

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS “CARLOS RAFAEL RODRIGUEZ”

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**



**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO**

Evaluación del desempeño de sistemas fotovoltaicos antes diferentes condiciones
meteorológicas.

Por

Autor: Yordani González Martínez

Tutor: Ing. Boris Gabriel Vega Lara, Dr. C

Ing. Royd Reyes Calvo, M.Sc

Cienfuegos, 2024

PENSAMIENTO

La ciencia puede divertirnos y fascinarnos pero es la ingeniería la que cambia el mundo.

Isaac Asimov.

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

A mis tutores Boris y Royd, por el honor de permitirme estar bajo su tutela y su guía, y por confiar en mí para realizar este trabajo.

A mis padres por impulsarme siempre a superarme y a dar lo mejor de mí, por todo el amor y el cariño dado, por hacer de mí el hombre que soy.

A mi familia por todo el apoyo que me han brindado.

A cada uno de mis amigos porque siempre pude contar con ellos.

A todas las personas que de una forma u otra hicieron posible el desarrollo de este trabajo.

Muchas gracias a todos.

RESUMEN

La energía solar es una forma de energía renovable que se obtiene a partir de la radiación del sol. Es una fuente de energía limpia y abundante que se utiliza para generar electricidad. Con la implementación de los paneles solares se aprovecha la energía solar mediante el uso de módulos compuestos por células fotovoltaicas que convierten la luz solar directamente en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. El cambio climático representa uno de los desafíos más significativos para los países tropicales que son especialmente vulnerables a sus impactos. La dependencia de los combustibles fósiles han sido la principal fuente de energía a nivel global, su extracción y uso han contribuido en gran medida al aumento de las misiones de efecto invernadero, que son responsable del cambio climático. La transición energética hacia fuentes de energía renovable es esencial para mitigar los efectos del cambio climático, esta transición se enfrenta a varios retos. La penetración de fuentes renovables, como la solar y la eólica, depende en gran medida de las condiciones meteorológicas locales. La situación climática y económica actual, unido a la falta de recursos de las fuentes de energías tradicionales ha hecho que el papel de energías alternativas en el modelo energético aumente continuamente. Mediante la revisión bibliográfica realizada se pudo profundizar sobre las diferentes tecnologías fotovoltaicas para conocer su características y así destacar cual es la mejor tecnología a implementar en los países tropicales. Los resultados obtenidos mediante los experimentos y cálculos realizados en Matlab, dieron a conocer que los paneles de silicio al aumentar la temperatura disminuye significativamente la eficiencia, en el panel de película delgada pasa lo contrario con el incremento de la temperatura la eficiencia no varía significativamente. El panel policristalino demostró que fue el mejor a emplear por su eficiencia y ser más económico.

Palabras Claves: energía renovable, sistema fotovoltaico, generación eléctrica, energía solar, módulos fotovoltaicos, análisis energético, bases de datos

ABSTRACT

Solar energy is a form of renewable energy that is obtained from the sun's radiation. It is a clean and abundant source of energy that is used to generate electricity. With the implementation of solar panels, solar energy is harnessed through the use of modules made up of photovoltaic cells that convert sunlight directly into electricity through the photovoltaic effect. Climate change represents one of the most significant challenges for tropical countries that are especially vulnerable to its impacts. The dependence on fossil fuels has been the main source of energy globally; their extraction and use have greatly contributed to the increase in greenhouse effect emissions, which are responsible for climate change. The energy transition towards renewable energy sources is essential to mitigate the effects of climate change; this transition faces several challenges. The penetration of renewable sources, such as solar and wind, largely depends on local weather conditions. The current climatic and economic situation, together with the lack of resources from traditional energy sources, has caused the role of alternative energies in the energy model to continually increase. Through the bibliographic review carried out, it was possible to delve deeper into the different photovoltaic technologies to know their characteristics and thus highlight which is the best technology to implement in tropical countries. The results obtained through the experiments and calculations carried out in Matlab revealed that when the temperature increases, the efficiency of silicon panels decreases significantly; in the case of the thin film panel, the opposite happens with the increase in temperature, the efficiency does not vary significantly. The polycrystalline panel demonstrated that it was the best to use due to its efficiency and being more economical.

Keywords: Renewable energy, photovoltaic system, electricity generation, solar energy, photovoltaic modules, energy analysis, databases.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 01: Sistemas Fotovoltaicos. Marco Teórico Conceptual	4
1.1 Generación de electricidad solar fotovoltaica	4
1.1.1 Energía solar fotovoltaica.....	4
1.1.2 Conversión de energía solar fotovoltaica	4
1.2 Conceptos del sistema fotovoltaico.....	10
1.3 Módulo Fotovoltaico	11
1.3.1 Tecnología Fotovoltaica.....	12
1.4 Tipos de tecnología	14
1.4.1 Tecnología de silicio cristalino.....	14
1.4.2 Tecnología de película delgada	15
1.4.3 Células fotovoltaicas concentradas de múltiples uniones	17
1.4.4 Nueva tecnología fotovoltaica emergente	18
1.5 Curva de la célula solar	21
1.6 Análisis del desempeño del sistema fotovoltaico.....	23
1.7 Conclusiones parciales.....	29
CAPÍTULO 2: Modelo físico de sistema fotovoltaico.....	31
2.1 La célula fotovoltaica	31
2.2 El Módulo Fv y el Dispositivo Fv	32
2.3 Modelado de sistemas fotovoltaicos y características eléctricas de los sistemas fotovoltaicos	33
2.3.1 Modelo fotovoltaico ideal	33
2.3.2 Celdas fotovoltaicas con resistencia en derivación	34
2.3.3 La celda fotovoltaica con resistencia en serie	35
2.3.4 La celda fotovoltaica con resistencia en serie y en derivación.....	36
2.4 Características de las curvas de las células FV	36
2.5 Parámetros de desajustes en las curvas de I-V	39
2.6 Parámetros de rendimiento adicionales de las células fotovoltaicas	43
2.7 Efecto de las condiciones ambientales sobre el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos....	46
2.8 Efecto del viento en los sistemas fotovoltaicos.....	47
2.9 Efecto de la lluvia y la humedad en los sistemas fotovoltaicos	47

2.10 Conclusiones parciales	48
CAPÍTULO 3. Evaluación de la eficiencia de los paneles fotovoltaico ante las diferentes condiciones meteorológicas.	50
3.1 Panel Monocristalino.....	50
3.2 Panel Policristalino.....	52
3.3 Panel Película delgada.....	54
3.4 Conclusiones parciales	56
CONCLUSIONES GENERALES	57
RECOMENDACIONES.	58
BIBLIOGRAFÍA.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1.1 Módulos de capa fina vs. Módulo de silicio cristalino. Fuente:(García Hortelano, 2023)
- Tabla 1.2. Ventajas y desventajas del silicio monocristalino. Fuente: Elaboración propia.
- Tabla 1.3. Ventajas y desventajas del silicio policristalino: Fuente: Elaboración propia.
- Tabla 1.4. Ventajas y desventajas de película delgada. Fuente: Elaboración propia.
- Tabla 2.1 Coeficiente empírico utilizados en el modelo térmico de Sandia. Fuente: (Tanrioven, 2023).
- Tabla 3.1 Datos de los parámetros que brinda el fabricante del Panel Monocristalino. Elaboración Propia.
- Tabla 3.2 Datos de los parámetros que brinda el fabricante del Panel Policristalino. Elaboración Propia.
- Tabla 3.3 Datos de los parámetros que brinda el fabricante del Panel películas delgadas. Elaboración Propia.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1: Principales tipos de células fotovoltaicas. Fuente:(Zambroni de Souza, 2019)
- Figura 1.2 Combinación de células fotovoltaicas para crear módulos, cadenas y matrices. Fuente:(Zambroni de Souza, 2019)
- Figura 1.3. Curvas I-V y P-V características de una célula solar. Fuente:(García Hortelano, 2023)
- Figura 1.4. Variación de la relación I-V en función de la irradiancia. Fuente:(García Hortelano, 2023).
- Figura 1.5. Variación de la relación I-V en función de la temperatura. Fuente:(García Hortelano, 2023)
- Figura 2.1 Ilustración de la conversión directa de la radiación solar en electricidad mediante una célula fotovoltaica. Fuente:(Tanrioven, 2023)
- Figura 2.2. Creación de pares hueco-electrón y flujo de corriente eléctrica a través de un circuito externo. Fuente:(Tanrioven, 2023)
- Figura 2.3. Las capas de laminación de una célula solar fotovoltaica. Fuente:(Tanrioven, 2023)
- Figura 2.4. La celda, el modulo, el panel y el conjunto fotovoltaico para aplicaciones de campo. Fuente:(Tanrioven, 2023)
- Figura 2.5. Modelo de un circuito ideal de una celda FV. Fuente:(Tanrioven, 2023)
- Figura 2.6 Voltaje de circuito abierto y Corriente de corto circuito Fotovoltaico. Fuente:(Tanrioven, 2023).
- Figura 2.7. Modelo equivalente de celda fotovoltaica de diodo único con resistencia de derivación de fugas. Fuente:(Tanrioven, 2023).
- Figura 2.8. Modelo equivalente de célula fotovoltaica mono-diodo con resistencia en serie. Fuente:(Tanrioven, 2023).
- Figura 2.9. El modelo de celda fotovoltaica equivalente más utilizado con resistencia en serie y en paralelo agregadas. Fuente.(Tanrioven, 2023).
- Figura 2.10 Las curvas de I-V y P-V de un módulo fotovoltaico y sus puntos característicos. Fuente:(Tanrioven, 2023).
- Figura 2.11 Curva de I-V a diferente Radiacion solar. Fuente:(Tanrioven, 2023).

- Figura 2.12 Curva de P-V a diferentes Radiacion solar. Fuente:(Tanrioven, 2023).
- Figura 2.13 Curva de I-V a diferente temperatura. Fuente:(Tanrioven, 2023).
- Figura 2.14. Determinación del punto V_{oc} en la conexión en paralelo de dos células fotovoltaicas con diferente corrientes de cortocircuito y tenciones de salida. Fuente.(Tanrioven, 2023).
- Figura 2.15. Conexión en paralelo de dos células fotovoltaicas con diferentes corrientes de cortocircuito y tenciones de salida. Fuente:(Tanrioven, 2023).
- Figura 2.16 Influencia de la temperatura en una celda fotovoltaica en una curva I-V.
- Figura 2.17 La resistencia característica de una célula fotovoltaica se muestra en la curva I-V. Fuente:(Tanrioven, 2023)
- Figura 2.18 La ilustración de FF en la curva I-V. Fuente:(Tanrioven, 2023),
- Figura 3.1. La eficiencia del panel de silicio monocristalino. Fuente: Elaboración propia.
- Figura 3.2. La eficiencia del panel de silicio policristalino. Fuente: Elaboración propia.
- Figura 3.3. La eficiencia del panel de películas delgadas. Fuente: Elaboración propia.

ÍNDICE DE ECUACIONES

- Ec.01 Ecuación característica de un modelo ideal a partir de la Ley de Kirchhoff.
- Ec.02 Ecuación característica de un modelo ideal con resistencia en Paralelo.
- Ec.03 Ecuación característica de un modelo ideal con resistencia en Paralelo.
- Ec.04 Ecuación característica de un modelo ideal con resistencia en Serie.
- Ec.05 Ecuación característica de un modelo ideal con resistencia en Serie.
- Ec.06 Ecuación característica de un modelo ideal con resistencia en Serie.
- Ec.07 Ecuación característica de un modelo ideal con R_s y R_p .
- Ec.08 Ecuación característica de la Temperatura de la celda Fotovoltaica.
- Ec.09 Ecuación característica de la T_{mb} por el modelo de Sandia.
- Ec.10 Ecuación característica de la Temperatura de la celda por el modelo de Sandia
- Ec.11 Ecuación característica de la Resistencia (R_o).
- Ec.12 Ecuación característica de Factor de Llenado
- Ec.13 Ecuación empírica del Factor de Llenado.
- Ec.14 Ecuación característica de la Eficiencia.
- Ec.15 Ecuación característica de la caída del % de eficiencia relativa.

LISTA DE ABREVIATURAS Y VARIABLES

Abreviatura	Definición	Unidades
aSI	Silicio amorfo	-
pSI	Silicio policristalino	-
CdTe	Telururo de cadmio	-
CIS	Sulfuro de cobre e indio	-
c-SI	Silicio cristalino	-
HIT	Heterounión con capa fina intrínseca	-
nc-Si,	Silicio microcristalina	-
sc-Si, mSi	Silicio monocristalina	-
FF	Factor de llenado	-
G	Irradiación	W/m ²
Tamb,Ta	Temperatura ambiente	°C
TONC	Temperatura de operación nominal de célula	°C
Ro	Resistencia característica	Ω
E	Eficiencia	%

INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa uno de los desafíos más significativos para los países tropicales que son especialmente vulnerables a sus impactos. Después de la revolución industrial con el uso intensivo de la quema de combustibles fósiles ha sido la principal fuente de energía a nivel global, su extracción y uso han contribuido en gran medida al aumento de los niveles de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero que son responsable del cambio climático, lo que produce una crisis que amenaza con la vida del planeta. La transición energética hacia fuentes de energía renovable es esencial para mitigar los efectos del cambio climático, esta transición se enfrenta a varios retos. La penetración de fuentes renovables, como la solar y la eólica, depende en gran medida de las condiciones meteorológicas locales. Por ejemplo, la generación solar puede ser muy efectiva en áreas con alta irradiancia solar, pero puede ser limitada en condiciones de nubosidad o durante la temporada de lluvia.

En este sentido, la energía solar es una forma de energía renovable que se obtiene a partir de la radiación del sol. Es una fuente de energía limpia y abundante que se utiliza para generar electricidad, calentar agua y proporcionar energía térmica en diversas aplicaciones. La energía solar fotovoltaica, la cual es el objeto de análisis en este trabajo, aprovecha la energía solar mediante el uso de módulos compuestos por células fotovoltaicas que convierten la luz solar directamente en electricidad mediante el efecto fotovoltaico.

Se realizaron varias investigaciones referida al trabajo como:

Taha Selim Ustun realizó un trabajo en Fukushima, Japón en el 2019, donde analizó el rendimiento de paneles fotovoltaicos basados en diferentes tecnologías después de dos años de exposición al aire libre. En este trabajo se informa sobre el impacto del clima de ese territorio, que suele ser ventoso en otoño y con fuertes nevadas en invierno, en los sistemas fotovoltaicos instalados. Finalmente se presenta un ejemplo de cálculo de un sistema fotovoltaico para mostrar los impactos de estos hallazgos en un sistema fotovoltaico en las etapas de planificación y operación (Ustun, 2019).

Mustafa Kamal realizó un trabajo en el estado de Uttarakhand, India en el 2021, donde evaluó el desempeño del sistema solar fotovoltaico autónomo para diferentes perfiles de

carga en el área rural. Se investigaron doce aldeas no electrificadas bajo diferentes perfiles de carga. En este trabajo se consideraron cinco perfiles de carga diferentes para el análisis de desempeño en función del requerimiento energético de la población rural. El análisis económico sugirió que el perfil de carga optimizado propuesto tiene el mejor diseño para la electrificación de la comunidad rural (Kamal, 2021).

Humada Mojgan realizó un estudio en Malasia en el 2017. Se desarrolla y caracteriza un modelo fotovoltaico (PV) de tres parámetros que opera en condiciones climáticas tropicales. También se evalúa el rendimiento del modelo de sistema fotovoltaico. Se establece un modelo fotovoltaico matemático de un sistema fotovoltaico de pequeña escala. Este estudio podría servir como una referencia valiosa para la instalación de sistemas fotovoltaicos conectados a la red en Malasia y otras regiones tropicales para promover la implementación fotovoltaica (Humada Mojgan, 2017).

Liomnis y Reineris analizaron el desempeño energético de un sistema fotovoltaico a base de silicio amorfo, integrado a la cubierta plana horizontal del Edificio Docente #2 del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Con el software PV syst se determinó la producción anual de energía eléctrica del sistema de 3 kWp conectado a la red, así como las pérdidas por sombras, cableado, electrónica de potencia, modificación del ángulo de inclinación y por efecto de la irradiancia y temperatura. Los resultados demostraron que la energía anual generada, es equivalente al consumo eléctrico del Instituto durante dos días y además, constituye una alternativa para la generación de energía, a partir del aprovechamiento de espacios disponibles en azoteas de las áreas docentes y administrativas (Osorio Laurencio, 2015).

En la literatura han tenido una limitada cantidad de investigaciones sobre la evaluación del desempeño de los sistemas fotovoltaico en Cuba. Teniendo en cuenta la variabilidad de las condiciones meteorológicas. Este 14 de marzo, el Día de la Prensa Cubana, el ministro de Energía y Minas, Vicente de la O Levy informó que se firmaron dos contratos que totalizan 2 000 MW de energía fotovoltaica. El objetivo es concluir el primer contrato de 1 000 MW hacia mayo de 2025, y el segundo, en 2028. Cada uno, además, cuenta con 100 MW adicionales en capacidad de almacenamiento.

Problema científico: Necesidad de determinar cómo las condiciones meteorológicas de nuestro país afecta la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos.

Hipótesis: Determinar el efecto de las condiciones meteorológicas en el desempeño de los sistemas fotovoltaicos permitiendo hallar con una mayor exactitud la energía producida por los mismos.

Objetivo general:

Evaluar el desempeño de sistemas FV antes diferentes condiciones meteorológicas.

Objetivos específicos:

1. Exponer el marco teórico conceptual de los sistemas fotovoltaicos.
2. Describir los sistemas fotovoltaicos, los módulos y cómo funcionan.
3. Explicar el modelo dinámico que describe los procesos del sistema fotovoltaico.
4. Determinar el desempeño de sistemas fotovoltaicos antes diferentes condiciones meteorológicas.

Objeto de estudio:

Diferentes tecnologías de sistemas fotovoltaicos

Campo de acción:

Desempeño de sistemas fotovoltaicos ante diferentes condiciones meteorológicas tropicales.

CAPÍTULO1: Sistemas Fotovoltaicos. Marco Teórico Conceptual

1.1 Generación de electricidad solar fotovoltaica

1.1.1 Energía solar fotovoltaica

El crecimiento mundial de la energía solar fotovoltaica (PV) ha seguido una curva exponencial durante más de dos décadas. Durante este período, la energía fotovoltaica, también conocida como energía solar fotovoltaica, ha evolucionado a un mercado puro de aplicaciones a pequeña escala convirtiéndose en una típica fuente de electricidad conectada a la red. La investigación y el desarrollo, junto con la industrialización, han conducido hoy a una amplia cartera de opciones de tecnología fotovoltaica disponibles en diferentes niveles de madurez. Hay una serie de tecnologías emergentes, incluida la energía fotovoltaica concentrada (CPV) y células solares orgánicas, así como conceptos novedosos con un potencial significativo para aumentar el rendimiento y reducir los costes (Agency, 2010).

La gran variedad de las aplicaciones fotovoltaicas permite que una gama de tecnologías diferentes estén presentes en el mercado, desde tecnologías de bajo costo y baja eficiencia hasta tecnologías de alta eficiencia a costos más altos (Zambroni de Souza, 2019).

Históricamente, Estados Unidos había sido el líder de la instalación de energía fotovoltaica en su etapa inicial, y su capacidad total ascendió a 77 MW en 1996, más que cualquier otro país en el mundo en ese momento. Luego, Japón se mantuvo a la cabeza como líder mundial de producir electricidad solar hasta 2005, cuando Alemania tomó la delantera. China ha aumentado significativamente la producción de energía fotovoltaica (News, 2014).

1.1.2 Conversión de energía solar fotovoltaica

La energía solar ofrece muchas ventajas, con beneficios similares a los de la energía eólica: es renovable (restaurada por la naturaleza), sostenible (no se agota ni daña de forma no permanente), limpia (no contamina) y ubicua (disponible en abundancia en cualquier parte del mundo; de hecho, el recurso energético más abundante en el planeta Tierra), además de ser hoy rentable (es una de las tecnologías de energía renovable más baratas disponibles en la actualidad después de la energía eólica). Otra ventaja importante de la energía

fotovoltaica es su modularidad, que permite un dimensionamiento del sistema muy flexible para la integración en edificios y para aplicaciones descentralizadas con demandas de carga mínimas (Zambroni de Souza, 2019).

En general, no intervienen piezas móviles ni tensiones térmicas específicas. Por lo tanto, los sistemas fotovoltaicos funcionan silenciosamente y pueden ofrecer una confiabilidad extremadamente alta, bajos requisitos de mantenimiento y una larga vida útil. Debido a la naturaleza del proceso de conversión, según el tipo de sistema fotovoltaico, se puede utilizar tanto radiación directa como difusa, lo que también permite aplicaciones en climas moderados con mayores fracciones de radiación difusa. Los principales inconvenientes de la energía fotovoltaica son que es intermitente (variabilidad limitada controlable e imprevisibilidad parcial, aunque no tan compleja como la energía eólica) y tiene una baja densidad de potencia (sistemas fotovoltaicos en el rango de unos pocos kW), lo que se traduce en altos costos de inversión inicial (Zambroni de Souza, 2019).

Además, los niveles de eficiencia de los módulos solares son relativamente bajos (entre 14 y 25%) en comparación con los niveles de eficiencia de otros sistemas de energía renovable. Los sistemas de conversión de energía solar fotovoltaica convierten la luz solar directamente en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. El componente básico de un sistema fotovoltaico es la célula solar fotovoltaica, que es un dispositivo (normalmente un semiconductor) que convierte la energía solar en electricidad de DC. Una amplia variedad de materiales son fotoeléctricos, es decir, la luz se absorbe y un electrón adquiere energía cinética para moverlo a otro nivel de energía dentro del material (Zambroni de Souza, 2019).

Hoy en día, los elementos principales de las células fotovoltaicas son los semiconductores, aunque los investigadores están probando con otros materiales, incluidos polímeros orgánicos. La eficiencia de conversión de la célula fotovoltaica es la relación entre la energía eléctrica producida y la insolación de la célula. Hoy en día, los dispositivos fotovoltaicos convierten entre el 7% y el 17% de la energía luminosa en energía eléctrica. Sin embargo, las capas múltiples y otras mejoras han aumentado la eficiencia en el rango del 35 al 40 % para las pruebas de laboratorio. Aproximadamente el 55% de la energía de la luz solar no puede ser utilizada por la mayoría de las células fotovoltaicas porque esta

energía está por debajo de la banda prohibida o transporta un exceso de energía, lo que genera calor (Zambroni de Souza, 2019).

Existen principalmente cuatro tipos diferentes de células fotovoltaicas, es decir, células de silicio cristalino con sus dos variaciones monocristalinas y policristalinas, de película delgada e híbridas, que se presentan en la figura 1.1 (Zambroni de Souza, 2019).

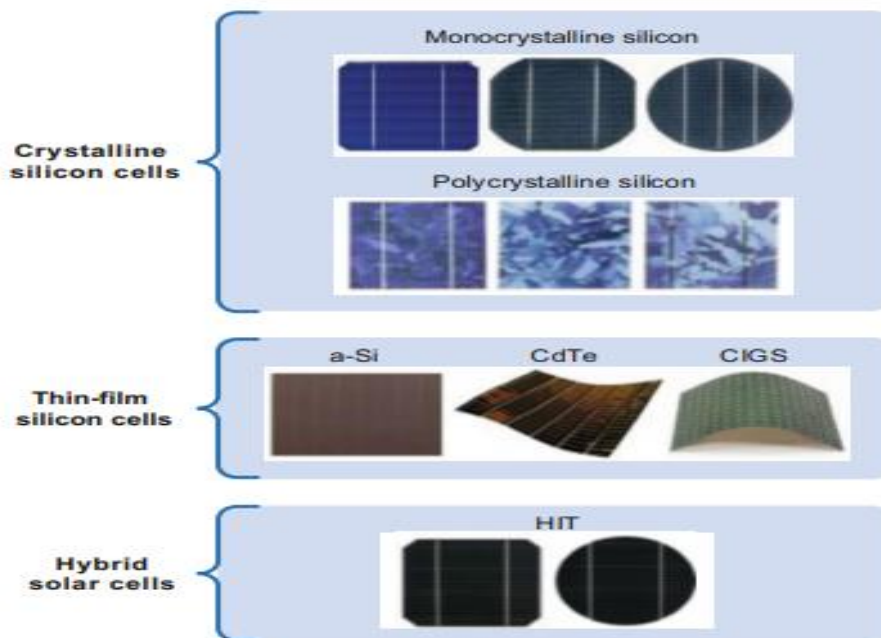


Figura 1.1: Principales tipos de células fotovoltaicas. Fuente: (Zambroni de Souza, 2019)

Las células de silicio monocristalino se cortan con sierra a partir de un único cristal cilíndrico de silicio. Toda la célula está alineada en una dirección, lo que significa que cuando el sol brilla intensamente sobre ellas en el ángulo correcto, son extremadamente eficientes. Por lo tanto, estas células funcionan mejor a la luz del Sol, cuando el sol brilla directamente sobre ellas. Tienen un color más negro uniforme porque absorben la mayor parte de la luz. Las celdas puras son octogonales, aunque hay celdas redondas y semicirculares, por lo que hay espacio no utilizado en las esquinas cuando se convierten muchas celdas en un módulo solar. La principal ventaja de las células monocristalinas es su alta eficiencia, de entre el 14% y el 16%, aunque el proceso de fabricación es complicado y caro. El coste de producir obleas de silicio puro es un poco mayor que el de las células

policristalinas, pero hoy en día no hay mucha diferencia de precio (Zambroni de Souza, 2019).

Las células de silicio policristalino (o multicristalino) se cortan a partir de un metal de silicio fundido y recristalizado. En el proceso, el silicio fundido se transforma en lingotes de silicio policristalino. Luego, estos metales se cortan con sierra en obleas muy finas y se ensamblan en celdas completas. Debido a que los cristales individuales no están necesariamente perfectamente alineados entre sí, como en el caso anterior de las células monocristalinas, y hay pérdidas en las uniones entre ellos, no son tan eficientes. Sin embargo, esta desalineación puede ayudar en algunas circunstancias porque las celdas funcionan mejor con luz en todos los ángulos, especialmente con poca luz. La apariencia también es diferente, la disposición aleatoria de los cristales y los paneles se ven un poco más azules ya que reflejan parte de la luz. Al estar cortados en bloques rectangulares, se desperdicia muy poco espacio en el panel por lo que no aparecen los pequeños rombos típicos de los paneles mono o híbridos. Las células multicristalinas solían ser un poco más baratas que las células monocristalinas debido a su proceso de fabricación más simple, pero hoy en día su precio es muy similar al de las células monocristalinas aunque tienen una eficiencia ligeramente menor (alrededor del 13-15%) (Zambroni de Souza, 2019).

El silicio de película gruesa es una tecnología multicristalina en la que el silicio se deposita en una celda, se encapsula en un polímero aislante transparente con una cubierta de vidrio templado y generalmente se une a un marco de aluminio resistente (Zambroni de Souza, 2019).

Las células de película delgada son células solares de segunda generación que se fabrican depositando una o más capas delgadas, o película delgada (TF, por sus siglas en inglés Thin-Film) de material fotovoltaico sobre un sustrato, como vidrio, plástico o metal, en lugar de una estructura cristalina. El espesor de la película varía desde unos pocos nanómetros (nm) hasta decenas de micrómetros (μm). Así, esta capa de material fotovoltaico es mucho más fina que cualquier otra tecnología rival, como la célula solar de silicio cristalino (c-Si), que utiliza obleas de hasta 200 μm para la primera generación de células de (c-SI). Esta es la razón por la que se les llama tecnología de células solares fotovoltaicas de “película delgada”. Esta característica permite que las celdas de película

delgada sean flexibles, versátiles, de menor peso y tengan un buen rendimiento en aplicaciones de luz indirecta y alta temperatura. La eficiencia típica es de alrededor del 6% al 12%, más baratas de producir que las células solares de silicio cristalino. La película delgada se puede depositar sobre una amplia gama de sustratos, tanto rígidos como flexibles, lo que la hace ideal para superficies curvas y módulos plegables. Esta tecnología se utiliza en la construcción de sistemas fotovoltaicos integrados y como material de acristalamiento fotovoltaico semitransparente que se puede laminar en ventanas. Otras aplicaciones comerciales utilizan paneles solares rígidos de película delgada (intercalados entre dos paneles de vidrio) en algunas de las centrales fotovoltaicas más grandes del mundo (Zambroni de Souza, 2019).

Hay tres tipos comunes de células solares de película delgada disponibles comercialmente en la actualidad, incluido el silicio amorfo de película delgada (a-Si), que sigue siendo silicio pero en una forma diferente a las células cristalinas, el telururo de cadmio (CdTe) y el cobre, el indio, el galio y diSelenida por sus siglas (CIGS o simplemente CIS). El silicio TF amorfo tiene una eficiencia cercana al 6-8% y tolera el calor extremo, mientras que las células CdTe y CIGS sin silicio tienen eficiencias más altas, alrededor del 9-11% y del 10-12%, respectivamente, y sufren un impacto relativamente bajo en el rendimiento con temperatura. Mediante procesos industriales relativamente económicos se pueden fabricar células sin silicio en tecnologías de silicio cristalino. Otras tecnologías de película delgada, que aún se encuentran en una etapa temprana de investigación en curso o con disponibilidad comercial limitada, a menudo se clasifican como células fotovoltaicas emergentes o de tercera generación. Incluyen células solares orgánicas, sensibilizadas con colorantes y poliméricas, así como células solares de punto cuántico, sulfuro de cobre, zinc y estaño, nanocristales, micromorfas y perovskitas (Zambroni de Souza, 2019).

El cuarto tipo de celda fotovoltaica está compuesto por celdas híbridas como las celdas solares de heterounión (HJ) de silicio amorfo/silicio cristalino (s-Si:H/c-Si), que ahora se están volviendo populares básicamente debido a su excelente rendimiento y bajo costo. Estas células fotovoltaicas híbridas combinan silicio monocristalino y de película delgada para producir células con las mejores características de ambas tecnologías (Zambroni de Souza, 2019).

La característica clave de la tecnología HIT (HIT-heterounión con capa fina intrínseca) es que se inserta una fina capa intrínseca de silicio amorfo entre el emisor amorfo y la base cristalina formando una célula solar HJ con la capa fina intrínseca heterogénea. La capa amortiguadora, debido a sus excelentes propiedades de pasivación, proporciona voltajes de circuito abierto muy altos y eficiencias de módulo de hasta el 19 % (Zambroni de Souza, 2019).

El módulo HIT, que tiene una fina capa de película solar amorfa detrás de las células monocristalinas, extrae aún más energía de la luz solar disponible, especialmente en condiciones de poca luz. Sin embargo, los paneles híbridos son mucho más caros que los monocristalinos o policristalinos, por lo que el aumento de la energía producida no justifica los costes de inversión adicionales de esta tecnología fotovoltaica. La célula solar es el componente básico de un sistema fotovoltaico. Las células individuales pueden variar en tamaño desde aproximadamente 1 a 10 cm; sin embargo, una celda solo produce de 1 a 2 W con aproximadamente 0,5 V de voltaje de DC, lo que no es suficiente energía para la mayoría de las aplicaciones (Zambroni de Souza, 2019).

Las células se combinan en un módulo, a veces llamado panel, normalmente con 36 células para alcanzar entre 50 y 300 W. Los módulos fotovoltaicos también se pueden agrupar en serie para crear una cadena con el objetivo de aumentar su voltaje para alcanzar un voltaje más alto. Eventualmente, un grupo de módulos en un sistema se puede combinar en serie/paralelo, a bajo/alto voltaje, en un bastidor único/múltiple para formar un conjunto fotovoltaico de hasta decenas de MW (o más) para aplicaciones de gran potencia, como es representado en la figura 2.12 (Zambroni de Souza, 2019).

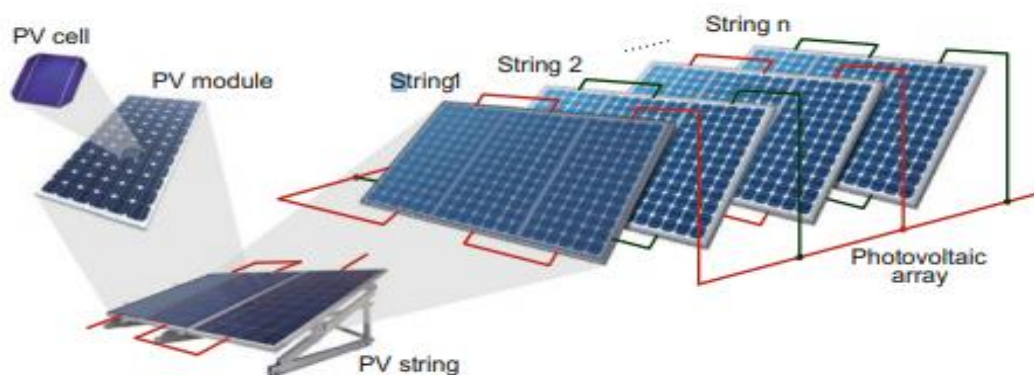


Figura 1.2: Combinación de células fotovoltaicas para crear módulos, cadenas y arreglos.
Fuente: (Zambroni de Souza, 2019).

1.2 Conceptos del sistema fotovoltaico

Uno de los principales desafíos de un sistema solar fotovoltaico sin conexión a la red eléctrica es la incertidumbre sobre la cantidad de rayos solares que recibiría, ya que el clima puede cambiar de vez en cuando. Esto resultaría difícil a la hora de determinar cuanta energía almacenar para su uso futuro. Es evidente que la luz del sol no está disponible durante las horas nocturnas mientras todavía hay demandas de electricidad. Por este motivo, se necesita un mecanismo para el almacenamiento eficaz de energía y la recuperación eficiente (Han, 2013).

Otros de los desafíos claves de los sistemas no conectados a la red es el problema de la ubicación, lo que varía la disponibilidad de radiación solar. En el hemisferio norte los paneles se inclinan hacia el sur porque es donde hay mayor radiación solar. Esto significaría que la generación de energía solar depende de ciertos lugares donde sería necesario instalar los sistemas (Han, 2013).

El coste de la energía solar fotovoltaica suele ser una forma rentable de suministrar grandes cantidades de electricidad. Aunque el coste de electricidad solar fotovoltaica ha disminuido significativamente, todavía es necesario reducirlo aún más para que esta tecnología sea asequible para todos (Han, 2013).

Los sistemas fotovoltaicos sin conexión a la red tienen grandes ventajas como; que la radiación solar no emite ningún tipo de contaminación por lo que carece de emisiones de CO₂. Dado que una gran cantidad de energía proviene simplemente de los rayos del sol, la escasez no es una preocupación en absoluto. Esto puede ser una solución a la escasez de otras fuentes de energía, especialmente las provenientes de combustibles fósiles. La energía de la radiación solar está disponible en cualquier lugar, por lo que, independientemente de la ubicación, la energía solar se puede generar en cualquier lugar de forma descentralizada (como los paneles de los tejados). Esto también significa que se reduciría las pérdidas que se producen debido a la transmisión de energía. La implementación de la tecnología solar

fotovoltaica puede ser modular, por lo que el tamaño del sistema fotovoltaico se puede aumentar cuando aumente la necesidad de electricidad (Han, 2013).

1.3 Módulo Fotovoltaico

El efecto fotovoltaico, mencionado previamente, es un fenómeno físico por el cual ciertos materiales tienen la capacidad de generar una corriente eléctrica cuando son expuestos a la radiación solar. Este efecto se basa en la propiedad de algunos materiales semiconductores que libera electrones cuando absorben fotones de luz. Cuando la luz solar incide sobre un material fotovoltaico, los fotones de luz interactúan con los átomos del material, proporcionando energía suficiente de liberar electrones de sus átomos de valencia. Estos electrones liberados pueden moverse libremente a través del material, generando así una corriente eléctrica. El material fotovoltaico más comúnmente utilizado en las células solares es el silicio, que es un semiconductor. Las células solares de silicio están compuestas por capas de material dopado, es decir, con impurezas añadidas intencionalmente para crear una estructura con una región tipo p y una región tipo n. Cuando la luz solar incide sobre la célula solar, los electrones en la región tipo n se liberan y se mueven hacia la región tipo p, generando una diferencia de potencial eléctrico entre las dos regiones. Esta diferencia de potencia es la base de generar una corriente eléctrica utilizable (García Hortelano, 2023).

El efecto fotovoltaico fue descubierto por Heinrich Hertz en 1887. Sin embargo, no fue hasta la década de 1950 cuando los científicos de Bell Laboratories fabricaron el primer módulo solar de silicio que logró convertir alrededor del 6% de la luz solar en electricidad (García Hortelano, 2023).

A medida que avanzaba la tecnología, la eficiencia de los módulos solares mejoró y los costos de producción disminuyeron. En las décadas siguientes, los avances en la investigación y el desarrollo permitieron un aumento significativo en la eficiencia y la disponibilidad de los módulos fotovoltaicos (García Hortelano, 2023).

Desde entonces, los módulos fotovoltaicos se han convertido en una fuente de energía renovable cada vez más común. Han desempeñado un papel importante en la expansión de la energía solar a nivel mundial, contribuyendo a la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles (García Hortelano, 2023).

1.3.1 Tecnología Fotovoltaica

En la actualidad, existen distintos tipos de Tecnologías (García Hortelano, 2023):

La siguiente tabla muestra una comparación de las características de los módulos de película delgada frente a los módulos de silicio cristalino.

Película delgada	Silicio cristalino
Menor coste de fabricación (menor consumo de material base, energía)	Mayor potencial por m ² (menor superficie de instalación)
Mayor producción kWh/kWp	Mayor estabilidad de la potencia y de la tensión
Mayor potencial de integración arquitectónica	Mayor implementación de la tecnología
Más coste de instalación: más cableado y mayor coste del soporte por Wp	Menores exigencias del inversor

Tabla 1.1 Módulos de capa fina vs. Módulo de silicio cristalino. Fuente:(García Hortelano, 2023).

Las siguientes tablas muestran las ventajas y desventajas de cada módulo fotovoltaico.

Módulo de Silicio monocristalino

Ventajas	Desventajas
Es más eficiente entre las células fotovoltaicas de base cristalina	Son las más caras de todas las células solares
Son más eficientes en términos de espacio en términos de potencia por unidad de área.	
Su vida es más larga que la de otros tipos de células.	Las células policristalina y de película delgada suelen ser las opciones más preferidas que las células monocristalinas.
Su rendimiento se ve menos afectado por el cambio de temperatura.	

Tabla 1.2. Ventajas y desventajas del silicio monocristalino. Fuente: Elaboración propia.

Módulos de Silicio policristalino

Ventajas	Desventajas
El silicio no se desperdicia como en el proceso de fabricación monocristalino.	Tiene una menor eficiencia espacial en comparación con las células monocristalinas.
El costo de la célula policristalina es menor debido al proceso más simple de producción de silicio policristalino.	Las células policristalinas es que tienen coeficientes de temperatura más altos en comparación con las células monocristalinas (las potencias de salida de las células policristalinas disminuyen más a altas temperaturas.)
	Las altas temperaturas afectan negativamente el rendimiento de la célula policristalina
Las células policristalinas es que tienen un aspecto estético similar al de la tecnología de película fina.	Presentan una vida útil más corta en comparación con las células monocristalinas.

Tabla 1.3. Ventajas y desventajas del silicio policristalino: Fuente: Elaboración propia.

Módulo de película delgada

Ventajas	Desventajas
Son ideales para aplicaciones de construcción debido a su excelente estética.	Las células solares de película delgada tienen poca eficiencia espacial debido a su baja eficiencia de conversión de energía.
Generan energía constante a temperaturas más altas, en días nublados y con ángulos de sol bajos.	
La producción en masa de módulos de película delgada es mucho más fácil.	Los paneles fotovoltaicos de película delgada tienen una vida útil

Ventajas	Desventajas
Lo que da como resultado módulos relativamente más baratos en comparación con los paneles solares de base cristalina.	más corta que sus contrapartes cristalinas.

Tabla 1.4. Ventajas y desventajas de película delgada. Fuente: Elaboración propia.

1.4 Tipos de tecnología

Como una de las tecnologías emergentes, los diferentes sistemas fotovoltaicos se utilizan cada vez más para satisfacer el consumo mundial de energía. Docenas de tecnologías fotovoltaicas diferentes están disponibles comercialmente en el mercado. Esta sección tiene como objetivo presentar las características más básicas de las tecnologías fotovoltaicas y proporcionar información sobre el rendimiento y los parámetros tecnoeconómicos para permitir una comparación entre las tecnologías fotovoltaicas (Tanrioven, 2023).

1.4.1 Tecnología de silicio cristalino

Entre las tecnologías fotovoltaicas, la fotovoltaica de silicio cristalino es la tecnología más utilizada, con una cuota de mercado mundial de alrededor del 90%. Hay dos tipos de células fotovoltaicas que se utilizan en la energía fotovoltaica de silicio cristalino. Se trata de células de silicio monocristalino y de silicio policristalino (Tanrioven, 2023).

Las células fotovoltaicas monocristalinas se producen cortando lingotes de forma cilíndrica de alta pureza en obleas. Las células fotovoltaicas policristalinas se producen cortando un bloque de silicio fundido en barras y luego en obleas. Aquí, las piezas de diferentes cristales de silicio se funden para formar lingotes y obleas policristalinas. En general, la eficiencia de las células monocristalinas es mejor que la de las células fotovoltaicas policristalinas. La eficiencia máxima de conversión de energía reportada hasta ahora es de aproximadamente el 25% para las células fotovoltaicas monocristalinas. La eficiencia de conversión de energía de las células policristalinas es inferior al 22% hasta ahora. Sin embargo, la diferencia entre las tasas de eficiencia está disminuyendo gradualmente (Tanrioven, 2023).

1.4.1.1 Cinta de cuerda de silicona

Los paneles fotovoltaicos String Ribbon Si (silicio) están hechos de Si policristalino. En su proceso de fabricación, los alambres resistentes a la temperatura se tiran a través del silicio fundido (fundido) para obtener cintas de silicio muy finas. Los paneles fotovoltaicos obtenidos de esta manera son muy similares en apariencia a los paneles policristalinos convencionales. La principal ventaja de los paneles String Ribbon Si es el uso de menos silicio en la producción. Casi la mitad de las siliconas utilizadas en la fabricación de células monocristalinas, lo que contribuye a un menor coste. Debido a su baja eficiencia, de alrededor del 13% al 17%, los paneles de silicio de cinta de cuerda tienen la eficiencia de espacio más baja entre los principales tipos de paneles solares de base cristalina (Tanrioven, 2023).

1.4.2 Tecnología de película delgada

El proceso de fabricación de células solares de película delgada se basa en el principio de recubrimiento de uno o más materiales fotovoltaicos sobre un sustrato. El silicio amorfo (a-Si), el telurio de cadmio (CdTe) y el seleniuro de cobre, indio y galio (CIS/CIGS) son los principales tipos de tecnologías de película delgada. Los paneles de película delgada tienen una eficiencia del 7% al 13% dependiendo de la tecnología de la que estén hechos (Tanrioven, 2023).

1.4.2.1 Silicio amorfo

La tasa de silicio utilizado en la producción de células de silicio amorfo (a-Si) es bastante baja, de modo que alrededor del 1%-2% del silicio utilizado en la célula de silicio cristalino es suficiente para las células solares de silicio amorfo. Debido a su baja potencia de salida, las celdas de a-Si no son las preferidas en aplicaciones a gran escala. Por el contrario, las celdas de silicio amorfo se utilizan para aplicaciones de menor escala, como calculadoras, luces de viaje, equipos de campamento, etc. La eficiencia de las células a-Si se puede aumentar mediante el proceso llamado apilamiento, que contiene varias capas de células de silicio amorfas. La eficiencia de las células a-Si aumenta hasta un 8% mediante el proceso de apilamiento. Sin embargo, siguen siendo relativamente costosos debido al costoso proceso de apilamiento. Se espera que las células a-Si también sean beneficiosas para algunas aplicaciones a gran escala debido a las innovaciones en curso (Tanrioven, 2023).

1.4.2.2 Teluro de cadmio

El teluro de cadmio (CdTe) es una tecnología fotovoltaica basada en el uso de una película delgada de CdTe. Los paneles solares CdTe funcionan con una eficiencia promedio del 9% al 11% en el campo. Aunque su mayor eficiencia de conversión de energía es de aproximadamente el 16%, CdTe es la única tecnología de paneles solares de película delgada que es competitiva en costos con los modelos de silicio cristalino. El CdTe está creciendo rápidamente y, después de la tecnología basada en silicio, el CdTe representa actualmente el segundo material de células solares más utilizado en todo el mundo. Los paneles CdTe tienen varias ventajas sobre la tecnología tradicional de silicio. La principal ventaja de esta tecnología es que los paneles se pueden fabricar a costos más bajos que los paneles solares a base de silicio debido a su facilidad de fabricación y la abundancia de cadmio, que se produce como subproducto de otros metales industriales importantes como el zinc (Tanrioven, 2023).

1.4.2.3 Seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS-CIS)

Los materiales de seleniuro de cobre, indio, galio con diferentes bandas prohibidas se intercalan entre semiconductores para formar células fotovoltaicas CIGS que tienen estructuras de heterounión. La capa superior de las células fotovoltaicas CIGS está hecha de material de sulfuro de cadmio (CdS) y, a veces, se agrega zinc a la capa para mejorar la transparencia. Aunque su mayor eficiencia de conversión de energía es de aproximadamente el 20% en condiciones de laboratorio, los paneles solares CIGS funcionan con una eficiencia promedio del 10% al 12% en el campo, hasta cierto punto comparable a las tecnologías cristalinas. Esta tecnología sigue siendo una tecnología emergente y, en comparación con las otras tecnologías de película delgada mencionadas anteriormente, las células fotovoltaicas CIGS han mostrado el mayor potencial de eficiencia energética. Por lo tanto, se espera que se utilice en aplicaciones comerciales o de mayor tamaño en un futuro próximo. La desventaja más importante de las tecnologías CIGS es su mayor coste, ya que es más difícil trabajar con el material. Las ventajas más importantes en términos de rendimiento son que los paneles fotovoltaicos CIGS muestran un buen rendimiento en condiciones de radiación indirecta y alta temperatura. Por esta razón, son atractivos en aplicaciones orientadas al norte, aplicaciones en la edificación y lugares seguros (Tanrioven, 2023).

1.4.2.4 Película delgada de arseniuro de galio

La celda fotovoltaica de arseniuro de galio (GaAs) de película delgada está hecha de una mezcla de dos elementos, a saber, galio y arseniuro. Las células fotovoltaicas de GaAs siguen siendo tecnologías emergentes y tienen un potencial significativo entre los sistemas fotovoltaicos. Porque la banda prohibida de GaAs es de 1,43 eV y es adecuada para su uso en células solares de múltiples uniones y de alta eficiencia. Las células fotovoltaicas de GaAs tienen importantes ventajas sobre las células basadas en silicio, como que GaAs es el material solar de mayor eficiencia con un coeficiente de baja temperatura y muestra un buen rendimiento en condiciones de poca luz. Dado que son costosos, flexibles, livianos y resistentes a la humedad y la luz ultravioleta, son adecuados para su uso en tecnologías espaciales y aplicaciones militares (Tanrioven, 2023).

1.4.2.5 Celda de silicio microcristalino (policristalino) de película delgada

Como una de las tecnologías solares de reciente aparición, las células fotovoltaicas de silicio microcristalino de película delgada ($\mu\text{c-Si}$) están compuestas de pequeños granos de silicio cristalino, que se utiliza como capa generadora de energía. La eficiencia de conversión máxima es de aproximadamente el 10%, pero se espera que aumente aún más con las innovaciones. Los estudios sobre $\mu\text{c-Si}$ son todavía bastante nuevos y se están llevando a cabo estudios a escala de laboratorio (Tanrioven, 2023).

1.4.3 Células fotovoltaicas concentradas de múltiples uniones

A diferencia de las tecnologías fotovoltaicas de placa plana, los sistemas fotovoltaicos concentrados (CPV) utilizan lentes y espejos curvos para enfocar la radiación solar en células fotovoltaicas pequeñas pero altamente eficientes. Existen principalmente dos tipos de CPV, a saber, PV de alta concentración (HCPV) y PV de baja concentración (LCPV). Los sistemas HCPV concentran la luz solar en un factor de entre 300 y 1000 veces en un área de celda pequeña. Las células utilizadas en HCPV son células solares de uniones múltiples comparativamente caras basadas en semiconductores III - V obtenidas combinando elementos del grupo III con elementos del grupo V de la tabla periódica. Los sistemas LCPV con una relación de concentración de hasta 100 veces utilizan células fotovoltaicas de silicio cristalino (u otras células) y, en general, sistemas de seguimiento de un solo eje (también se puede utilizar el seguimiento de dos ejes) (Tanrioven, 2023).

Los sistemas CPV tienen varias ventajas sobre otras tecnologías fotovoltaicas, tales como: Tienen coeficientes de temperatura bajos y alta eficiencia para irradiación directa. La eficiencia de los sistemas HCPV ha superado el 40% en estudios recientes. Los sistemas CPV tienen calor residual y este calor se puede utilizar para diferentes propósitos, como el enfriamiento activo. Tienen una producción de energía mejor y más estable durante el día gracias a sus sistemas de seguimiento. Los sistemas CPV tienen un mayor potencial para aumentar la eficiencia en el futuro en comparación con los sistemas fotovoltaicos de placa plana de unión única (Tanrioven, 2023).

Los sistemas CPV también tienen varias debilidades, tales como: Los sistemas HCPV no pueden utilizar radiación difusa, aunque LCPV solo puede usar una fracción de radiación difusa. Son muy caros debido a los costes adicionales de los sistemas ópticos y de seguimiento (Tanrioven, 2023).

1.4.4 Nueva tecnología fotovoltaica emergente

Las nuevas tecnologías fotovoltaicas emergentes tienen como objetivo abrir nuevos potenciales para la energía fotovoltaica con costos reducidos y mayor eficiencia. A continuación se presentan las principales tecnologías fotovoltaicas emergentes y se detallan sus características principales (Tanrioven, 2023).

1.4.4.1 Células fotovoltaicas sensibilizadas por colorante

Una célula solar sensibilizada por colorante (DSC) es una célula solar avanzada de película delgada. Las DSC se basan en un semiconductor formado entre un ánodo fotosensibilizado (ánodo transparente) y un electrolito más una placa conductora. Estas células solares tienen numerosas ventajas sobre sus homólogas. Estas son algunas de las ventajas de los DSC. La eficiencia general de los DSC es de aproximadamente el 11 %, por lo que son adecuados principalmente para aplicaciones de baja densidad. Las DSC están hechas de materiales de bajo costo y son más baratas que muchas de las mejores celdas de película delgada. Por tanto, la relación precio-rendimiento obtenida a través de los DSC es superior a la de otros. El tinte utilizado en los DCS puede absorber la luz solar difusa y la luz fluorescente. Por lo tanto, los DSC también funcionan en condiciones nubladas y con poca luz, con poco efecto en la eficiencia. Otra ventaja de los DSC es su vida útil más larga en comparación con sus

homólogos. Las DSC no se degradan tanto con la luz solar, por lo que no requieren reemplazos frecuentes (Tanrioven, 2023).

1.4.4.2 Células fotovoltaicas orgánicas

Las células fotovoltaicas orgánicas (OPV) están hechas de moléculas a base de carbono y la mayoría de ellas son células solares de polímero. Aunque las células orgánicas son baratas y fáciles de producir, su eficiencia y vida útil son considerablemente inferiores a las de otras tecnologías fotovoltaicas. Otras desventajas de las células OPV son su baja estabilidad y baja resistencia en comparación con sus contrapartes inorgánicas. Sin embargo, el interés de los investigadores por las OPV ha aumentado, con una eficiencia superior al 10% en las células solares de polímero (Tanrioven, 2023).

1.4.4.3 Células fotovoltaicas de perovskita

Una célula solar de perovskita es un tipo de célula solar que incluye un compuesto estructurado de perovskita. El material de perovskita ofrece un costo reducido, una excelente absorción de luz y una banda prohibida óptica directa de alrededor de 1,5 eV, lo que resulta en una alta eficiencia del dispositivo. El nivel de eficiencia alcanzado hasta el momento ronda el 20%. Como resultado, los fotovoltaicos de perovskita tienen un futuro prometedor para la entrada al mercado fotovoltaico (Tanrioven, 2023).

1.4.4.4 Células fotovoltaicas de puntos cuánticos

Los puntos cuánticos (QDs) están hechos de materiales electroópticamente activos, cuya energía fotónica se puede controlar y su longitud de onda de absorción se puede ajustar cambiando el tamaño del QD para generar múltiples pares de huecos de electrones. Con este proceso, es posible operar la celda QDs con alrededor del 10% de eficiencia. Las células basadas en QDs ofrecen dos beneficios importantes: versatilidad y flexibilidad en su uso. Esta gran ventaja los convierte en excelentes candidatos para futuros desarrollos. (Tanrioven, 2023).

1.4.4.5 Células fotovoltaicas de grafeno

El grafeno, como material, está formado por una sola capa de átomos de carbono unidos entre sí formando hexágonos. Es un material muy resistente, transparente y flexible con características conductoras sorprendentemente buenas, pero no es muy bueno para recoger

la corriente eléctrica producida dentro de la célula solar. Por lo tanto, los científicos están buscando formas aplicables de adaptar el grafeno para este propósito. Actualmente, las células fotovoltaicas basadas en grafeno no están disponibles comercialmente. Como material abundante y de precio relativamente bajo, el grafeno tiene un potencial ilimitado para aplicaciones futuras (Tanrioven, 2023).

1.4.4.6 Células fotovoltaicas híbridas

Recientemente, una de las tendencias más importantes en la industria fotovoltaica es la producción de células híbridas de silicio y varios estudios de investigación se han centrado en explorar formas de combinar diferentes materiales para fabricar células solares con mayor eficiencia, mayor vida útil y costos reducidos. Por ejemplo, recientemente se ha colocado una capa de silicio amorfo sobre obleas de cristal único para formar una célula solar híbrida. El resultado ha mostrado un rendimiento mejorado con un coeficiente de temperatura más bajo, así como una eficiencia mejorada bajo luz indirecta (Tanrioven, 2023).

1.4.4.7 Células fotovoltaicas bifaciales

La fotovoltaica bifacial es una tecnología prometedora que aumenta la generación de electricidad por unidad de área de módulos fotovoltaicos mediante el uso de la absorción de luz reflejada del albedo. En otras palabras, las células fotovoltaicas bifaciales pueden aceptar la radiación solar de ambas superficies para generar energía eléctrica. Los paneles fotovoltaicos bifaciales se pueden producir utilizando diferentes tecnologías. La mayoría utilizan células monocristalinas, pero también existen diseños policristalinos. Las tecnologías fotovoltaicas de silicio policristalino de tipo p, silicio monocristalino de tipo n, monocristalino de heterounión y HIT (heterounión con capa delgada intrínseca) son ejemplos de dispositivos fotovoltaicos bifaciales. Los módulos bifaciales vienen en varios diseños. Por ejemplo, algunos están enmarcados y otros sin marco. Algunos son de doble vidrio y otros usan láminas traseras. En las células fotovoltaicas bifaciales, una parte trasera transparente puede generar energía adicional, que oscila entre el 5% y el 30% de la energía generada solo por la parte frontal. La eficiencia de las células fotovoltaicas bifaciales aumentó por encima del 22% según el tipo de tecnología (Tanrioven, 2023).

La principal diferencia entre las células fotovoltaicas bifaciales y los diseños monofaciales está relacionada con el modelado. Las células solares bifaciales se pueden modelar eléctricamente como dos células monofaciales en paralelo, basándose en el circuito equivalente de diodo simple o diodo doble. En este contexto, se puede obtener el circuito equivalente de una celda fotovoltaica bifacial típica como se muestra en la Figura 3.53. Después de esta etapa, todas las técnicas relativas a la solución de células fotovoltaicas bifaciales se pueden realizar siguiendo los mismos procedimientos que en las células mono-faciales (Tanrioven, 2023).

1.5 Curva de la célula solar

La curva intensidad-tensión de un módulo fotovoltaico muestra la relación entre la corriente y la tensión eléctrica en el circuito externo a diferentes niveles de radiación solar. La curva verde tiene una forma características en la que la potencia aumenta a medida que el voltaje aumenta hasta alcanzar un punto de máxima potencia. La curva representa la relación entre la potencia de salida del módulo fotovoltaico y la tensión eléctrica. La potencia se calcula multiplicando la corriente y la tensión, y la curva alcanza su valor máximo en el punto de máxima potencia. Este punto representa la máxima eficiencia del módulo, donde se obtiene la mayor potencia de salida (Abdulameer Abbood, 2016).

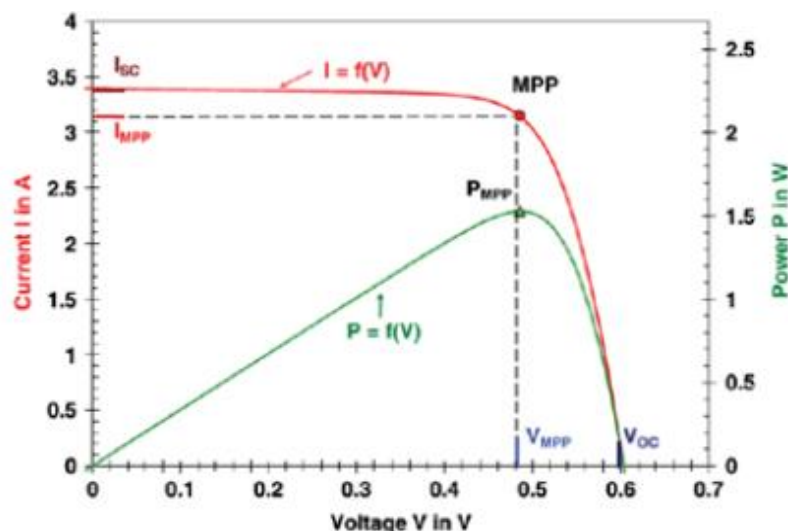


Figura 1.3. Curvas I-V y P-V características de una célula solar. Fuente:(García Hortelano, 2023).

La curva características del módulo y la curva de funcionamiento dependen de las condiciones de irradiancia y de temperatura. Así, la siguiente curva intensidad-tensión de un módulo fotovoltaico con la irradiancia se refiere a cómo cambia la curva cuando la cantidad de radiación solar incidente varía. A medida que aumenta la irradiancia, la curva se desplaza hacia arriba, lo que significa que tanto la corriente de corto circuito como el voltaje de circuito abierto aumentan (Abdulameer Abbood, 2016).

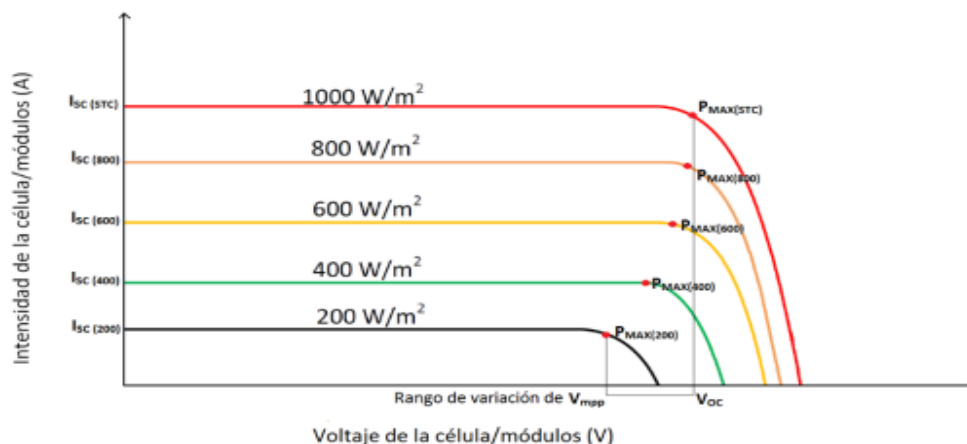


Figura 1.4. Variación de la relación I-V en función de la irradiancia. Fuente:(García Hortelano, 2023).

Por otro lado, la variación de la curva intensidad-tensión de un módulo fotovoltaico con la temperatura muestra cómo cambia la curva cuando la temperatura ambiente varía. A medida que la temperatura aumenta, se produce un ligero aumento de la corriente de cortocircuito, mientras que, por el contrario, la tensión de circuito abierto cae de forma pronunciada, típicamente a $2,3\text{mV}/^{\circ}\text{C}_{\text{célula}}$. Esto supondrá una caída de la eficiencia del módulo a medida que aumenta la temperatura (Abdulameer Abbood, 2016).

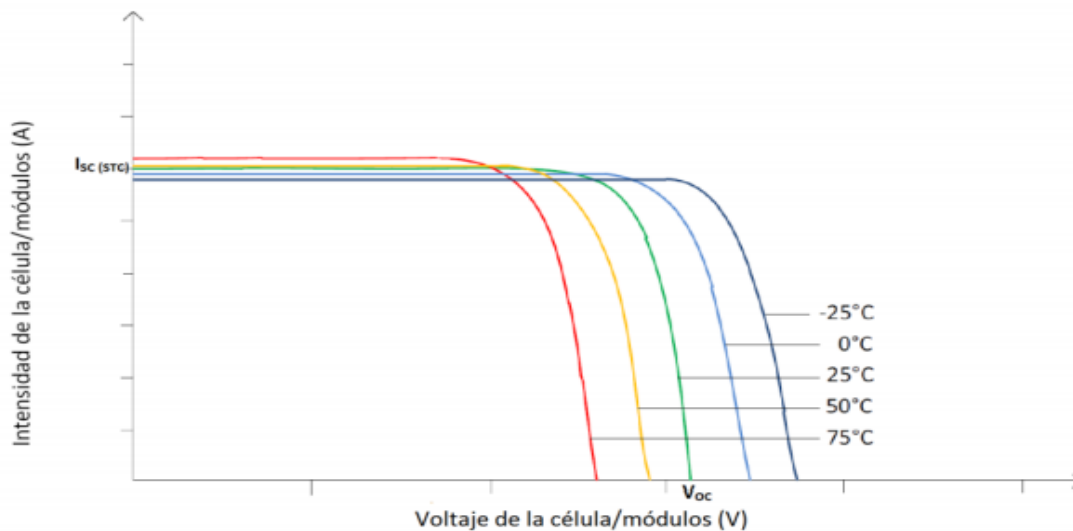


Figura 1.5. Variación de la relación I-V en función de la temperatura. Fuente:(García Hortelano, 2023).

1.6 Análisis del desempeño del sistema fotovoltaico

En esta sección se hace una revisión de algunos artículos más principales sobre el desempeño de sistemas fotovoltaicos ante diferentes condiciones meteorológico.

Rendimiento comparativo de los sistemas solares fotovoltaicos integrados en la red en el entorno tropical.

En este artículo, se presentaron los rendimientos comparativos de seis sistemas fotovoltaicos diferentes conectados a un parque solar integrado en la red de 1,2 MWp. Las tecnologías solares consideradas son la monocristalina (sc-Si), policristalina (mc-Si), microcristalina (nc-Si/a-Si), silicio amorfo (a-Si), cobre, indio, selenio (CIS) y heterounión con capa fina intrínseca (HIT). Siguiendo las directrices de la IEA, se tomaron como criterios para la comparación del rendimiento, el rendimiento del conjunto, las pérdidas de captura, el índice de eficiencia del conjunto y el índice de rendimiento. Entre los seis tipos diferentes de módulos, los sistemas basados en silicio amorfo y HIT ofrecen el mejor rendimiento en el entorno tropical considerado (Ismail, 2013).

Evaluación del rendimiento de la energía fotovoltaica y predicción del rendimiento energético basada en simulación para edificios tropicales.

En este artículo se evaluó el rendimiento de diferentes tipos de células solares para el clima tropical de Singapur. Como caso de estudio, se analizaron los datos medidos de los

sistemas fotovoltaicos implementados en un edificio de energía cero en Singapur. Se han instalado diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos (obleas de silicio y películas delgadas) en tejados, fachadas, refugios de aparcamientos, barandillas, etc. El impacto de diferentes generaciones de células solares, condiciones ambientales de los conjuntos (sin sombra, sombra moteada, sombra total), La orientación (orientación sur, norte, este u oeste) y la inclinación (entre el módulo fotovoltaico y la dirección horizontal) se investigaron sobre el rendimiento de los módulos. En la segunda etapa de la investigación, todos los sistemas fotovoltaicos del caso de estudio se simulan en el software de simulación de energía EnergyPlus con varios modelos de rendimiento fotovoltaico, incluidos Simple, Equivalente de un diodo y Sandia. Los resultados pronosticados por diferentes modelos se comparan con los datos medidos y el modelo validado se utiliza para proporcionar predicciones de rendimiento energético basadas en simulación para una amplia gama de escenarios (Saber, 2014).

Análisis del rendimiento a largo plazo de un sistema fotovoltaico autónomo en condiciones reales.

En este estudio, se investigó el rendimiento operativo a largo plazo de un sistema solar fotovoltaico autónomo (SAPV) de 19,8 kWp en una isla remota. Se presenta la metodología para evaluar el desempeño del sistema y luego se presentan los resultados detallados de la evaluación, acompañados de análisis y discusión. Los resultados muestran que el conjunto fotovoltaico (PV) funcionó bien con una eficiencia de generación de energía de AC de aproximadamente el 10 % y la eficiencia general del sistema es de aproximadamente el 7,7 %. Sin embargo, después de un seguimiento y análisis del rendimiento a largo plazo, la limitación del sistema SAPV comienza a surgir debido a la falta de gestión de la red y de compensaciones de otras fuentes de energía, lo que sugiere que sería mejor desarrollarlo o integrarlo en un sistema de microrredes con fuentes híbridas si es posible (Ma, 2017).

Monitorización y análisis del rendimiento de la energía fotovoltaica conectada a la red en diferentes condiciones climáticas en el sur de Argelia.

El objetivo principal de este estudio era presentar el efecto de las condiciones climáticas sobre el rendimiento del sistema fotovoltaico (PV) conectado a la red instalado en la zona sahariana del sur de Argelia (Adrar) durante el año 2010 y analizado diariamente. Esta

región se caracteriza por una alta temperatura ambiente en verano, un fuerte potencial de insolación solar y un bajo índice de humedad. La medición de los datos se realizó en la Unidad de Investigación en Energías Renovables de la URERMS en diversas condiciones climáticas diarias (día despejado, nublado y tormenta de arena). La evaluación del rendimiento basada en el monitoreo del rendimiento del conjunto fotovoltaico y del inversor durante la operación del sistema, los parámetros derivados incluyeron el rendimiento final, el rendimiento de referencia, la relación de rendimiento y la eficiencia del sistema. Los resultados experimentales muestran que los valores más bajos de la eficiencia del sistema y la relación de rendimiento (10,29% y 76,5% respectivamente) causados por la alta temperatura del módulo igual a 41,1 C en el día despejado, y el rápido cambio de la irradiancia solar es causado por La variación de la nubosidad o, la tormenta de polvo afecta la energía generada y la estabilidad del sistema fotovoltaico (Dabou, 2016).

Evaluación del rendimiento de dos tecnologías fotovoltaicas (c-Si y CIS) para la construcción de sistemas fotovoltaicos integrados basados en condiciones climáticas tropicales. Un estudio de caso en Malasia.

Este artículo presentó dos sistemas fotovoltaicos (PV) conectados a la red (silicio monocristalino, c-Si; cobre-indio-diseleniuro; CIS) situados en la azotea del edificio del laboratorio solar en la Universidad Nacional de Malasia, en el suroeste de Malasia. Se utilizaron varios parámetros para analizar el desempeño del sistema; incluido el rendimiento de la matriz, el rendimiento final, el factor de capacidad y la relación de rendimiento. Las grabaciones se anotaron en las condiciones climáticas reales durante todo un año. También se consideraron las variables de costo de energía y período de recuperación para calcular la viabilidad económica del sistema. Finalmente, este estudio proporciona información valiosa para quienes estén interesados en la instalación de sistemas fotovoltaicos en las zonas tropicales (Humada Mojgan, 2016).

Análisis de desempeño ambiental tecnoeconómico y del ciclo de vida de un sistema de microrred solar fotovoltaica para países en desarrollo.

Este artículo presenta análisis tecnoeconómicos y ambientales detallados de una SPM (microrred solar fotovoltaica) para comunidades remotas. El SPM está modelado para soportar un crecimiento de carga anual del 2% durante una vida útil del proyecto de 25

años, con una demanda de caso base de 63,875 kWh/año. El rendimiento fotovoltaico y de la batería se evalúa cuidadosamente. Utilizamos la demanda insatisfecha, la probabilidad de pérdida de energía y los índices de disponibilidad para determinar la confiabilidad del sistema. Los análisis LCC (coste del ciclo de vida) y LCI (impacto del ciclo de vida) se utilizan para evaluar el desempeño económico y ambiental del SPM. Se utiliza como estudio de caso una pequeña comunidad en Gusau, estado de Zamfara, Nigeria, y obtuvimos capacidades de SPM de 55 a 82,5 kW con valores de disponibilidad de 96,86 a 98,74%. El potencial de calentamiento global de los sistemas SPM oscila entre 5178 y 7765 kgCO₂-eq, mientras que el tiempo de recuperación de la energía y el retorno de la inversión en energía son 1,46 años y 17, respectivamente. Estos resultados pueden ser útiles para conceptualizar y planificar microrredes fotovoltaicas en países en desarrollo (Akinyele, 2016).

Monitoreo inteligente de microrredes Evaluación de indicadores clave de desempeño para una planta fotovoltaica conectada a una microrred de BT.

El monitoreo del funcionamiento diario de una microrred se puede utilizar para cuantificar los beneficios económicos y ambientales y evaluar indicadores clave de desempeño de las unidades de generación. El objetivo del presente artículo era mostrar los principales resultados de un análisis de rendimiento realizado en una planta fotovoltaica (PV1) de 80,64 kW conectada a una microrred inteligente de baja tensión (BT) en funcionamiento en el norte de Italia. La campaña experimental duró un año, desde principios de diciembre de 2015 hasta finales de noviembre de 2016, y los datos recopilados se analizaron para evaluar algunos indicadores clave de rendimiento, entre los que se encuentran el “rendimiento final”, el “rendimiento de referencia”, y el “índice de rendimiento”. Además, se ha comparado el rendimiento de la planta con el de otra planta fotovoltaica (PV2) instalada en el mismo emplazamiento. El artículo reporta los principales resultados del citado estudio y propone algunas futuras actividades de investigación que podrían derivarse del mismo (Bracco, 2017).

Modelado y caracterización de un sistema fotovoltaico conectado a red en condiciones de clima tropical.

En este estudio, se desarrolla y caracteriza un modelo fotovoltaico (PV) de tres parámetros que opera en condiciones climáticas tropicales. También se evalúa el rendimiento del modelo de sistema fotovoltaico. Las condiciones climáticas de Malasia seleccionadas en este estudio de caso como banco de pruebas. Se establece un modelo fotovoltaico matemático de un sistema fotovoltaico de pequeña escala. El modelo fotovoltaico propuesto se basa tanto en la simplicidad como en la precisión, y se basa en datos reales. Los resultados potenciales obtenidos en base a la simulación diseñada. El rendimiento fotovoltaico medio basado en la comparación del rendimiento fotovoltaico calculado y real fue del 65,8%. El rendimiento promedio del inversor basado en las eficiencias calculadas y reales del inversor fue del 97,58%. La precisión del modelo propuesto se verificó mediante el uso de diferentes criterios de evaluación y se comparó con varios modelos de las obras heredadas. Este estudio podría servir como una referencia valiosa para la instalación de sistemas fotovoltaicos conectados a la red en Malasia y otras regiones tropicales para promover la implementación fotovoltaica (Humada Mojgan, 2017).

Análisis de rendimiento de paneles fotovoltaicos basados en diferentes tecnologías después de dos años de exposición al aire libre en Fukushima, Japón.

Este trabajo informa del impacto del clima de Fukushima, que suele ser ventoso en otoño y con fuertes nevadas en invierno, en los sistemas fotovoltaicos instalados. Además, numerosos paneles pertenecientes a diferentes tecnologías fotovoltaicas y fabricantes se instalan uno al lado del otro para comparar la variación en su rendimiento y, así, comparar su calidad y resistencia. Para investigar el posible impacto del microclima o las condiciones geográficas locales, se utilizan dos sitios de prueba en la prefectura de Fukushima. Finalmente, se presenta un ejemplo de cálculo de un sistema fotovoltaico para mostrar los impactos de estos hallazgos en un sistema fotovoltaico en las etapas de planificación y operación (Ustun, 2019).

Evaluación del Desempeño del Sistema Solar Fotovoltaico Autónomo para diferentes perfiles de Carga en el Área Rural.

En el presente trabajo, se llevó a cabo la planificación y el análisis económico de un sistema solar fotovoltaico independiente para la electrificación de una comunidad rural en el escenario indio. Para el estudio de caso, se investigaron doce aldeas no electrificadas del

estado de Uttarakhand en India bajo diferentes perfiles de carga. En este trabajo se consideraron cinco perfiles de carga diferentes para el análisis de desempeño en función del requerimiento energético de la población rural. Se estimaron el tamaño de los módulos fotovoltaicos y la capacidad de la batería para todos los perfiles de carga. El análisis económico sugirió que el perfil de carga optimizado propuesto tiene el mejor diseño para la electrificación de la comunidad rural (Kamal, 2021).

Evaluación del rendimiento de una microrred alimentada por energía solar conectada a la red Un estudio de caso.

Este artículo examina la evaluación del rendimiento de plantas fotovoltaicas conectadas a la red entre enero de 2019 y diciembre de 2019 de acuerdo con la norma IEC 61724. Además, los resultados de la planta real también se han comparado con los resultados del software PV*Syst que simula el comportamiento en tiempo real de la planta. Además, para evaluar el rendimiento de la planta de energía, este documento analiza los diversos parámetros de la planta fotovoltaica, incluido el rendimiento de referencia, el rendimiento final y la relación de rendimiento de la planta fotovoltaica. Una evaluación del rendimiento del módulo indica que ha producido 101,57 MWh de energía en 1 año, con un ratio de rendimiento de 0,60. Del análisis comparativo se desprende claramente que los paneles solares en los tejados son un medio económicamente viable y tecnológicamente factible de suministrar electricidad en el norte de la India. Al tomar estas medidas, los institutos u oficinas pueden proteger el medio ambiente y ahorrar dinero al convertirse en microrredes. El proyecto propuesto proporciona una hoja de ruta para instalar plantas fotovoltaicas en tejados en ciudades pobladas sin ocupar terreno adicional (Srivastava, 2022).

Análisis energético de un sistema fotovoltaico integrado a una cubierta plana horizontal.

En el presente trabajo se analiza el desempeño energético de un sistema fotovoltaico a base de silicio amorfo, integrado a la cubierta plana horizontal del Edificio Docente #2 del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Con el software PV syst se determinó la producción anual de energía eléctrica del sistema de 3 kWp conectado a la red, así como las pérdidas por sombras, cableado, electrónica de potencia, modificación del ángulo de inclinación y por efecto de la irradiancia y temperatura. También se calcularon los

parámetros característicos de la instalación, útiles para establecer perfiles mensuales para la planificación del consumo eléctrico. Los resultados demostraron que la energía anual generada, es equivalente al consumo eléctrico del Instituto durante dos días y además, constituye una alternativa para la generación de energía, a partir del aprovechamiento de espacios disponibles en azoteas de las áreas docentes y administrativas (Osorio Laurencio, 2015).

CubaDebate. Ministro de Energía y Minas: El camino es avanzar en la soberanía energética con el gas y el crudo nacionales y las energías renovables.

En un encuentro con periodistas a propósito de celebrarse este 14 de marzo el Día de la Prensa Cubana, el ministro de Energía y Minas, Vicente de la O Levy, abordó este miércoles la difícil situación energética del país y algunas estrategias y acciones en curso para afrontarla en el corto y mediano plazos. En un contexto marcado por la falta de financiamiento, la pérdida de suministradores claves de combustibles y una infraestructura de generación térmica con décadas de explotación, el ministro enfatizó que “el camino trazado para Cuba es avanzar con nuestros propios recursos, ir hacia la sostenibilidad y la soberanía energética con nuestro propio crudo, nuestro gas y las fuentes renovables de energía”. Según el ministro, se firmaron dos contratos que totalizan 2 000 MW de energía fotovoltaica. El objetivo es concluir el primer contrato de 1 000 MW hacia mayo de 2025, y el segundo, en 2028. Cada uno, además, cuenta con 100 MW adicionales en capacidad de almacenamiento (CubaDebate, 2024).

1.7 Conclusiones parciales.

1. En las referencias consultadas se reportan limitados estudios sobre los efectos que producen las condiciones meteorológicas de países tropicales en el desempeño de PV.
2. Una revisión de la literatura demostró que es necesario realizar una evaluación del desempeño de los sistemas fotovoltaicos en diferentes condiciones meteorológicas para analizar cómo cambia la eficiencia en el tiempo.
3. En la literatura se reportan diferentes tecnologías como: las células de silicio cristalino, las cuales son las más utilizadas, las cuales tienen dos tipos de células fotovoltaicas la de silicio monocristalino y de silicio policristalino, también están

las tecnologías de películas delgadas que estas presentan varios tipos de células fotovoltaicas. También podemos observar las nuevas tecnologías emergentes donde se encuentran las células fotovoltaicas orgánicas entre otros.

CAPÍTULO 2: Modelo físico de sistema fotovoltaico

2.1 La célula fotovoltaica

Las células fotovoltaicas (PV) convierten la luz solar directamente en electricidad sin causar ningún tipo de contaminación, están formadas por dos capas semiconductoras, una de las cuales está cargada positivamente y la otra negativamente (Tanrioven, 2023).

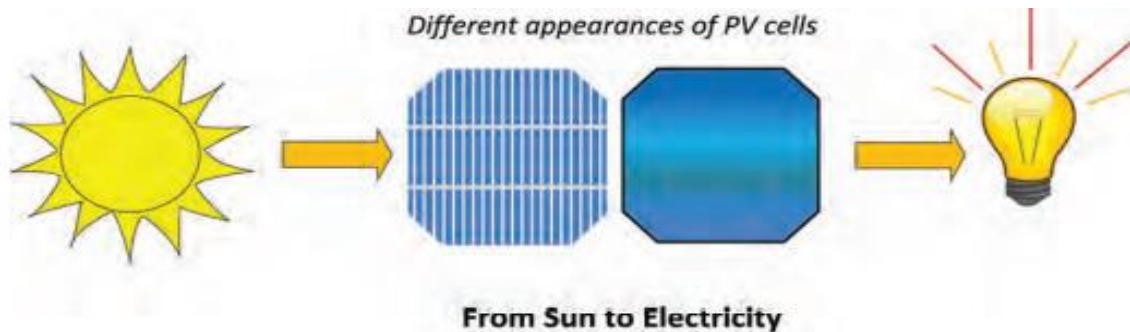


Figura 2.1. Ilustración de la conversión directa de la radiación solar en electricidad mediante una célula fotovoltaica. Fuente: (Tanrioven, 2023).

Una vez que la luz solar llega a la celda fotovoltaica, algunos de los fotones son absorbidos por los materiales semiconductores y liberan algunos de los electrones en la capa negativa. Luego, los electrones libres fluyen a través de un circuito externo hacia la capa positiva. Este flujo de electrones produce una corriente eléctrica como se representa en la figura 2.2 (Tanrioven, 2023)

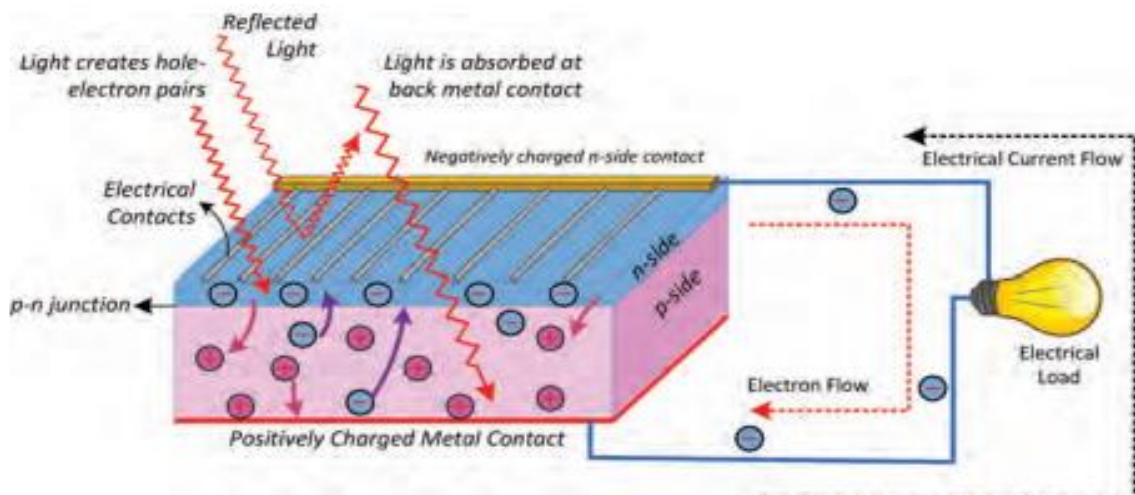


Figura 2.2. Creación de pares hueco-electrón y flujo de corriente eléctrica a través de un circuito externo. Fuente: (Tanrioven, 2023)

Las células fotovoltaicas están laminadas con varias capas para protegerlas de las influencias ambientales. La Figura 2.3 muestra las capas de laminación de una célula solar fotovoltaica (Tanrioven, 2023).

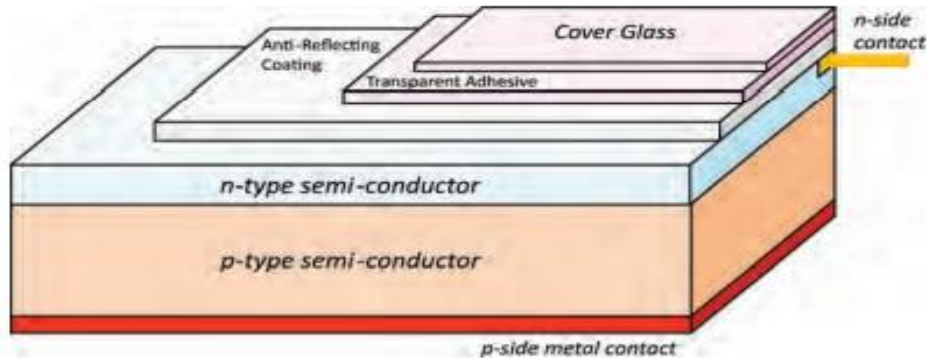


Figura 2.3. Las capas de laminación de una célula solar fotovoltaica. Fuente: (Tanrioven, 2023).

Como puede verse en la figura, hay una capa de revestimiento anti reflectante y una capa adhesiva transparente entre el material tipo p-n y el cubreobjetos. Después de este proceso de laminación, la estructura fotovoltaica se enmarca con aluminio. Normalmente, una célula fotovoltaica tiene un área de aproximadamente 100 cm² y produce un voltaje de circuito abierto de aproximadamente 0,5 a 0,6 voltios a temperatura ambiente. La multiplicación en serie y en paralelo de células fotovoltaicas se realiza para obtener mayores niveles de voltaje y potencia (Tanrioven, 2023).

2.2 El Módulo Fv y el Dispositivo Fv

Una fase crucial en el diseño del sistema fotovoltaico es decidir la cantidad requerida de módulos en serie y conjuntos en paralelo para satisfacer la demanda de energía solicitada. Las células fotovoltaicas están conectadas en serie para formar módulos fotovoltaicos. Luego, los módulos se ensamblan en serie para crear paneles fotovoltaicos o cadenas fotovoltaicas. Las cadenas fotovoltaicas se conectan en paralelo para crear conjuntos fotovoltaicos. Se reúnen varios conjuntos fotovoltaicos para formar un parque fotovoltaico a escala de servicios públicos. La ilustración de las células fotovoltaicas a los módulos y luego a los conjuntos se muestra en la figura 2.4 (Tanrioven, 2023).

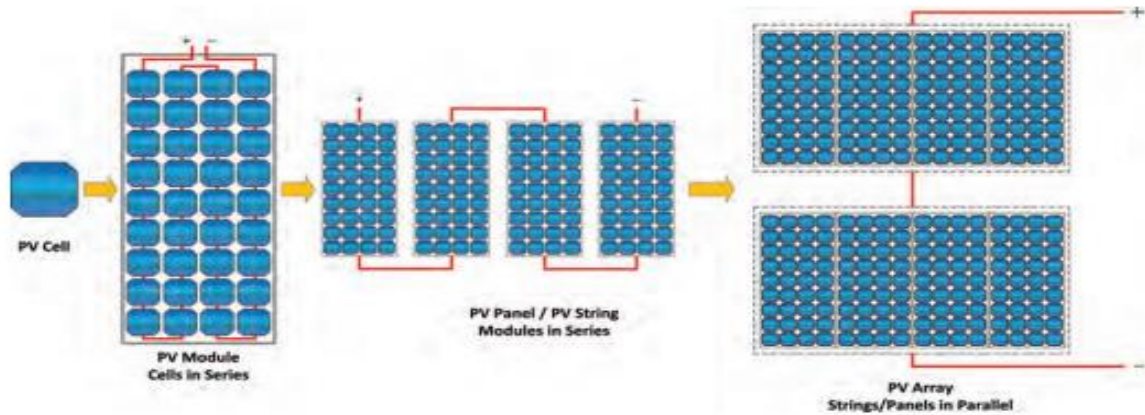


Figura 2.4. La celda, el módulo, el panel y el conjunto fotovoltaico para aplicaciones de campo. Fuente: (Tanrioven, 2023)

Un módulo fotovoltaico típico de 18 V se logra mediante la conexión en serie de 36 celdas. Hoy en día, los módulos de 36 V se utilizan ampliamente y se obtienen mediante una conexión en serie de 72 celdas. El rendimiento de un módulo fotovoltaico generalmente se clasifica según su potencia máxima de DC [vatios] según STC (Tanrioven, 2023).

2.3 Modelado de sistemas fotovoltaicos y características eléctricas de los sistemas fotovoltaicos

Hay varios factores eléctricos y ambientales que afectan el rendimiento de un sistema fotovoltaico. Considerar todos los parámetros del sistema fotovoltaico en un modelo aumenta la complejidad del problema y hace que la solución sea un desafío. Por esta razón, existen diversos modelos en la literatura desde un modelo ideal hasta modelos simplificados e incluso modelos más sofisticados. Por lo tanto, los modelos fotovoltaicos comúnmente utilizados se tratan en las siguientes secciones (Tanrioven, 2023).

2.3.1 Modelo fotovoltaico ideal

Un modelo de circuito ideal para una celda fotovoltaica consta de una fuente de corriente ideal en paralelo con un diodo real, como se muestra en la figura 2.5. La fuente actual en el modelo proporciona corriente en proporción a la radiación solar incidente en la superficie de la celda. El voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y la corriente de cortocircuito (I_{sc}), como se ilustra en la Figura 2.6, son dos parámetros importantes para determinar el rendimiento de un sistema fotovoltaico y su ecuación característica. Si los terminales de la célula fotovoltaica se dejan abiertos, no fluye corriente a través de los terminales fotovoltaicos. En

este caso, el voltaje en los terminales fotovoltaicos es igual al voltaje de circuito abierto ($V=V_D=V_{OC}$). De manera similar, si los terminales de la celda fotovoltaica están en cortocircuito, la corriente de cortocircuito fluirá a través de los cables en cortocircuito. En este caso, la corriente fotovoltaica es igual a la corriente de cortocircuito ($I=I_{SC}$) (Tanrioven, 2023).

Ahora, a partir de la ley de Kirchoff, podemos escribir la ecuación característica para el circuito equivalente ideal de la celda fotovoltaica que se muestra en la Figura 2.5 de la siguiente manera (Tanrioven, 2023).

$$I=I_{sc}-I_D$$

Ec-1

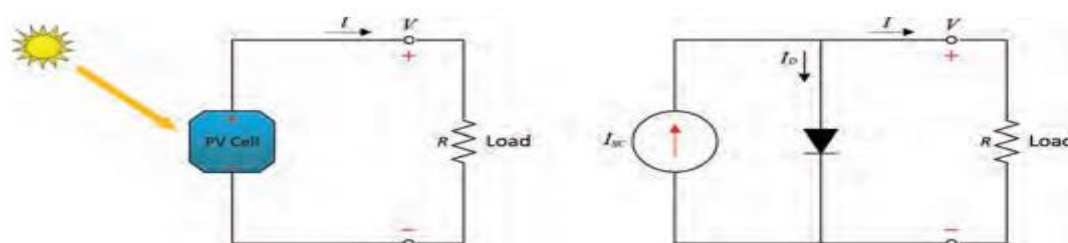


Figura: 2.5. Modelo de un circuito ideal de una celda FV. Fuente: (Tanrioven, 2023)



Figura: 2.6 Voltaje de circuito abierto y Corriente de corto circuito Fotovoltaico. Fuente: (Tanrioven, 2023)

2.3.2 Celdas fotovoltaicas con resistencia en derivación

Se puede obtener un modelo más preciso agregando una resistencia de fuga paralela R_p al modelo como se muestra en la Figura 2.7. En este caso, la corriente de cortocircuito (I_{SC}) es

igual a la suma de tres corrientes nodales, a saber, corriente de diodo (I_D), corriente de rama paralela (I_P) y corriente de carga (I) (Tanrioven, 2023).

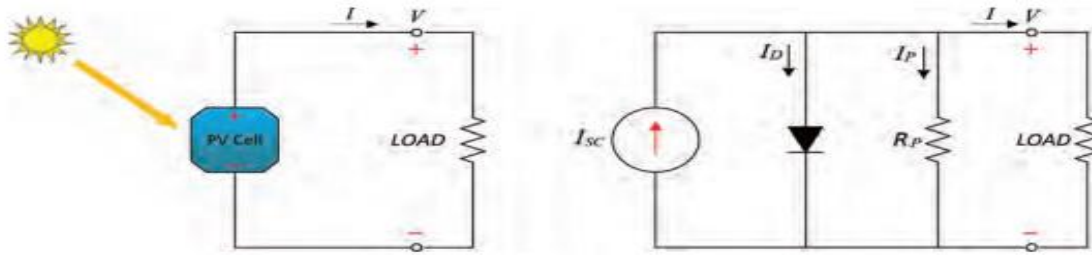


Figura 2.7. Modelo equivalente de celda fotovoltaica de diodo único con resistencia de derivación de fugas. Fuente: (Tanrioven, 2023).

$$I = I_{SC} - I_D - I_P \tag{Ec-2}$$

$$I = I_{SC} - I_D \left(e^{\frac{qV}{nkT_c}} - 1 \right) - \frac{V}{R_P} \tag{Ec-3}$$

2.3.3 La celda fotovoltaica con resistencia en serie

El modelo ideal de celda fotovoltaica se puede modificar agregando una resistencia en serie (R_S) causada por resistencias de contacto y semiconductores. El modelo de circuito eléctrico para la celda fotovoltaica con resistencia en serie se muestra en la Figura 2.8. En este caso, la corriente de cortocircuito (I_{SC}) es igual a la suma de la corriente del diodo (I_D) y la corriente de carga (I) (Tanrioven, 2023).

$$I = I_{SC} - I_D \tag{Ec-4}$$

$$I = I_{SC} - I_D \left(e^{\frac{qV_D}{nkT_c}} - 1 \right) \tag{Ec-5}$$

$$I = I_{SC} - I_D \left(e^{\frac{q(V+I \times R_S)}{nkT_c}} - 1 \right) \tag{Ec-6}$$

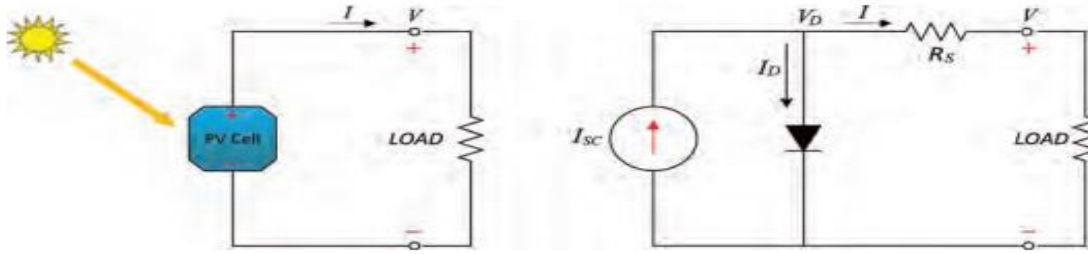


Figura 2.8. Modelo equivalente de célula fotovoltaica mono-diodo con resistencia en serie. Fuente: (Tanrioven, 2023).

2.3.4 La celda fotovoltaica con resistencia en serie y en derivación

El modelo de circuito más común para describir las características de las células fotovoltaicas se muestra en la Figura 2.9, que incluye resistencias tanto en serie como en paralelo. En este caso, la corriente de cortocircuito (I_{sc}) es igual a la suma de tres corrientes nodales, a saber, corriente de diodo (I_D), corriente de rama paralela (I_P) y corriente de carga (I). Ahora podemos escribir la siguiente ecuación I-V para el modelo (Tanrioven, 2023).

$$I = I_{sc} - I_D \left(e^{\frac{q(V+I \times R_s)}{nkT_c}} - 1 \right) - \frac{V+I \times R_s}{R_p} \quad \text{Ec-7}$$

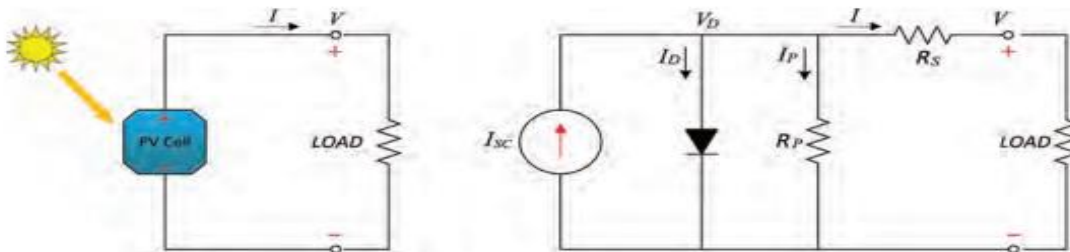


Figura 2.9. El modelo de celda fotovoltaica equivalente más utilizado con resistencia en serie y en paralelo agregadas. Fuente: (Tanrioven, 2023).

2.4 Características de las curvas de las células FV

En las secciones anteriores se obtiene una característica genérica I-V de una célula fotovoltaica. Ahora obtengamos la curva P-V de un módulo solar multiplicando los pares I-V en el mismo sistema de ejes como se muestra en la Figura 2.10. En esta curva se muestran los puntos característicos de la célula fotovoltaica. Los parámetros clave se dan en la figura 2.10, como el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la corriente de cortocircuito (I_{sc}), la corriente (I_{mp}) y el voltaje (V_{mp}) en el punto de máxima potencia (MPP), que son

puntos necesarios para la mayoría de las Aplicaciones fotovoltaicas. La potencia en MPP se designa como potencia máxima ($P_{mp}=P_{max}=P_m$) o potencia nominal (P_R), que es el producto de ($V_{mp}=V_m$) y ($I_{mp}=I_m$). De manera similar, los pares de corriente y voltaje en MPP a veces se designan como corriente nominal (I_R) y voltaje nominal (V_R), de los cuales el producto proporciona la potencia máxima (Tanrioven, 2023).

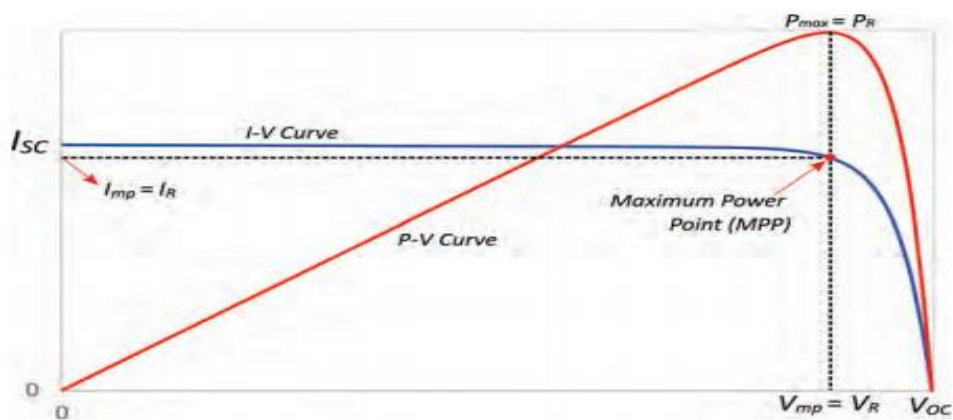


Figura 2.10 Las curvas de I-V y P-V de un módulo fotovoltaico y sus puntos característicos. Fuente:(Tanrioven, 2023).

Las curvas I-V de las células fotovoltaicas cambian continuamente según los valores de temperatura y radiación solar (Tanrioven, 2023).

Por este motivo, se definen condiciones de referencia estándar (SRC) para los módulos fotovoltaicos, lo que nos permite comparar diferentes tecnologías fotovoltaicas. SRC incluye radiación solar de 1000 W/m^2 para el espectro solar con una relación de masa de aire de 1,5 (AM 1,5) y una temperatura de 25°C . La capacidad máxima del módulo fotovoltaico bajo STC (1000 W/m^2 , espectro AM 1,5 y 25°C) se define como la potencia máxima del módulo fotovoltaico y se expresa en vatios pico (Wp) (Tanrioven, 2023).

A continuación se representaran como varia las curvas de I-V según los valores de Temperatura y radiación solar (Tanrioven, 2023).

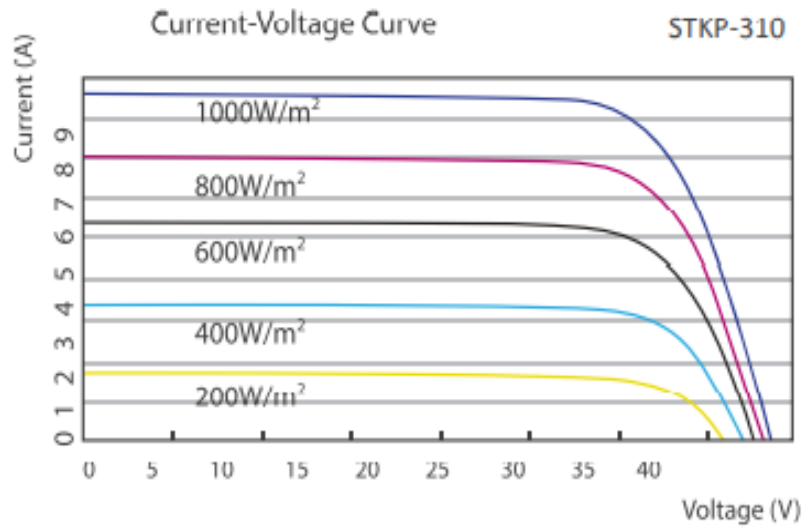


Figura 2.11 Curva de I-V a diferente Radiacion solar. Fuente: (Tanrioven, 2023).

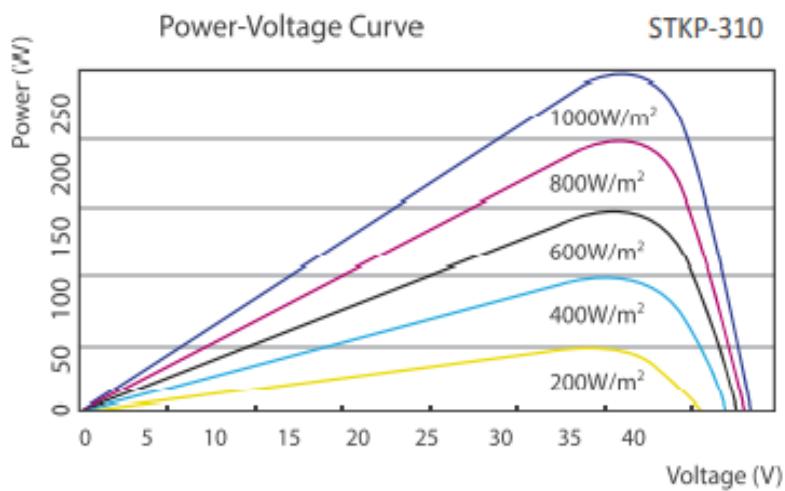


Figura 2.12 Curva de P-V a diferentes Radiacion solar. Fuente: (Tanrioven, 2023).

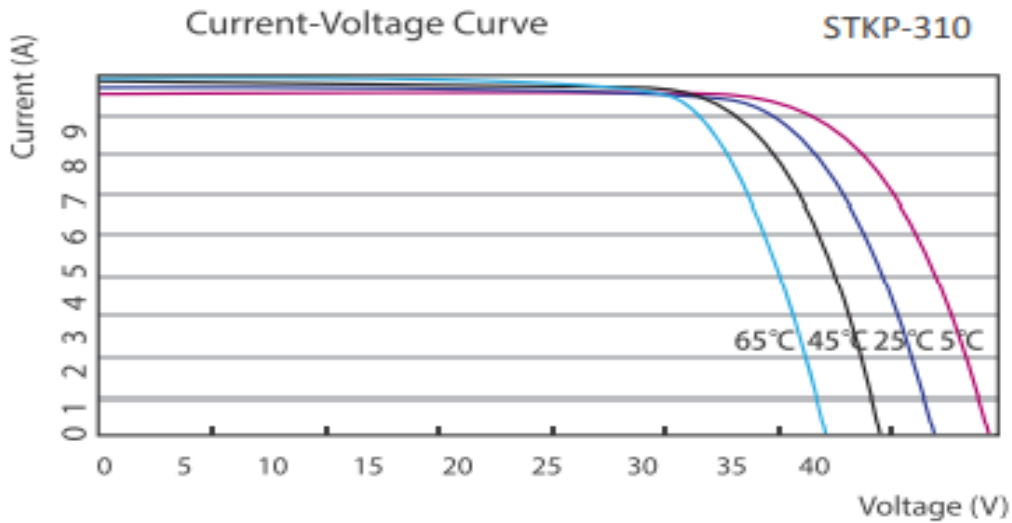


Figura 2.13 Curva de I-V a diferente temperatura. Fuente: (Tanrioven, 2023).

2.5. Parámetros de desajustes en las curvas de I-V

En este epígrafe se tratara sobre lo relacionado con parámetros de desajustes en las curvas de I-V. Los más importantes se mencionan a continuación:

- Efecto de desajuste (Conexiones en serie)

Las células o paneles fotovoltaicos generalmente no son 100% idénticos debidos a diferencias en las etapas de producción y condiciones de operación. Por este motivo, los niveles nominales de corriente y tensión de los paneles fotovoltaicos muestran ligeras diferencias en las condiciones atmosféricas reales. En la energía fotovoltaica conectada en serie, la corriente del sistema está limitada por el componente con la tasa de corriente más baja. Por ejemplo, si un panel de 4 A se conecta en serie con un panel de 3 A, la corriente general se reducirá a 3 A. De manera similar, en la energía fotovoltaica conectada en paralelo, el voltaje del sistema están limitado por el componente con el voltaje de salida más bajo. Por ejemplo, si un panel de 24 V se conecta en paralelo con un panel de 18 V, entonces el voltaje general del sistema se reducirá a 18 V. Esto se conoce como efecto de desajuste en la literatura. Por lo tanto, cualquier diferencia en las curvas I-V de las células fotovoltaicas puede provocar pérdidas por desajuste en algún punto de funcionamiento (Tanrioven, 2023).

- Efecto de desajuste (conexión en paralelo)

Las células fotovoltaicas se conectan en serie en módulos fotovoltaicos. La energía fotovoltaica conectada en paralelo generalmente existe en paneles fotovoltaicos y estructuras de matriz. Por este motivo, el efecto de desajuste en estructuras paralelas se produce al menos a nivel de módulo. Consideremos la conexión en paralelo de paneles fotovoltaicos no idénticos para mostrar el efecto de desajuste en la curva I-V. El voltaje a través de la combinación de módulos fotovoltaicos en paralelo es igual en todo momento y la corriente total de la combinación en paralelo es la suma de las corrientes de los módulos fotovoltaicos individuales. La figura 2.14 muestra el cálculo del voltaje de circuito abierto de módulos no coincidentes en paralelo. En la figura se muestra que la curva I-V de un módulo en la combinación en paralelo se refleja en el eje de voltaje para determinar el (V_{OC}) de la combinación. La conexión en paralelo de dos células fotovoltaicas con diferentes valores de corriente y voltaje se muestra en la figura 2.15. En este caso, el efecto de desajuste para el (V_{OC}) de la combinación se determina como el punto de intersección de dos curvas I-V, una de las cuales se refleja como se muestra en la figura 2.14. Para la corriente corta de un sistema conectado en paralelo, es igual a la suma de las corrientes de las dos células fotovoltaicas (Tanrioven, 2023)

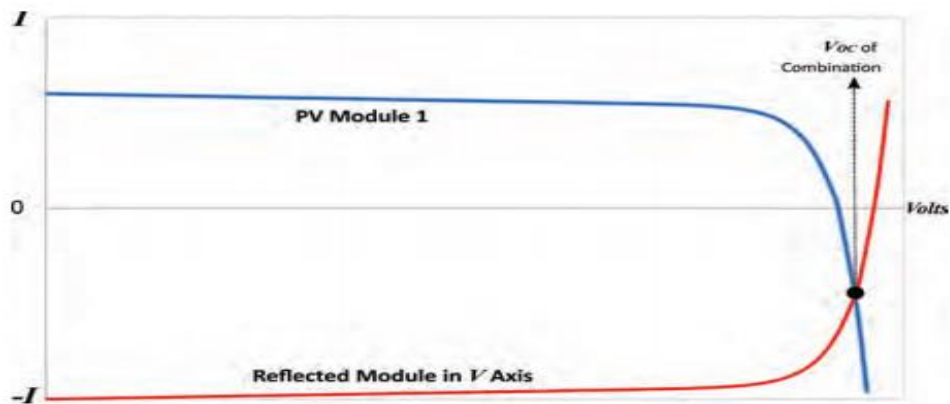


Figura 2.14. Determinación del punto V_{oc} en la conexión en paralelo de dos células fotovoltaicas con diferentes corrientes de cortocircuito y tensiones de salida. Fuente: (Tanrioven, 2023).

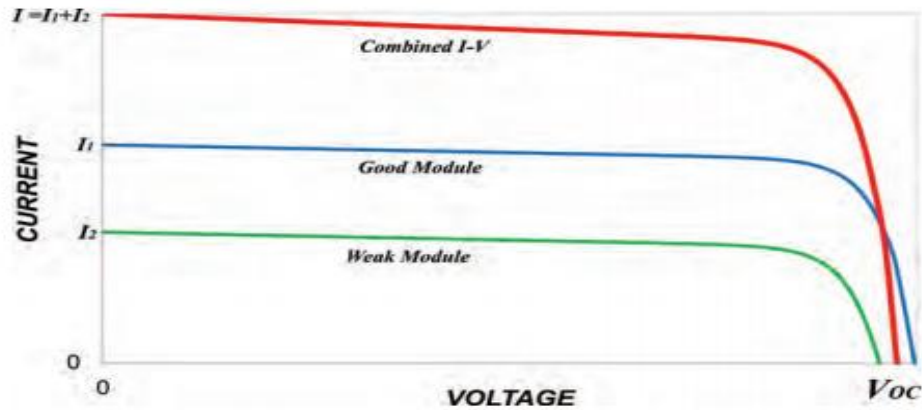


Figura 2.15. Conexión en paralelo de dos células fotovoltaicas con diferentes corrientes de cortocircuito y tenciones de salida. Fuente: (Tanrioven, 2023).

- Efecto de la temperatura

Las características I-V de las células fotovoltaicas se ven afectadas por el cambio en la temperatura de la célula. A medida que aumenta la temperatura de la celda, la tensión de circuito abierto del fotovoltaico disminuye notablemente, mientras que la corriente de cortocircuito del fotovoltaico aumenta ligeramente. Por lo tanto, a medida que aumenta la temperatura de la celda, la curva I-V de la PV se desplaza hacia la izquierda como se muestra en la figura 2.16 (Tanrioven, 2023).

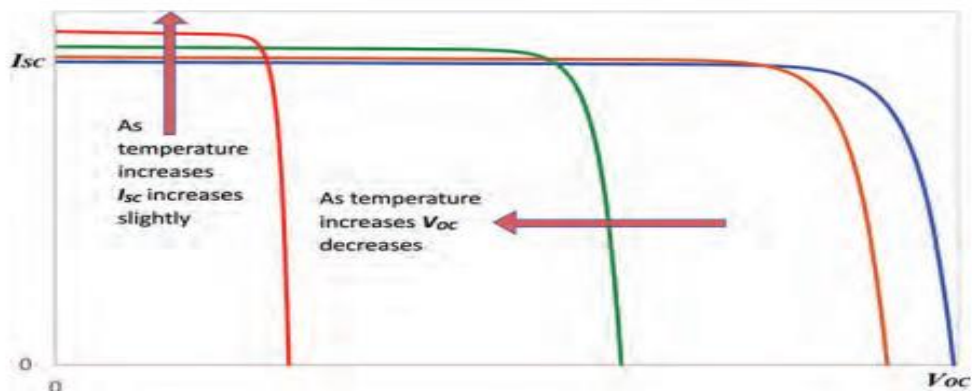


Figura 2.16 Influencia de la temperatura en una celda fotovoltaica en una curva I-V. Fuente: (Tanrioven, 2023).

La temperatura es un factor crítico a considerar en el diseño de una instalación solar fotovoltaica debido a su impacto directo en la eficiencia y el rendimiento de los módulos solares (Tanrioven, 2023).

Los módulos solares son más eficientes a temperaturas más bajas. Cuando los módulos se calientan, su eficiencia disminuye y produce menos energía para la misma cantidad de radiación solar incidente (Tanrioven, 2023).

Las más altas temperaturas también pueden acortar la vida útil de los módulos solares y otros componentes del sistema, lo que aumenta la necesidad de mantenimiento y reemplazo en el futuro. Los cambios bruscos de temperatura y los ciclos diarios de calor y frío también afectan a los materiales y pueden causar problemas de fatiga térmica (Tanrioven, 2023).

Para mitigar los efectos negativos de la temperatura, es importante tener en cuenta el diseño térmico del sistema. Esto puede incluir la selección de materiales adecuados, la ubicación y orientación de los módulos para permitir una mejor circulación de aire y la implementación de sombreado para evitar el sobrecalentamiento (Tanrioven, 2023).

Para estimar la generación de energía de los módulos fotovoltaicos, es fundamental predecir la temperatura de la celda en un módulo fotovoltaico. La temperatura ambiente, la velocidad del viento, la dirección del viento, la irradiancia total y la humedad relativa son los parámetros clave que afectan la temperatura de funcionamiento de la célula fotovoltaica (Tanrioven, 2023).

Una de las fórmulas más comunes para estimar la temperatura de las células fotovoltaicas es el enfoque especificado en la norma IEC 61215. La temperatura de la celda según IEC 61215 tiene en cuenta NOCT y la irradiancia global G y viene dada por (Ec.8) (Tanrioven, 2023).

Otro modelo importante desarrollado por Sandia National Laboratories considera la función exponencial obtenida empíricamente, que se basa en la irradiancia solar, la temperatura del aire ambiente y la velocidad del viento. Por lo tanto, el modelo térmico de Sandia se presenta como se muestra en (Ec.9) y (Ec.10), utilizando la tabla 2.1 (Tanrioven, 2023).

$$T_c = T_{amb} + \frac{(T_{noct} - 20)}{800} \times G \quad \text{Ec.8}$$

$$T_{mb} = G \times (e^{a+b \times v}) + T_{amb} \quad \text{Ec.9}$$

$$T_c = T_{mb} + \frac{G}{1000} \times \Delta T \quad \text{Ec.10}$$

Tipo de Modelo	Configuración de montaje	A	B	ΔT
Vidrio/Celda/Vidrio	Estante abierto	-3,47	-0,0594	3
Vidrio/Celda/Vidrio	Montaje en techo cerrado	-2,98	-0,0471	1
Hoja de vidrio/Celda/Polimero	Estante abierto	-3,56	-0,0750	3
Hoja de vidrio/Celda/Polimero	Espalda aislada	-2,81	-0,0455	0
Polimero/película delgada/acero	Estante abierto	-3,58	-0,113	3

- Tabla 2.1. Coeficiente empírico utilizados en el modelo térmico de Sandia. Fuente: (Tanrioven, 2023).

2.6 Parámetros de rendimiento adicionales de las células fotovoltaicas

Generalmente, los parámetros de rendimiento en una célula fotovoltaica están relacionados con los parámetros V_{oc} , I_{sc} (o J_{sc} mA / cm²), resistencias parásitas (resistencia en serie R_s , resistencia paralela R_p), eficiencia y factor de llenado (FF). Se examinarán la resistencia característica (R_o) de la eficiencia de la célula fotovoltaica y los parámetros (FF) (Tanrioven, 2023).

La resistencia característica (R_o): La resistencia característica de una célula fotovoltaica se define como la resistencia de salida de la célula en su MPP. En otras palabras, si la resistencia característica del PV es igual a la resistencia de carga, entonces la potencia máxima se transmite a la carga. La resistencia característica es un parámetro útil en el análisis y la comparación de sistemas fotovoltaicos (Tanrioven, 2023).

Por ejemplo, las resistencias parásitas en las células fotovoltaicas reducen la eficiencia de la célula solar al disipar la energía en las resistencias. Por lo tanto, puede ser un parámetro útil para comprender el impacto del mecanismo de pérdida parásita (efecto resistivo) en el

rendimiento de la energía fotovoltaica. La figura 2.17 muestra la resistencia característica en una curva I-V (Tanrioven, 2023).

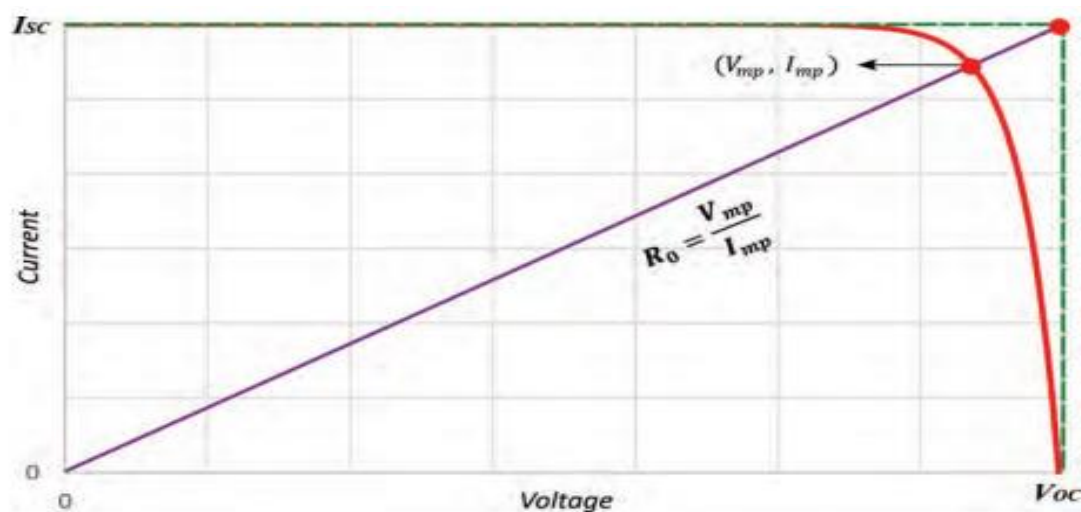


Figura 2.17 .La resistencia característica de una célula fotovoltaica se muestra en la curva I-V. Fuente: (Tanrioven, 2023).

De la Figura 2.16 se desprende claramente que la pendiente inversa de la línea da la impedancia característica de la célula fotovoltaica. La resistencia característica también se puede aproximar dividiendo el V_{oc} por el I_{sc} para la mayoría de los tipos de células fotovoltaicas.

$$R_o = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \times \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad \text{Ec. 11}$$

Factor de llenado (FF): El FF se puede definir como la relación entre la potencia máxima de una célula fotovoltaica y el producto de V_{oc} e I_{sc} . Gráficamente, es un factor para medir el nivel de cuadratura de I-V la curva de la célula fotovoltaica. Es decir, es la relación entre el área del rectángulo más grande bajo la curva I-V y el rectángulo más grande ($V_{oc} \times I_{sc}$) que cubre la curva I-V. Básicamente, cuanto mayor sea el FF, mejor será el rendimiento de la célula fotovoltaica. El FF se ilustra gráficamente en la Figura 2.17.

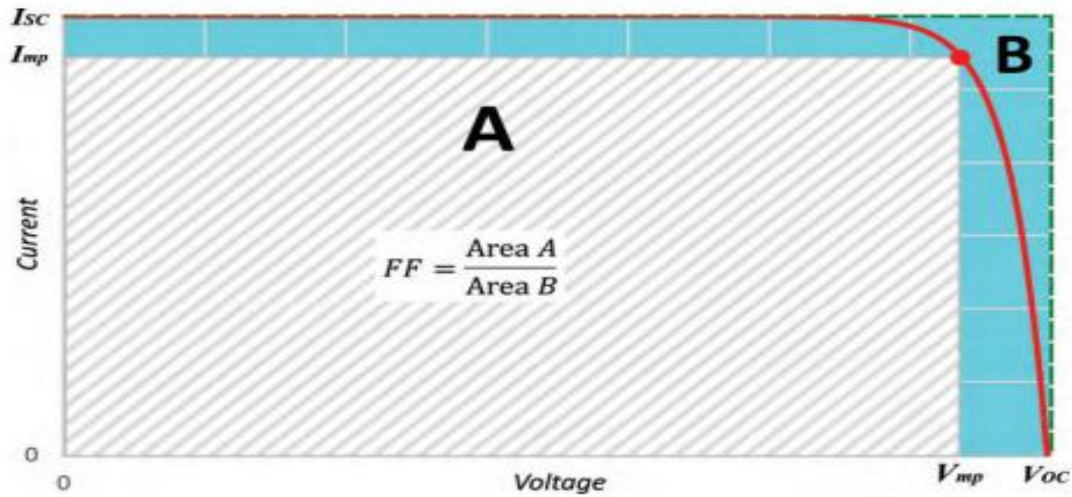


Figura 2.18. La ilustración de FF en la curva I-V. Fuente: (Tanrioven, 2023).

De la figura 2.17 se desprende claramente que el FF puede expresarse matemáticamente como:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{\eta \times A_c \times G}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad \text{Ec.12}$$

Donde η es la eficiencia de la célula, el área de la célula de A_c (m^2) y G es la radiación solar en [W/m^2]. El FF para una célula fotovoltaica de silicio es de alrededor del 80 % y, por lo general, puede cambiar en el rango del 50 % al 90 % para diferentes tecnologías fotovoltaicas. El voltaje correspondiente al valor FF teórico máximo se puede encontrar diferenciando la potencia de una célula fotovoltaica con respecto a su voltaje y resolviendo la ecuación para el voltaje como se muestra a continuación. La ecuación anterior requiere un método iterativo para la solución de V_{mp} y se necesitan ecuaciones adicionales para encontrar I_{mp} y FF. Por lo tanto, se desarrolla la siguiente expresión empírica de uso común para calcular el FF de una manera simple donde FF_0 es el factor de llenado del módulo fotovoltaico ideal sin efecto resistivo (Tanrioven, 2023).

$$FF = FF_0 \left(1 - \frac{R_s}{V_{oc}/I_{sc}} \right) = \left[\frac{\frac{q}{nkT} V_{oc} - \ln\left(\frac{q}{nkT} V_{oc} + 0,72\right)}{\frac{q}{nkT} V_{oc} + 1} \right] \left(1 - \frac{R_s}{V_{oc}/I_{sc}} \right) \quad \text{Ec.13}$$

Eficiencia de la célula fotovoltaica (η): La eficiencia de la célula fotovoltaica es el parámetro de rendimiento más utilizado para comparar las tecnologías de células

fotovoltaicas entre sí y puede definirse como la relación entre la potencia máxima de salida y la potencia de entrada debido a la radiación solar entrante en la superficie de una célula fotovoltaica. La eficiencia de la célula no solo depende de la radiación solar, sino que también depende del espectro solar, la intensidad de la luz solar incidente y la temperatura de la célula fotovoltaica. Por lo tanto, es vital controlar las condiciones en las que se mide la eficiencia para comparar el rendimiento de los sistemas de células fotovoltaicas entre sí. Por ejemplo, las células fotovoltaicas terrestres se miden en condiciones AM 1,5 a 25 °C, mientras que las células fotovoltaicas para uso espacial se miden en condiciones AM 0 (Tanrioven, 2023).

La eficiencia de un dispositivo fotovoltaico (η) puede expresarse como (Ec.4).

$$\eta = \frac{\text{Maximum Electric Power}}{\text{Input Power}} = \frac{P_{max}}{\text{Area} \times \text{Irradiancia}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{A_c \times G} \quad \text{Ec.14}$$

Donde η representa la eficiencia de la celda, V_{oc} es el voltaje de circuito abierto, I_{sc} representa la corriente de cortocircuito, FF representa el factor de llenado, A_c representa el área de superficie de la celda y G representa la radiación solar entrante.

2.7 Efecto de las condiciones ambientales sobre el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos

La potencia de salida fotovoltaica depende de varios aspectos diferentes, como el tipo de material fotovoltaico, la orientación del módulo, la radiación solar incidente y su rango espectral, la ubicación geográfica, la temperatura de funcionamiento de la celda, las resistencias parásitas y las condiciones ambientales, incluidas la nubosidad, la claridad del cielo, las precipitaciones y las nevadas. , formación de hielo, humedad, sombra y suciedad. Además, las pérdidas del sistema eléctrico, así como la eficiencia de los componentes del sistema eléctrico, como la eficiencia del inversor y las pérdidas de transmisión de energía, etc., también afectan la potencia de salida de los módulos fotovoltaicos. Este capítulo sólo pretende cubrir el efecto de las condiciones ambientales en el rendimiento de los sistemas solares fotovoltaicos. Algunos de los factores restantes que afectan el rendimiento del sistema fotovoltaico se han examinado en los capítulos anteriores y otros se examinarán en los capítulos siguientes (Tanrioven, 2023).

2.8 Efecto del viento en los sistemas fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos se pueden colocar tanto en los tejados de los edificios como en el campo, siempre expuestos al viento. El viento a veces tiene un efecto positivo en el rendimiento del sistema fotovoltaico y otras veces tiene un efecto negativo. Gracias al efecto de ventilación del viento, este enfría la temperatura de las células de los paneles fotovoltaicos y, por tanto, aumenta el rendimiento fotovoltaico. Además, el movimiento del aire (viento) reduce la humedad relativa hasta un cierto límite, lo que también provoca un ligero aumento en el rendimiento fotovoltaico. Sin embargo, el viento esparce la arena y el polvo en el aire, lo que provoca que el polvo y la arena se acumulen en la superficie del panel fotovoltaico. El flujo de viento también tiene efectos negativos sobre el sistema mecánico de los paneles fotovoltaicos. Debido al comportamiento aleatorio del viento, la distribución de presión varía todo el tiempo y es diferente en cada punto de la superficie del panel. Especialmente los vientos de más de 80 km/h pueden causar daños a los paneles fotovoltaicos. Debido a las fluctuaciones de las cargas de viento, puede producirse una avería total si se alcanza un determinado nivel de frecuencia de vibración. Como se analiza en la literatura, muchos patrones de viento son circulares (vórtices) y provocan una fuerza de sustentación debajo de los paneles fotovoltaicos. Por lo tanto, las partes más vulnerables de un conjunto fotovoltaico son las esquinas y, a menudo, dependen de la posición y orientación de los paneles en el entorno. Es por eso que todos los paneles fotovoltaicos deben someterse a pruebas para resistir determinadas cargas de viento (Tanrioven, 2023).

2.9 Efecto de la lluvia y la humedad en los sistemas fotovoltaicos

Las precipitaciones tienen un impacto significativo en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos debido a sus efectos de eliminación de polvo y enfriamiento en los paneles fotovoltaicos. El efecto de limpieza debido a la lluvia será mayor cuando el ángulo de inclinación del panel sea superior a 10°. Por lo tanto, es muy importante limpiar los paneles manualmente para reducir las pérdidas de suciedad durante largos períodos secos. Según los estudios de la literatura, se recomienda limpiar los paneles fotovoltaicos una vez a la semana o cada dos semanas, dependiendo del nivel de suciedad. Un efecto negativo de la lluvia sobre el panel fotovoltaico está relacionado con la humedad relativa. En general, las precipitaciones aumentan localmente la humedad relativa como resultado de la evaporación. El principal efecto de la humedad sobre las células solares fotovoltaicas es la

corrosión. Naturalmente, las temperaturas más altas y los niveles de humedad más altos aceleran el proceso de corrosión. El efecto corrosivo se produce principalmente en el contacto titanio-plata de las células fotovoltaicas en ambientes húmedos de larga duración. El aumento de la humedad relativa también hace que la superficie se vuelva pegajosa y, en consecuencia, se acumula suciedad y polvo en la superficie del panel fotovoltaico. Por lo tanto, una superficie pegajosa debido al aumento de los niveles de humedad da como resultado una caída en la eficiencia de conversión de los módulos. Se ha demostrado que la humedad relativa en las proximidades de los sitios fotovoltaicos provoca la degradación de la corriente, el voltaje, la potencia y la eficiencia de conversión de las células fotovoltaicas. Aunque muchos estudios muestran este efecto en la literatura, no existe una formulación generalizada para el efecto de la humedad en diferentes tecnologías fotovoltaicas. Sin embargo, según los estudios publicados, el efecto de la humedad sobre el rendimiento fotovoltaico puede ser significativo. Por ejemplo, puede producirse una disminución del 50 % en la eficiencia de la celda si la humedad relativa alcanza entre el 60 % y el 95 % (Tanrioven, 2023).

2.10 Conclusiones parciales

1. Los modelos físicos de las celdas fotovoltaicas están determinados por la resistencia en serie(R_s), la resistencia en paralelo(R_p), el factor de idealidad, la corriente de cortocircuito(I_{sc}) y el voltaje de circuito abierto(V_{oc}).
2. Los parámetros de los modelos físicos de los sistemas fotovoltaicos son características eléctricas que se utilizan para entender, medir y optimizar el rendimiento de las placas fotovoltaicas como la Temperatura Nominal de Operación de la Célula(NOCT), las Horas de Sol Pico (HSP), el Punto de Máxima Potencia (MPP), las curvas de panel solar(curva I-V), el Factor de Forma(FF), el voltaje de circuito abierto(V_{oc}) y la corriente de cortocircuito(I_{sc}).
3. Entre los tipos de modelos podemos observar, el modelo fotovoltaico ideal, el modelo con resistencia en paralelo y en serie. El modelo de celda fotovoltaica equivalente más utilizado es la que tiene resistencia en serie y en paralelo agregadas.

4. Se determinan las variables meteorológicas tanto temperatura ambiente radiación solar la velocidad del viento, la lluvia y la humedad como afecta negativamente a la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos.

CAPÍTULO 3. Evaluación de la eficiencia de los paneles fotovoltaico ante las diferentes condiciones meteorológicas.

Mediante los resultados obtenidos a través de los cálculos realizados en Matlab, daremos a conocer las gráficas y las diferentes eficiencias, analizando cuál es la mejor alternativa para la implementación de los paneles solares en diferentes condiciones meteorológicas. También podemos observar cual es el % de eficiencia relativa que cae a un determinado rango, por la siguiente ecuación:

$$E_r = (E_{max} - E_{min}) \div E_{max} \times 100 \quad \text{Ec.15}$$

La temperatura nominal de funcionamiento de la celda (NOCT) es en las condiciones de 800W/m², con una masa de aire de AM1.5, a velocidad del viento de 1m/s y temperatura ambiente 20°C.

3.1 Panel Monocristalino

En la tabla 3.1 se muestran los parámetros necesarios que brinda el fabricante, utilizados para obtener la eficiencia del Panel Monocristalino. Para más información se evalúa el mismo a diferentes condiciones meteorológicas, tanto a temperatura como radiación solar (CanadianSolar, 2020).

Parámetros del Fabricante	
Parámetros de Catálogos	
Numero de celdas	144
Voltaje en circuito abierto.(V)	Vocs=46.2
Corriente en corto circuito.(A)	Iscs=9.36
Voltaje en el punto de máxima potencia.(V)	Vmps=38.3
Corriente en el punto de máxima potencia.(A)	Imps=8.76
Coefficiente de temperatura de corriente de cortocircuito(°C)	CIsc=0.05
Coefficiente de temperatura de voltaje de circuito abierto. (°C).	CVoc=-0.27
Temperatura Nominal de Operación	NOCT=42
Área de la superficie del panel.(m ²)	2108*1048/ 1e6

Parámetros del Modelo
$I_o=8.16e-13$ A.
$I_L=9.38$ A
$R_s=0.3406$ Ohm
$R_{sh}=167.2662$ Ohm
Factor= 0.4157
Parámetros que debe cumplir para diferentes condiciones meteorológicas
Irradiación= 100:50:1000.
Temperatura ambiente= 10:1:35.

Tabla 3.1 Datos de los parámetros que brinda el fabricante del Panel Monocristalino.

Fuente: Elaboración Propia.

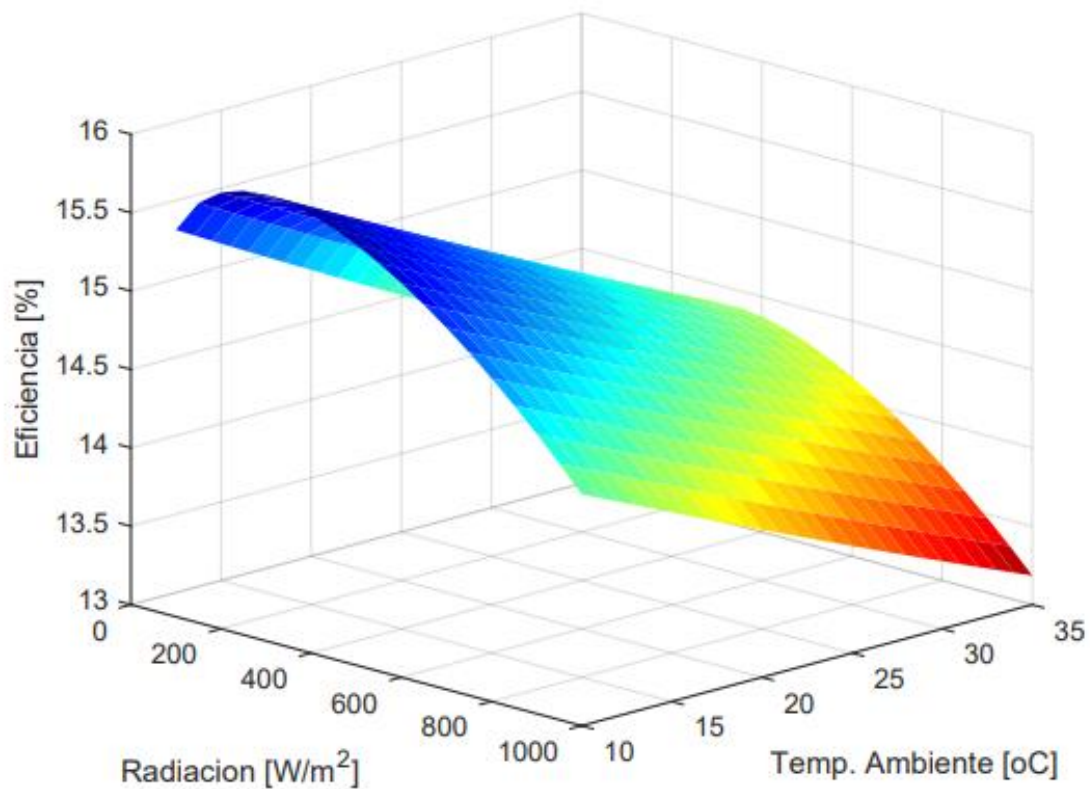


Figura 3.1. Eficiencia del panel de silicio monocristalino. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en la figura 3.1 que la eficiencia estándar es de 15.19%. Se considera que la eficiencia varía entre un 13.2% a 15.2%, por tanto la eficiencia relativa cae en un 13% con un aumento de 20°C, desde 15 °C a 35 °C.

A medida que la temperatura aumenta, la eficiencia disminuye. Sin embargo, su caída de eficiencia con el calor es más baja en comparación con los paneles policristalinos. A medida que aumenta la irradiación, la temperatura de la celda también aumenta, lo que lleva a una mayor pérdida de eficiencia.

3.2 Panel Policristalino

En la tabla 3.2 se muestran los parámetros necesarios que brinda el fabricante, utilizados para obtener la eficiencia del Panel Policristalino. Para más información se evalúa el mismo a diferentes condiciones meteorológicas, tanto a temperatura como radiación solar (Solarever, 2021).

Parámetros del Fabricante	
Parámetros de Catálogos	
Numero de celdas	72
Voltaje en circuito abierto.(V)	Vocs=45.88
Corriente en corto circuito.(A)	Iscs=8.60
Voltaje en el punto de máxima potencia.(V)	Vmps=39.04
Corriente en el punto de máxima potencia.(A)	Imps=8.10
Coeficiente de temperatura de corriente de cortocircuito(°C)	CIsc=-0.05
Coeficiente de temperatura de voltaje de circuito abierto. (°C).	CVoc=-0.34
Temperatura Nominal de Operación	NOCT=43.6
Área de la superficie del panel.(m ²)	1990*991/ 1e6
Parámetros del Modelo	
Io=3.06e-11 A.	
IL=8.60 A	
Rs=0.1711 Ohm	

Rsh=296.8331 Ohm
Factor= 0.9415
Parámetros que debe cumplir para diferentes condiciones meteorológicas
Irradiación= 100:50:1000.
Temperatura ambiente= 10:1:35.

Tabla 3.2 Datos de los parámetros que brinda el fabricante del Panel Policristalino. Fuente: Elaboración Propia.

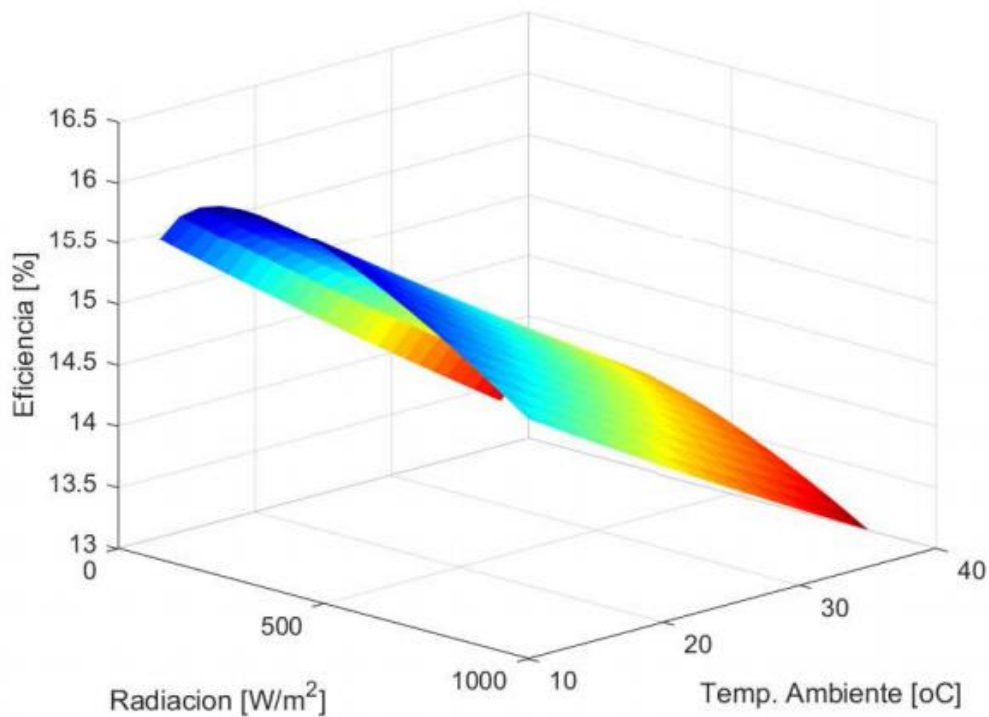


Figura 3.2. La eficiencia del panel de silicio policristalino. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en esta figura 3.2 que la eficiencia estándar es de 16.03%. Se considera que la eficiencia varía entre un 13% a 15.3%, por tanto la eficiencia relativa cae en un 15% con un aumento de 20°C, desde 15 °C a 35 °C.

La caída de la eficiencia del panel policristalino se debe al aumento de la temperatura ya que es similar a los paneles monocristalinos porque presenta coeficiente de temperatura más bajos por lo que se necesita menos energía para producir electricidad y la demás queda en la capa convirtiéndola en calor, provocando que aumente la temperatura de la celda y disminuya la eficiencia., aunque generalmente podrían ser un poco más sensible a los aumento de temperatura. Esto significa que su rendimiento se ve afectado en condiciones de mucho calor y radiación elevada.

3.3 Panel Película delgada.

En la tabla 3.3 se muestran los parámetros necesarios que brinda el fabricante, utilizados para obtener la eficiencia del Panel de película delgada. Para más información se evalúa el mismo a diferentes condiciones meteorológicas, tanto a temperatura como radiación solar (Surana Solar, 2024).

Parámetros del Fabricante	
Parámetros de Catálogos	
Numero de celdas	108
Voltaje en circuito abierto.(V)	Vocs=93.10
Corriente en corto circuito.(A)	Iscs=1.63
Voltaje en el punto de máxima potencia.(V)	Vmps=71.50
Corriente en el punto de máxima potencia.(A)	Imps=1.47
Coeficiente de temperatura de corriente de cortocircuito(°C)	CIsc=0.010
Coeficiente de temperatura de voltaje de circuito abierto. (°C).	CVoc=-0.29
Temperatura Nominal de Operación	NOCT=46.5
Área de la superficie del panel.(m ²)	1429*1109/ 1e6
Parámetros del Modelo	
Io=8.22e-11 A.	
IL=1.63 A	
Rs=4.1043 Ohm	
Rsh=4101.5601 Ohm	

Factor= 2.3159
Parámetros que debe cumplir para diferentes condiciones meteorológicas
Irradiación= 100:50:1000.
Temperatura ambiente= 10:1:35.

Tabla 3.3 Datos de los parámetros que brinda el fabricante del Panel películas delgadas.
Elaboración Propia.

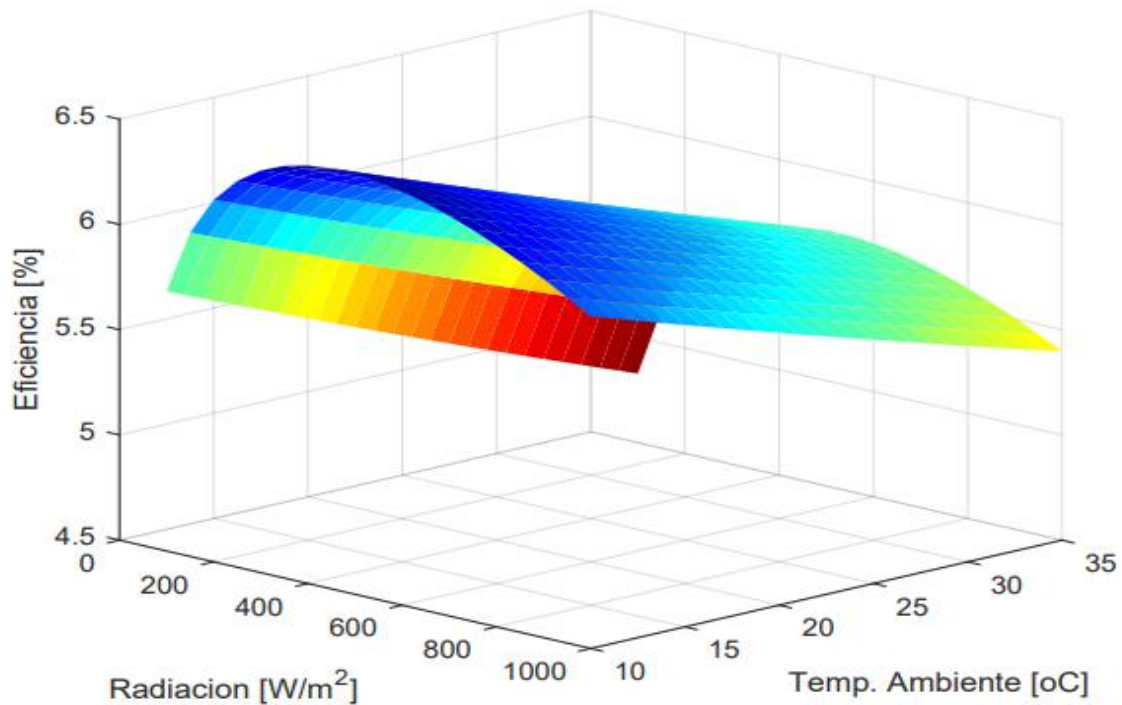


Figura 3.3. La eficiencia del panel de películas delgadas. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en esta figura 3.3 que la eficiencia estándar es de 6.63%. Se considera que la eficiencia varía entre un 4.8% a 5.5%, por tanto la eficiencia relativa cae en un 12.7% con un aumento de 20°C desde 15°C a 35°C.

En el panel de película delgada se observa que también sufren una disminución de eficiencia con el aumento de la temperatura, su rendimiento se ve afectado de manera diferente a los paneles de silicio cristalinos. Ya que estos presentan un coeficiente de temperatura alta por lo que se necesita más energía para producir electricidad. Esto

significa que, en condiciones extremas de calor, podría mantener una eficiencia más alta en comparación con los paneles de silicio.

3.4 Conclusiones parciales

1. En los paneles solares de silicio la eficiencia disminuye significativamente con el aumento de la temperatura.
2. En los sistemas fotovoltaicos tipo películas delgadas no es tan significativo la disminución de la eficiencia con respecto al aumento de la temperatura.
3. Con el mismo aumento de temperatura tiene menor pérdida de eficiencia relativa el panel de películas delgadas y el que mayor pérdida de eficiencia relativa es el panel de silicio policristalino.
4. Con el aumento de la radiación y la temperatura ambiente los paneles de silicio disminuye su eficiencia en cambio los paneles de película delgada no sufren cambios bruscos de baja eficiencia.
5. El aumento de temperatura en los paneles fotovoltaicos, independientemente del tipo, generara una disminución en la eficiencia de conversión de energía. La selección del tipo de panel dependerá del entorno específico y de los requisitos del sistema, considerando que los paneles monocristalinos son más eficientes en general, los policristalinos son más económicos, y los de película delgada pueden ser más apropiados en climas cálidos o con radiación variable.

CONCLUSIONES GENERALES

De esta investigación se obtuvieron los siguientes resultados:

1. La revisión bibliográfica se reportan limitados estudios sobre los efectos que producen las condiciones meteorológicas de países tropicales en el desempeño de PV demostrando que es necesario realizar una evaluación del desempeño de los sistemas fotovoltaico en diferentes condiciones meteorológica para analizar cómo cambia la eficiencia en el tiempo.
2. Se identificaron los modelos físicos de las celdas fotovoltaicas los cuales estan determinados por la resistencia en serie(R_s), la resistencia en paralelo(R_p), el factor de idealidad, la corriente de cortocircuito(I_{sc}) y el voltaje de circuito abierto(V_{oc}).
3. Los parámetros de los modelos físicos de los sistemas fotovoltaicos son características eléctricas que se utilizan para entender, medir y optimizar el rendimiento de las placas fotovoltaicas como la Temperatura Nominal de Operación de la Celula(NOCT), las Horas de Sol Pico (HSP), el Punto de Maxima Potencia (MPP), las curvas de panel solar(curva I-V), el Factor de Forma(FF), el voltaje de circuito abierto(V_{oc}) y la corriente de cortocircuito(I_{sc}).
4. Los resultados obtenidos mediante los experimentos y cálculos realizados en Matlab, dieron a conocer con el mismo aumento de temperatura tiene menor perdida de eficiencia relativa el panel de películas delgadas y el que mayor pérdida de eficiencia relativa es el panel de silicio policristalino.

RECOMENDACIONES.

Como perspectivas para el trabajo futuro se recomienda seguir las siguientes pautas:

1. Investigar otras variables meteorológicas que afecten a los paneles solares, desarrollando experimentos en escenarios reales. Sería interesante considerar, por ejemplo, la influencia de la velocidad del viento.
2. Utilizar el modelo físico de doble diodo que pudiera ser más exacto.
3. Utilizar el modelo de Sandia ya que esta recoge parámetros como el viento.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdulameer Abbood, A. (2016). Temperature effect on power drop of different. Photovoltaic modules. Journal of Engineering., 22, Article 5.
- Agency, I. E. (2010). Technology roadmap, solar photovoltaic energy. http://www.iea.org/papers/2010/pv_roadmap.pdf
- Akinyele, D. O. R., R. K. (2016). Techno-economic and life cycle environmental performance analyses of a solar photovoltaic microgrid system for developing countries. Energy., 160-179.
- Bracco, S. D., F. (2017). Smart microgrid monitoring : evaluation of key performance. Indicators for a pv plant connected to a lv microgrid.
- CanadianSolar. (2020). HiKu, super high power mono perc module .[http:// www.canadiansolar.com/support@canadiansolar.com](http://www.canadiansolar.com/support@canadiansolar.com)
- CubaDebate. (2024). El camino es avanzar en la soberanía energética con el gas y el crudo nacionales y las energías renovables.<http://www.cubadebate.cu/noticias/2014/03/13/ministro-de-energía-y-minas-el-camino-es-avanzar-en-la-soberaniarenovables/comments>.
- Dabou, R. B., F.; Hadj Arab, A. (2016). Monitoring and performance analysis of grid connected photovoltaic under different climatec conditions in south algeria. Energy Conversión and Management, 200-206.
- García Hortelano, A. (2023). Aplicación de la norma iec-61724 a la caracterización energética de sistemas fotovoltaicos utilizando mysql.
- Han, A. (2013). Ventajas y desafios de la energia solar fotovoltaica. <https://sites.lafayette.edu/egrs352-sp14-pv/technology/advantages-and-challenges-with-solar-pv>.
- Humada Mojgan, A. M. (2016). Performance evaluation of two pv technologies(c-si and cis) for building integrated photovoltaic based on tropical climate condition: a case study in malaysia. Energy and buildings.
- Humada Mojgan, A. M. A., A. M. (2017). Modeling and characterization of a grid-connected photovoltaic system under tropical climate conditions. Renewable and sustainable Energy Reviews.

- Ismail, H. M., S. (2013). Comparative performance of grid integrated solar photovoltaic systems under the tropical environment.
- Kamal, M. A., I. (2021). Performance assesment of standalone solar photovoltaic system for different load profiles in the rural area.
- Ma, T. Y., H.; Lu, L. (2017). Long tern performance analysis of a standalone photovoltaic system under real conditions. *Applied Energy* 320-331.
- News, B. (2014). China targets 70 gigawatts of solar power to cut coal reliance. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2014-05-16/china-targets-70-gigawatts-of-solar-power-to-cut-coal-reliance>.
- Osorio Laurencio, L. Montero Laurencio, R.(2015). Análisis energético de un sistema fotovoltaico integrado a una cubierta plana horizontal. *Ingeniería Energética.*, 37(1), 45-54.
- Saber, E. M. E. L., S. (2014). Pv(photovoltaics) performance ealuation andsimulation-based energy yield prediction for tropical buildings. *Energy XXX.*, 1, Article 8.
- Srivastava, R. M., A. (2022). Performance evaluation of grid connected solar powered microgrid: a case study. *Frontiers in Energy Research*.
- Solarever. (2021). Catálogo de productos. <https://solarever.com.mxPDF>.
- Surana Solar. (2024). Thin Film 100WP-150WP. <https://www.ensolar.com>.
- Tanrioven, M. (2023). Photovoltaic systems engineering for students and professionals.
- Ustun, T. S. N., Y. (2019). Performance analysis of pv panels based on different technologies after two years of outdoor exposure in fukushima, japan. *Renewable Energy.*, 159-178.
- Zambroni de Souza, A. C. C., M. (2019). Microgrids design and implementation.