



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Caracterización de módulos fotovoltaicos de diversas tecnologías mediante la automatización de un sistema de medida instalado en un seguidor solar.

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Jonathan Tejada Mosquea

Director: José Abad López

Codirector: Antonio Urbina Yeregui



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Cartagena, 25 de septiembre de 2018

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres que me han apoyado en cada decisión que tomo en mi vida. A la escuela de industriales que me ha dado la oportunidad de cursar el master de energías renovables en esta prestigiosa universidad, al ministerio de educación ciencia y tecnología (MESCyT) por haberme facilitado la beca económica para tales fines, la cual me ha permitido venir aquí a tantos kilómetros de distancia de mi tierra natal.

Debo además un especial reconocimiento a mi director, Dr. José Abad López y codirector Dr. Antonio Urbina Yeregui, por su paciencia, apoyo y disponibilidad siempre que la necesité. “Continúen así, ustedes son ejemplos a seguir”.

Le agradezco enormemente a Carlos Toledo (estudiante de doctorado), el cual brindó su mano amiga en cada momento, dándome consejos, recomendaciones y ayudándome en todo momento que le necesité.

Finalmente, quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que han vivido conmigo la realización de este trabajo fin de máster, les agradezco el haberme brindado todo el apoyo, colaboración, ánimo, y sobre todo el cariño y la amistad sincera.

Índice De Contenido

RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN.....	7
1.1 SITUACIÓN ENERGÉTICA ACTUAL	7
1.2 EL ESTADO DE LA ENERGÍA SOLAR EN ESPAÑA	9
1.3 EL AUTOCONSUMO Y EL IMPUESTO AL SOL	11
1.4 FUTURO DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA.....	11
FUNDAMENTOS DE LA RADIACIÓN SOLAR.....	13
2.1 ENERGÍA SOLAR	13
2.1.1 EL SOL	13
2.1.2 ESPECTRO SOLAR.....	13
2.2 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR.....	16
2.3 SEGUIMIENTO SOLAR	17
2.3.1 SEGUIDOR SOLAR DE UN EJE	18
2.3.2 SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES	18
ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	20
3.1 EL EFECTO FOTOVOLTAICO	20
3.2 CELDA SOLARES.....	20
3.2 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	21
3.3 TIPOS DE CELDAS FOTOVOLTAICAS	21
3.3.1 TECNOLOGÍAS DE MÓDULO FOTOVOLTAICO DE SILICIO CRISTALINO	22

3.3.2	SILICIO MONOCRISTALINO	22
3.3.3	SILICIO POLICRISTALINO	23
3.4	TECNOLOGÍAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE LÁMINA DELGADA	23
3.4.1	SILICIO AMORFO	23
3.4.2	TELURO DE CADMIO	24
3.5	ORGÁNICAS CON CAPA ACTIVA DE P3HT: PCBM	24
	OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DE TRABAJO	26
4.1	OBJETIVO GENERAL	26
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
4.3	METODOLOGÍA IMPLEMENTADA EN EL PROYECTO	27
4.4	PUESTA EN MARCHA DEL SEGUIDOR SOLAR	27
4.5	MODELO MATEMÁTICO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO UTILIZANDO MATLAB Y SIMULINK.....	32
4.6	CIRCUITO MATEMÁTICO EQUIVALENTE DE UNA CELDA SOLAR.....	34
4.7	CURVA CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO DE TELURO DE CADMIO.....	39
4.8	REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE CAMPO TOMADOS EN EL MÓDULO DE TELURO DE CADMIO EN EL SEGUIDOR DE DOS EJES	44
4.9	AFECTACIÓN DE LA R_s Y R_p EN EL MÓDULO DE TELURO DE CADMIO	50
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
	BIBLIOGRAFÍAS.....	58
	ANEXOS	60

El presente trabajo se realiza con el fin de exponer la puesta en marcha de un sistema automatizado de medida para caracterizar módulos fotovoltaicos de diversas tecnologías en experimentos “*outdoor*” sobre un seguidor solar. Adicionalmente se han tomado datos ambientales a partir de una estación meteorológica in situ para analizar la eficiencia y el rendimiento de los módulos en diferentes condiciones de operación. Las tecnologías estudiadas son: silicio cristalino, silicio amorfo, teluro de cadmio y tecnología orgánica con capa activa de P3HT: PCBM.

Antes de presentar los resultados se explicará en algunos capítulos los conceptos y terminología útiles que serán vitales para más tarde seguir el desarrollo de este trabajo con mayor facilidad. En el primer capítulo se hace una introducción de la situación energética actual en el mundo y sobre todo en España en el ámbito de la energía fotovoltaica y su futuro próximo. En un breve segundo capítulo se plasman los conceptos de energía solar, espectro solar, se habla además de los instrumentos utilizados para medir la potencia del sol y de aquellos utilizados para seguir la posición aparente del sol en todo momento.

En el tercer capítulo se desarrolla el concepto de efecto fotovoltaico, celda solar y se comenta brevemente acerca de las tecnologías fotovoltaicas a tratar en este trabajo. Ya en un cuarto apartado se explican los objetivos y metodología de este trabajo; además se detalla paso a paso lo que se ha realizado para alcanzar los resultados obtenidos. También se expone en detalle la realización de un simulador de módulos fotovoltaicos en Matlab/Simulink y finalmente se muestran algunos de los resultados conseguidos en experimentos de campo en los módulos sobre el seguidor solar.

Ya finalmente en el capítulo 5 se dan las conclusiones obtenidas y se dan recomendaciones para futuras mejoras de este trabajo.

INTRODUCCIÓN

1.1 SITUACIÓN ENERGÉTICA ACTUAL

La creciente demanda mundial de energía, las preocupaciones sobre la contaminación ambiental y los recursos naturales agotables ha aumentado enormemente el interés de las personas en fuentes de energías renovables.

Esta es la razón por la cual aparecen cada vez más regulaciones y acuerdos a nivel nacional e internacional, que luchan por disminuir el consumo de energía de fuentes no renovables y que buscan evitar efectos dañinos e irreversibles al planeta. Entre ellos se puede citar: el conocido Acuerdo de París y el plan de energías renovables (PER 2011-2020). Los cuales fijan objetivos claros que se deben cumplir con el uso de fuentes de energías limpias [1, 2].

Entre los diversos recursos renovables disponibles, se encuentra la energía solar fotovoltaica (PV, por sus siglas en inglés). La cual tiene las perspectivas más prometedoras para una utilización generalizada debido a sus diversas ventajas, como son la ausencia de contaminación acústica debido a que no posee partes móviles, la ausencia de emisión de gases nocivos o de efecto invernadero y la posibilidad de instalarse como soporte en sistemas aislados o sistemas conectados a la red en función de su ubicación, aplicación e infraestructura disponible.

Los sistemas fotovoltaicos aislados proporcionan una buena solución de energía en áreas remotas donde el suministro de energía de la red no se extiende por completo. Es el caso de comunidades en Kenia [3] o Birmania [4], entre otros ejemplos. Las aplicaciones que involucran sistemas fotovoltaicos independientes han visto un aumento en los últimos años tanto en países en desarrollo como en países en vía de desarrollo.

A inicios de 2018 había instalados 402,5 GW fotovoltaicos en el mundo. De los cuales, 131 GW en China, 51 GW en EEUU, 49 GW en Japón, 42 GW en Alemania, 19,70 GW en Italia y 4,7 GW en España [5].

2017		
Países	Acumulada (GW)	Acumulada (%)
Rep. Popular China	131,00	33%
Estados Unidos	51,00	13%
Japón	49,00	12%
Alemania	42,00	10%
Italia	19,70	5%
India	18,30	5%
Reino Unido	12,70	3%
Francia	8,00	2%
Australia	7,20	2%
España	4,70	1%
Resto del mundo	58,00	14%
Total mundial	402,5	100%

Figura 1. Potencia solar acumulada en los principales países del mundo (IEA-PVPS, 2018).

Aunque su inversión inicial es alta, la energía fotovoltaica tiene un menor coste de funcionamiento y mantenimiento que otras formas de energías. Los resultados de diferentes estudios coinciden en señalar que el coste de la energía solar fotovoltaica resulta similar, y en algunos casos inferior, al de otras tecnologías de producción de electricidad renovables y convencionales. El coste medio de la energía producida (conocido como LCOE, siglas del término inglés “*Levelized Cost of Electricity*”) para grandes plantas fotovoltaicas se estima en el rango 0,04-0,07 €/kWh en España.

1.2 EL ESTADO DE LA ENERGÍA SOLAR EN ESPAÑA

El hecho de que una fuente de energía limpia y renovable como la energía solar no tenga un mayor protagonismo en la realidad social de España, se debe principalmente a las diferentes legislaciones existentes al respecto a lo largo de las últimas décadas.

Partiendo de la base de que España es uno de los países europeos con más horas de sol al año (figura 2), era normal que desde el gobierno se apostase desde un principio por esta tecnología para la obtención de energía eléctrica barata. Y de hecho así fue en los inicios, llegando a ser España en el año 2008, uno de los países con mayor potencia fotovoltaica instalada a nivel mundial.

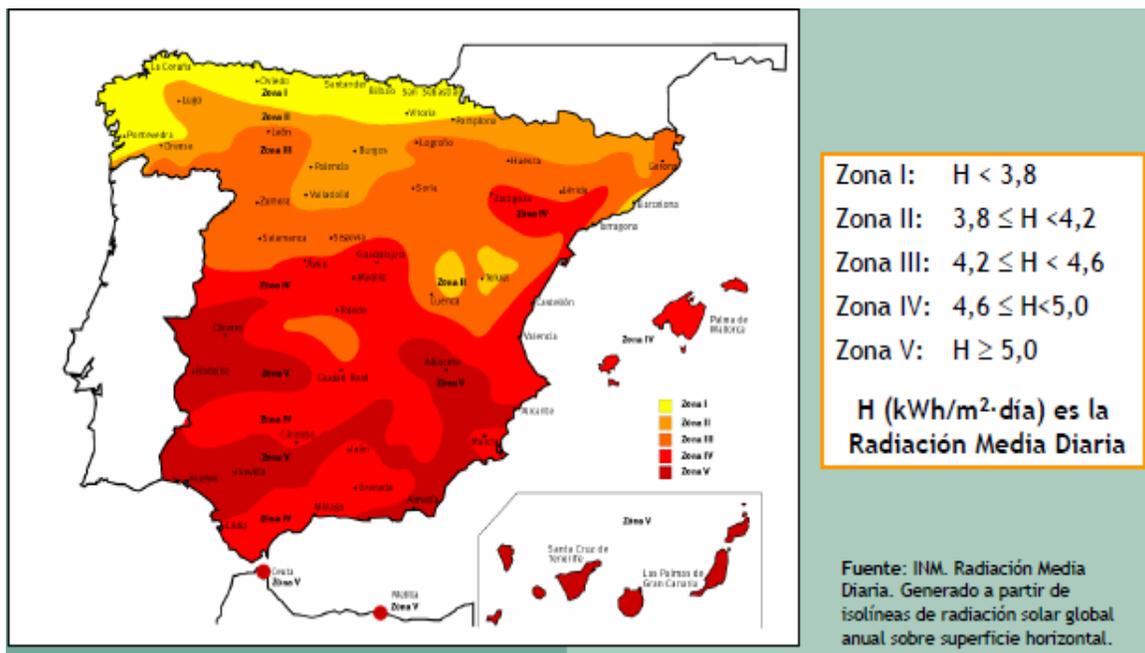


Figura 2. Radiación media diaria. Generado a partir de isolíneas de radiación solar global anual sobre superficie horizontal en España (INM, 2007).

Este impulso de la energía solar y las renovables en general, se inició a finales del pasado siglo. Desde los organismos europeos se trataba de favorecer el uso de éstas, y España creó un marco regulador favorable que las impulsase. Tras un par de modificaciones en los reales decretos que regulaban esta actividad, las energías renovables alcanzaron su velocidad de

crucero, y experimentaron un importante desarrollo en un plazo muy breve de tiempo (2003-2010).

España, y en concreto la comunidad autónoma de Andalucía son las zonas de mayor radiación solar de Europa, pero a partir del 2008 la situación cambió sustancialmente. El 30 de septiembre de ese año el gobierno aprobaba una nueva regulación en la que las energías fotovoltaicas ya no recibían una prima tan alta por kWh fotovoltaico que se inyectaba en la red, sino que las primas, además de reducirse, pasaron a ser variables en función de la ubicación de la instalación. Estas y otras modificaciones incluidas en el Real decreto aprobado en esa fecha, tuvieron como consecuencia un frenazo inmediato del sector, debido sobre todo a la inseguridad jurídica creada, ya que las modificaciones se hicieron de manera retroactiva y afectaron a instalaciones ya aprobadas e incluso construidas.

La crisis de éste no hizo sino agravarse posteriormente, cuando nuevos cambios legislativos todavía empeoraron más la situación. En 2010 y 2012, se aprobaron nuevos reales decretos, especialmente el RD. 900/2015, que en la práctica desincentivaban totalmente el uso de este tipo de energías, y agravaban la inseguridad jurídica, limitando las primas hasta una fecha concreta para las instalaciones ya en funcionamiento, y posteriormente eliminando éstas para las nuevas plantas fotovoltaicas que se instalaran desde ese momento.

La energía solar no pasa por su mejor momento en la actualidad en España. Para que la energía solar pueda transformarse en electricidad y acceder a la red ha de superar un gran número de requisitos, que incluyen permisos del gobierno y autorizaciones de las compañías eléctricas operativas en un área concreta. Y son estas las que, con las trabas que ponen, impiden que la energía solar se convierta en una alternativa práctica.

Las compañías eléctricas aducen motivos técnicos para justificar estas actuaciones, pero la realidad es que el verdadero motivo que se esconde tras esta clase de comportamientos está en el deseo de que la población no pueda autoabastecerse de energía eléctrica, así como sus intereses en otras fuentes energéticas.

El gobierno, por su parte, también justifica su actuación poco favorable a las energías renovables con el argumento de que el recorte de ayudas al sector debe ser impulsado para

atajar el déficit de tarifa, o lo que es lo mismo, la desviación entre costes e ingresos del mercado eléctrico.

Sin embargo, y según afirman las empresas del sector, este déficit que achacan a las primas concedidas a las energías renovables, se debe a muchos otros motivos, teniendo las ayudas a este tipo de energías un impacto de sólo un 20% del total del déficit.

1.3 EL AUTOCONSUMO Y EL IMPUESTO AL SOL

Con la excusa de que las instalaciones de autoconsumo deben de contribuir a la financiación del sistema de red eléctrico en la misma medida que el resto de consumidores, el real decreto 900/2015 que regula esta práctica establece el pago de impuestos a quienes opten por este sistema, en lo que se conoce como “impuesto al sol”.

Esta medida choca en la práctica con las disposiciones europeas al respecto de las energías renovables, y así lo expresa en un documento publicado por el Parlamento Europeo en relación a las políticas sobre energía solar de la Unión Europea y sus estados miembros, donde se expresa lo injusto de tal medida, ya que, entre otras cosas, afirma que el exceso de electricidad que los particulares puedan suministrar a la red, no se les remunera, y en la práctica supone un tirón de orejas en toda regla respecto a la política energética que en España se lleva a cabo actualmente [6].

1.4 FUTURO DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA

En los próximos años se prevé que la energía fotovoltaica se desarrolle debido al abaratamiento de los costes, al alto volumen de recurso solar que posee España y el consenso de descarbonización. Actualmente, los módulos solares cuestan un 80% menos que hace 5 años.

Según un estudio de IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables) la electricidad que produce la energía fotovoltaica es la que más se ha abaratado de todas las energías

renovables. Para este 2018 las condiciones de mercado y el consenso político europeo alcanzado tras el Acuerdo de París, están atrayendo a los inversores hacia la energía solar fotovoltaica, pues la rentabilidad puede alcanzar el 7% de media.

El sector de las energías renovables es un sector pendiente de variaciones para poder cumplir con los objetivos europeos, según datos de la APPA (Asociación de Empresas de Energías Renovables). Existen negociaciones sobre la Nueva Directiva de Renovables 2020-2030 y trabajos sobre futura Ley de Cambio Climático y Transición Energética, algo muy necesario para que la normativa de autoconsumo se adapte a las necesidades actuales. Además, en este 2018 todo apunta que el sector de las energías renovables se reactivará por las subastas e incremento de las inversiones. También algunas consecuencias de la sequía sufrida desde el 2017 han sido la causa de una mayor producción de otras tecnologías renovables como la eólica y la fotovoltaica (-5,4% global y -47,5 % generación hidráulica). Además, el consumo de biocarburantes siguió el alza en 2017 aunque estuvo muy por debajo de 2010 [7].

Por otro lado, desde el 17 de enero del presente año, el Parlamento Europeo votase mayoritariamente en contra del impuesto al sol, pidiendo a los países miembros que retirasen sus gravámenes para el autoconsumo fotovoltaico. La nueva normativa fue aprobada meses más tarde, pero no entraría en vigor hasta 2021. [8]

FUNDAMENTOS DE LA RADIACIÓN SOLAR

2.1 ENERGÍA SOLAR

El Sol es el origen directo o indirecto de todas las fuentes de energía presentes en nuestro planeta. La energía solar aprovecha directamente la energía que recibimos del Sol en forma de radiación electromagnética dando lugar a dos modalidades de aprovechamiento según el tipo de tecnología: energía solar térmica y energía solar fotovoltaica. La fotovoltaica utiliza la radiación solar para generar electricidad aprovechando las propiedades físicas de ciertos materiales semiconductores y el efecto fotovoltaico que se produce en su estructura interna. La energía térmica utiliza directamente la energía que recibimos del Sol para calentar un fluido y completar un ciclo térmico para su posterior uso mediante una turbina.

2.1.1 EL SOL

El Sol es la estrella central de nuestro sistema Solar, con un diámetro de 1.392.000 km y una masa equivalente a unas 300.000 veces la masa de la Tierra. A la distancia que se encuentra nuestro planeta del Sol (cerca a los 149,5 millones de kilómetros) la energía proveniente de él es calculable analíticamente según modelos de radiación, de la cual solo una parte ingresa directamente a nuestro espacio habitable, debido entre otras cosas a la cantidad de nubes, a la porción de energía absorbida por los gases de la atmósfera y a la reflejada por los océanos.

2.1.2 ESPECTRO SOLAR

Se dice que un material o dispositivo tiene características fotovoltaicas cuando la exposición del mismo a la luz que puede ser absorbida por el material es capaz de transformar la energía

de los fotones en energía eléctrica de modo que se pueda obtener una corriente y un voltaje. Asimismo, la naturaleza espectral de la luz solar es importante para el diseño de dispositivos fotovoltaicos o celdas solares, condicionando las características de los materiales aptos para estas aplicaciones.

Es una buena aproximación considerar que el Sol actúa como un emisor perfecto de radiación (cuerpo negro) a una temperatura cercana a los 5.800 K. La constante solar es la cantidad de energía recibida del Sol por unidad de tiempo y unidad de superficie, medida fuera de la atmósfera terrestre en un plano perpendicular a los rayos a una distancia de 1 UA (unidad astronómica = 1.496×10^8 km) del Sol. Como la distancia Tierra - Sol va variando a lo largo del año, se utiliza en consecuencia como constante solar su valor medio que es de $1.366,1 \text{ W/m}^2$.

Se define la masa de aire AM0 (air mass 0) como la ausencia de atenuación atmosférica de la irradiancia solar a 1 UA del Sol. La distribución espectral AM0 difiere del caso ideal para un cuerpo negro, lo cual se debe a efectos como la variación de la transmitancia de la atmósfera solar para diferentes longitudes de onda.

Cuando la radiación pasa a través de la atmósfera de la Tierra, es atenuada en su intensidad por diversos procesos que se producen a lo largo de su recorrido a través de la misma. Estos procesos son: absorción selectiva por los gases y por el vapor de agua, dispersión molecular (o de Rayleigh) por los mismos componentes, dispersión por aerosoles (o de Mie) y absorción por los mismos. El resultado de todos estos procesos es la descomposición de la radiación solar incidente en componentes diferenciadas. En condiciones atmosféricas claras el parámetro más importante para la determinación de la potencia total es la longitud del camino que recorre la luz a través de la atmósfera. Cuando el Sol se encuentra en dirección vertical, el camino es mínimo y se puede decir que la radiación que llega a la superficie de la Tierra es AM1 (air mass 1). Si el ángulo respecto de la vertical es φ resulta:

$$AM = \frac{1}{\cos \varphi}$$

El espectro AM1,5, estandarizado a una densidad de potencia global de $1\text{kW}/\text{m}^2$, es el utilizado como patrón para la medición de las características eléctricas de las celdas solares para aplicaciones terrestres, mientras que para la caracterización de dispositivos para aplicaciones espaciales se utiliza el espectro AM0 normalizado a $1,36\text{kW}/\text{m}^2$. En la Figura 2 se muestran las distribuciones espectrales AM0, AM1,5 y la de un cuerpo negro a $5800\text{ }^\circ\text{K}$.

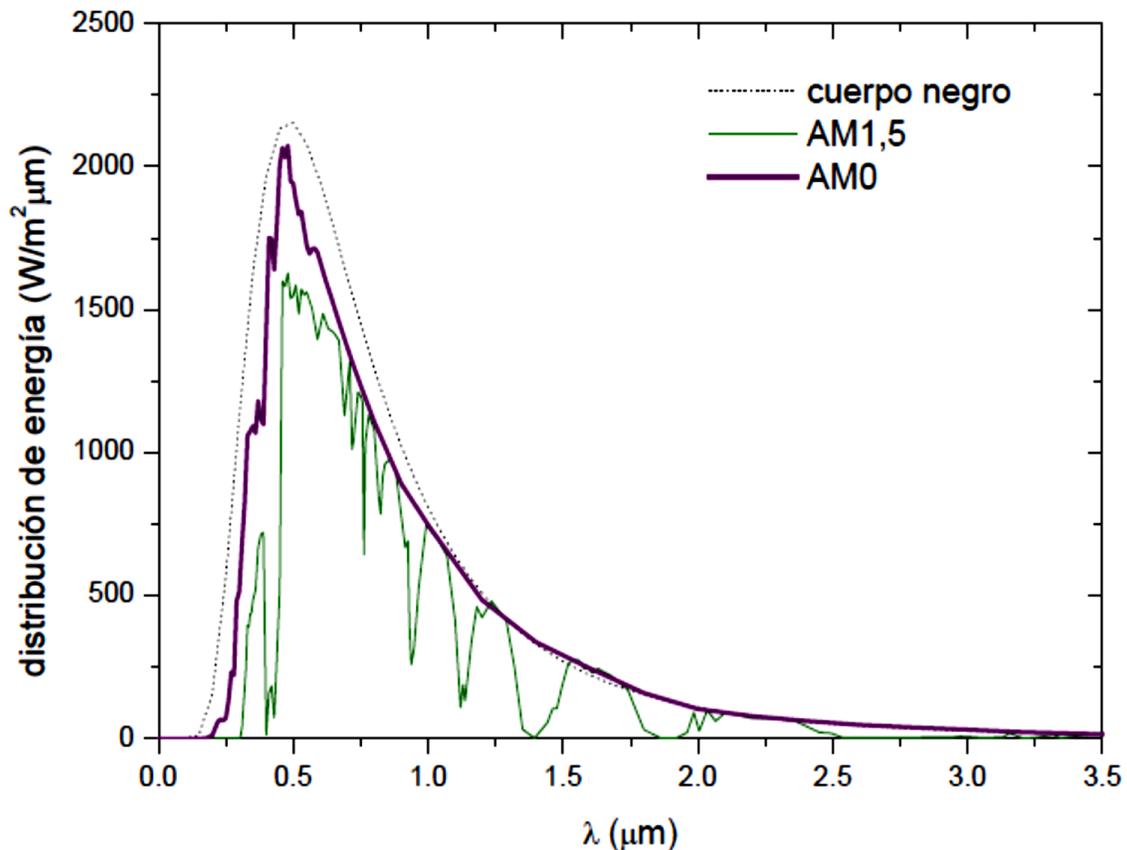


Figura 3. Distribución espectral de la radiación solar. Se muestran los casos AM0 y AM1,5 junto con la distribución correspondiente a un cuerpo negro a $5800\text{ }^\circ\text{K}$ (ASTM, 2000).

Por otra parte, la radiación solar que llega a la superficie terrestre luego de atravesar la atmósfera se conoce como radiación solar directa; la dispersada por el aire y las nubes pierde la dirección definida y se conoce como radiación solar difusa; mientras que el albedo es radiación reflejada por el suelo. La radiación total sobre una superficie es la suma de las tres radiaciones (directa + difusa + albedo) y se conoce como radiación global o total [9].

2.2 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR.

Los dos métodos comunes que caracterizan a la radiación solar son la irradiancia y la insolación. La irradiancia es una densidad de potencia instantánea en unidades de $[\text{W}/\text{m}^2]$, varía a lo largo del día desde 0 a un máximo de aproximadamente 1000 dependiendo de la ubicación geográfica y el clima local.

El instrumento que mide la radiación solar (radiación global) recibida desde todo el hemisferio celeste sobre una superficie horizontal terrestre, se llama Piranómetro (figura 3). El principio de funcionamiento de este instrumento es a través de termocuplas, las cuales, al calentarse producto de la radiación del sol, emiten una pequeña fuerza electromotriz (fem, tensión o milivoltios) pudiendo ser medidas por algún otro instrumento (integrador o datalogger). Para obtener la irradiancia en W/m^2 , se multiplica la tensión entregada por el piranómetro por una constante del instrumento.



Figura 4. Piranómetro, instrumento utilizado para medir la radiación solar global (EKO Instruments MS-802).

Para medir la radiación solar directa se usa un instrumento llamado Pirheliómetro (figura 4), la medición se expresa en unidades de W/m^2 , siendo necesario que esté constantemente orientado hacia el sol. Para su funcionamiento debe estar conectado a una unidad de control auxiliar para poder determinar mediante cálculo la potencia que es recibida desde el sol. [10]



Figura 5. Pirheliómetro, instrumento utilizado para medir la radiación solar directa (Sensovant DR30-D1).

2.3 SEGUIMIENTO SOLAR

A consecuencia de su naturaleza no lineal, las características eléctricas de un panel fotovoltaico varían debido a diversos factores, como son la radiación solar que reciben y la temperatura de funcionamiento. Todo esto hace que la producción de potencia del panel fotovoltaico varíe. Para aprovechar la máxima potencia de los paneles fotovoltaicos en cualquier condición atmosférica, se debe implementar un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) utilizando un convertidor CC-CC para garantizar que el sistema esté funcionando en el punto de potencia óptimo. Al hacer esto, se puede maximizar la eficiencia operativa del sistema y se puede garantizar el funcionamiento continuo y duradero del mismo. [11]

Haciendo uso de convertidores se puede obtener que el sistema trabaje en su punto de máxima potencia (MPPT); no obstante, al implementar un seguimiento solar en los módulos fotovoltaicos optimizamos aún más el sistema, ya que esto nos permite situar los paneles siempre lo más perpendicular posible al sol y de esta manera conseguir una mayor producción de energía. La posición del sol en el cielo varía tanto con las estaciones (elevación) como con la hora del día a medida que el sol se mueve por el cielo. Existen dos tipos de seguidores solares:

- **Seguidor solar de un eje**
- **Seguidor solar de doble eje.**

2.3.1 SEGUIDOR SOLAR DE UN EJE

Los seguidores solares de un solo eje pueden tener un eje horizontal o vertical (figura 6). El de tipo horizontal se usa en regiones tropicales donde el sol se pone muy alto al mediodía, pero los días son cortos. El de tipo vertical se usa en latitudes altas (como en el Reino Unido) donde el sol no sube demasiado, pero los días de verano pueden ser muy largos.

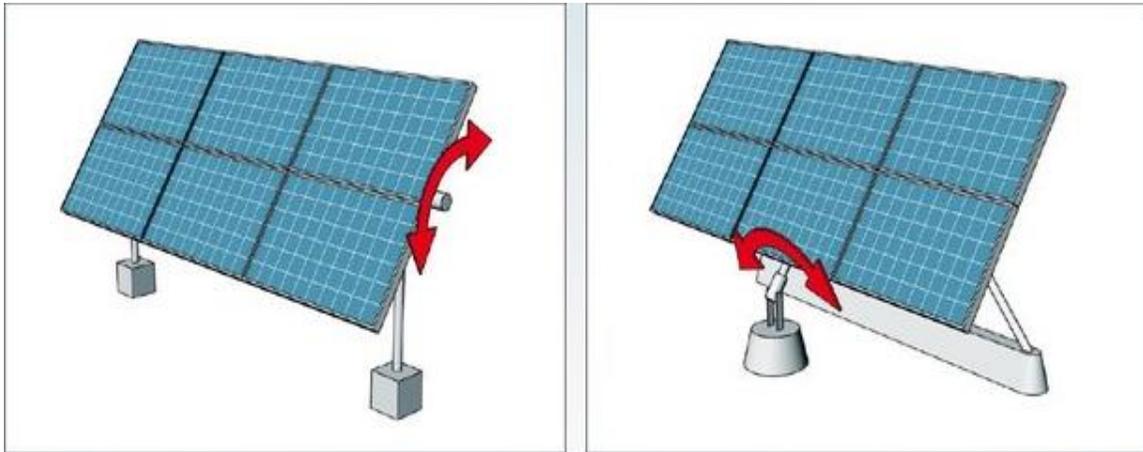


Figura 6. Seguidores solares de un eje, horizontal (imagen izquierda) y vertical (imagen derecha). (REDIS, 2014)

2.3.2 SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES

Los seguidores solares de doble eje tienen un eje horizontal y uno vertical (figura 7), por lo que pueden rastrear el movimiento aparente del sol en cualquier lugar del mundo. Este tipo de sistema se utiliza para controlar telescopios astronómicos, por lo que hay una gran cantidad de software disponible para predecir y rastrear automáticamente el movimiento del sol en el cielo. Los rastreadores de doble eje rastrean el sol tanto de este a oeste como de norte a sur para obtener una mayor potencia (aproximadamente 40% de ganancia comparado con sistemas sin seguimiento) [12].

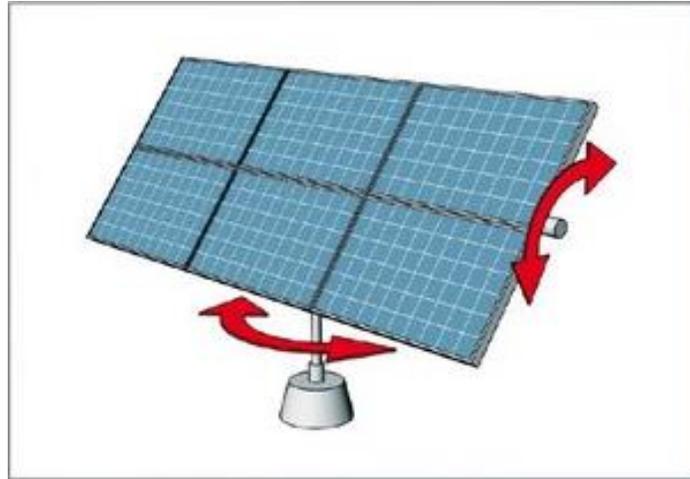


Figura 7. Seguidor solar de doble eje. Posee dos ejes uno que gira horizontalmente y otro vertical, siguiendo siempre la posición aparente del sol (REDIS, 2014).

En la actualidad existen dos métodos que se utilizan comúnmente en el seguimiento solar para identificar y seguir la posición del sol en cualquier instante entre el amanecer y el atardecer: el método óptico y el método astronómico. El método óptico utiliza varios sensores de retroalimentación tales como los sensores de intensidad de luz de sulfuro de cadmio (CdS) y un comparador. El comparador compara las señales de salida de los sensores y opera en un bucle de realimentación con la condición de señal deseada. El objetivo del ciclo es producir el voltaje total máximo de los sensores CdS ajustando continuamente la dirección del rastreador hasta que la sombra en los sensores sea la mínima.

Un inconveniente del método óptico es que no puede rastrear efectivamente el sol en un día nublado sin un algoritmo robusto. Y el método astronómico el cual usa los datos de longitud y latitud de la ubicación del rastreador solar para determinar y rastrear la posición del sol, tiene las ventajas de la programación simple y alta precisión. Sin embargo, en este método se requiere una dirección de inicio fija del rastreador al amanecer todos los días y un buen sistema de sincronización (o reloj) en funcionamiento permanente. En realidad, los motores y engranajes en un sistema de seguimiento solar tienden a desarrollar el efecto de "retroceso" debido a los ajustes continuos para ajustar los datos del GPS. Por lo tanto, la dirección de inicio del rastreador debe corregirse de vez en cuando. [13]

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

3.1 EL EFECTO FOTOVOLTAICO

El efecto fotovoltaico fue reconocido por primera vez en 1839 por el físico francés Alexander Edmond Becquerel, pero la primera célula solar no se construyó hasta 1883. Su autor fue Charles Fritts, quien recubrió una muestra de selenio semiconductor con un pan de oro para formar el contacto. Este primitivo dispositivo presentaba una eficiencia de sólo un 1%. En 1905 Albert Einstein dio la explicación teórica del efecto fotoeléctrico, fenómeno diferente al fotovoltaico dado que las cargas son extraídas del material (en general, un metal) mediante radiación ultravioleta, sin embargo, estos avances permitieron una mejor comprensión del fenómeno fotovoltaico en materiales semiconductores. Russell Ohl patentó la célula solar moderna en el año 1946, aunque Sven Ason Berglund había patentado, con anterioridad, un método que trataba de incrementar la capacidad de las células fotosensibles.

El fundamento de la energía solar fotovoltaica es el efecto fotovoltaico, que consiste en la conversión de la luz en electricidad. Este proceso se consigue mediante materiales que tienen la propiedad de absorber fotones y generar electrones en la banda de conducción (Células fotovoltaicas); cuando los electrones de la banda de conducción son transferidos a contactos externos que cuando se conectan a una carga permite el flujo de una corriente eléctrica que puede ser utilizada para realizar trabajo.

3.2 CELDAS SOLARES

Las celdas solares, llamadas también celdas fotovoltaicas (PV) son dispositivos semiconductores que convierten directamente la luz solar en corriente eléctrica para producir potencia eléctrica utilizable.

En la actualidad la tecnología más desarrollada para la producción de electricidad solar por vía fotovoltaica es la basada en el uso de módulos fotovoltaicos planos, que incorporan células de silicio, ya sea mono o poli cristalinas, o módulos fotovoltaicos de alta concentración, éstos últimos siendo los más modernos y en los que se necesita mucha menos cantidad de silicio para las células, y están fabricados con aleaciones semiconductoras de materiales III-V (en la tabla periódica, por ejemplo InGaAs/GaAs).

La tecnología de módulos fotovoltaicos planos se encuentra desarrollada desde hace décadas, ofreciendo en la actualidad un producto comercial que ha ido mejorando sus prestaciones en el tiempo gracias a la libre competencia. Así los fabricantes actuales garantizan sus productos por tiempos superiores a 20 años, obteniendo degradaciones inferiores al 20% durante la vida útil de los módulos.

3.2 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

El módulo fotovoltaico es el elemento resultado de la unión de varias células fotovoltaicas conectadas eléctricamente en diferentes combinaciones en serie y/o paralelo recubiertas en una cápsula laminada para su protección y soporte mecánico. A su vez estos módulos se conectan en serie para aumentar el voltaje y/o en paralelo para aumentar la corriente, formando el sistema fotovoltaico.

3.3 TIPOS DE CELDAS FOTOVOLTAICAS

Hoy en día gracias a los avances tecnológicos se continúan fabricando módulos fotovoltaicos de diversos materiales, buscando siempre el menor coste en la producción y la mayor eficiencia posible en términos de conversión de energía. Debido a esto en este apartado solo estudiaremos las tecnologías concernientes a nuestro propósito.

3.3.1 TECNOLOGÍAS DE MÓDULO FOTOVOLTAICO DE SILICIO CRISTALINO

La materia prima para la fabricación de las células fotovoltaicas más utilizada actualmente es silicio, que es el material más abundante en la Tierra después del oxígeno, formando la combinación de ambos el 60% de la corteza terrestre. Este sistema de producción eléctrica renovable dispone de un combustible infinito, la luz solar, y de una tecnología que utiliza una materia prima prácticamente inagotable.

El silicio utilizado actualmente en la fabricación de las células que componen los módulos fotovoltaicos puede ser:

- **Silicio monocristalino**
- **Silicio policristalino**

3.3.2 SILICIO MONOCRISTALINO

En este caso el silicio que compone las células de los módulos está compuesto de cristales orientados de la misma forma. La red cristalina es uniforme en todo el material y tiene muy pocas imperfecciones. El proceso de cristalización es complicado y costoso, pero, sin embargo, es el que proporciona la mayor eficiencia de conversión de luz en energía eléctrica [11].



Figura 8. Célula de silicio monocristalino.

3.3.3 SILICIO POLICRISTALINO

No está formado por cristales orientados de la misma forma. El proceso de cristalización es diferente y la red cristalina no es uniforme en todo el material, pudiéndose apreciar las zonas donde los cristales tienen una misma orientación. El proceso de cristalización es más barato que el anterior, pero se obtienen rendimientos ligeramente inferiores. [11]

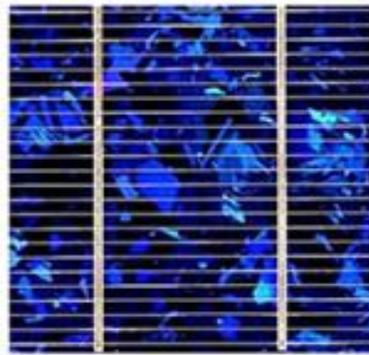


Figura 9. Célula de silicio multicristalino.

3.4 TECNOLOGÍAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE LÁMINA DELGADA

3.4.1 SILICIO AMORFO

En el silicio amorfo no hay red cristalina y se obtiene un rendimiento inferior a los de composición cristalina. Sin embargo, posee la ventaja, además de su bajo coste, de ser un material muy absorbente por lo que basta una fina capa para captar la luz solar. [11]



Figura 10. Célula de silicio amorfo.

3.4.2 TELURO DE CADMIO

El telurio de cadmio (CdTe), es otra clase de película delgada. Tiene cualidades útiles, pero tiene un problema, que el Cd es considerado una sustancia tóxica. El CdTe es también menos eficiente que el silicio, aunque es más barato. En la fabricación de este tipo de células se utiliza vidrio recubierto con una delgada película de un compuesto cristalino de cadmio - telurio en vez del típico y costoso silicio, necesitando 100 veces menos material semiconductor.

Debido a esto se fabrican paneles altamente eficaces de una forma rápida y mucho más barata. El costo final para el consumidor se podría reducir hasta en un 50%. [11]

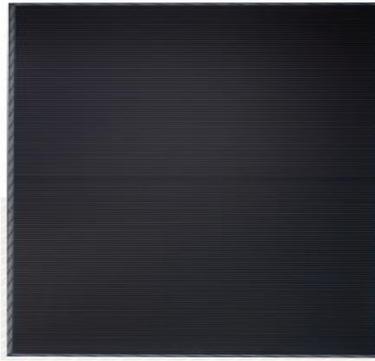


Figura 11. Módulo fotovoltaico de Teluro de Cadmio.

3.5 ORGÁNICAS CON CAPA ACTIVA DE P3HT: PCBM

Son células solares orgánicas cuya capa activa está basada en una mezcla de un polímero conjugado poly (3-hexylthiophene) (P3HT) y un éster metílico del ácido fenil-C61-butírico (PCBM), otras combinaciones de polímeros y materiales aceptores es también posible. Son hasta la fecha los materiales activos más estudiados en todo el mundo para la estructura de la heterounión en volumen o dispersa. Alcanzan eficiencias de conversión de energía hasta un máximo del 5%. [12, 13]

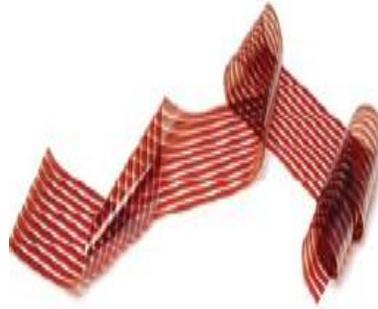


Figura 12. Célula orgánica de capa activa de P3HT/PCBM.

A continuación, se presenta una imagen con las eficiencias alcanzadas de manera comercial en la actualidad por las diferentes tecnologías existentes.

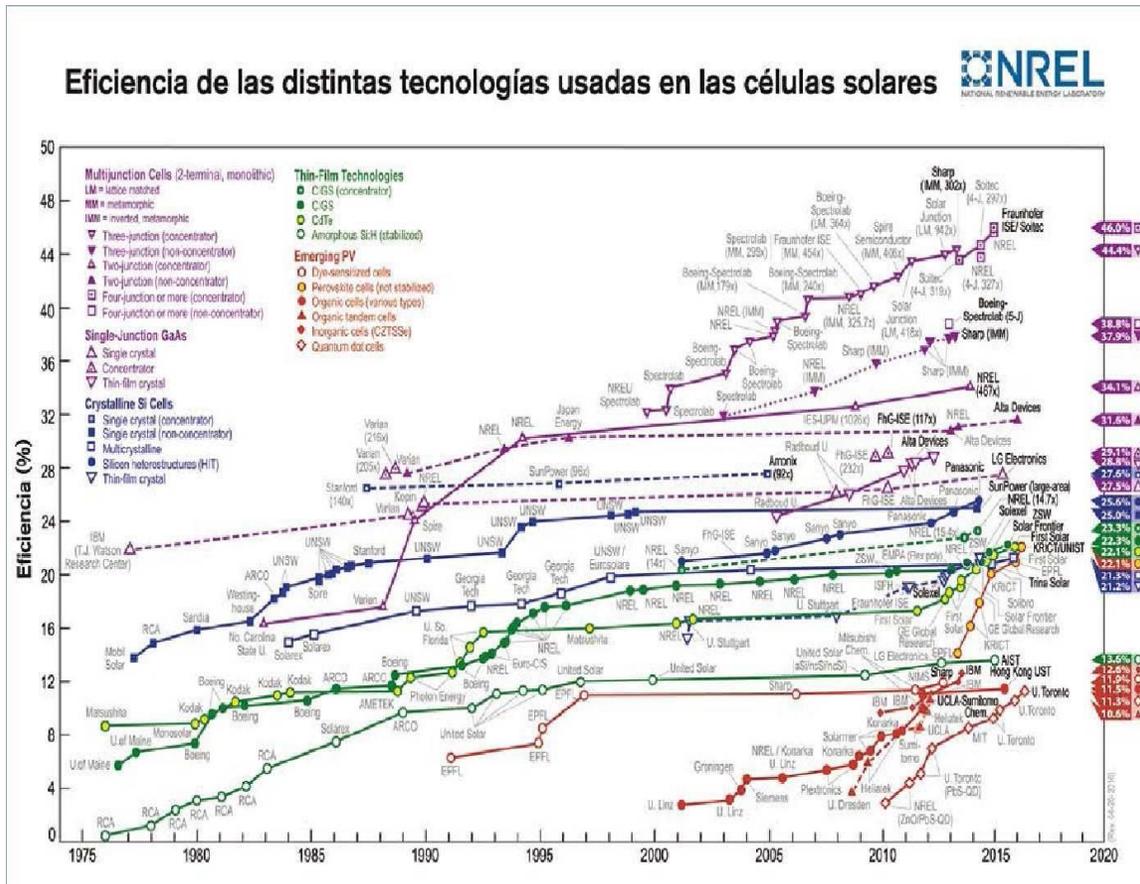


Figura 13. Eficiencia actual de las diferentes tecnologías usadas en las células solares (NREL, USA).

OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DE TRABAJO

4.1 OBJETIVO GENERAL

- Caracterizar módulos fotovoltaicos de diversas tecnologías mediante la automatización de un sistema de medida instalado en un seguidor solar.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Puesta a punto del seguidor solar en el que van instalados los módulos.
- Configurar el instrumento utilizado (trazador I-V) para hacer las mediciones de campo a los módulos en estudio.
- Analizar los datos obtenidos con una herramienta diseñada en MatLab para tales fines.
- Desarrollar un simulador fotovoltaico para realizar pruebas y compararlas con los datos tomados de campo.
- Analizar diferentes condiciones de operación para ver el desempeño de los módulos.
- Estimar la producción energética de los módulos sobre el seguidor.

4.3 METODOLOGÍA IMPLEMENTADA EN EL PROYECTO

En esta parte se detallará los pasos que se han seguido para llevar a cabo la realización del proyecto; así como los problemas que se tuvieron que enfrentar, por último las soluciones que se tomaron para subsanar estos problemas. Además, para su correcta estructuración:

Se ha estudiado la documentación relacionada con el tema en cuestión, principalmente los trabajos de fin de master y manuales disponibles en la UPCT.

Se han realizado búsquedas adicionales de información a través de otros medios para comprender sobre el funcionamiento y la programación que se llevaría a cabo.

Se evaluó la parte electrónica y de potencia para comprobar el funcionamiento del seguidor solar.

Se probó la comunicación del controlador del seguidor solar para el movimiento de los motores y la recepción de las señales de entrada de optoacoplador y final de carrera.

Se utilizó un trazador de curvas I-V para tomar las medidas de los módulos fotovoltaicos con la mayor precisión posible.

Se realizó una interfaz gráfica en Matlab para analizar los datos de una manera más rápida y eficaz.

4.4 PUESTA EN MARCHA DEL SEGUIDOR SOLAR

El seguidor solar fue el primer reto que se presentó a solventar, éste se encontraba con uno de sus motores averiado; en concreto el motor A, el cual es el encargado del movimiento que sigue la trayectoria del sol en todo momento. Para subsanar el problema se procedió a reemplazar dicho motor por uno nuevo que fue adquirido para dichos fines. La figura 14 muestra el motor averiado desmontado.

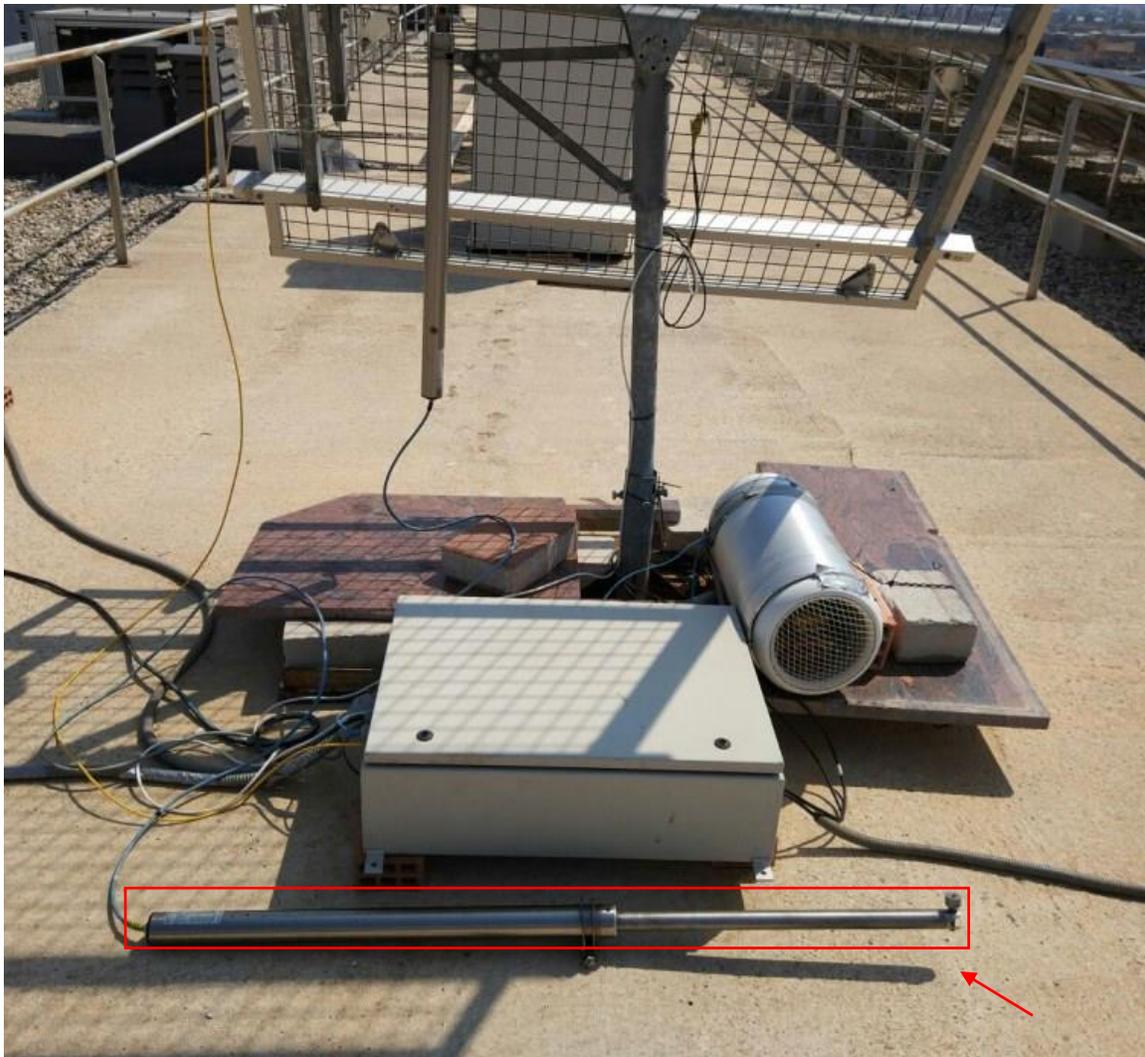


Figura 14. Seguidor solar con uno de sus motores desmontados para su posterior reemplazo.

En principio, en el seguidor solar solo se procedió con el reemplazo del motor ya mencionado, ya que el cuadro de alimentación necesario para el correcto funcionamiento de éste ya se encontraba instalado. En la figura 15 se muestra la imagen del seguidor con ambos motores ya instalados.



Figura 15. Seguidor solar de dos ejes con ambos motores instalados y funcionando.

Una vez verificado el correcto funcionamiento de ambos motores manualmente a través del software; el cual no se ha mencionado con anterioridad, pero es un software específico del fabricante Helios Analytics para el control manual y automático del seguidor solar (figura 16). En esta etapa del proceso surgió un segundo contratiempo y fue que al momento de poner en marcha el modo automático en el seguidor este no se alineaba correctamente con la posición aparente del sol. Luego de muchas pruebas se llegó a la conclusión de que este no sincronizaba correctamente con la zona horaria. La solución fue proceder a sincronizar correctamente el seguidor con el software en relación a la hora actual del día.

Para comprobar que el seguidor ya se alineaba correctamente con la posición aparente del sol, se utilizó un sencillo método manual basado en planos que proyectan sombra. Dicha herramienta en forma de cruz permite reflejar una sombra si el seguidor no se encuentra

alineado correctamente, en cambio sí está alineado no refleja sombra alguna (ver figura 17), es un método cualitativo que permite identificar muy fácilmente si hay un problema de alineamiento.

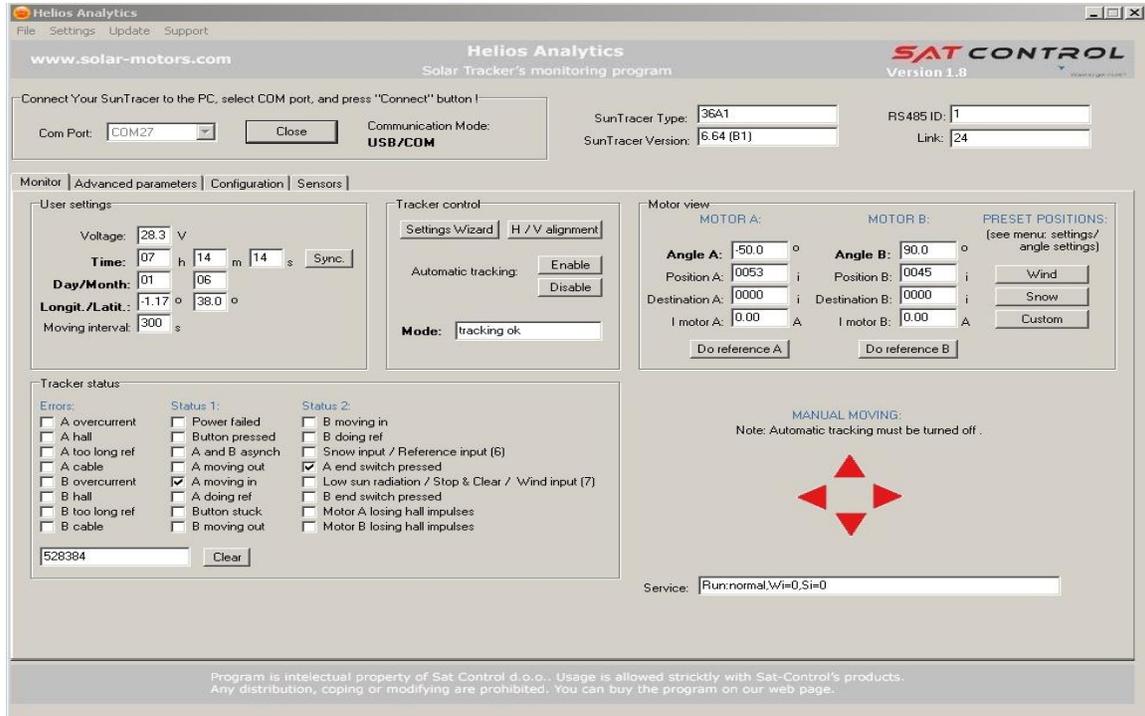


Figura 16. Software Helios Analytics de Sat Control, encargado de controlar el movimiento tanto manual como de forma automática del seguidor solar.



Figura 17. Herramienta utilizada para verificar el correcto alineamiento del seguidor respecto al sol, en ella se verifica que no existe sombra alguna indicando así que el seguidor se encuentra alineado correctamente.

Luego decidimos montar un módulo en el seguidor y comenzar de ese modo las pruebas pertinentes; ya que el módulo más accesible que disponemos es el de teluro de cadmio, procedimos a su montaje (figura 18).



Figura 18. Seguidor solar con módulo de teluro de cadmio instalado.

Después de varias pruebas realizadas con éxito con el trazador curvas I-V (Adler PVPM 1000CX), ver figura 19; decidimos tomar una serie de medidas automatizadas con el mismo.



Figura 19. Trazador de curvas I-V (Adler PVPM 1000CX).

4.5 MODELO MATEMÁTICO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO UTILIZANDO MATLAB Y SIMULINK.

OBJETIVO

La finalidad de este apartado es realizar un simulador que a partir de las características eléctricas que nos brindan el fabricante de los módulos fotovoltaicos; se encargue de trazar la curvas I-V y P-V a diferentes irradiancias y temperaturas deseadas, con la finalidad de compararlas con las medidas tomadas en experimentos “*outdoor*” para su posterior análisis e interpretación de los resultados obtenidos.

Para llevar a cabo la programación se utilizará el software Matlab/Simulink., con el cual se resolverán las ecuaciones matemáticas planteadas por varios autores para el análisis de los módulos fotovoltaico. Dichas ecuaciones se irán desarrollando en el transcurso de este apartado.

PLANTEAMIENTO

Antes de empezar a simular las curvas I-V y P-V de un panel solar, se debe conocer las características eléctricas del mismo. Hoy en día cada fabricante de módulos fotovoltaicos nos facilita la hoja de especificaciones en la cual encontramos dicha información, la cual será la base de donde parte nuestro análisis.

El modelo solar desarrollado solo investiga dos aspectos (irradiación solar y temperatura ambiente). El procedimiento de simulación se realizó paso a paso para una clara comprensión del mismo. En general, a pesar de tener ventajas y desventajas, los diferentes métodos tienen lagunas similares de la siguiente manera:

Los modelos propuestos están basados en ecuaciones paramétricas para el comportamiento del diodo, y son suficientes para estudiar todos los parámetros que pueden afectar significativamente las características I-V y P-V de un módulo fotovoltaico, incluidos los parámetros físicos como la corriente de saturación, el factor de idealidad, la resistencia en serie y paralela, etc. condiciones de trabajo (irradiación, temperatura y especialmente efecto de sombreado). Para analizar parámetros más específicos de los procesos de fotogeneración y transporte de carga (por ejemplo: equilibrios entre corriente de arrastre o difusión, efectos de recombinación, efectos de dopaje, contactos, etc.) es necesario utilizar modelos más detallados [14].

Para analizar los resultados experimentales, en este TFM proponemos un modelo construido bajo el entorno MatLab/Simulink. El cual muestra fortaleza en la investigación de la influencia de todos los parámetros en la operación de un módulo fotovoltaico. Además, se muestra un procedimiento de modelado paso a paso que permitirá seguir y simular por sí mismo para realizar futuras investigaciones.

4.6 CIRCUITO MATEMÁTICO EQUIVALENTE DE UNA CELDA SOLAR

El circuito equivalente de una celda fotovoltaica se muestra en la figura 20. La fuente de corriente I_{ph} representa la fotocorriente de la celda. R_{sh} y R_s son las resistencias intrínsecas de derivación y serie de la celda, respectivamente. Por lo general, el valor de R_{sh} es muy grande y el de R_s es muy pequeño, por lo que se puede despreciar para simplificar este análisis. Prácticamente, las células fotovoltaicas se agrupan en unidades más grandes llamadas módulos fotovoltaicos y estos módulos están conectados en serie o en paralelo para crear matrices fotovoltaicas que se utilizan para generar electricidad en sistemas de generación fotovoltaica [13].

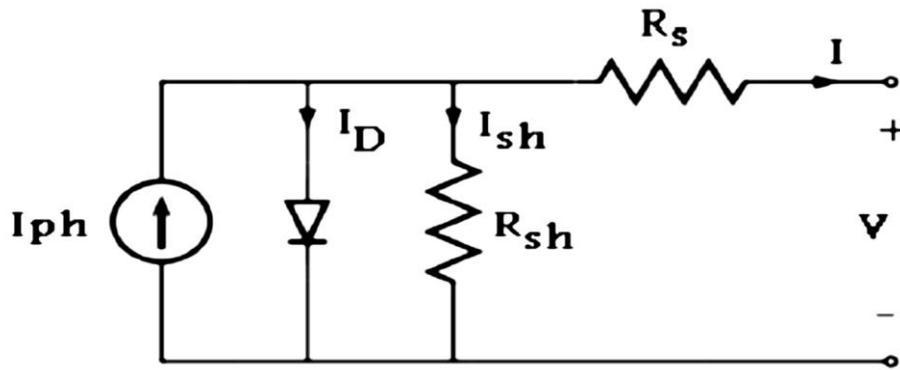


Figura 20. Circuito equivalente de una célula solar real.

La ecuación característica tensión-corriente de una célula solar que se proporciona es la siguiente. Para el módulo de la fotocorriente (I_{ph}):

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i (T - 298)] \times \frac{G}{1000}$$

Donde,

I_{ph} : Fotocorriente (A).

I_{sc} : Corriente de cortocircuito (A).

K_i : Corriente de cortocircuito de la celda a 25 °C y 1000 W/m².

T: Temperatura de funcionamiento (K).

G: Irradiación solar (W/m²) normalizada a G_{STC} .

Al resolver dicha ecuación en Simulink obtenemos el siguiente diagrama:

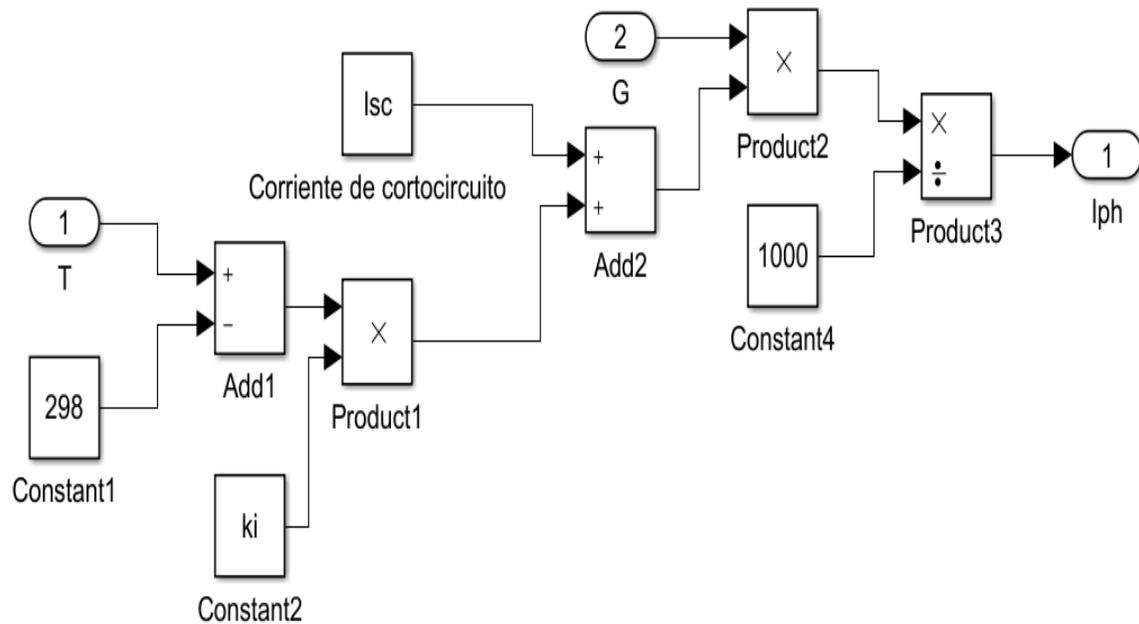


Figura 21. Diagrama en bloques de Simulink para la resolución de la ecuación de la fotocorriente generada por una célula solar.

En el caso de la corriente de saturación inversa (I_{rs}), la obtenemos con la siguiente ecuación:

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s k n T} - 1\right) \right]}$$

Donde,

q: Carga del electrón, = 1.6×10^{-19} C;

V_{oc} : Voltaje de circuito abierto (V);

N_s : Número de celdas conectadas en serie;

n: Factor de idealidad del diodo;

k: Constante de Boltzmann, = 1.3805×10^{-23} J/K.

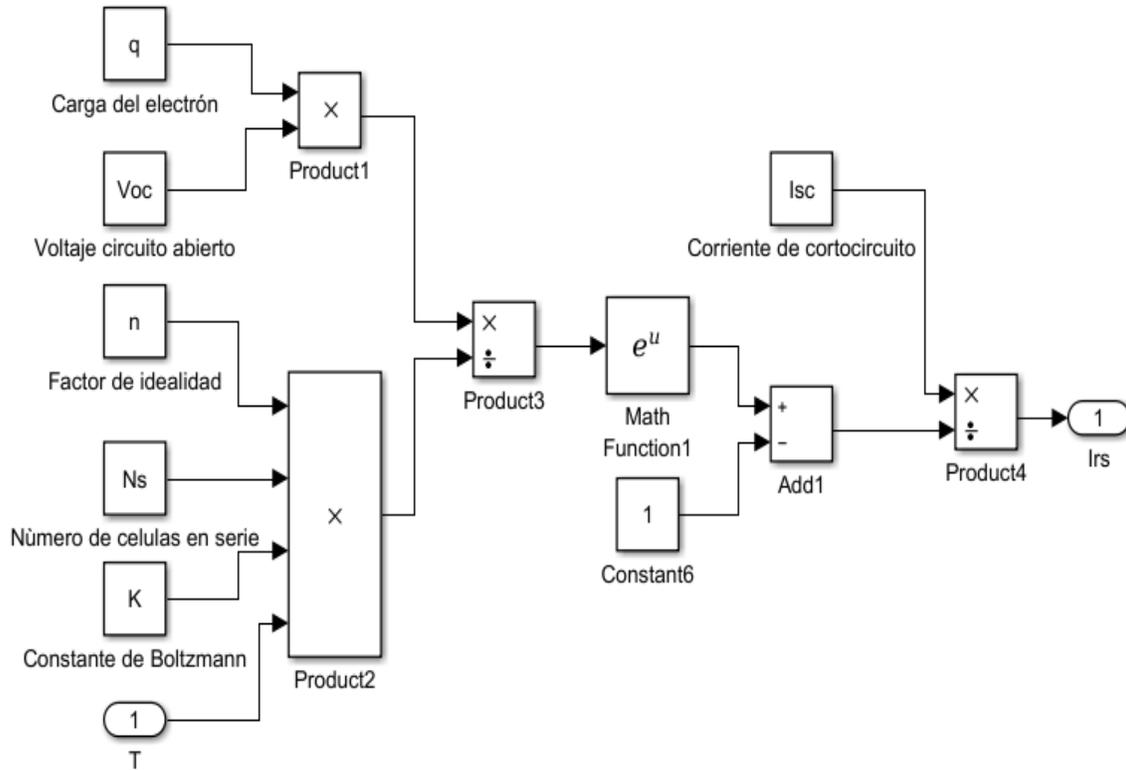


Figura 22. Diagrama en bloques de Simulink para la resolución de la ecuación de la corriente de saturación inversa generada por una célula solar.

El módulo de corriente de saturación (I_0), varía con la temperatura de la célula y viene dado por:

$$I_0 = I_{rs} \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 * \exp \left[\frac{q * E_{g0}}{nk} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right]$$

Donde,

T_r : Temperatura nominal = $273.15 + 25 = 298.15$ °K

E_{g0} : Banda del gap de energía del semiconductor = 1.49 eV

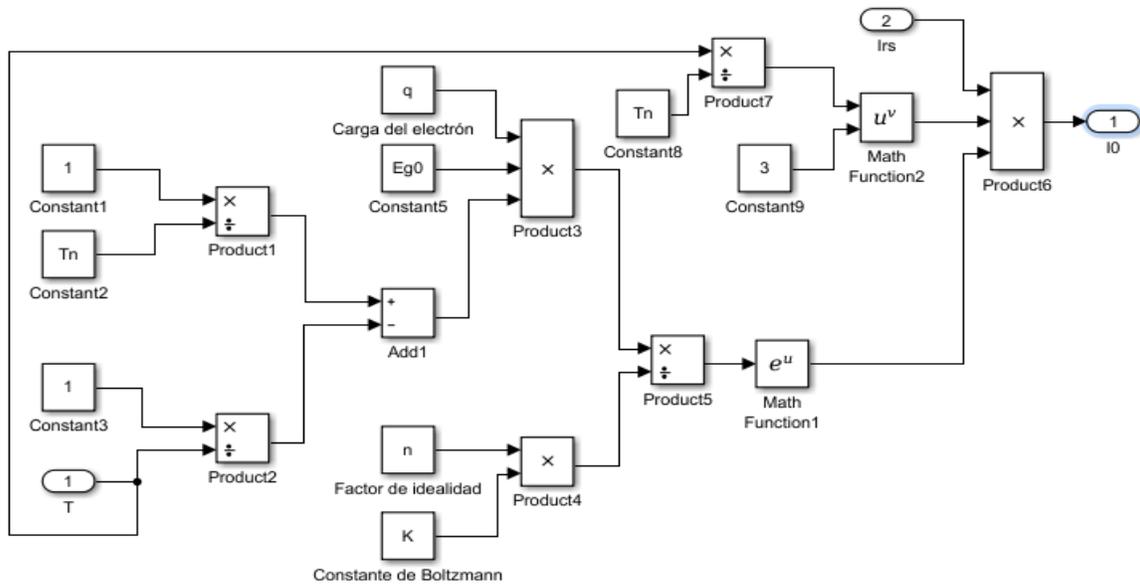


Figura 23. Diagrama en bloques de Simulink para la resolución de la ecuación de la corriente de saturación generada por una célula solar.

Ya al final la corriente de salida (I) del módulo fotovoltaico se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$I = N_p * I_{ph} - N_p * I_0 \left[\exp \left(\frac{V}{N_s} + \frac{I * R_s}{N_p} \right) - 1 \right] - I_{sh}$$

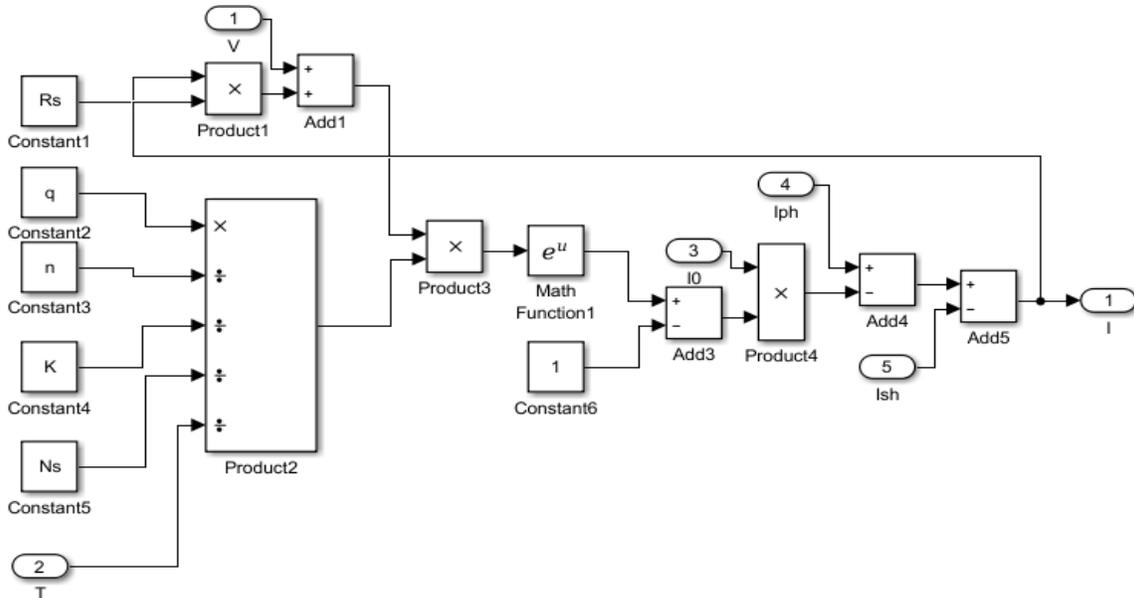


Figura 24. Diagrama en bloques de Simulink para la resolución de la ecuación de la corriente de salida generada por una célula solar.

Todos estos bloques se unen a este ultimo dandonos como resultado la siguiente representación:

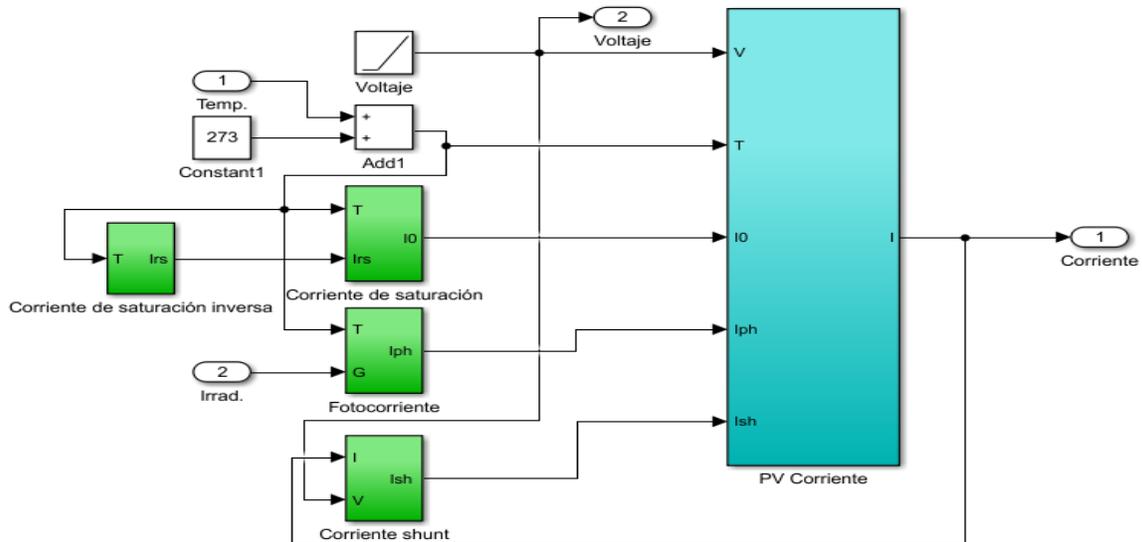


Figura 25. Diagrama en bloques de Simulink para la resolución de la ecuación del comportamiento de una célula fotovoltaica

El resultado final de nuestro simulador es el que se muestra en la (figura 26), con el cual simularemos el comportamiento teórico de un panel fotovoltaico específico y nos graficará las curvas I-V y P-V del mismo a diferentes irradiancias y temperaturas. El anexo I muestra los parámetros a definir para el correcto funcionamiento del simulador.

SIMULADOR DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

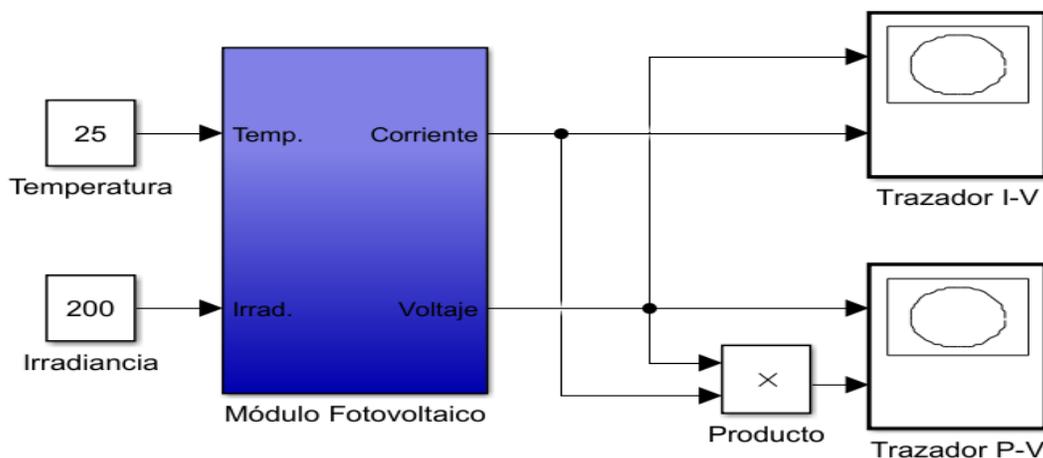


Figura 26. Diagrama en bloques del simulador fotovoltaico realizado en Matlab/Simulink.

4.7 CURVA CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO DE TELURO DE CADMIO

Lo primero que se debe saber es que la representación estándar de un dispositivo fotovoltaico es la característica corriente-tensión (figura 27). La curva representa las posibles combinaciones de corriente y voltaje para un dispositivo fotovoltaico bajo unas condiciones ambientales determinadas (radiación solar incidente y temperatura ambiente). El punto en concreto de corriente y voltaje en el que el dispositivo fotovoltaico trabajará vendrá determinado por la carga a la que esté conectado [15].

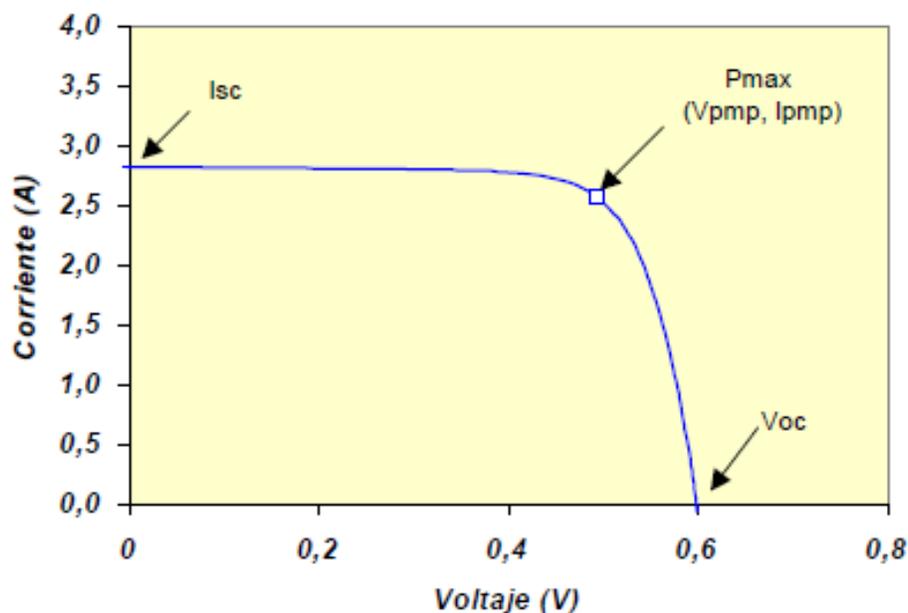


Figura 27. Curva característica, con sus principales elementos de una célula fotovoltaica.

Al observar la curva IV podemos extraer los principales parámetros del módulo, los cuales son:

- Voltaje de circuito abierto (V_{oc}): Es el voltaje máximo que entrega el módulo, este se da cuando los terminales del mismo están desconectados y, por lo tanto, la corriente es nula.
- Corriente de cortocircuito (I_{sc}): Es el máximo valor de corriente que produce el módulo, esto se logra cuando la resistencia entre sus terminales es cero.

- Punto de máxima potencia (MPP): Es el punto de la curva característica dónde el valor de potencia es máximo. De este punto se extrae además la máxima potencia (P_{mpp}), la corriente de máxima potencia (I_{mpp}) y el voltaje de máxima potencia (V_{mpp}).

En la figura 28 se muestra la hoja de características eléctrica que nos brinda el fabricante del módulo en la cual aparecen los parámetros antes señalados. En este módulo en concreto no se nos brinda las curvas I-V a diferentes irradiancias, no obstante, la simularemos con el simulador construido para ver los resultados obtenidos. El módulo en cuestión es el FS-397-Plus, su hoja de especificaciones se muestra a continuación.

MODULE NUMBERS AND RATINGS AT STC ^{1,2}		
NOMINAL VALUES		FS-397-PLUS
Nominal Power ($\pm 5\%$)	P_{MPP} (W)	97.5
Voltage at P_{MAX}	V_{MPP} (V)	46.3
Current at P_{MAX}	I_{MPP} (A)	2.11
Open Circuit Voltage	V_{OC} (V)	58.6
Short Circuit Current	I_{SC} (A)	2.29
Maximum System Voltage	V_{SYS} (V)	
Limiting Reverse Current	I_R (A)	
Maximum Series Fuse	I_{CF} (A)	

Figura 28. Características eléctricas del módulo de teluro de cadmio FS-397-Plus.

Al simular este módulo a diferentes irradiancias y a temperatura ambiente constante (25 °C) en el simulador realizado en Matlab/Simulink nos da como resultado las siguientes curvas, en ellas se aprecia como varia el área bajo la curva a medida que cambia la irradiancia que recibe el panel.

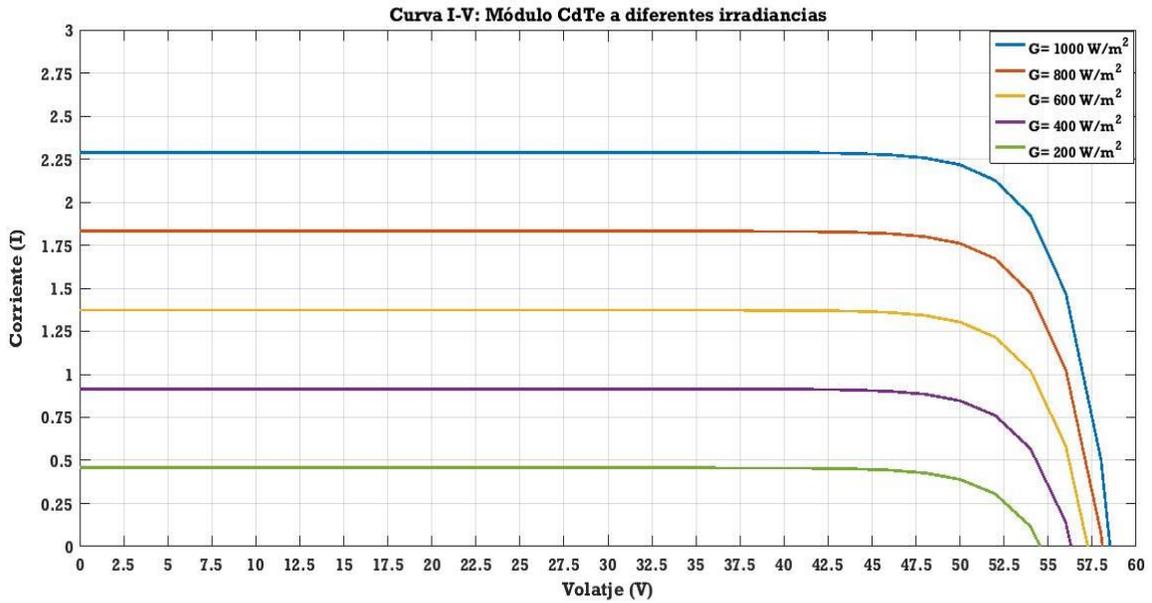


Figura 29. Curvas I-V superpuestas a diferentes irradiancias del módulo de telurio de cadmio FS-397-Plus

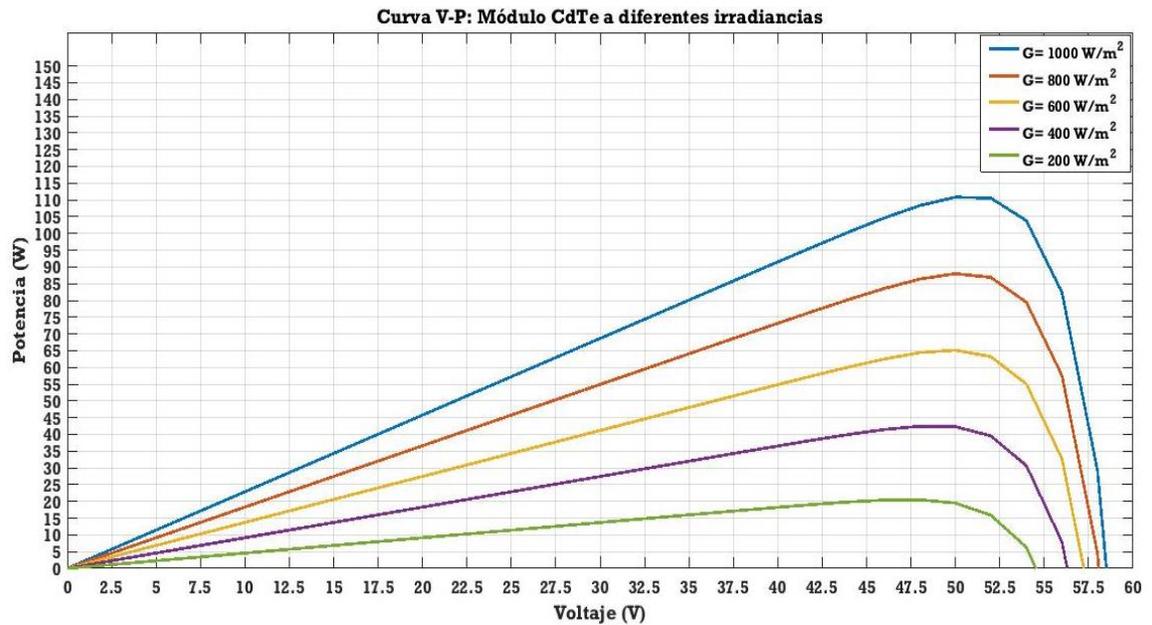


Figura 30 Curvas V-P superpuestas a diferentes irradiancias del módulo de telurio de cadmio FS-397-Plus.

Considerando que estos valores variarán dependiendo de las condiciones ambientales (irradiación solar y temperatura ambiente), vemos que con un valor de irradiancia de 1000 W/m² obtenemos un V_{oc} = 58,6V, I_{sc} = 2,29A; mientras que con una irradiancia de 200 W/m²

se obtuvo un $V_{oc} = 54,5V$ e $I_{sc} = 0,45A$. Notándose que la variación de irradiancia es directamente proporcional a la corriente producida por el módulo.

Al obtener la gráfica V-P (figura 30) se puede apreciar como la potencia también varía en función de los valores de irradiancia, al mayor ser esta, mayor potencia nos entregara el modulo y al disminuir por consiguiente menor potencia extraemos.

Además, de la curva I-V podemos obtener el factor de llenado (FF), el cual es un parámetro que en conjunto con el V_{oc} e I_{sc} , determina la potencia máxima de una célula solar. El factor de llenado se define como la relación de la potencia máxima de la célula solar para el producto de V_{oc} e I_{sc} . Gráficamente, el FF es una medida de la "cuadratura" de la célula solar y también es el área del rectángulo más grande que se ajuste en la curva I-V.

En este caso cuando la irradiancia es igual a $1000 W/m^2$, se obtiene un factor de llenado "FF" de 0,82; mientras que con una irradiancia de $200 W/m^2$ se obtuvo un $FF = 0,65$. De lo cual podemos concluir que al tener un mejor factor de llenado extraemos más potencia del módulo.

En esta parte simulamos las curvas I-V y V-P, pero ahora variando las temperaturas y con la misma irradiancia ($1000 W/m^2$), los resultados obtenidos son los siguientes:

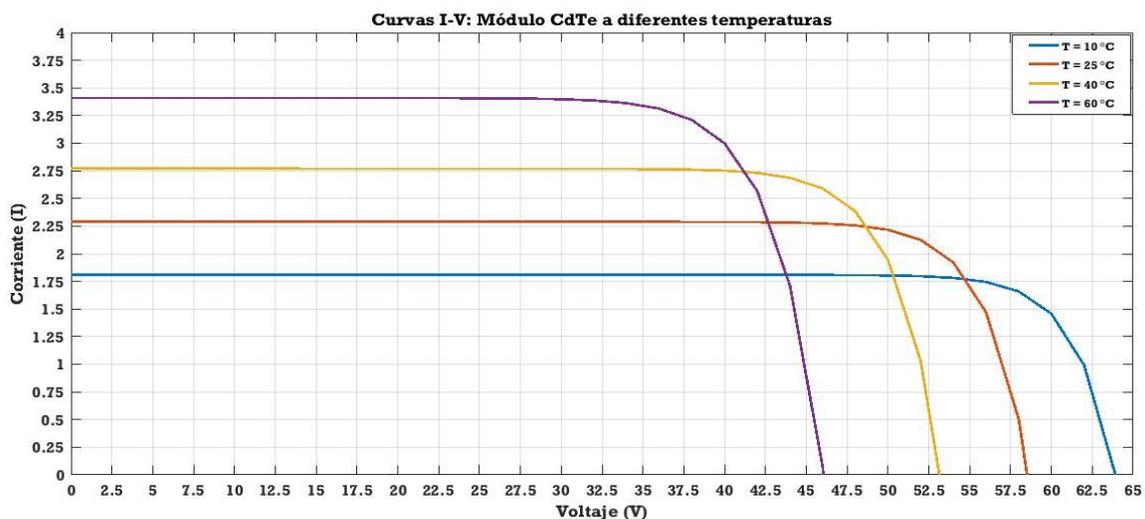


Figura 31. Curvas I-V superpuestas a diferentes temperaturas y la misma irradiancia del módulo de telurio de cadmio FS-397-Plus.

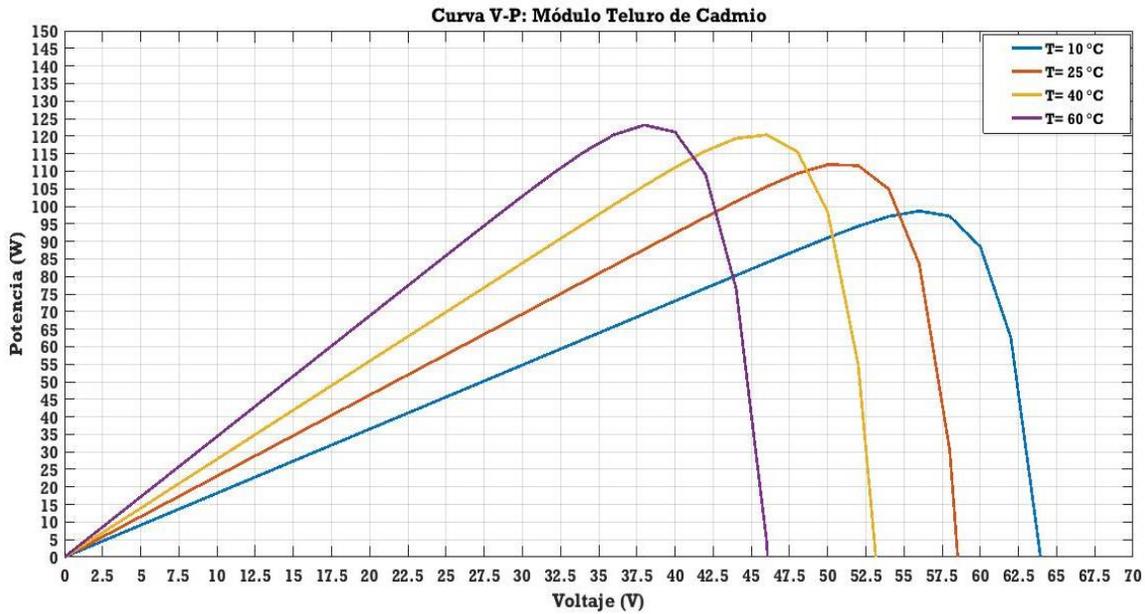


Figura 32. Curvas V-P superpuestas a diferentes temperaturas del módulo de telurio de cadmio FS-397-Plus.

En las figuras anteriores (31 y 32) se aprecia como la influencia de la temperatura afecta el comportamiento eléctrico del módulo fotovoltaico. Se puede observar como al aumentar o disminuir la temperatura ambiente, también cambian las magnitudes de funcionamiento del módulo (Se debe tener en cuenta que en este estudio no se tomó valores de temperatura del módulo, pero por regla general la temperatura del módulo siempre está por encima de la temperatura ambiente; por lo general unos 25 °C más elevada). De aquí podemos concluir que un incremento en la temperatura sobre el módulo afecta negativamente la tensión de salida del mismo, afectando de igual forma su factor de llenado. Cabe recalcar también que los módulos son caracterizados bajo condiciones estándar (STC), es decir, 1000 W/m² de irradiación, una distribución espectral de 1,5 AM y una temperatura de la célula de 25 °C; entonces para obtener dicha temperatura debemos tener una temperatura ambiente aproximadamente de - 5 °C.

Analizando las figuras anteriores se observa que con la menor temperatura simulada (10 °C) se aumenta la magnitud del voltaje en el módulo hasta alcanzar un valor de 64,1V; mientras la magnitud de la corriente disminuye hasta un valor de 1,8A, en cambio con 25 °C se consiguió un voltaje de 58,6V y una corriente de 2,29A, con T =40 °C el Voltaje fue de 53,1V

y al alcanzar los 60 °C de temperatura el voltaje obtenido fue de 45,9V; mientras la corriente es de 3,40A.

También se puede observar que, al aumentar la temperatura en el módulo, también lo hace la corriente suministrada por el mismo. Por otra parte, al analizar el factor de llenado (FF) respecto a la variación de temperatura se obtuvo que con una temperatura de 10 °C el FF = 0,85, para una T = 25 °C de FF = 0,82, para T = 40 °C se alcanzó un FF = 0,80 y para una T = 60 °C el FF = 0,78. Lo cual nos dice que el incremento de la temperatura también afecta la calidad del factor de llenado.

4.8 REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE CAMPO TOMADOS EN EL MÓDULO DE TELURO DE CADMIO EN EL SEGUIDOR DE DOS EJES

Una vez instalado el módulo fotovoltaico en el seguidor solar empezamos a tomar medidas para su posterior análisis e interpretación. Al tomar las medidas con el trazador I-V, este nos permite visualizar las curvas en un software propio y además nos da la posibilidad de exportar los datos a una hoja Excel; lo cual es una gran ventaja para nuestros propósitos. Aprovechando esto se ha realizado un script en MatLab (ver anexo II) para obtener las curvas deseadas a partir de las medidas tomadas por el trazador.

A modo de ejemplo se presentarán algunas curvas obtenidas a diferentes irradiancias y temperaturas tomadas en diferentes días y horas. Las siguientes curvas fueron tomadas a lo largo de un día soleado el 09/05/18 a las 10:45 horas, en este momento había una irradiancia de 620 W/m² y una temperatura ambiente de 23,1 °C. En la figura 33 se muestra la curva I-V y V-P generada a partir de los datos obtenidos.

Con las condiciones señaladas el módulo suministro una $I_{sc} = 1,44A$ y una $V_{oc} = 59,1V$. En cambio, en la curva V-P se puede apreciar que la máxima potencia alcanzada fue de 60W. También se llevó a cabo los cálculos para la eficiencia del módulo, la cual es el parámetro más empleado para comparar comportamientos de distintas células solares, este parámetro relaciona la energía que produce el modulo con la energía incidente. En este caso se obtuvo una eficiencia (η) de 13,4%.

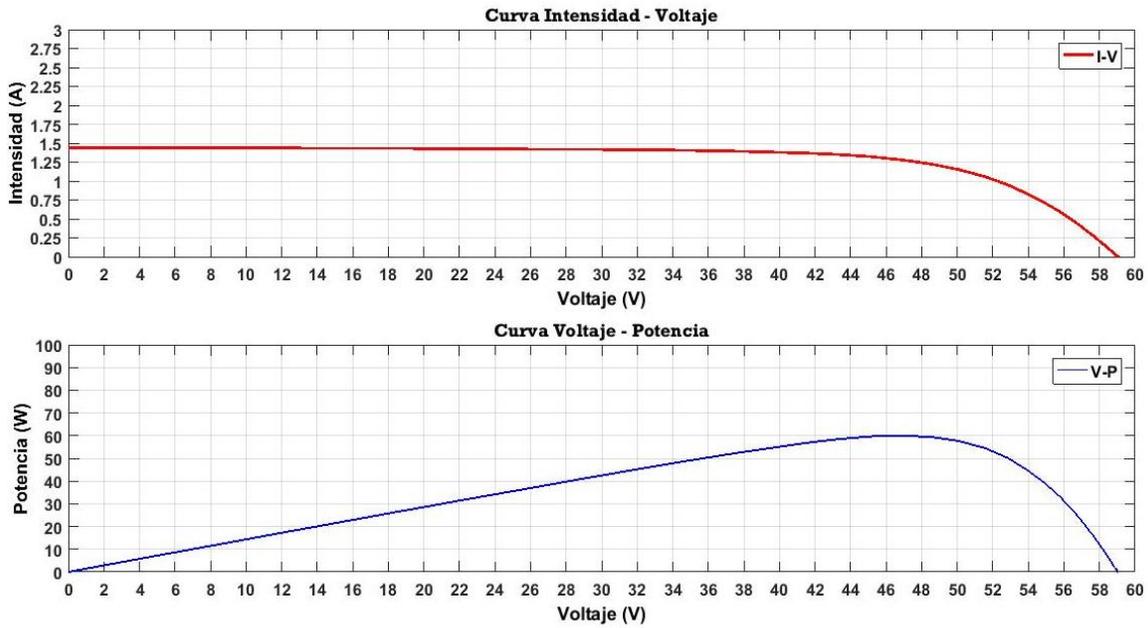


Figura 33. Curva I-V y V-P realizada a partir de los datos tomados del trazador el día 09/05/18 a las 10:40 horas y generada con el script realizado en Matlab.

Las siguientes curvas (figura 34) fueron tomadas el 09/05/18 a las 12:53 pm, en este momento había una irradiancia de 1080 W/m^2 y una temperatura ambiente de $28,3 \text{ }^\circ\text{C}$. En esta ocasión la $I_{sc} = 2,56\text{A}$, $V_{oc} = 54,4\text{V}$ y se obtuvo una $P_{max} = 90,3 \text{ W}$. En este caso el módulo alcanzo una eficiencia de conversión de tan solo el 11,6%.

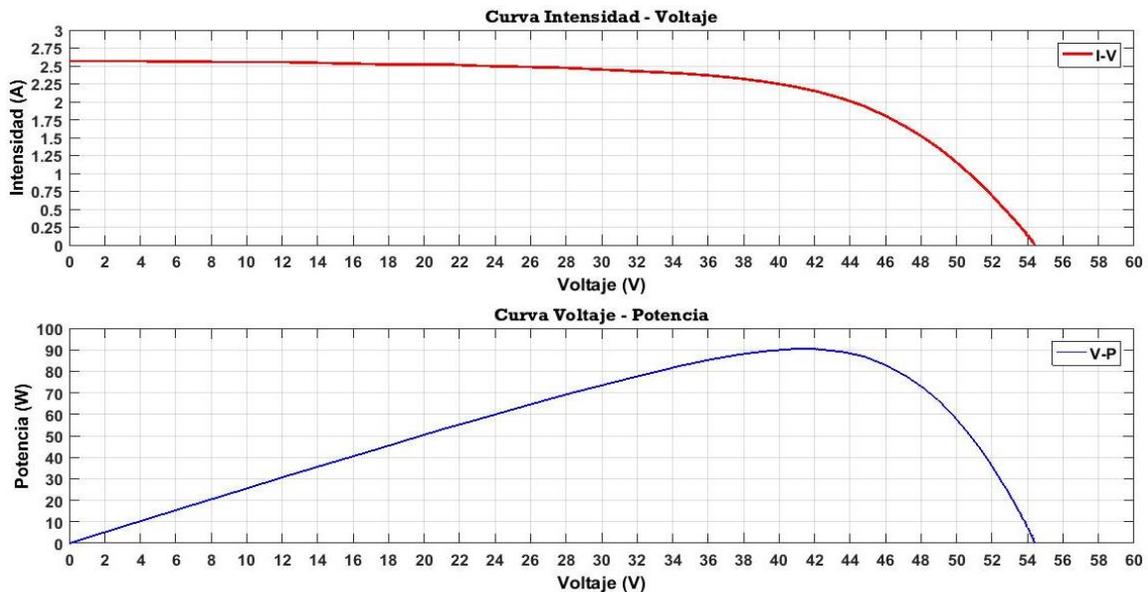


Figura 34. Curva I-V y V-P realizada a partir de los datos tomados del trazador el día 09/05/18 a las 12:53 horas y generada con el script de Matlab.

Ya analizando una última curva tomada para el día 09/05/18 a las 16:00 horas (figura 35), en este momento había una irradiancia de 1105 W/m^2 y una temperatura ambiente de $25,9 \text{ }^\circ\text{C}$. En esta hora fue que se obtuvo la mayor irradiancia del día, en ese momento el módulo proporciona una $I_{sc} = 2,58\text{A}$, $V_{oc} = 56,83\text{V}$ y una $P_{max} = 96,3\text{W}$.

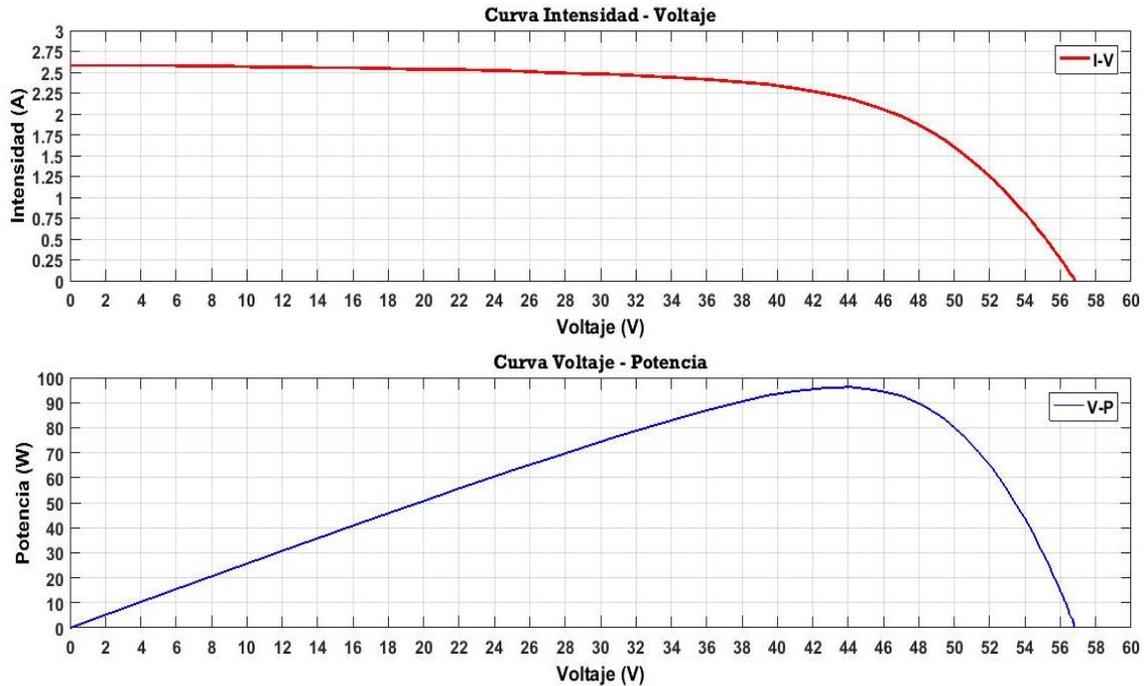


Figura 35. Curva I-V y V-P realizada a partir de los datos tomados del trazador el día 09/05/18 a las 16:00 horas y generada con el script de Matlab.

En las figuras 36 y 37 se han superpuestos las curvas I-V y V-P en una misma figura para visualizar más claramente las variaciones existentes.

Se puede observar claramente la afectación de las condiciones climatológicas en las curvas superpuestas, en ellas se aprecia que al aumentar la irradiancia, la magnitud de la corriente en la curva I-V es el parámetro que más se ve afectado; por el contrario, al variar los rangos de temperatura, la magnitud del voltaje es el parámetro que más cambia.

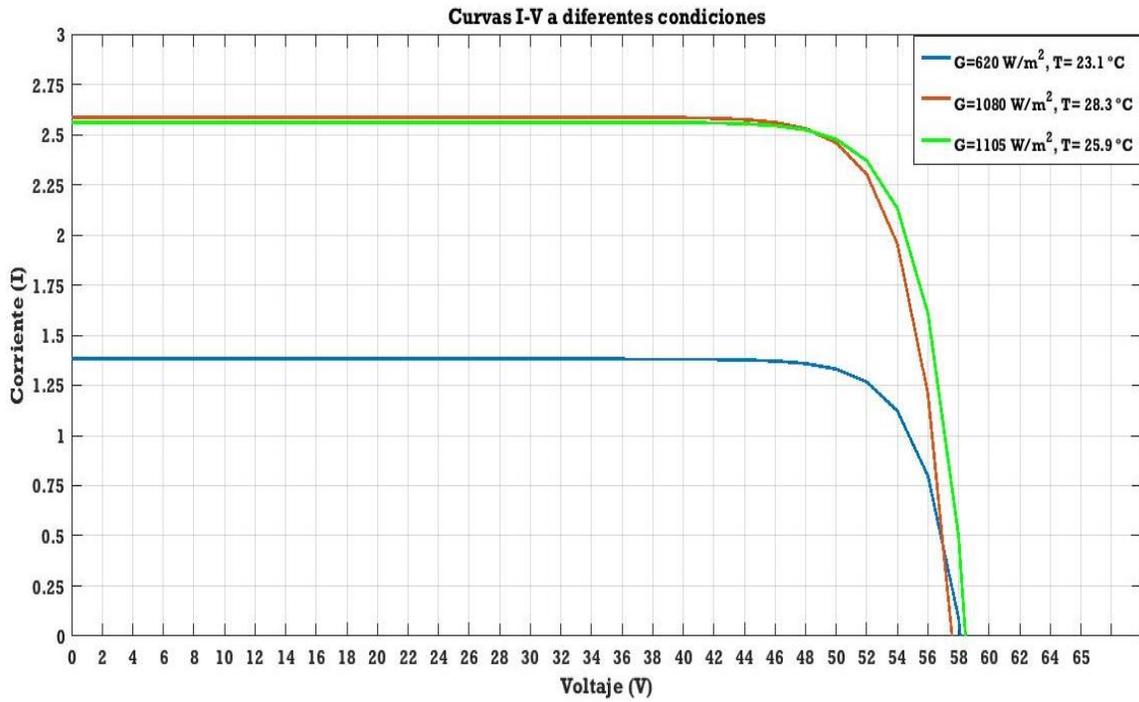


Figura 36. Curvas I-V superpuestas tomadas con el trazador a diferentes condiciones de irradiancias y temperaturas.

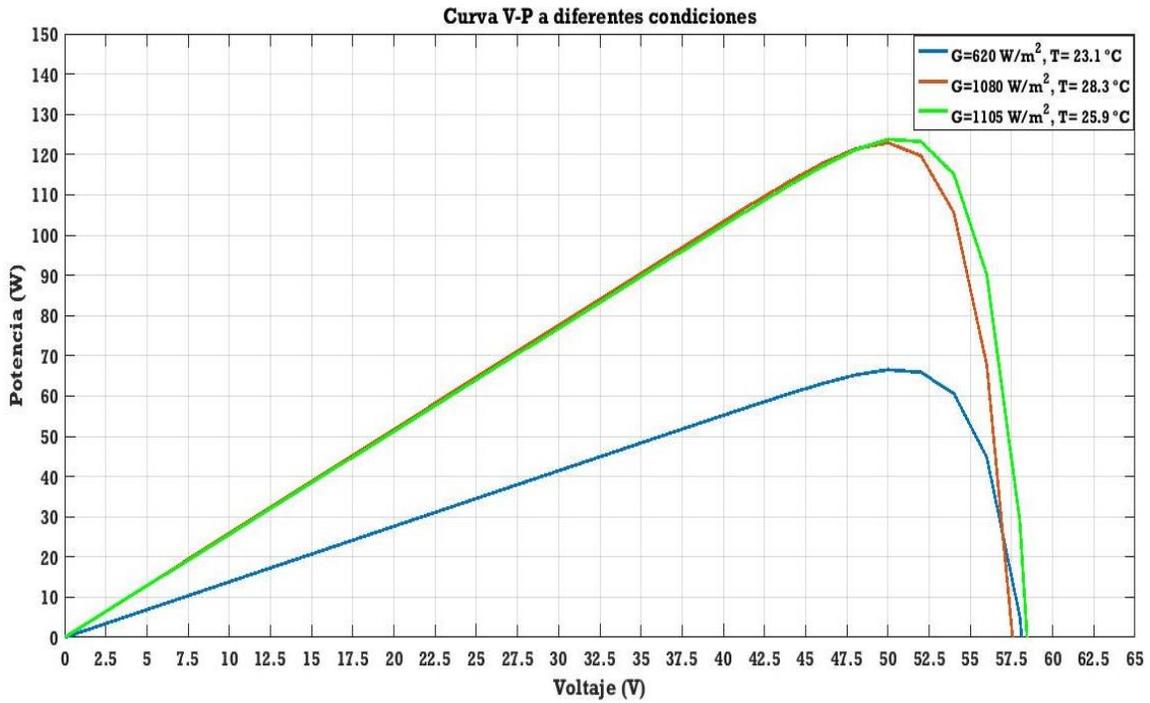


Figura 37. Curvas V-P superpuestas tomadas con el trazador a diferentes condiciones de irradiancias y temperaturas.

Ahora se eligió otro día en particular para continuar con las mediciones, en dicho caso se optó por el 23/05/18. Este día en concreto se dejó el trazador IV tomando medidas automatizadas en intervalos de tiempo de 1 minuto entre muestras. Al finalizar del día se obtuvo alrededor de 450 mediciones las cuales se analizaron y de las cuales se presentan los resultados más interesantes.

La primera que se analizó fue tomada a las 15:17 horas, en la cual se presentó la máxima radiación de ese día con un valor marcado por el sensor de irradiancia de 1250 W/m^2 , además la temperatura ambiente se registró un valor de $29,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Al graficar los datos se obtuvo el siguiente resultado (figura 38).

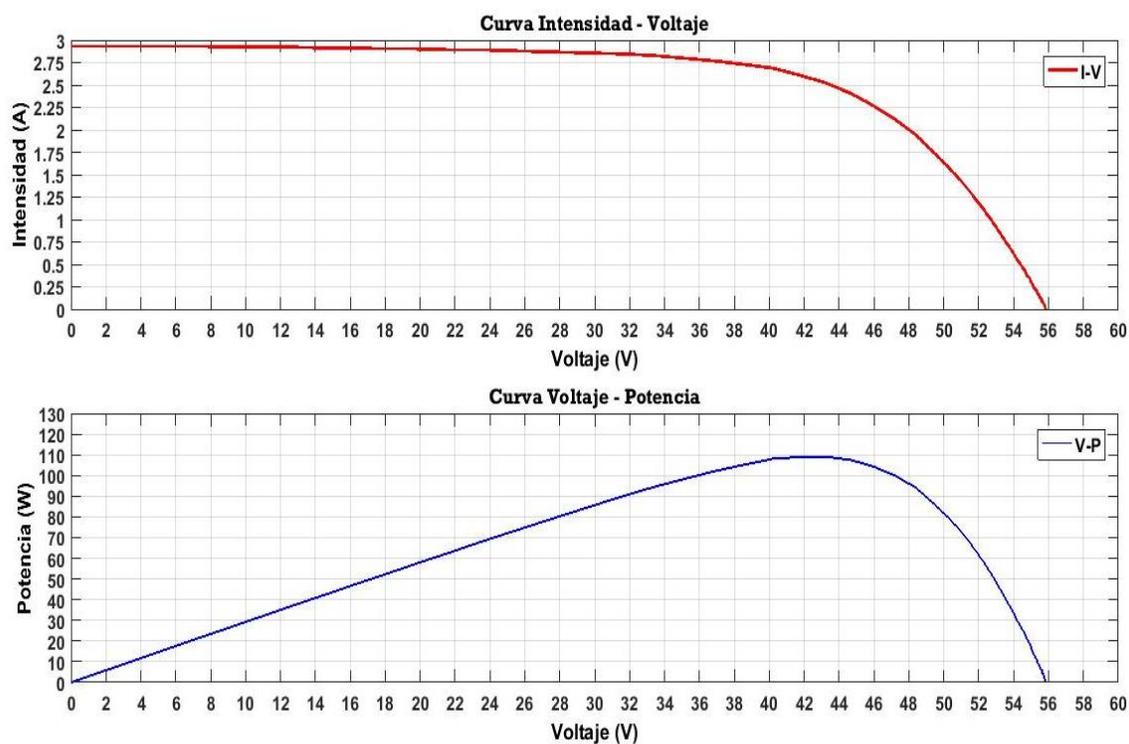


Figura 38. Curvas V-P superpuestas tomadas con el trazador a diferentes condiciones de irradiancias y temperaturas.

En este instante el panel entregó un $V_{oc} = 56\text{V}$ y una $I_{sc} = 3\text{A}$ superando el valor establecido en la hoja de especificaciones del fabricante realizado bajo condiciones estándar STC. En esta medición en particular el panel suministró una potencia máxima de $110,8\text{W}$, la eficiencia en conversión de energía fue de $12,3\%$ y el factor de llenado de $0,66$.

La siguiente medida que se presenta fue tomada alrededor de las 16:00 a 17:00 hora donde hubo algunas nubes y por lo cual se consiguió algunas buenas curvas con baja irradiancia. Una de las cuales fue tomada en concreto a las 16:32 (figura 39), donde se midió una irradiancia de 152 W/m^2 y una temperatura de $26,1 \text{ }^\circ\text{C}$; la segunda de las mediciones (figura 40) fue tomada a las 17:27 con una irradiancia de 231 W/m^2 y una temperatura ambiente de $25,3 \text{ }^\circ\text{C}$.

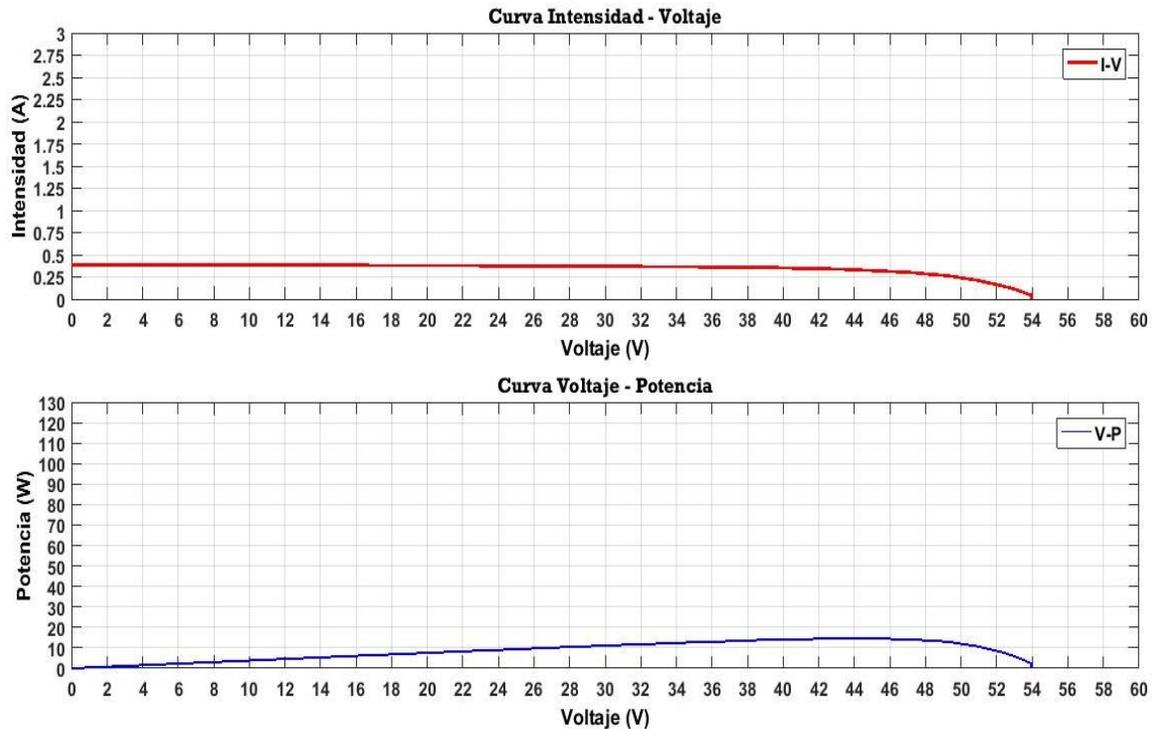


Figura 39. Curva I-V y V-P tomada el día 23/05/18 a las 16:32 horas en momento en que el cielo se encontraba nublado.

Con dichas condiciones se obtuvo una $I_{sc} = 0,39\text{A}$, $V_{oc} = 53,96\text{V}$ y una $P_{max} = 14,6\text{W}$, sin embargo, la eficiencia en conversión de energía fue de $13,3\%$; mientras que el $FF = 0,67$.

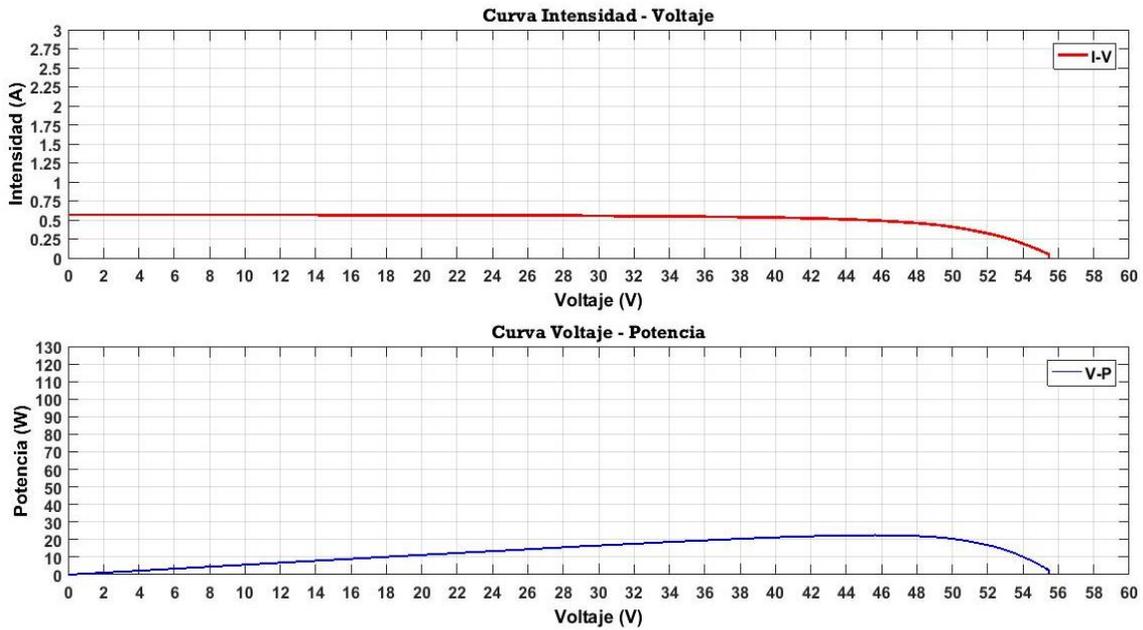


Figura 40. Curva I-V y V-P tomada el día 23/05/18 a las 17:27 horas en momento en que el cielo se encontraba nublado.

En la figura anterior se muestra el comportamiento del módulo con las condiciones ya mencionadas en este caso se obtuvo una $I_{sc} = 0.57A$, el $V_{oc} = 55.47V$ y la $P_{max} = 22.6W$. La eficiencia en conversión de energía fue de 13,5%.

4.9 AFECTACIÓN DE LA R_s Y R_p EN EL MÓDULO DE TELURO DE CADMIO

Existen muchos factores que influyen en el comportamiento de los módulos fotovoltaicos, pero la mayoría de estos no se toman en cuenta en las pruebas de laboratorio. Estos factores pueden ser la variación de la temperatura ambiente y la irradiancia, las resistencias internas de los cables, la temperatura del módulo en el momento de la medición, entre otros. Ya que se ha diseñado un simulador en Matlab/Simulink, analizaremos el comportamiento las curvas generadas replicando las mismas condiciones del lugar, pero variando las resistencias internas (R_s y R_p) para su posterior análisis.

En principio se evaluó como se comportaría el módulo bajo condiciones estándar (STC), pero variando la resistencia serie de éste. La figura 40 muestra los resultados obtenidos:

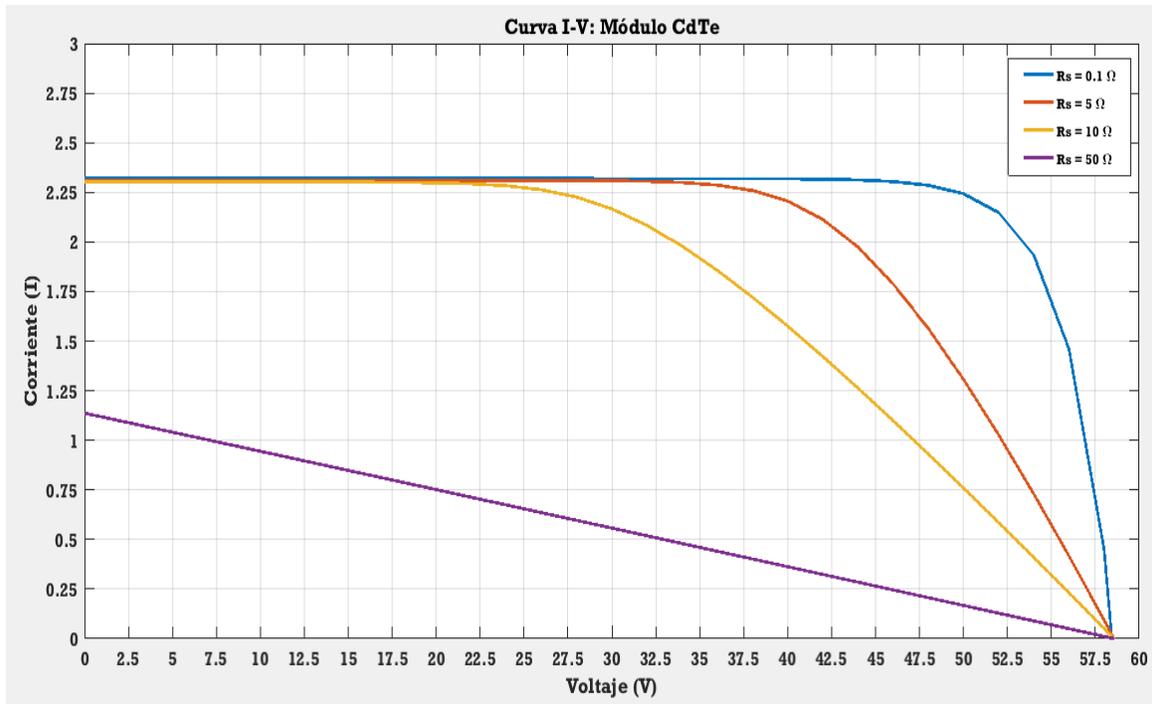


Figura 41. Influencia de la variación de la resistencia serie (R_s), en la curva I-V del módulo de Teluro de cadmio FS-397-Plus bajo condiciones estándar.

A medida que la resistencia serie (R_s) aumenta, la curva I-V se va haciendo menos pronunciada, dando lugar a un pésimo factor de llenado y por consiguiente una mala eficiencia presentada por el módulo. En la curva I-V simulada con una resistencia de 0.1Ω (línea azul), el factor de llenado fue de 0,83; con una resistencia de 5Ω (línea roja) el factor de llenado fue 0,67; mientras que con una resistencia de 10Ω (línea amarilla) se obtuvo un factor de llenado de 0,50 y con la última de las resistencias evaluadas con un valor de 50Ω (línea violeta) se obtuvo un factor de llenado de tan solo 0,25.

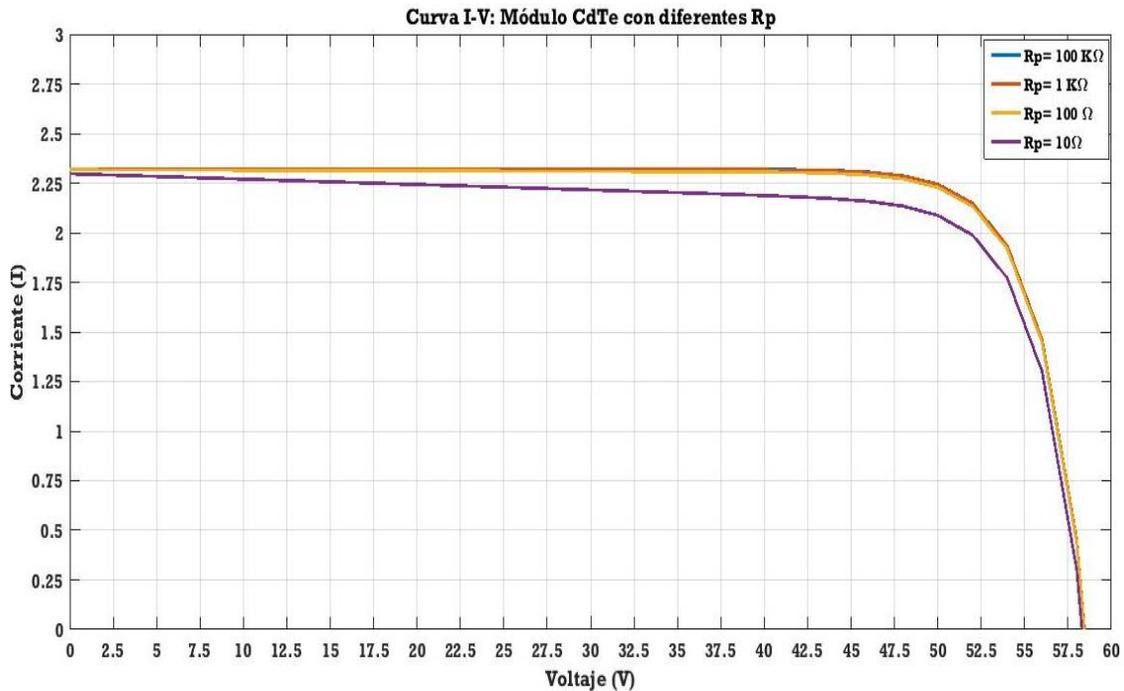


Figura 42. Influencia de la variación de la resistencia paralelo (R_p), en la curva I-V del módulo de Teluro de cadmio FS-397-Plus.

La figura 42 muestra cómo afecta la variación de R_p en este módulo en concreto, en ella se obtuvo un resultado interesante. La pendiente de la curva I-V no se ve muy afectada incluso disminuyendo mucho el valor de la resistencia paralelo; esto se debe a que este módulo está construido internamente por tan solo dos ristras en paralelo, cada una de las cuales está formada por 73 células en serie. Por lo cual este módulo posee un voltaje elevado y una corriente pequeña, debido a esto al disminuir la R_p la curva I-V no varía demasiado.

Un último análisis que se hizo fue realizar una comparativa entre las curvas V-P, evaluando las condiciones de irradiancia sobre un plano fijo (orientación sur) y en el seguidor de dos ejes. Para de esta manera ver las posibles ventajas de montar los módulos sobre un seguidor solar, respecto a dejarlos fijos sobre una superficie. En este análisis basta con evaluar uno de los días trabajados, ya que para cualquier de los demás días se comportará de manera similar. El día elegido fue el 09/05/2018. La siguiente tabla muestra los niveles de irradiancias tomados ese día tanto en un plano fijo (orientación sur), como en el seguidor de dos ejes.

	Radiación Global (W/m ²)	
Tiempo (h)	Plano Fijo	Seguidor
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	5	39
6	77	108
7	220	335
8	345	440
9	417	530
10	531	620
11	712	824
12	869	923
13	811	1009
14	693	1062
15	552	1080
16	377	1105
17	193	808
18	51	787
19	0	62
20	0	0
21	0	0

Tabla I. Radiación Global en el plano fijo y sobre un seguidor solar de dos ejes.

En la figura 43 se observa como varían los niveles de irradiancia en un plano fijo (orientado hacia el sur), respecto a un seguidor de doble eje. Notándose que se consigue un mayor aprovechamiento de la irradiancia al usar un seguidor.

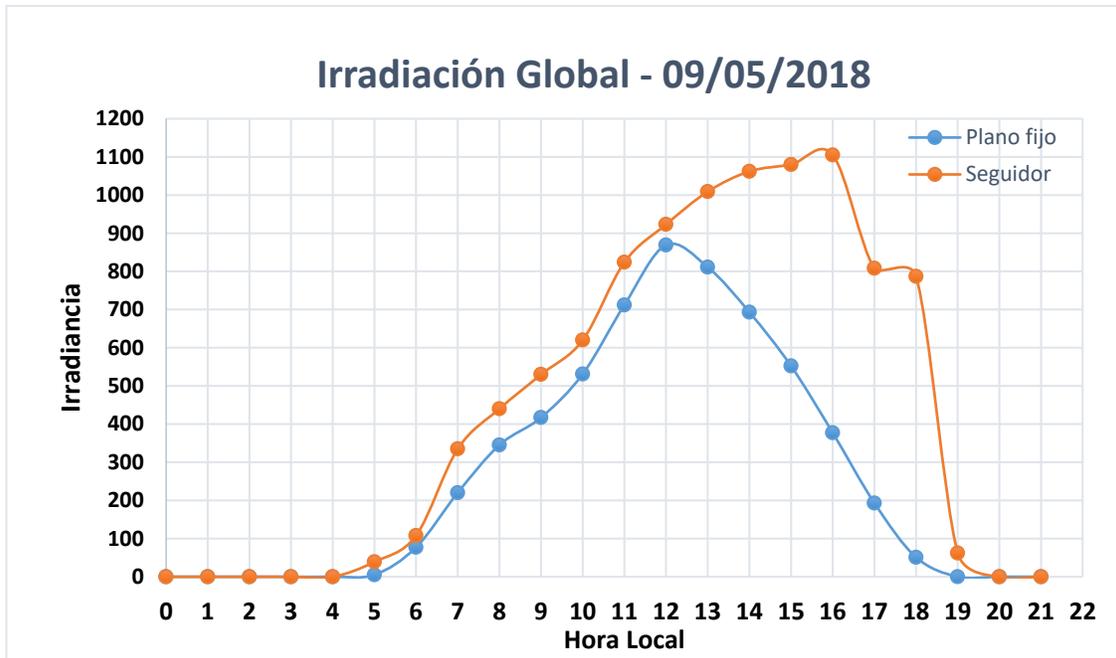


Figura 43. Radiación Global sobre un plano fijo y en un seguidor con datos obtenidos el 09/05/2018.

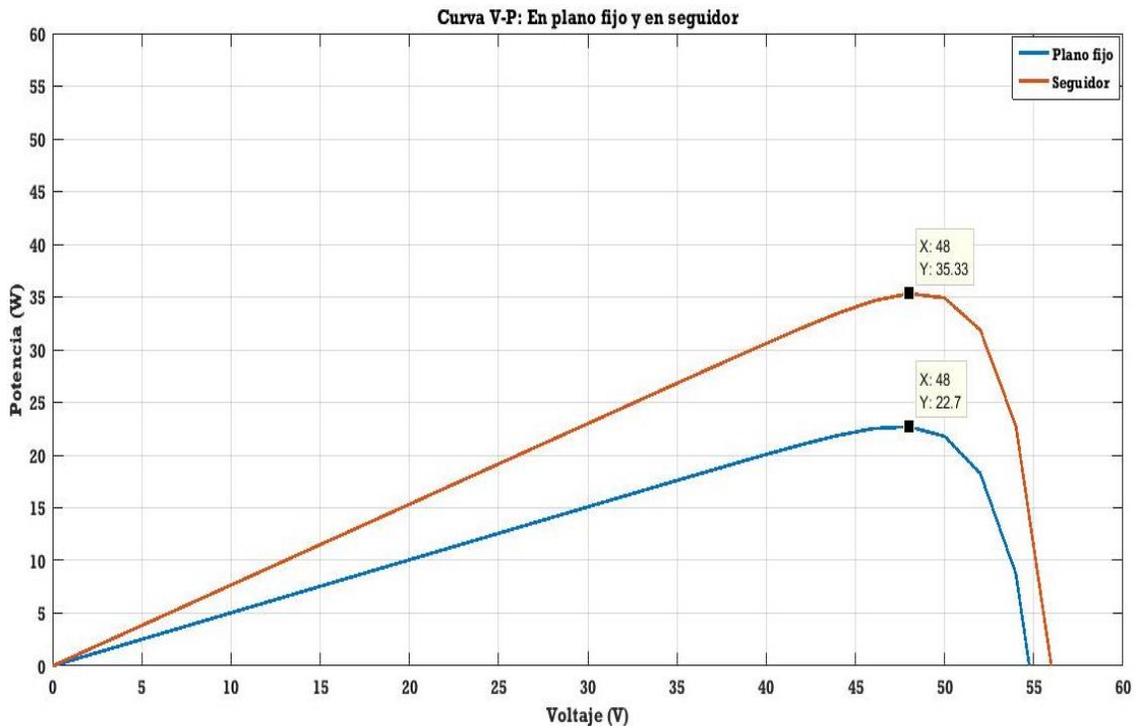


Figura 44. Curva V-P en plano fijo y seguidor generada a partir de datos tomados a las 7:00 horas del día 09/05/2018.

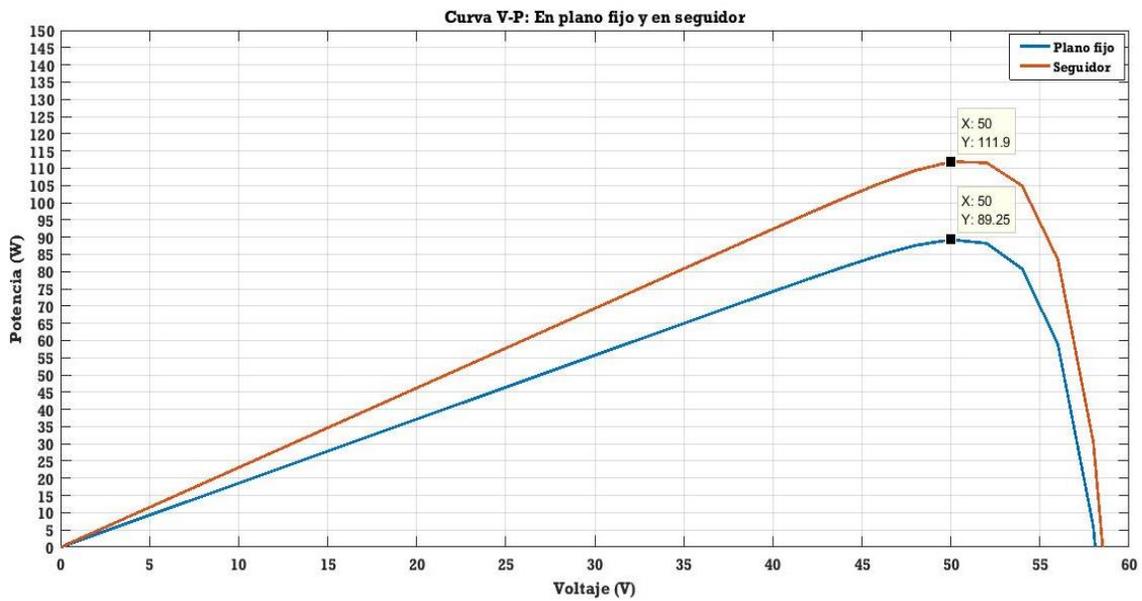


Figura 45. Curva V-P en plano fijo y seguidor generada a partir de datos tomados a las 13:00 horas del día 09/05/2018.

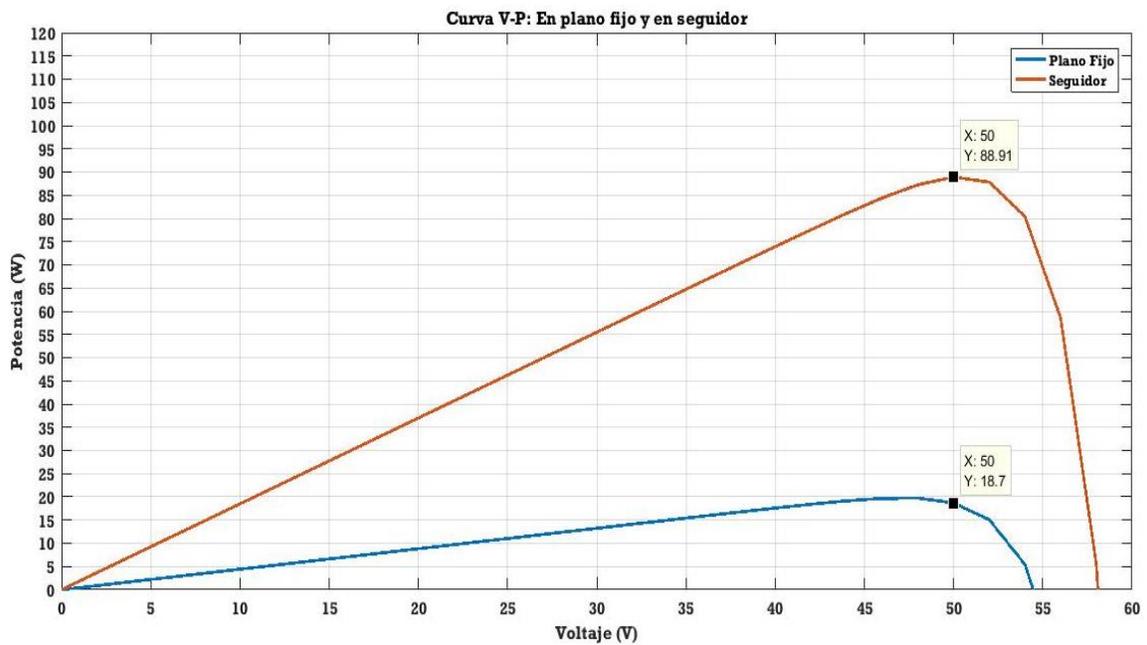


Figura 46. Curva V-P en plano fijo y seguidor generada a partir de datos tomados a las 17:00 horas del día 09/05/2018.

Luego de analizados los resultados se llegó a la conclusión de que obtenemos aproximadamente un 22% más de producción en este panel si el mismo está instalado sobre un seguidor de dos ejes respecto a un plano fijo (orientado al sur).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El objetivo principal de este trabajo fue la puesta en marcha y caracterización de módulos fotovoltaicos de diversas tecnologías sobre un seguidor solar de dos ejes, mediante la automatización de un sistema de medida. Este objetivo se cumplió casi en su totalidad, ya que se logró poner en marcha tanto el seguidor solar, como el trazador IV para adquirir las medidas de manera automáticas. No obstante, a pesar de caracterizar todas las tecnologías del estudio, solo se pudo analizar sobre el seguidor la de telurio de cadmio (CdTe).

En cuanto a los objetivos específicos que se plantearon fueron conseguidos en su todos con éxito, ya que se logró analizar los datos recogidos por el trazador con la herramienta diseñada en MatLab para dichos fines. Por otro parte, se pudo analizar las curvas IV y VP en diferentes condiciones de operación tanto en experimentos de campo, como con el simulador fotovoltaico diseñado en MatLab/Simulink.

Para la elaboración del simulador a través del modelo matemático propuesto, se tuvo que partir del entendimiento de algunos fenómenos físicos como el efecto fotoeléctrico, así como también conocer las ecuaciones utilizadas para poder aproximar las curvas generadas lo más posible a la realidad, con la finalidad de obtener los resultados más fiables.

Por otra parte, al evaluar las características dadas por el fabricante del módulo con los datos obtenidos en experimentos de campo se concluye que estos cumplen dichas especificaciones.

En cuanto al seguidor solar luego de realizar los cálculos pertinentes se concluyó que se puede extraer un 22% más de energía del panel al este estar instalado sobre él, respecto a un plano fijo orientado hacia el sur.

A modo de recomendación fuera de especial interés que en un futuro próximo la universidad disponga de más equipamiento necesario para hacer este tipo de trabajos; ya que de esta manera se realizarían trabajos más extensos y con más profundidad de investigación.

Por otra parte, fuera de especial interés que, con los scripts realizados en Matlab, tanto para el estudio de las curvas IV generadas por el trazador, así como el script diseñado para simulador fotovoltaico se diseñara una aplicación más amigable para el usuario.

Por último y no por eso menos importante, como futuras líneas de investigación o ampliación del proyecto se pueden estudiar otros factores que afectan las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos, como son el efecto de sombra, las pérdidas por temperatura, etc.

BIBLIOGRAFÍAS

- [1] Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). Resumen del plan de Energías Renovables 2011-2020.
- [2] https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_english.pdf.
- [3] O.M. Roche, R.E. Blanchard, 2018 - Design of a solar energy centre for providing lighting and income-generating activities for off-grid rural communities in Kenya. DOI: 10.1016/j.renene.2017.11.053
- [4] Haein Kima, Tae Yong Jung, 2017 - Independent solar photovoltaic with Energy Storage Systems (ESS) for rural electrification in Myanmar. Renewable & Sustainable Energy Reviews. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.037
- [5] International Renewable Energy Agency (IRENA), 2018 - Renewable Capacity Statistics, ISBN: 978-92-9260-057-0 (PDF).
- [6] <https://www.ariaia.es>, 2018 - El estado de la energía solar en España.
- [7] Asociación de Empresas de Energías Renovables (APPA), 2018 – Energías Renovables, Balance Energético 2017 y Perspectiva 2018
- [8] <https://www.xataka.com/energia/el-impuesto-al-sol-pierde-su-primera-gran-batalla-en-europa-un-paso-importante-pero-insuficiente>
- [9] R.H. Bube, 2018 - “Series on properties of semiconductor materials. Vol. 1 - Photovoltaic Materials”, Imperial College Press.
- [10] Agencia estatal de meteorología (AEMet), 2014. – La Radiación Solar
- [11] Adrian S. T. Tan and S. Iqbal, 2018 – Implementation of INC MPPT and CV Charging Using LLC Resonant Converter for Solar Streetlight System. DOI: 10.1142/S0218126618500433.

- [12] International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 5, Issue 3, March 2015. ISSN 2250-3153. Solar Tracking System, pág. 142.
- [13] Seung Jin Oh, Yoon Joon Lee, Kuan Chen, Young Min Kim, Sang Hoon Lim and Wongee Chun, 2011. - Development of an embedded solar tracker for the enhancement of solar energy utilization. DOI: 10.1002/er.1813.
- [14] Xuan Hieu Nguyen and Minh Phuong Nguyen, 2015. Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink. DOI 10.1186/s40068-015-0047-9
- [15] María del Carmen Alonso García, 2007. El Generador Fotovoltaico.

ANEXOS

5.1 ANEXO I: SCRIPT DE MATLAB PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL SIMULADOR FOTOVOLTAICO.

```
% Características eléctricas del panel fotovoltaico a estudiar.

Voc = 58.6;           % Voltaje de circuito abierto
Isc = 2.29;          % Intensidad de cortocircuito
Ns = 73;             % Número de células en serie
Np = 2;              % Número de células en paralelo

% Parámetros de interés para las células fotovoltaicas.

ki = 0.032;          % Corriente de cortocircuito de la célula en STC
q = 1.60218e-19;    % Carga del electrón
K = 1.38065e-23;    % Constante de Boltzmann
n = 1.3;             % Factor de idealidad del diodo
Eg0 = 1.49;          % Gap de energía del material de la célula
Rs = 0.221;          % Resistencia serie del módulo
Rsh = 415.405;       % Resistencia paralelo del módulo
Tn = 25 + 273.15;   % Temperatura de referencia en grados kelvin
```

5.2. ANEXO II: SCRIPT DE MATLAB PARA GRAFICAR LOS DATOS EXPORTADOS A EXCEL DEL TRAZADOR.

```
% Comportamiento de un panel solar con datos de campo

% Importamos el archivo Excel generado por el trazador I-V

Archivo = uigetfile('.xls');

% Definimos las columnas del archivo Excel para la nube de puntos I, V, P

V = xlsread(Archivo, 1, 'A19:A119');
I = xlsread(Archivo, 1, 'B19:B119');
P = xlsread(Archivo, 1, 'C19:C119');

%Definimos las columnas del archivo Excel para G, Isc, Voc, Ipmax, Vpmax, Ppk

G = xlsread(Archivo, 1, 'B7');
Isc = xlsread(Archivo, 1, 'B8');
Voc = xlsread(Archivo, 1, 'B9');
Ipmax = xlsread(Archivo, 1, 'B10');
Vpmax = xlsread(Archivo, 1, 'B11');
Ppk = xlsread(Archivo, 1, 'B16');
```

```
% Definimos algunos parámetros de interés para la caracterización de las
celdas fotovoltaicas
```

```
K = 1.38065e-23;
q = 1.60218e-19;
T = 298.15;
Gstc = 1000;
I0 = 1e-10;
```

```
% Calculo del Factor de Forma
```

```
FF = (Ipmax*Vpmax)/(Isc*Voc);
```

```
n = (Ipmax*Vpmax)/(G);
```

```
% Calculo del punto de máxima potencia
```

```
Pmpp = FF*Isc*Voc;
```

```
% Se grafican las curvas I-V
```

```
figure (1);
subplot (2,1,1);
plot (V,I,'r','linewidth',1.15, 'Marker','none');
title('Curva Intensidad - Voltaje', 'FontWeight', 'normal',
'Color','black', 'FontName', 'Rockwell');
legend ({'I-V'}, 'TextColor','black', 'FontSize',10);
xlabel('Voltaje
(V)', 'FontSize',12, 'FontWeight', 'normal', 'Color', 'black');
ylabel('Intensidad
(A)', 'FontSize',12, 'FontWeight', 'normal', 'Color', 'black');
axis([0 60 0 3]);
set(gca, 'XTick',0:2:60, 'YTick', 0: 0.25: 3, 'FontSize',11,
'FontWeight', 'bold', 'Color', 'white');
grid on;
```

```
subplot (2,1,2);
plot (V,I,'r','linewidth',1.15, 'Marker','*');
title('Curva Intensidad - Voltaje', 'FontSize', 20, 'Color','black',
'FontName', 'Rockwell');
legend ({'I-V'}, 'TextColor','black', 'FontSize',10);
xlabel('Voltaje
(V)', 'FontSize',12, 'FontWeight', 'normal', 'Color', 'black');
ylabel('Intensidad
(A)', 'FontSize',12, 'FontWeight', 'normal', 'Color', 'black');
axis([0 60 0 3]);
set(gca, 'XTick',0:2:60, 'YTick', 0: 0.25: 3, 'FontSize',11,
'FontWeight', 'bold', 'Color', 'white');
grid on;
```

```
% Se grafican las curvas V-P
```

```
figure (2);
subplot (2,1,1);
plot (V,P,'blue','linewidth',1.15, 'Marker','none');
```

```

title('Curva Voltaje - Potencia', 'FontWeight', 'normal',
'Color','black', 'FontName', 'Rockwell');
legend ({'V-P'}, 'TextColor', 'black', 'FontSize', 10);
xlabel('Voltaje
(V)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'normal', 'Color', 'black');
ylabel('Potencia
(W)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'normal', 'Color', 'black');
axis([0 60 0 100]);
set(gca, 'XTick', 0:2:60, 'YTick', 0: 10: 100, 'FontSize', 11,
'FontWeight', 'bold', 'Color', 'white');
grid on;

subplot (2,1,2);
plot (V,P, 'blue', 'linewidth', 1.15, 'Marker', '*');
title('Curva Voltaje - Potencia', 'FontSize', 20, 'Color', 'black',
'FontName', 'Rockwell');
legend ({'V-P'}, 'TextColor', 'black', 'FontSize', 10);
xlabel('Voltaje
(V)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'normal', 'Color', 'black');
ylabel('Potencia
(W)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'normal', 'Color', 'black');
axis([0 60 0 100]);
set(gca, 'XTick', 0:2:60, 'YTick', 0: 10: 100, 'FontSize', 11,
'FontWeight', 'bold', 'Color', 'white');
grid on;

% Se gráficas las curvas I-P

figure (3);
subplot (2,1,1);
plot (I,P, 'g', 'linewidth', 1.15, 'Marker', 'none');
title('Curva Intensidad - Potencia', 'FontWeight', 'normal',
'Color', 'black', 'FontName', 'Rockwell');
legend ({'I-P'}, 'TextColor', 'black', 'FontSize', 10);
xlabel('Intensidad
(A)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'normal', 'Color', 'black');
ylabel('Potencia
(W)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'normal', 'Color', 'black');
axis([0 3 0 100]);
set(gca, 'XTick', 0:0.25:3, 'YTick', 0: 10: 100, 'FontSize', 11,
'FontWeight', 'bold', 'Color', 'white');
grid on;

subplot (2,1,2);
plot (I,P, 'g', 'linewidth', 1.15, 'Marker', '*');
title('Curva Intensidad - Potencia', 'FontSize', 20, 'Color', 'black',
'FontName', 'Rockwell');
legend ({'I-P'}, 'TextColor', 'black', 'FontSize', 10);
xlabel('Intensidad
(A)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'normal', 'Color', 'black');
ylabel('Potencia
(W)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'normal', 'Color', 'black');
axis([0 3 0 100]);
set(gca, 'XTick', 0:0.25:3, 'YTick', 0: 10: 100, 'FontSize', 11,
'FontWeight', 'bold', 'Color', 'white');
grid on

```