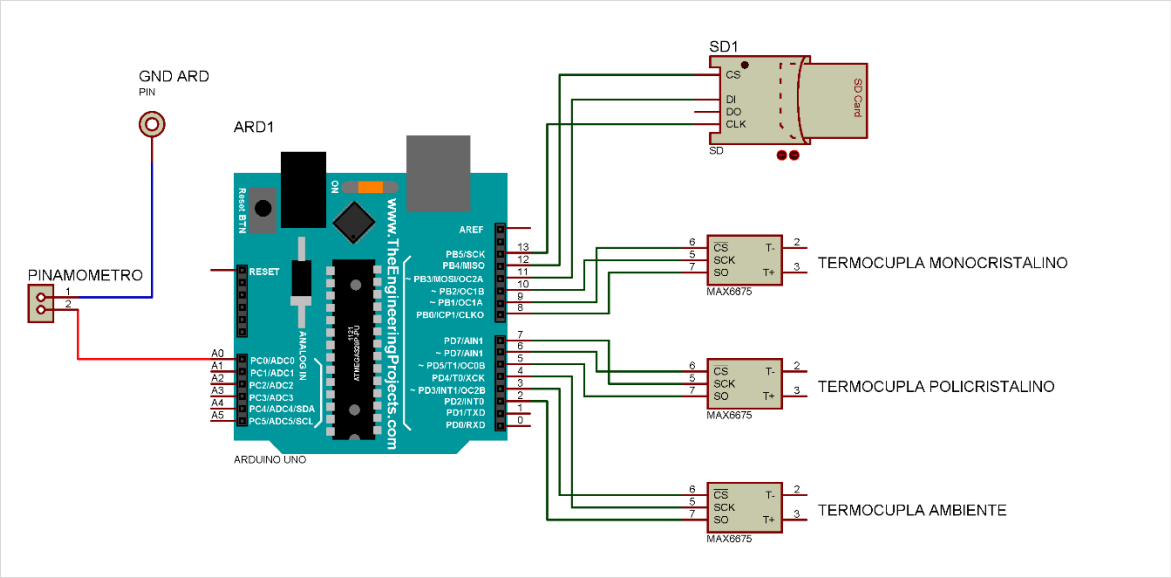


Fig. 11 Diagrama representa la interconexión entre Arduino y los elementos de medición utilizados para la recolección de los datos en sitio Diagrama Esquemático de Equipo de Medición, ref.: elaboración propia.

El equipo de medición en sitio fue ubicado por un periodo de tiempo de 40 días, desde el día 24 de abril hasta el día dos de junio del 2022. Durante este lapso se obtuvieron 3,840 datos por variable, de los cuales únicamente se utilizarán los datos obtenidos en un horario entre las 6am y las 6pm, llegando a la cantidad de 1,920 datos brutos, siendo 48 datos por día aproximadamente.

3.3. Recolección de Datos de Irradiancia y Temperatura desde Plataforma Virtual

Accediendo a la plataforma REDMET del ICC, se pueden extraer los datos de las variables meteorológicas que mide y almacena la estación meteorológica automática, ubicada en Agua Santa, Zacatecoluca, El Salvador. Dicha estación meteorológica se encuentra alejada, del sitio del proyecto, aproximadamente 22-23km de distancia. Debido a dicha cercanía, se propone utilizar los valores de medición de dicha estación como variables aptas para la evaluación del presente trabajo de investigación. De la estación meteorológica de Agua Santa, únicamente se utilizarán los datos de irradiancia y temperatura ambiente. Estas variables serán comparadas con los datos obtenidos de la medición en sitio, con el propósito de verificar la validez de dichos valores y así poder ser utilizadas o no dentro de esta investigación o estudios de terceros. Se tomaron estas dos variables debido a que son las utilizadas como variables de entrada para el modelo utilizado en Matlab.

3.4. Obtención de Curva I-V

Una vez se tienen los datos de las variables, tabulados dentro de un documento de Excel, se procede a ser uso de la herramienta virtual o software llamado MATLAB.

MATLAB es una plataforma de programación y cálculo numérico utilizada para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos. (MATLAB,2022)

Con la ayuda de este programa se realizará un procesamiento de las variables obtenidas y junto a las características de los paneles solares, construir un modelo para cada uno de los tipos de paneles solares. Con el modelo de cada tipo de panel se construirá una curva I-V para cada uno y así poder comparar el rendimiento de generación entre ambos tipos de paneles.

MATLAB cuenta con un *Plug-in*, un entorno de programación virtual, a través del cual existe un modelo de panel solar ya creado, el cual únicamente debe ser programado con el objetivo de

utilizar las variables presentes dentro del archivo Excel, como las variables de entrada para este modelo.

Simulink cuenta con un modelo matemático que representa un arreglo de paneles solares, que incluye una variedad de módulos fotovoltaicos preestablecidos disponibles desde la plataforma de *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, sin embargo, los modelos de los paneles a utilizar dentro de la investigación no se encuentran dentro de esta lista, por lo que se apoyará de la ficha técnica creada por los fabricantes de cada panel como apoyo para el conocimiento de los valores básicos como: voltaje de circuito abierto, voltaje óptimo de trabajo, corriente de cortocircuito y corriente óptimo de trabajo, así como las constantes de perdida y ganancia por temperatura.

El modelo del panel solar que utiliza *Simulink* se basa en cinco parámetros principales: una fuente de corriente (que simula la corriente generada por la luz), un diodo (parámetros I0 y nl), resistencia en serie Rs y resistencia de derivación Rsh. Teniendo como parámetros de entrada la radiación y la temperatura del panel solar, este modelo permite la representación característica de una gráfica I-V bien sea por módulo o por arreglo de paneles. Debido a que los cinco parámetros anteriormente descritos no se encuentran dentro de la descripción que el fabricante entrega, el bloque o modelo de *Simulink* calcula automáticamente estos valores una vez se hayan ingresado los valores básicos. En la Fig. 12 muestra el diagrama del modelo utilizado para la simulación del panel solar que utiliza *Simulink*.

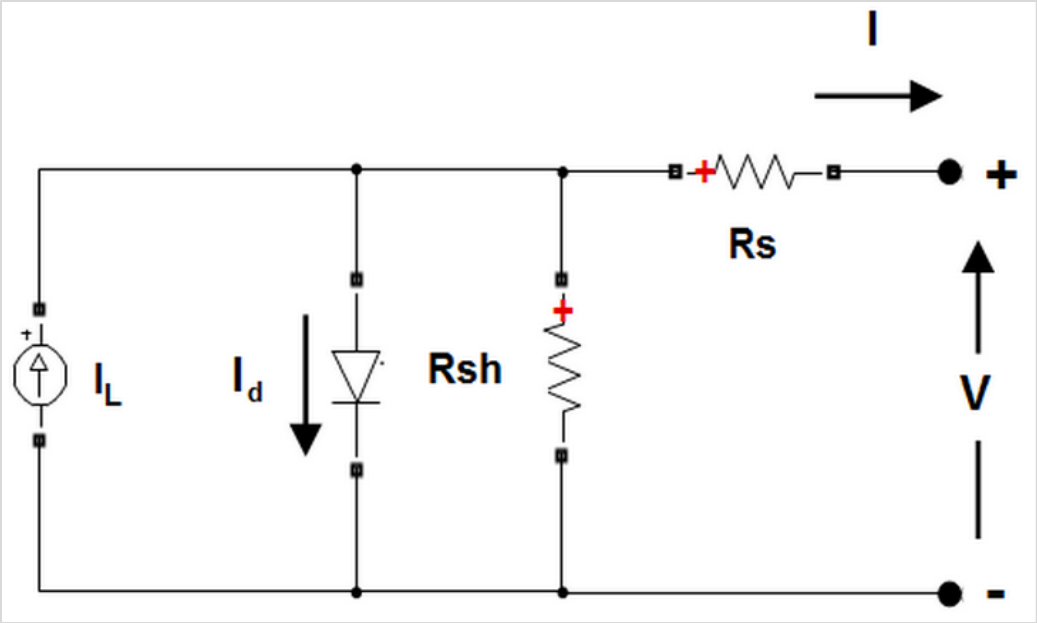


Fig. 12 Diagrama del Modelo Utilizado en Simulink.

4. Análisis de Resultados

4.1. Modelado de Paneles Solares

Utilizando el bloque del modelo de arreglo fotovoltaico llamado "*PV Array*" dentro de la herramienta *Simulink* y utilizando los datos característicos de los paneles solares entregado por el fabricante en su ficha técnica, se obtuvieron las siguientes graficas I-V por arreglo según el tipo de panel.

Panel Monocristalino

En la Fig. 14 se muestran los datos ingresados a *Simulink*, para obtener las gráficas I-V Y P-V mostradas en la Figura 14 de los 11 paneles monocristalinos conectados en serie.

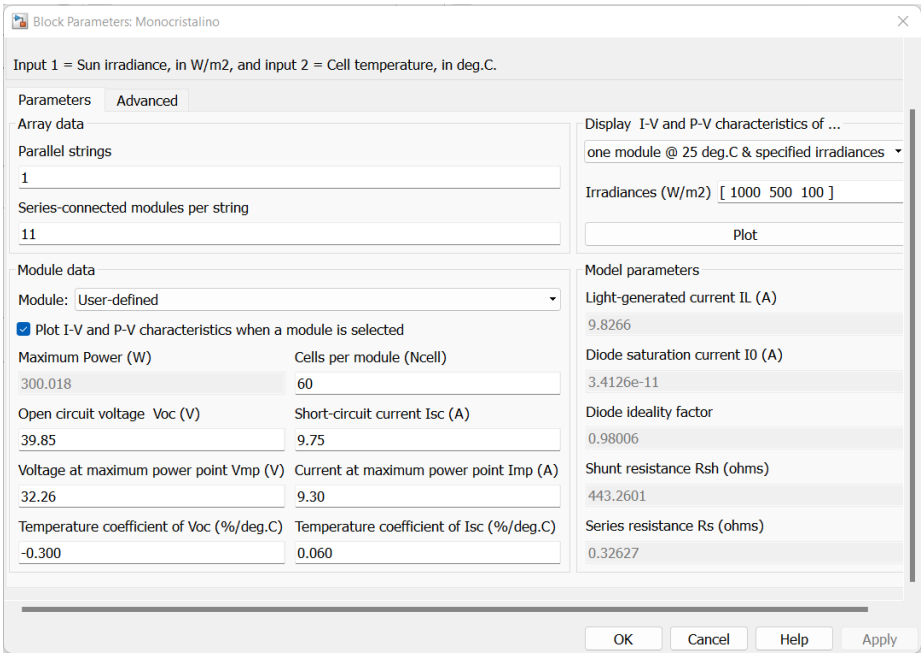


Fig. 13 Datos Ingresados para Modelado de Panel Solar Monocristalino

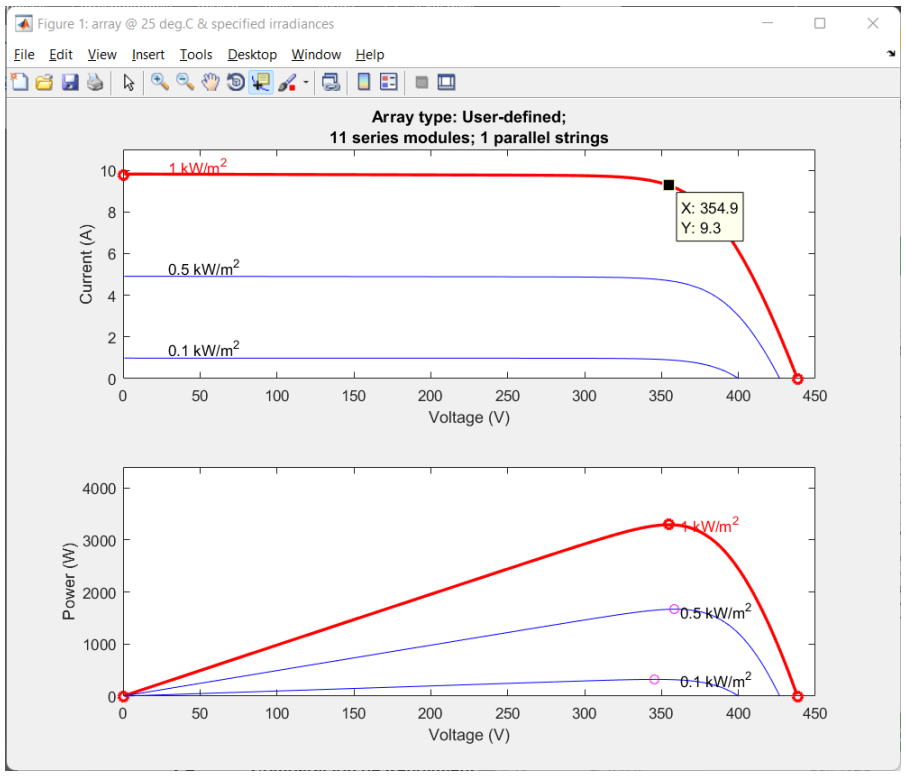


Fig. 14 Gráfica I-V y P-V de los Paneles Monocristalinos

Panel Policristalino

En la Fig. 15 se muestran los datos ingresados a *Simulink*, para obtener las gráficas I-V y P-V mostradas en la Fig. 16 de los 11 paneles policristalinos conectados en serie.

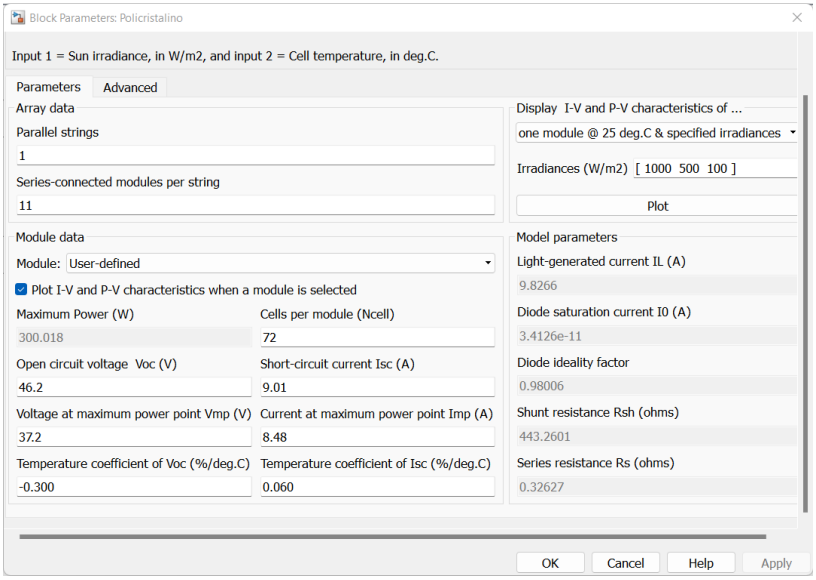


Fig. 15 Datos Ingresados para Modelado de Panel Solar Policristalino.

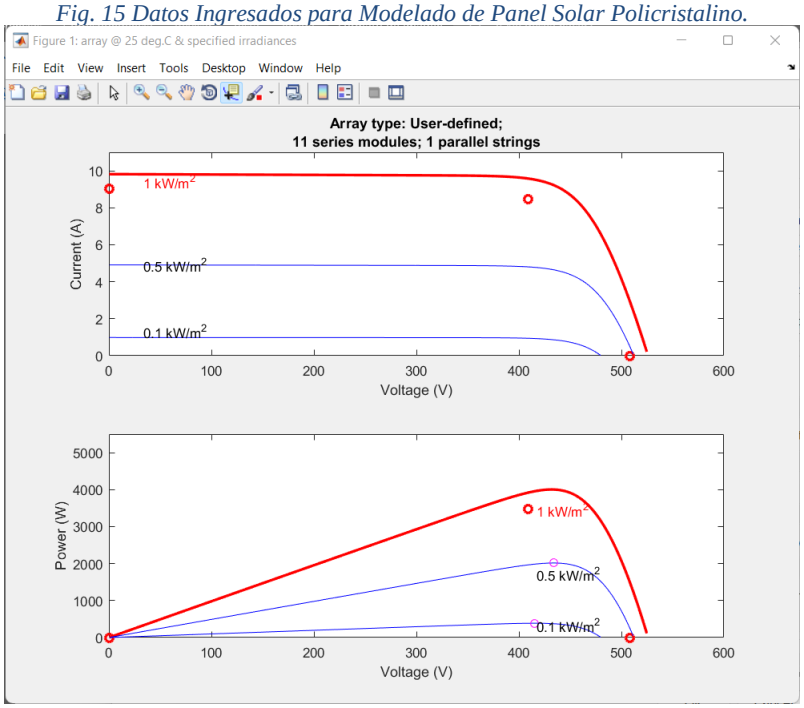


Fig. 16 Grafica I-V y P-V de Paneles Policristalinos

El entorno de programación Simulink (Fig. 17), permitió generar el siguiente diagrama con el cual se trabajó la simulación de todos los casos de estudio. Las variables que fueron cambiando fueron la radiación solar y temperatura de cada panel solar.

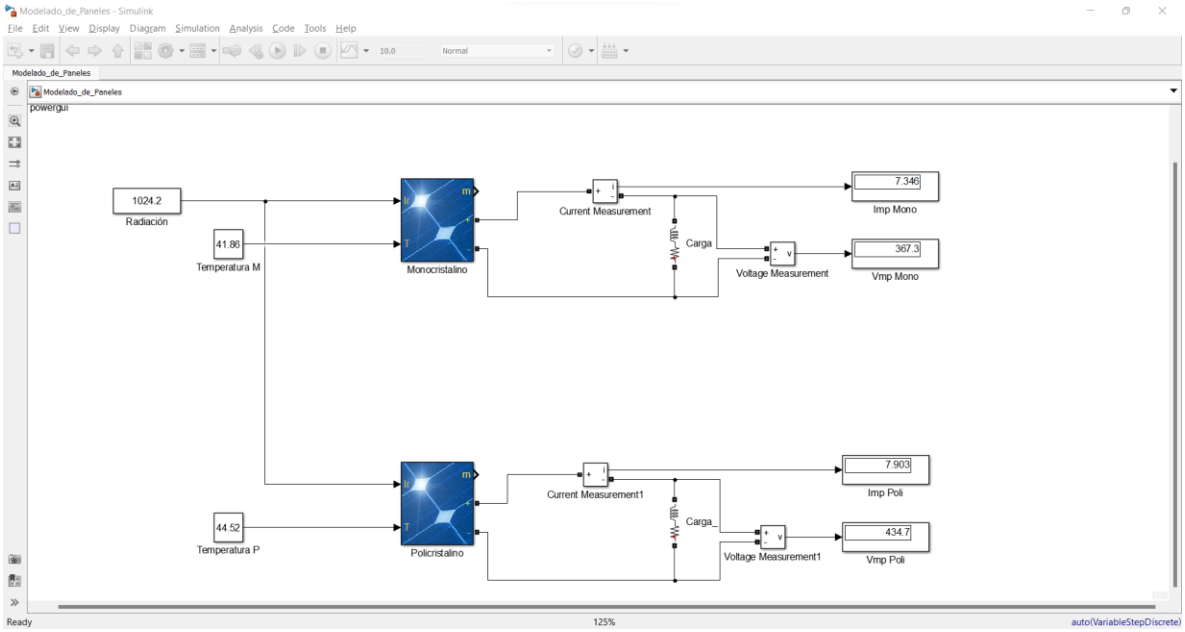


Fig. 17 Diagrama de Interconexión de Bloques de Simulación Dentro de Simulink.

4.2. Procesamiento de Variables

Valores Medidos en Sitio

Las variables obtenidas con las mediciones realizadas en sitio fueron: Radiación Solar en W/m^2, temperatura ambiente, temperatura de panel monocristalino y temperatura de panel policristalino en grados Celsius, así como también la fecha y la hora en la que fueron tomados. Estos valores se almacenaron en un archivo de texto con cada dato separado por una coma “,” y para su mejor procesamiento los datos fueron exportados hacia un archivo Excel.

Una vez se tuvieron los datos en Excel se procedió a realizar un filtrado de la información. Debido a la cantidad de datos obtenidos, se determinó que se seleccionarían datos relevantes por semana. Se seleccionó la información en seis grupos, conformados por siete días cada uno. Una

vez agrupados se buscó la radiación solar con mayor valor en cada uno de los grupos y se filtró junto a los datos de temperatura correspondientes a ese evento. Se construyó la Tabla 4, que muestra un resumen de dicha información.

Tabla 4 Resumen de Datos Medidos en Sitio de Proyecto, ref.: elaboración propia.

Semana	Periodo	Mayor día de Radiación de cada Semana	Radiación	Temperatura Monocristalino	Temperatura Policristalino
1	24/04/22 - 30/04/22	28/04/2022 12:45	1066.60	45.38	47.41
2	01/05/22 - 07/05/22	04/05/2022 11:45	986.02	41.40	43.89
3	08/05/22 - 14/05/22	11/05/2022 12:30	1015.70	42.91	43.04
4	15/05/22 - 21/05/22	21/05/2022 12:45	1068.96	41.34	43.33
5	22/05/22 - 28/05/22	26/05/2022 10:30	1052.52	37.86	39.47
6	29/05/22 - 01/06/22	29/05/2022 12:45	1024.20	41.86	44.52

Se utilizaron los datos de la Tabla 4, para realizar las simulaciones del comportamiento de cada conjunto de paneles solares. Junto a la radiación y a la temperatura de cada panel introducidos al modelo construido en *Simulink*, se obtuvieron los datos de voltaje en operación (V_{mp}) y de corriente de operación (Imp) para cada semana de cada tipo de panel, como se muestra en la Tabla 4. Con estos valores obtenidos se utilizaron las Ecuación 1 y 2 para poder conocer la eficiencia a la que se encontraban trabajando los arreglos de paneles solares durante el caso de mayor radiación solar. Una vez obtenidos los valores de eficiencia, se calculó un valor promedio de la eficiencia de cada tipo de panel solar. La Tabla 5, muestra los resultados de la simulación y el cálculo de la eficiencia de cada conjunto de paneles.

Tabla 5 Resultado de simulación de conjunto de paneles solares en Simulink, ref.: elaboración propia.

Semana	Periodo	Panel Monocristalino				Panel Policristalino			
		Vmp	Imp	FF	Eficiencia	Vmp	Imp	FF	Eficiencia
1	24/04 - 30/04	365.4	7.31	0.62	16.47	430.4	7.826	0.74	17.48
2	01/05 - 07/05	365.7	7.13	0.61	16.08	432.3	7.86	0.74	17.63
3	08/05 - 14/05	365.7	7.31	0.63	16.48	435.9	7.93	0.75	17.93
4	15/05 - 21/05	370.1	7.4	0.64	16.89	439.5	7.99	0.77	18.22
5	22/05 - 28/05	373.3	7.47	0.65	17.2	443.5	8.06	0.78	18.55
6	29/05 - 01/06	367.3	7.35	0.63	16.65	434.7	7.9	0.75	17.82
				promedio	16.63			promedio	17.94

Valores Descargados de Plataforma

Gracias al acceso a la plataforma "*FusionSolar*" se realizó una descarga de los valores de voltaje y de corriente de operación de cada uno de los conjuntos de los paneles solares. La descarga es realizada en un archivo *Excel* que contiene los valores medidos durante un mes, cada cinco minutos en un periodo desde que el inversor entra en marcha, hasta que éste se desconecta de la red, que coincide aproximadamente con un horario entre 6:00:00 a.m. y 6:00:00 p.m.

Aparte de esta información, se utilizó la plataforma virtual de lCC para conocer la radiación solar desde una estación meteorológica cercana al sitio del proyecto. La plataforma entrega información de radiación y de temperatura ambiente cada 15 minutos, por lo que los datos de esta plataforma eran menos que los recolectados anteriormente desde *FusionSolar*.

Una vez obtenidos los datos de ambas plataformas se cruzó la información de tal forma que coincidieran según la hora y el día en que estos fueron medidos por sus respectivos medios. Posteriormente se identificó el valor de irradiancia mayor, alcanzado en cada uno de los meses desde agosto del 2021 hasta el mes de mayo del 2022. La Tabla 6 muestra los datos de la eficiencia de los paneles con la información de información entre plataforma ICC y plataforma *FusionSolar*.

Tabla 6 Eficiencia obtenida a partir de datos de estación meteorológica e inversores, ref.: Elaboración propia.

MES	Mayor día de radiación del mes	Radiación	Panel Monocristalino				Panel Policristalino			
			Vmp	Imp	FF	Eficiencia	Vmp	Imp	FF	Eficiencia
Agosto	29/08/2021 12:45	1021.1	262.5	7.14	0.44	11.56	308.3	6.36	0.43	11.19
Septiembre	06/09/2021 12:15	911.2	256	6.17	0.37	9.74	325.8	6.09	0.43	11.32
Octubre	11/10/2021 12:30	1036.1	300.3	6.17	0.43	11.43	298.7	6.93	0.45	11.81
Noviembre	28/11/2021 12:15	1026.6	238.2	6.28	0.35	9.22	307.2	6.36	0.43	11.15
Diciembre	09/12/2021 11:30	1024	246.5	8.14	0.47	12.37	288.8	8.25	0.52	13.6
Enero	04/01/2022 12:45	913.4	318	6.16	0.46	12.08	279.3	7.11	0.43	11.33
Febrero	08/02/2022 12:30	1102.2	274.2	7.39	0.47	12.5	308.7	7.46	0.5	13.14
Marzo	10/03/2022 12:45	1048	301.3	5.4	0.38	10.03	311.7	6.39	0.43	11.37
Abril	18/04/2022 12:00	1098.8	226.7	8.75	0.46	12.23	289.2	8.49	0.54	14.01
Mayo	26/05/2022 12:45	1073.3	250.6	8.33	0.49	12.87	308.7	8	0.54	14.09
				promedio		11.40		promedio		12.30

4.3. Comparación del Rendimiento entre Paneles Solares

Una vez obtenida la eficiencia de cada tipo de panel solar, por cada uno de los medios propuestos, se realizó una comparación del comportamiento de los resultados obtenidos. Se agruparon estos datos y se compararon entre sí. A su vez se realizó la comparación de los datos obtenidos contra los datos de eficiencia que presenta el fabricante de cada tipo de panel solar, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7 Comparación de eficiencias obtenidas versus datos de fabricante, ref.: elaboración propia.

Tipo de Panel Solar	Eficiencia			Deviación Respeto a Fabricante	
	Medición en Sitio	Datos de Plat ICC	Datos de Fabricante	Medición en Sitio	Datos de Plataforma ICC
Monocristalino	16.63%	11.40%	18.35%	-9.37%	-37.87%
Policristalino	17.94%	12.30%	16.23%	10.54%	-24.21%

Como se puede observar en la Tabla 7, ambos resultados provenientes de la medición presentan una misma tendencia con respecto a qué tipo de panel solar tiene una mejor eficiencia. En ambos casos la eficiencia del panel policristalino es ligeramente superior al valor de eficiencia

del panel monocristalino. A su vez se observa que los datos de medición en sitio no coinciden con los datos entregados por la plataforma, no obstante, los datos de eficiencia calculados con las mediciones locales son más cercanos a los datos de fabricante.

4.4. Comparación entre Mediciones en Sitio vs Estación Meteorológica

Con la información recolectada de los equipos de medición colocados en sitio y la información descargada desde la estación meteorológica de Agua Santa en El Salvador (ICC, 2020), se realizó un análisis comparativo para estudiar la variación en los valores obtenidos entre sí. Como ya se indicó anteriormente, la comparación se hizo con dos datos de irradiación medidos a una distancia aproximada de 23 km; la medición de irradiancia en Agua Santa es sobre una superficie horizontal mientras que en el sitio es sobre el plano inclinado de los módulos. A modo de ejemplo, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la comparación e ntre las gráficas de irradiancia para el 15 de mayo de 2022, día en el cual el viento tuvo una

velocidad promedio de 11.04 km/h y humedad relativa promedio del 65.02%. A continuación, se puede observar dicha gráfica.

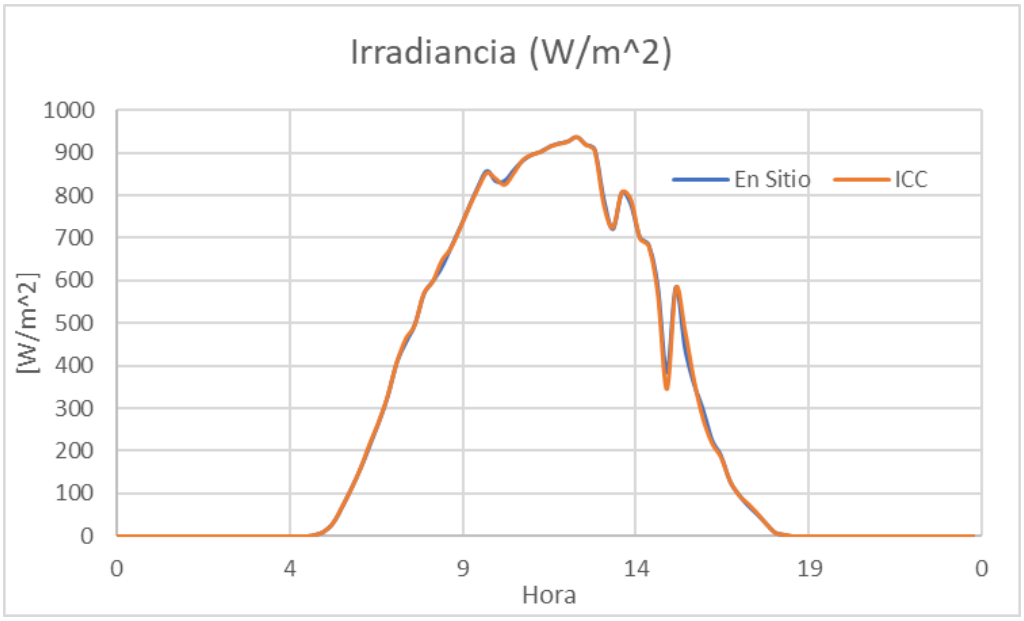


Fig. 18 Comparación de Irradiación solar medida en sitio contra estación meteorológica Agua Santa (ICC), para el día 15 de mayo de 2022, Ref.: Elaboración propia.

Según el resultado, la energía total acumulada durante el periodo de medición (38 días) para ambas estaciones fue de 922.087 kWh para la estación de medición local, y 924.919 kWh para Agua Santa, lo que hace que la estación de medición en Agua Santa sea 0.3 % mayor que la medición local.

5. Conclusiones

Se pudo verificar que, las eficiencias obtenidas a partir de los valores medidos, tanto de forma local como de forma externa de los dos tipos de paneles solares en estudio, de igual coeficiente de pérdidas por temperatura; presentan una tendencia que contradice de forma general lo que teóricamente se conoce, es decir, en el ámbito de los paneles solares se dice que bajo condiciones de Laboratorio Estándar (STC, por sus siglas en inglés) los paneles del tipo

monocristalinos presentan una mayor eficiencia en comparación a los del tipo policristalino, mientras que para las condiciones ambientales que presenta la zona costera de El Salvador, según el resultado obtenido, los paneles policristalinos presentan un valor de eficiencia ligeramente mayor en comparación de los paneles monocristalinos. De acuerdo con lo anterior, desde el punto de vista de producción de energía no se justifica el uso de paneles monocristalinos ya que su desempeño no compensa el incremento de la inversión inicial.

En cuanto a la comparación de eficiencia del panel monocristalino con el policristalino, este último presenta un valor de 1.3% por encima del valor de eficiencia que presenta el panel monocristalino, esto en cuanto a los valores medidos en el sitio del proyecto. Siguiendo la misma comparación, pero esta vez considerando los valores descargados desde la estación meteorológica Agua Santa y de la plataforma *FusionSolar*, los paneles policristalinos se encuentran un 0.9% por encima de los paneles monocristalinos.

Según la teoría, los paneles monocristalinos cuentan con celdas solares que son construidos de tal forma que obtienen una mayor pureza química en cuestión a su componente principal: el silicio. Así mismo los fabricantes de paneles solares recomiendan el uso de este tipo de panel bajo condiciones climáticas que no cuenten con temperaturas demasiado elevadas ya que esto podría afectar su rendimiento. En contraste a lo dicho, los fabricantes sugieren que en climas tropicales o con temperaturas ambientes relativamente altas se utilicen los paneles policristalinos, los cuales se dice que están compuesto con celdas solares que tienen menos pureza del silicio que las compone. Siguiendo estas ideas, se puede determinar que en un ambiente cálido como lo es la zona costera de El Salvador, específicamente en la Costa del Sol, los paneles del tipo policristalino se ven afectados de menor forma por la temperatura ambiente y operativa, a pesar de que estos se calienten más que los paneles tipo monocristalino.

Se construyó una gráfica I-V y una gráfica P-V de cada conjunto de paneles solares en estudio, utilizando principalmente los valores obtenidos a partir de la medición en sitio. Gracias a ello se puede apreciar cuales son los valores de voltaje y de corriente idóneos para obtener el punto de mayor eficiencia. Como herramienta principal para ellos se utilizó el modelo de bloque PV Array proveniente de *Simulink*.

Se pudo observar que la variación entre los datos entregados por la estación meteorológica de Agua Santa y el equipo de medición en sitio es muy similar. En otras palabras, en ciertos momentos del día la diferencia de valor no varía demasiado, sin embargo, en otros momentos (tarde) esta variación puede ser más significativa, posiblemente afectado por las condiciones climáticas locales (tormentas) en cada zona de medición.

6. Recomendaciones

- Se recomienda continuar con la medición meteorológica en sitio, con la que se puedan realizar mediciones durante periodos mayores. Con el fin de obtener más información directamente desde el sitio y darle un seguimiento prolongado y así llegar a confirmar si durante de periodo de vida de los paneles solares los resultados obtenidos en esta investigación siguen la misma tendencia.
- Obtener valores, de las variables estudiadas, en los días solares de mayor y menor relevancia en el año. Con la intención de evaluar los comportamientos de generación durante episodios como los solsticios de verano e invierno. Estudiando las posibles ventajas o desventajas que estos días puedan causar durante el proceso de generación.
- Debido a los resultados obtenidos (preliminares) en esta investigación, se recomienda utilizar paneles solares del tipo policristalinos en ambientes similares a la Costa del Sol, ya que la eficiencia de estos se ve menos afectado por este tipo de ambientes.
- El periodo de registro y almacenamiento de datos debería de ser ampliado hasta por lo menos toda la época húmeda o un año entero. Lo anterior tiene como objetivo verificar el comportamiento de generación de los paneles solares durante las diferentes estaciones del año, aumentando con ello la confiabilidad del presente estudio.

7. Limitaciones

A lo largo de la investigación surgieron inconvenientes que limitaron los alcances de esta investigación. En estas situaciones se buscaron alternativas para que las ideas iniciales se mantuvieran. En esta sección se listan los inconvenientes más relevantes.

- En las propuestas iniciales, como equipo de registro y almacenamiento de datos de medición, se obtuvo el equipo Datalogger XR5-SE. Este equipo fue proporcionado por el Ing. Flamenco, asesor del presente trabajo de graduación. Sin embargo, el equipo presentó problemas de programación al momento de configurar desde una PC. Se solventó ese problema, pero luego, no guardaba de forma constante la información.
- Se propuso la alternativa de utilizar un microcontrolador como intermedio para el almacenaje de datos, específicamente un Arduino UNO. Los sensores de temperatura, las termocuplas, presentaban valores de sensibilidad bastante bajo y se recurrió a la utilización de módulos de compensación (módulo MAX6675). Debido a estos cambios de equipos, el tiempo propuesto para la toma de datos medidos en sitio se vio reducido por aproximadamente 1 mes.
- Debido a que el equipo de medición en sitio aún se encontraba ubicado en la zona del proyecto cuando inició el periodo de invierno en el país, las medidas de protección de los equipos que se instalaron no fueron las suficientes para evitar que estos no fueran afectados principalmente por las fuertes lluvias. Desafortunadamente la fuente de alimentación principal del circuito resultó comprometida y esto contrajo la desconexión total del equipo de medición. Como resultado de lo anterior, hubieron días de investigación en los cuales el equipo no tomó lectura.

8. Referencias

BBVA. (s/f). *¿Qué son los paneles solares, cómo funcionan y cuál es su futuro?* https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-son-los-paneles-solares-como-funcionan-y-cual-es-su-futuro/

Solar Energy Internacional. (2015). *Fotovoltaica: Manual de diseño e instalación*.

Grupo JAB. (2018). *Historia de las células solares y su evolución*. https://www.grupojab.es/historia-de-las-celulas-solares-y-su-evolucion-tecnologica/

Barrera, M., Pajares,L., Clemente, O., Castro, A., López., Fuentes, F. (s.f). *Fabricación de paneles solares fotovoltaicas.* Universitat Jaume I. https://www.fisica.uji.es/priv/web%20master%20SIH007/temes/treballs/1%20fabricaci%F3n_paneles_a.pdf.

Agencia Internacional de Energías Renovables (2022). *Energía Solar*. https://www.irena.org/solar.

Autosolar Energía del Peru S.A.C. (15 de Julio de 2021). *¿Que es un panel solar?*. https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/que-es-un-panel-solar.

Hernández, F. (2011). *Estudio comparativo de los sistemas fotovoltaicos con inyección a la red monocristalino, policristalino y amorfo instalados en CEL.* Universisad de El Salvador. http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/3718/1/Estudio%20comparativo%20de%20los%20sistemas%20fotovolt%C3%A1icos%20con%20inyecci%C3%B3n%20a%20la%20red%20monocriatalino,%20policristalino%20y%20amorfo%20instalados%20en%20CEL.pdf

Instituto Privado de Investigaciones sobre Cambio Climático (2020).

Seis estaciones meteorológicas instaladas y en funcionamiento en El Salvador. https://icc.org.gt/es/seis-estaciones-meteorologicas-instaladas-y-en-funcionamiento-en-el-salvador/#:~:text=Las%20primeras%20tres%20estaciones%20fueron,San%20Miguel%2C%20San%20Miguel).

ASTRUM (2020). *5 Tipos de Paneles Solares y sus Características*. https://astrummx.com/tipos-de-paneles-solares/

Rodríguez, F. (2014). *Análisis de la factibilidad para la instalación de una planta implementadora de productos y servicios fotovoltaicos en la región puno.* Universidad Católica Santa María. http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/UCSM/4962/44.0320.II.pdf?sequence=1&isAllowed=y

MATLAB (2022). Productos. https://la.mathworks.com/products/matlab.html

Miguel Cascant, L. (2013). *Difusión frontal de dopantes en células fotovoltaicas de contacto trasero.* https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/38937/Tesis.pdf?sequence=1#:~:text=Cuando%20la%20luz%20del%20sol,en%20el%20interior%20del%20material.

Torres Pacheco, S., Jurado Pérez, F., Granados Lieberman, D. y Lozano Luna, A. (2018). *Eficiencia de paneles solares. Revista del diseño innovativo.* 2(29-21), 11-19. https://www.ecorfan.org/tiwan/research_journals/Diseno_Innovativo/vol2num2/Revista_Diseno_Innovativo_V2_N2_2.pdf

Martínez, M., (2011). Materiales y materias primas Silicio. http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL007296.pdf

Papageorgiou, Nik. (2021) Perovskite solar cells exceed 25% power-conversion efficiency https://actu.epfl.ch/news/perovskite-solar-cells-exceed-25-power-conversion-/

9. Anexos

Anexo A

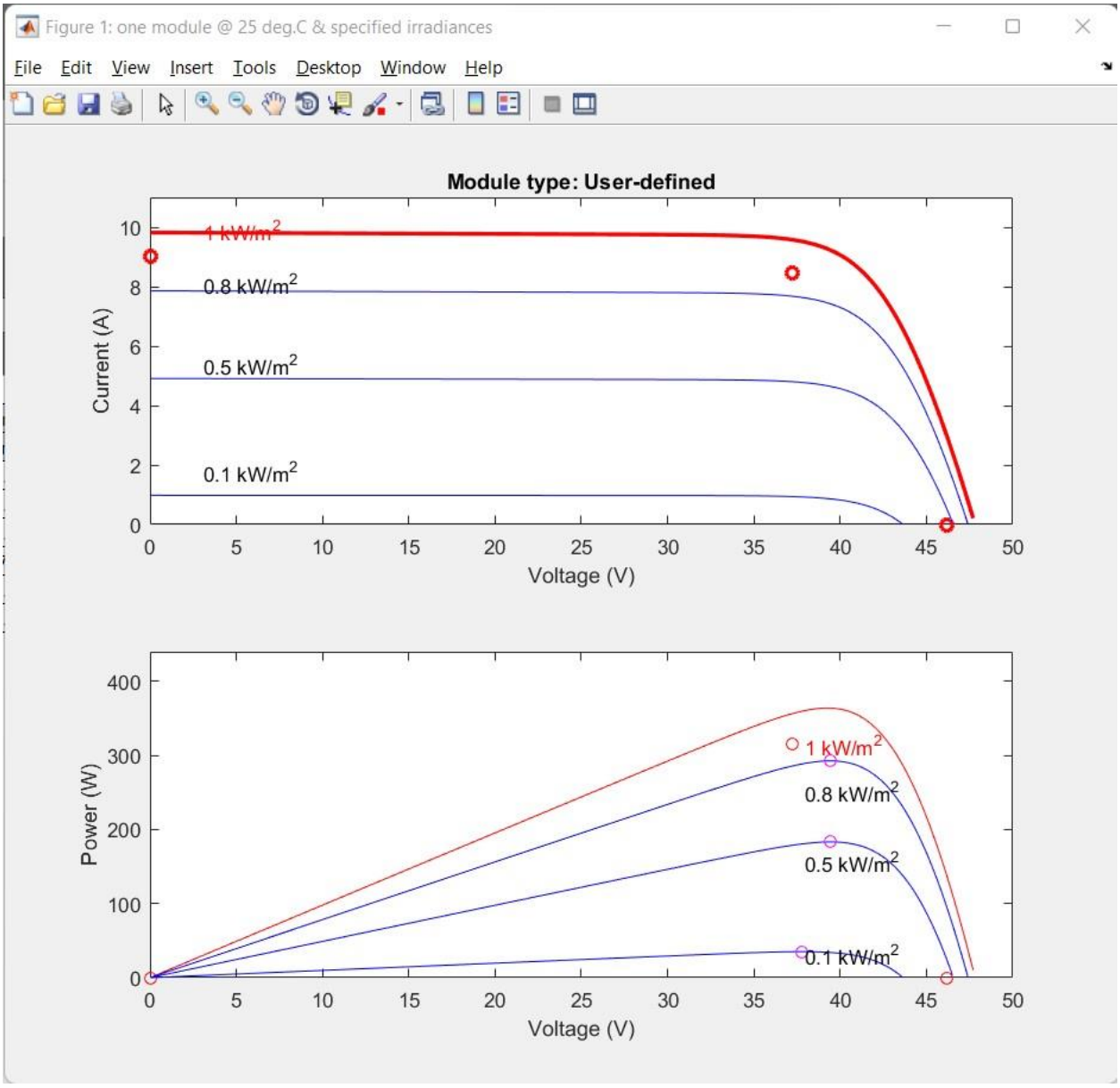
Código desarrollado en la plataforma Arduino.
https://drive.google.com/file/d/1dzdN-KDuzYe6YtAnORx4G-5wcw7RxFH0/view?usp=sharing

Anexo B

Vista de planta de la instalación de los paneles solares.

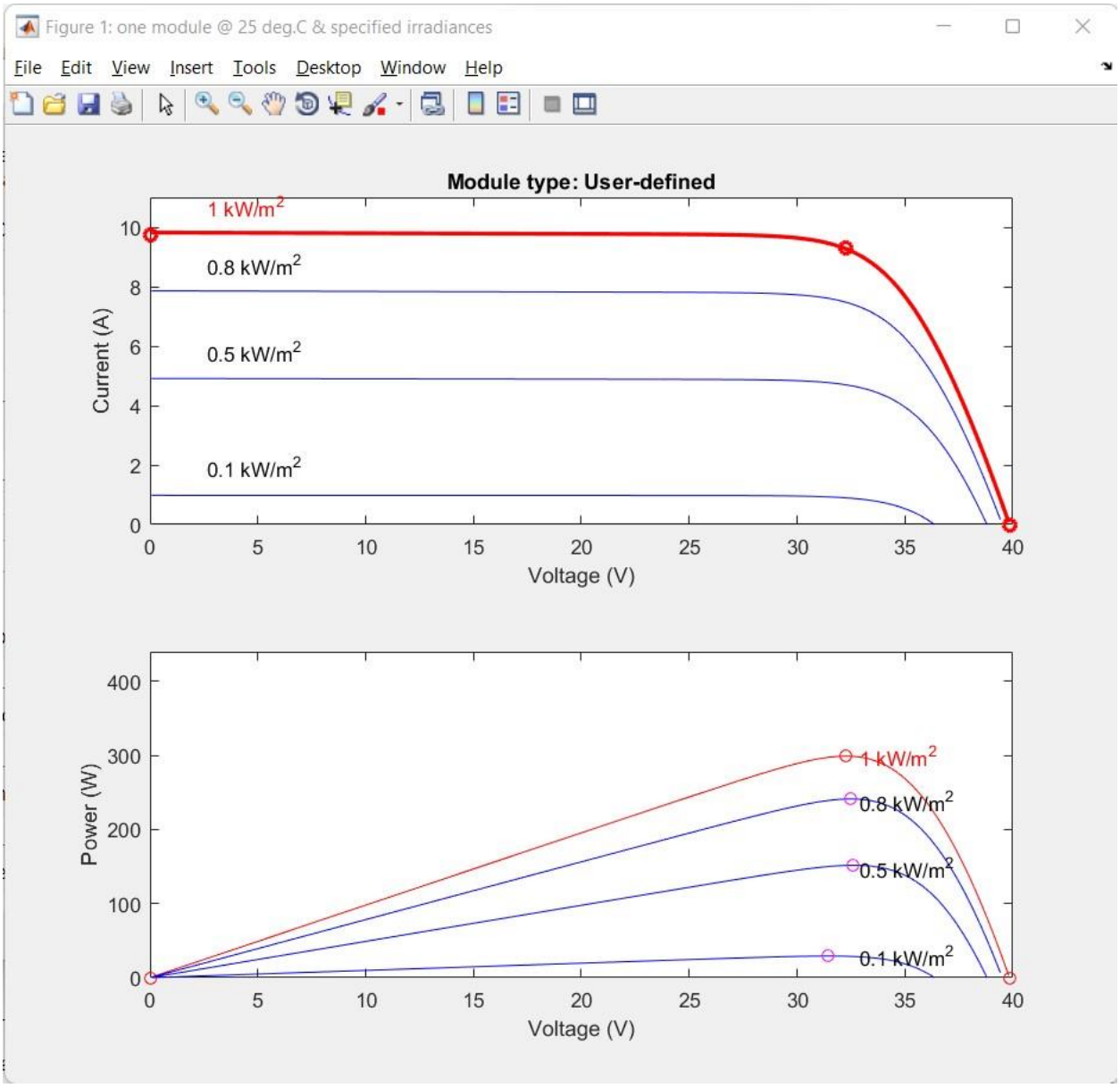
Inversores correspondientes a planta solar estudiada

Anexo C



Gráfica I-V y P-V de los paneles solares policristalinos.

Anexo D



Gráfica I-V y P-V de los paneles solares policristalinos.