



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT**

**UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS  
BÁSICAS E INGENIERÍAS**

---

---

**ESTUDIO DE LAS PÉRDIDAS ENERGÉTICAS  
DEBIDAS A UNA INADECUADA ORIENTACIÓN  
DE LAS CELDAS SOLARES FOTOVOLTAICAS  
EN LA CIUDAD DE TEPIC, NAYARIT**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO**

**DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**

**PRESENTA**

**ING. ALAN ROBERTO FIGUEROA FLORES**

**DIRECTORA**

**DRA. YAMILET RODRÍGUEZ LAZCANO.**

**CO-DIRECTOR**

**DR. JESÚS MARIO COLÍN DE LA CRUZ**

**TEPIC, NAYARIT**

**NOVIEMBRE DE 2024**

## Créditos

El trabajo experimental de esta tesis se desarrolló en el Laboratorio de Energías Renovables de la Unidad Académica de Ciencias Básicas e Ingenierías de la Universidad Autónoma de Nayarit y en la Unidad Especializada en Energías Renovables del Centro Nayarita de Innovación y Transferencia de Tecnología (CENITT-UAN). La dirección de tesis estuvo a cargo de la **Dra. Yamilet Rodríguez Lazcano** con la co-dirección del **Dr. Jesús Mario Colín de la Cruz**.

El desarrollo de esta tesis de maestría, realizada por el estudiante Alan Roberto Figueroa Flores con **No. CVU 1230440**, contó con el apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (**CONAHCYT**) a través del Número de Apoyo **No. 826428**, y el proyecto **CONAHCYT PRONAI- 319456**.

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo con todo mi cariño a mi familia, quienes han sido mi pilar fundamental a lo largo de este extenso y significativo trayecto. Especialmente a mis amados padres, Rafael y Rita, cuya presencia y palabras de aliento se convirtieron en una fuente inagotable de motivación para avanzar, aun sin comprender del todo lo que estaba realizando. Siempre me ofrecieron su amor, comprensión y apoyo incondicional, por lo que les estaré eternamente agradecido.

A mis hermanos, Jenny y Herit, quiero expresarles mi gratitud por su generosidad y apoyo inquebrantable. Gracias por asumir mis responsabilidades familiares y por ayudarme en todo lo que no podía atender mientras me concentraba en mis estudios. Ustedes estuvieron siempre ahí, dispuestos a ayudar, haciendo que mi carga fuera más ligera y permitiéndome enfocarme en mis metas académicas.

También dedico esta tesis a mis amigos y compañeros, quienes, de manera desinteresada, me brindaron su apoyo en todo momento. Su compañerismo y amistad han sido esenciales para mí, dándome fuerzas para seguir adelante y recordándome que nunca estaba solo en este desafío.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento, pues sin su apoyo, este logro no habría sido posible.

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a la Universidad Autónoma de Nayarit por brindarme la oportunidad de cursar la Maestría en Ciencias Básicas e Ingeniería y, a la Unidad Académica de Ciencias Básicas e Ingenierías, donde se encuentra el programa académico de maestría, por ofrecerme el entorno propicio para mi desarrollo académico y profesional. También extendiendo mi gratitud a la Coordinación de la Maestría por su valiosa gestión y apoyo. Además, mi más sincero agradecimiento a los profesores que nunca se rindieron y con su dedicación y perseverancia, lograron consolidar la Maestría en Ciencias Básicas e Ingeniería. Su compromiso ha sido una fuente constante de inspiración y motivación a lo largo de todo mi proceso formativo.

Debo también agradecer el apoyo brindado por el CONAHCYT, que, al otorgarme una beca durante dos años, me permitió dedicarme de manera exclusiva a las actividades académicas que culminaron en la realización de esta tesis.

Me es indispensable agradecer a la Unidad Especializada en Energías Renovables del CENITT-UAN, por permitirme el acceso a su laboratorio y realizar pruebas clave para mi investigación. Asimismo, agradezco al proyecto CONAHCYT PRONAI 319456, cuyo financiamiento permitió la adquisición de equipo con el que pude llevar a cabo importantes mediciones en el desarrollo de mi investigación. También deseo extender mi agradecimiento a la Red Solarimétrica Mexicana del Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM, por facilitarme los datos de la estación solarimétrica sede UAN-Tepic, los cuales fueron de mucha utilidad para mi trabajo.

Quiero expresar también mi más profundo agradecimiento a la doctora Yamilet Rodríguez Lazcano, mi directora de tesis, por su inmenso apoyo y orientación. Su amabilidad, paciencia y constante actitud positiva hicieron de este recorrido una experiencia mucho más llevadera. Su enfoque humanista y su capacidad para brindar confianza en los momentos más difíciles han sido invaluable, haber contado con su guía ha sido un verdadero privilegio. También agradezco al doctor

Jesús Mario Colín de la Cruz, co-director de este trabajo, quien siempre estuvo dispuesto a ofrecer su apoyo. Su contribución es igualmente apreciada y valiosa para este trabajo.

El apoyo del comité tutorial fue fundamental para la realización de esta tesis. Agradezco a la Dra. Sarah Ruth Messina Fernández y al Dr. Pablo Velarde Alvarado, su experiencia y dedicación aportaron una perspectiva valiosa en cada etapa de este trabajo, enriqueciendo con sus sugerencias y recomendación. Agradezco profundamente su tiempo y compromiso.

De manera muy especial agradezco al Dr. Iván Salgado Transito y al M.C. José Campos Álvarez ya que, sin títulos protocolarios, me brindaron su apoyo incondicional a lo largo de esta tesis. Su profesionalismo, profundo conocimiento del tema y gran inteligencia fueron esenciales en este proceso. Su disposición para ayudar, más allá de cualquier obligación, fue una muestra de su generosidad y pasión por compartir su conocimiento. También expreso mi agradecimiento al M.C. Fabian Andrés González Ramírez por su apoyo y guía en el manejo de los datos obtenidos de la estación solarimétrica ubicada en el campus UAN-Tepic.

## Resumen

La energía solar es una de las fuentes renovables más abundantes y limpias disponibles en la actualidad, y su aprovechamiento eficiente es crucial para avanzar hacia un futuro sostenible. Sin embargo, para maximizar su potencial, es fundamental optimizar la instalación de los sistemas fotovoltaicos, ya que la orientación y la inclinación de las celdas solares influyen directamente en su rendimiento. En este contexto, se evaluaron las desviaciones en la generación de energía que presentan las celdas solares cuando no están ubicadas en la posición considerada óptima anual por la industria solar fotovoltaica para la ciudad de Tepic, Nayarit. El objetivo principal es generar una tabla que cuantifique las pérdidas energéticas en porcentaje, proporcionando una herramienta útil para conocer el impacto que tiene la desviación en la orientación e inclinación de las celdas solares respecto a la posición óptima anual.

El objetivo de esta investigación se alcanzó mediante un experimento de campo que se llevó a cabo durante un año completo. En este experimento, se expusieron celdas solares en diversas posiciones, variando su inclinación y orientación, para cuantificar la energía generada en cada caso. Los datos obtenidos fueron fundamentales para entender cómo las diferentes configuraciones afectan la generación de energía en las celdas solares. Posteriormente, estos resultados se compararon con las simulaciones realizadas en el software SAM (System Advisor Model), lo que permitió corroborar su viabilidad como herramienta de simulación. Con base en esta comparación, se concluyó que SAM es confiable para la simulación en los términos aplicados al presente trabajo ya que la desviación porcentual respecto al experimento solo fue del 5.35%, permitiendo con ello, la creación de la tabla.

# Índice

1	Introducción .....	1
2	Objetivo general .....	4
2.1	Objetivos específicos .....	4
3	Justificación .....	5
4	Antecedentes .....	6
5	Marco teórico .....	13
5.1	El sol.....	13
5.2	La constante solar .....	13
5.3	La radiación extraterrestre.....	14
5.3.1	Radiación directa .....	15
5.3.2	Radiación difusa .....	15
5.3.3	Radiación reflejada.....	15
5.3.4	Radiación global .....	16
5.3.5	Dirección de la radiación solar .....	16
5.4	La celda solar y sus características .....	19
5.4.1	Características eléctricas de las celdas solares .....	20
5.4.2	La energía generada por una celda solar .....	25
5.5	Estimación de la incertidumbre .....	26
5.5.1	Evaluación de la incertidumbre de medición .....	27
5.5.2	Propagación de errores.....	28
5.5.3	Propagación de errores para la energía .....	29
6	Metodología.....	31
6.1	Estructura de montaje de celdas .....	32
6.2	Celdas solares .....	33
6.3	Sistema de adquisición y almacenamiento de datos .....	33
6.4	Selección de las posiciones de las celdas solares en el experimento .....	36
6.5	Simulación por SAM.....	37
7	Resultados y discusiones .....	41
7.1	Resultados método experimental.....	41
7.1.1	Corrección de los valores experimentales .....	41

<b>7.1.2 Obtención del factor de forma.....</b>	<b>43</b>
<b>7.1.3 Comportamiento de la potencia a lo largo del día .....</b>	<b>44</b>
<b>7.1.4 Cálculo de la energía generada por cada celda del experimento .....</b>	<b>45</b>
<b>7.2 Resultados método simulado.....</b>	<b>49</b>
<b>7.3 Comparación de resultados del método experimental y simulado.....</b>	<b>53</b>
<b>7.4 Obtención de la tabla de pérdidas porcentuales en la generación de energía por una inadecuada orientación de las celdas solares .....</b>	<b>64</b>
<b>8 Conclusiones .....</b>	<b>65</b>
<b>9 Referencias bibliográficas.....</b>	<b>67</b>

## Índice de tablas y figuras

### Tabla.

1	Orientación de celdas en experimento .....	41
2	Relaciones matemáticas para calibración de sensores del experimento .....	42
3	Generación de energía mensual por cada celda del experimento.....	47
4	Generación de energía anual por cada celda del experimento .....	49
5	Energía generada por simulación al mes por cada celda incluida en el experimento.....	50
6	Generación de energía anual por simulación para cada celda que integra el experimento.....	52
7	Valores de energía experimental y simulados para el periodo enero a marzo .	54
8	Valores de energía experimental y simulados para el periodo abril a junio .....	55
9	Valores de energía experimental y simulados para el periodo julio a septiembre.....	57
10	Valores de energía experimental y simulados para el periodo octubre a diciembre .....	59
11	Energía generada anual por experimentación y simulación para las siete posiciones del experimento .....	60

### Figura.

1	Variación anual de la declinación solar .....	17
2	(a) Ángulo Cenital, Inclinación, Ángulo de Acimut de la Superficie y Ángulo de Azimutal solar para una superficie inclinada. (b) Vista en Planta del Ángulo Azimutal Solar .....	19
3	Lugar en que se mide Voc e Isc de una celda solar .....	21
4	(a) Dispositivo Experimental para Medir el Comportamiento I vs V de una Celda Solar en Iluminación; (b) Circuito Equivalente .....	22
5	Curva de productos corriente-voltaje y curva I-V .....	23
6	Comportamiento de una celda con bajo y alto factor de relleno .....	25
7	Curva de salida de potencia típica de una celda solar .....	26
8	Diagrama de flujo del procedimiento metodológico desarrollado para la realización de la tesis .....	31
9	Estructura de montaje de celdas solares en experimento .....	32
10	Encapsulado de celdas solares .....	33
11	Diagrama del sistema de adquisición de datos .....	35
12	Estado físico del sistema de adquisición de datos .....	36

13	Venta de inicio en SAM.....	37
14	Ventana de geolocalización en SAM.....	38
15	Ficha técnica fabricante VikoCell.....	39
16	Ventana de diseño del sistema en SAM .....	39
17	Ventana de valores simulados en SAM .....	40
18	Gráfica de calibración para el sensor de voltaje No. 2 .....	42
19	Medición del factor de forma en ambiente Lazarus.....	43
20	Curva I-V y P-V para la celda solar utilizada en el experimento.....	44
21	Comportamiento de la potencia para el día 15 de abril para las celdas en el experimento.....	45
22	Energía generada por la celda No. 2 el día 15 de abril .....	45
23	Generación de energía mensual por cada celda del experimento.....	46
24	Energía anual generada por cada celda en el experimento .....	48
25	Generación de energía mensual por simulación para las posiciones equivalentes a las 7 celdas utilizadas en el método experimental .....	50
26	Generación de energía anual por simulación para las posiciones equivalentes a las 7 celdas utilizadas en el método experimental .....	52
27	Gráfica de la energía generada por experimentación y simulación para el periodo enero a marzo.....	54
28	Gráfica de la energía generada por experimentación y simulación para el periodo abril a junio .....	55
29	Gráfica de la energía generada por experimentación y simulación para el periodo julio a septiembre.....	57
30	Gráfica de la energía generada por experimentación y simulación para el periodo octubre a diciembre .....	58
31	Valores de energía experimental y simulados para un año .....	60
32	Tabla de pérdidas de energía de una celda instalada con una orientación distinta a la óptima anual para la ciudad de Tepic.....	64

# 1 Introducción

El uso de las energías renovables ha tomado especial importancia en nuestros días, lo anterior, debido a la necesidad de cuidar el medio ambiente sin dejar de producir la tan necesaria energía que mueven al mundo.

Una de las fuentes de energía limpia y que se considera inagotable es el sol; capaz de producir aproximadamente 62 mil 600 kilowatt por cada metro cuadrado de superficie solar. De hecho, en un periodo de tan sólo dos días, el planeta recibe el equivalente a 60 veces el consumo anual de energía de la sociedad humana (Arancibia Bulnes & Best y Brown, 2010).

En la actualidad, la ciencia ha desarrollado distintas formas de aprovechar la energía que llega a la tierra proveniente del sol, una de esas formas es a través de celdas solares, las cuales transforman dicha energía en electricidad. Las celdas solares son agrupadas y conectadas para formar lo que comúnmente se conocen como placas o paneles solares, mismos que son fabricados en un gran número de potencias.

Uno de los parámetros importantes a considerar para que los paneles solares generen la mayor cantidad de energía eléctrica es su orientación, esto es debido a que la mayor producción de energía se tiene cuando los rayos solares inciden perpendicularmente sobre la celda solar.

Para lograr que los rayos solares incidan perpendicularmente sobre las celdas, es necesario orientar el panel solar de acuerdo al lugar geográfico de instalación, esto debido a que la tierra no tiene una forma plana, ni perpendicular con respecto al sol y que además debido al movimiento de precesión que experimenta el globo terráqueo, su eje de rotación, se encuentra desviado  $23.5^\circ$  con respecto a la perpendicular de la eclíptica solar.

El tratar de instalar los paneles solares con la orientación correcta buscando la máxima generación de energía anual, se vuelve un reto importante, y es que, debido

a las propiedades intrínsecas de las celdas solares y el avance de esta tecnología, los paneles solares actuales solo alcanzan eficiencia del orden del 23%.

Cualquier tecnología en sus inicios es muy costosa, con el paso del tiempo, el desarrollo tecnológico y las reglas de la oferta y la demanda, las tecnologías se vuelven más accesibles. El caso de los paneles solares no ha sido la excepción; al inicio de los años 70, debido a su gran costo, los paneles solares solo eran incluidos en la industria aeroespacial. En la actualidad, el costo en México de un panel solar ronda los 25 centavos de dólar por watt, haciéndolos de muy fácil acceso, pudiendo con ello, ser implementados en casas habitación de la sociedad civil.

Dentro de los retos que presenta la instalación de paneles solares en las viviendas hoy en día, uno de ellos es la orientación óptima. El crecimiento desorganizado de las ciudades ha propiciado que la alineación de las calles en las zonas urbanas y por ende la arquitectura de las viviendas, no sean completamente norte-sur, provocando con ello que los instaladores de tecnologías solares, tengan que desarrollar complejas estructuras de soporte para los paneles solares, consiguiendo con ello, una orientación óptima, incrementando así el costo de utilizar esta tecnología.

Si los rayos solares no inciden perpendicular sobre las celdas fotovoltaicas no tendremos el máximo de generación. El costo actual de los paneles solares nos permite no ser tan estrictos en la instalación de los paneles solares, ya que, las posibles pérdidas que se pudieran tener por una orientación no óptima se compensarían instalando más paneles solares.

Actualmente se encuentran disponibles cartas que evidencian el porcentaje de pérdidas de generación en paneles solares debido a una orientación fuera de la óptima anual, sin embargo, dichas cartas son muy genéricas y solo evalúan a las grandes ciudades, dejando de lado a las ciudades más pequeñas como Tepic, Nayarit, México.

Por lo anteriormente descrito, surge la necesidad de crear una carta específica para la ciudad de Tepic, que permita a todos los instaladores de esta región conocer las

pérdidas de generación que experimentaría un panel solar al no ser instalado en la orientación óptima anual, pudiendo con ello compensar dichas perdidas instalando más potencia fotovoltaica.

## **2 Objetivo general**

Evaluar las pérdidas de generación de energía en celdas solares, en la ciudad de Tepic, Nayarit, debido a una inadecuada orientación.

### **2.1 Objetivos específicos**

- 1 Diseñar y construir un sistema que permita adquirir datos de celdas solares colocadas en distintas posiciones, dicho sistema constará de una estructura de soporte y un sistema de adquisición y almacenamiento de datos.
- 2 Evaluar experimentalmente el comportamiento de la generación de energía de las celdas solares colocadas en posiciones diferentes a la óptima anual.
- 3 Evaluar el comportamiento de la generación de energía en celdas solares ubicadas en posiciones distintas a la óptima anual, utilizando el programa System Advisor Model (SAM) para el análisis por simulación.
- 4 Comparar los resultados obtenidos mediante simulación con el software SAM y los datos experimentales, con el fin de validar la viabilidad de SAM como herramienta para la simulación de la generación de energía en celdas solares.
- 5 Generar una tabla que represente las pérdidas porcentuales en la generación de energía de celdas solares orientadas en posiciones distintas a la óptima anual para la ciudad de Tepic, Nayarit.

### **3 Justificación**

Actualmente, la ciudad de Tepic carece de un estudio que evidencie las pérdidas de eficiencia que sufriría un panel solar fotovoltaico al ser instalado en una posición distinta a la óptima anual. Debido a esta falta de información, los instaladores de esta tecnología se ven obligados a diseñar complejas estructuras y subestructuras que aseguren la correcta orientación hacia el sur geográfico y el ángulo de inclinación adecuado, de acuerdo con la latitud de Tepic (21.5°).

Por ello, esta investigación tiene como objetivo generar una tabla comparativa con diversas combinaciones de ángulo azimutal e inclinación, que muestre el porcentaje de pérdidas de generación de energía que sufriría un panel solar instalado en Tepic, Nayarit, si se coloca en una posición diferente a la óptima anual. Esto se lleva a cabo mediante la creación de una base de datos experimental y cálculos matemáticos, que permita evaluar la precisión de un software especializado en simular este tipo de escenarios.

Por lo anterior, la tabla de pérdidas por posición generada con la investigación, representaría una herramienta muy útil para todos los usuarios de la tecnología solar fotovoltaica, pero principalmente, para todos los instaladores que requieren evaluar las pérdidas de generación de energía en un proyecto solar, que no cumpla con las condiciones debido a la arquitectura del punto de instalación.

## 4 Antecedentes

El principal fenómeno por el cual una celda solar produce electricidad es el llamado efecto fotoeléctrico, el cual ha sido estudiado desde hace mucho tiempo. El científico francés Alexandre Edmond Becquerel, publicó en 1839, su primer artículo el cual trató:

[...] sobre los efectos de la temperatura en la duración de la emisión de luz fosforescente, con lo que demostró que ésta se estimulaba por frecuencias específicas de luz y que, en ocasiones, el resplandor fosforescente parecía detenerse inmediatamente después del corte de rayos luminosos. Había descubierto el efecto fotovoltaico consistente en la aparición de una tensión entre los bornes de un material semiconductor expuesto a la luz. (Foro Histórico de las Telecomunicaciones, s.f.)

“Hacia 1870 el profesor W. Grylls Adams y un estudiante suyo R. Evans Day experimentaron el efecto de la luz sobre el selenio, comprobando que se creaba un flujo de electricidad, que denominaron fotoeléctrica” (Pep Puig, s.f.).

Aunque el efecto fotoeléctrico se había estudiado con antelación, no fue sino hasta 1883 cuando el inventor estadounidense Charles Fritts construyó la “primer célula solar al recubrió una muestra de selenio semiconductor con un pan de oro para formar el empalme, un primitivo dispositivo que presentaba una eficiencia de solo el 1%” (Ambrojo, 2015).

Albert Einstein realizó investigaciones más profundas sobre el efecto fotoeléctrico y, en 1922 se le concedió el Premio Nobel de Física correspondiente al año 1921. Mediante una carta el secretario de la Academia Sueca, C. Aurivillius le comunicaba:

[...] “en consideración a su trabajo sobre la física teórica, y en particular por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico, pero sin tomar en cuenta el valor que pueda ser acordado en el futuro a sus teorías de la relatividad y

de la gravitación, después de que éstas sean confirmadas en el futuro".  
(Cassini & Levinas, 2008)

La célula solar moderna, es una patente del ingeniero investigador Russell Ohl del año de 1946, "A diferencia de las primeras células solares de selenio, que consistían sólo en una muestra de selenio regular, la célula de silicio con su unión p-n convirtió la luz solar en eléctrica mucho más eficientemente" (Asociación Española Ingenieros de Telecomunicación, s.f.).

No fue sino hasta 1953 cuando Gerald Pearson de Bell Laboratories aplico de forma practica el fenómeno fotovoltaico, casi de forma accidental cuando experimentaba con la electrónica del silicio. A partir de este descubrimiento, Bell, Daryl Chaplin y Calvin Fuller, otros dos científicos los cuales, perfeccionaron las células solares, produciendo una de silicio capaz de proporcionar suficiente energía eléctrica como para que pudiesen obtener aplicaciones prácticas de ellas. De esta manera empezaba la carrera de las placas fotovoltaicas como proveedoras de energía (Confederación de Consumidores y Usuarios, s.f.).

La meta siempre es construir una celda solar que proporcione la máxima generación de energía eléctrica al más bajo costo. En la actualidad se han creado distintos tipos de celdas generadas a partir de distintas combinaciones de materiales semiconductores. Una forma de evaluar los límites máximos para la eficiencia de conversión de las celdas solares es la Teoría del Balance Detallado la cual fue desarrollada por Shockley y Queisser misma que indica:

[...] la corriente que produce una celda solar se determina por el número de fotones absorbidos y emitidos por el dispositivo (celda); esto es debido a que los fotones absorbidos determinan la fotocorriente, mientras que los emitidos relacionan el voltaje de operación. (Noguera-Salas, Pinto-García, & Villarreal-Padilla, 2018)

Si bien la tendencia actual de la industria solar fotovoltaica es la de fabricar módulos solares con eficiencias más altas y de más bajos costos, estos no tienen el mismo rendimiento una vez operando.

Es claro que el rendimiento forma parte importante en la implementación de un sistema solar fotovoltaico, factores como la localización geográfica del sitio de instalación, la temperatura ambiente y la orientación afectan significativamente la producción de energía eléctrica.

Se sabe que la mayor producción de energía eléctrica de un panel solar se da cuando los rayos solares inciden perpendicularmente al plano de la celda, es por ello que cualquier posición de celda solar fuera de dicha condición, hará que el rendimiento disminuya.

De acuerdo a Gevorkian (2018), una forma de incrementar el rendimiento de los paneles solares, es instalarlos con una orientación hacia el ecuador terrestre, consiguiendo con ello, que los rayos solares incidan sobre el panel solar y no en la parte posterior. Adicional a lo anterior, inclinar el panel solar de acuerdo a la latitud del sitio de la instalación, permitirá compensar la pérdida de perpendicularidad respecto a la eclíptica solar de la superficie terrestre en el punto de instalación. La instalación bajo las dos condiciones anteriormente descrita, permite el incremento del rendimiento de los módulos solares (Gevorkian, 2018). La potencia nominal de un panel solar fotovoltaico suele estar referida a unas condiciones estándar de operación, STC: 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiancia, 25°C de temperatura de celda y un espectro estándar AM1.5. Sin embargo, durante el funcionamiento típico de un panel solar, la radiación no es constante ni el espectro se mantiene estándar a lo largo de su tiempo de operación.

La gran aceptación de los sistemas fotovoltaicos en forma global, ha generado la necesidad de estimar el comportamiento de una instalación solar fotovoltaica antes de su construcción, permitiendo con ello realizar ajustes necesarios para una correcta implementación. Derivado de lo anterior, la industria solar fotovoltaica ha desarrollado herramientas que intentan predecir el comportamiento de sistemas

fotovoltaicos. Investigaciones como la de Milosavljević (2022) quien realizó la *“Revisión y validación de herramientas/software de simulación solar fotovoltaica basados en casos de estudio”* en Serbia, han permitido la evaluación de la eficacia e idoneidad de softwares fotovoltaicos, todo ello basado en el análisis experimental del funcionamiento de un sistema solar fotovoltaico de 2 kWp instalado en el techo de la Facultad de Ciencias y Matemáticas de Niš, fijos con un ángulo de inclinación de 32° hacia el sur y conectados en serie formando una cadena. En dicha investigación se evalúa el desempeño de SAM (System Advisor Model) como herramienta de simulación, arrojando una desviación del 17,49% mayor que los valores medidos experimentalmente en la producción anual de electricidad fotovoltaica del sistema. La mayor desviación de los resultados de la simulación en SAM contra las mediciones experimentales de la producción mensual de electricidad fotovoltaica, se produce en enero (110,59%), mientras que la desviación más baja se produce en agosto (1,34%). El estudio indica que la elección de conjuntos de datos solares tiene un impacto significativo en la generación de energía fotovoltaica. No obstante, se reconoce que la producción de energía fotovoltaica no solo está vinculada a la radiación solar, sino que también está influenciada por diversos factores como las condiciones climáticas, la acumulación de suciedad, las pérdidas del sistema, entre otros. Las discrepancias entre los resultados medidos y simulados en la producción de energía fotovoltaica se atribuyen en gran medida a las pérdidas evaluadas en el sistema fotovoltaico. Además, se destaca que la producción de energía fotovoltaica podría variar según el año de medición utilizado (Milosavljević, Kevkić, & Jovanović, 2022).

Como ya se ha mencionado, la productividad y eficiencia de un sistema solar fotovoltaico está íntimamente ligado a sus condiciones de instalación, es por ello que se han desarrollado investigaciones en gran parte del mundo como la de Nfaoui (2020), *“Ángulo de inclinación y orientación óptimos para paneles solares fotovoltaicos: caso de la ciudad de Settat en Marruecos”*. En dicha investigación se estudian los efectos de la orientación de un panel solar y los ángulos de inclinación para recolectar energía solar en la ciudad de Settat en Marruecos. En el estudio, se desarrollaron programas a través de MATLAB para estimar la totalidad de la

radiación solar sobre cualquier superficie inclinada. La programación desarrollada permitió estimar el ángulo correcto bajo el cual las celdas solares podrían absorber la máxima energía y aplicarlo para 20 distintas ciudades de Marruecos. Además, en la última parte, se estudió la influencia de la exposición (orientación e inclinación) sobre la cantidad de radiación solar recibida en una superficie de 1 m<sup>2</sup> en Settat. Para la investigación se hace referencia a una instalación de bombeo fotovoltaico instalada en la Facultad de Ciencias y Tecnología de Settat-Marruecos (latitud 33.029° y longitud -7.619°). Como conclusión de esta última parte de la investigación, se generó una figura que representa la radiación solar (en porcentaje) respecto a la situación ideal en función de la inclinación y orientación para la ciudad de Settat. (Nfaoui & El-Hami, 2020).

Adicional a lo anterior, existen investigaciones que pretenden determinar el ángulo de inclinación y orientación óptimos para sistemas solares fotovoltaicos con el fin de maximizar la irradiancia solar incidente durante un período de tiempo específico sobre una superficie inclinada, tal es el caso de la investigación desarrollada por Mechleri (2010) "*Determinación del ángulo de inclinación y orientación óptimos para paneles solares fotovoltaicos*". El método propuesto en la investigación, emplea modelos bien establecidos y datos recolectados del área específica donde se planea instalar los paneles fotovoltaicos, fundamentándose en cuatro pasos. En el primer paso, los datos recopilados en la estación de la Universidad Técnica Nacional de Atenas (NTUA) (37°47'26"B, 23°47'16" A, 219 m sobre el nivel medio del mar) son utilizados para seleccionar el modelo más preciso entre varios, tanto isotrópicos como anisotrópicos, mismo que se pueden encontrar en la literatura, para predecir la irradiancia solar difusa en superficies inclinadas. En el segundo paso, se emplean los datos registrados junto con el modelo seleccionado para crear una base de datos que incluye los promedios y las variaciones de la irradiancia solar global horaria en superficies inclinadas durante intervalos de tiempo específicos, considerando diversos ángulos de inclinación y orientaciones. En el tercer paso, se emplea la base de datos generada para crear metamodelos que relacionan el ángulo de inclinación y la orientación con la irradiancia global promedio y su variabilidad en superficies inclinadas. Finalmente, se plantea un problema de optimización con el fin de

determinar los valores óptimos de ángulo de inclinación y orientación, considerando las restricciones del sistema. En este trabajo se presentó una nueva metodología para el cálculo del ángulo de inclinación y orientación óptimos de un conjunto fotovoltaico en una ubicación específica partiendo del modelo de “Liu y Jordan” que resultó ser el más preciso y, combinándolo con fórmulas estándar para los dos componentes restantes de la irradiancia global ( directa y reflejada), lo que derivó en un modelo completo para predecir la irradiancia solar global en superficies inclinadas (Mechleri, Zervas, Haralambos, Palyvos, & Markatos, 2010).

Por su parte Buzra (2022) desarrolló la investigación “*Ángulo de inclinación óptimo fijo y ajustado de paneles solares en tres ciudades de Albania*”. El propósito principal del estudio fue encontrar el mejor ángulo de inclinación para los paneles solares en tres ciudades de Albania, con el fin de maximizar la radiación solar global que alcanza la superficie de los paneles tanto anual como estacionalmente. Se llevó a cabo una comparación entre paneles solares con ángulo de inclinación fijo y ajustable, evaluando la cantidad de energía solar recibida en la superficie de los paneles. El estudio utiliza el modelo BMS como herramienta principal para calcular la energía incidente en una superficie inclinada. Los datos obtenidos mediante el modelo BMS se compararon con los valores obtenidos de mediciones físicas. La evaluación comparativa entre los datos obtenidos y el modelo BMS revela que la discrepancia más significativa se observa durante los meses de mayo a agosto, con una diferencia relativa que oscila entre el 16,6 % y el 21,5 %. En contraste, en los demás meses, esta desviación se mantiene entre el 9 % y el 13 % (Buzra, Mitrushi, Serdari, Halili, & Muda, 2022).

Investigaciones desarrolladas en otras partes del mundo, pretenden determinar el ángulo de inclinación óptimo para cada periodo del año, tal es el caso de la investigación de Aziz (2018) “*Ángulo de inclinación óptimo de los paneles fotovoltaicos para algunas ciudades de Irak*”. En dicha investigación se determinó el ángulo de inclinación óptimo de los paneles fotovoltaicos para obtener el valor máximo de radiación solar incidente utilizando el modelo Bernard-Menguy-Schwartz para algunas ciudades iraquíes. Los resultados normales mostraron que el ángulo

de inclinación óptimo de los paneles fotovoltaicos parece estar cerca de la latitud de las ciudades estudiadas. (Aziz Ali, 2018).

En el país asiático de China, se realizó una investigación por parte de Zang (2016), denominada *“Determinación del ángulo de inclinación óptimo de los colectores solares para diferentes climas de China”* en dicha investigación, se determina el ángulo de inclinación óptimo de los paneles fotovoltaicos sobre la base de maximizar la radiación solar global que llega a la superficie del colector mensual, estacional y anualmente y desarrollar correlaciones generales para estimar los ángulos de inclinación óptimos mensuales. en seis estaciones de diferentes zonas climática. Los resultados muestran que los ángulos de inclinación óptimos mensuales máximo y mínimos calculados son  $9.7^\circ$  (junio, Sanya) y  $78.4^\circ$  (diciembre, Mohe). Los ángulos de inclinación óptimos promedios anuales para un colector solar orientado al sur son  $15^\circ$ ,  $24.2^\circ$ ,  $27.4^\circ$ ,  $39^\circ$ ,  $47.1^\circ$  y  $27.5^\circ$  en Sanya, Shanghai, Zhengzhou, Harbin, Mohe y Lhasa, respectivamente. (Zang, Guo, Wei, & Sun, 2016)

Investigaciones similares que pretenden definir la inclinación óptima de un panel solar que maximice la generación de energía, se han desarrollado en Arabia Saudita, tal es el caso de la investigación desarrollada por BEN (2021). En ella, se evaluó el rendimiento fotovoltaico en cinco ciudades del Reino de Arabia Saudita. Los resultados muestran que el ángulo de inclinación óptimo anual estimado es cerca de la latitud de las ciudades estudiadas. Los ángulos de inclinación anuales estimados son los siguientes:  $27.3^\circ$  Dhahran,  $26^\circ$  Riad,  $22.7^\circ$  Jeddah,  $32.2^\circ$  Arar y  $20.1^\circ$  Abha. Para estimar la potencia máxima generada por un panel solar fotovoltaico inclinado se utilizaron simulaciones de MATLAB de modelos matemáticos ya reportados en la bibliografía. (BEN MANSOUR, MATEEN KHAN, ABDULAZIZ ALSULAIMAN, & BEN MANSOUR, 2021)

## 5 Marco teórico

### 5.1 El sol

El Sol es esencial para mantener las condiciones habitables en la Tierra y sustentar la vida tal como la conocemos, proporcionándonos energía en forma de luz y calor.

El sol es una esfera de materia gaseosa intensamente caliente con un diámetro de  $1,39 \times 10^9$  m y está, en promedio, a  $1,5 \times 10^{11}$  m de la tierra. El sol tiene una temperatura efectiva de cuerpo negro de 5777 °K. La temperatura en la región interior central se estima de diversas formas en  $8 \times 10^6$  a  $40 \times 10^6$  °K. (Duffe, Beckman, & Blair, 2020)

### 5.2 La constante solar

El sol emite energía que llega a la tierra en forma de radiación. Una gran cantidad de estudios han desarrollado modelos que permiten estimar el valor de dicha radiación, además, con el avance de la ciencia y la utilización de naves espaciales, se han podido medir los valores de radiación extraterrestre, estas mediciones arrojaron un valor de la constante solar ( $G_{sc}$ ) de 1353 W/m<sup>2</sup>, con un margen de error estimado de  $\pm 1,5\%$ . Este valor estándar fue aceptado por la NASA en 1971 y por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales en el 2006 (Duffe, Beckman, & Blair, 2020). Gueymard (2018) realizó un exhaustivo examen de 42 años de datos y análisis, y sugiere un valor de 1366,1 W/m<sup>2</sup> para la constante solar. Para la presente investigación se tomará el valor que hasta la fecha ha adoptado el Centro Mundial de Radiación (WRC), 1367 W/m<sup>2</sup> (1,960 cal/cm<sup>2</sup> min, 433 Btu/ft<sup>2</sup> h, o 4,921 MJ/m<sup>2</sup> h), valor que se desvía un 0,4% del estudio de Gueymard (2018).

Existen dos parámetros que afectan la magnitud de la radiación que llega a la tierra. El primero es la radiación emitida por el sol que, debido a las incertidumbres, las variabilidades y desde un punto de vista de la ingeniería, es común considerar que la energía emitida por el sol se mantiene constante. El segundo parámetro es la variación de la distancia tierra-sol ya que la excentricidad de la órbita terrestre

conduce a una variación del flujo de radiación extraterrestre en el rango de  $\pm 3,3\%$ . Modelos matemáticos se han desarrollado para el cálculo de la radiación extraterrestre incidente en el plano normal a la radiación ( $G_{on}$ ) con dependencia al día del año. Una ecuación simple con una precisión adecuada para la mayoría de los cálculos de ingeniería es la siguiente:

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (5.2.1a)$$

Según la referencia de Iqbal (1983), Spencer (1971) presenta una ecuación más exacta con un margen de error de  $\pm 0,01 \%$ , definida en la siguiente ecuación:

$$G_{on} = G_{sc} (1.00010 + 0.034221 \cos B + 0.001280 \sin B + 0.00719 \cos 2B + 0.000077 \sin 2B) \quad (5.2.1b)$$

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (5.2.2)$$

donde  $n$  es el día del año Juliano siendo el día 1 el 1 de enero y el día 365 el 31 de diciembre (Duffe, Beckman, & Blair, 2020).

### 5.3 La radicación extraterrestre

La interacción de la radiación solar con la atmósfera terrestre afecta a la temperatura, la composición química y otros aspectos del clima y del medio ambiente terrestre. Cuando la radiación solar entra en la atmósfera terrestre, varias cosas pueden suceder, por ejemplo, algunos de los gases presentes en la atmósfera, como el ozono, el dióxido de carbono y el vapor de agua, absorben parte de la radiación solar, una fracción es reflejada directamente de vuelta al espacio exterior por nubes, partículas en suspensión en la atmósfera y superficies reflectantes, como el hielo y la nieve, una fracción más es dispersada en diferentes direcciones por las moléculas y partículas en la atmósfera, generando con ello los colores del cielo y un gran parte atraviesa la atmósfera y llega a la superficie terrestre, donde puede ser absorbida por el suelo, calentando la superficie y generando calor.

### **5.3.1 Radiación directa**

La radiación directa se refiere a la cantidad total de energía solar que proviene directamente del Sol y llega a la superficie terrestre sin haber sido desviada o modificada por nubes u otras partículas en la atmósfera. Esta energía se mide generalmente en unidades de energía acumulada, como watt-hora por metro cuadrado ( $\text{Wh/m}^2$ ) o julios por metro cuadrado ( $\text{J/m}^2$ ), y representa la cantidad de radiación recibida en un periodo específico. Por otro lado, la irradiancia directa, conocida como Direct Normal Irradiance (DNI), mide la potencia instantánea de la radiación solar directa que incide de manera perpendicular a una superficie orientada hacia el Sol, y se expresa en watt por metro cuadrado ( $\text{W/m}^2$ ).

### **5.3.2 Radiación difusa**

La radiación difusa se refiere a la energía solar que ha sido dispersada en diversas direcciones por las moléculas y partículas en la atmósfera antes de alcanzar la superficie terrestre. A diferencia de la radiación directa, que sigue una trayectoria recta desde el Sol, la radiación difusa se recibe desde todas las direcciones del cielo, lo que la convierte en un componente crucial para la iluminación y el calentamiento de la Tierra. Esta radiación se mide comúnmente en términos de energía acumulada, utilizando unidades como watt-hora por metro cuadrado ( $\text{Wh/m}^2$ ) o julios por metro cuadrado ( $\text{J/m}^2$ ). Por otro lado, la irradiancia difusa, también conocida como Diffuse Horizontal Irradiance (DHI), se refiere a la potencia instantánea de la radiación solar difusa que incide sobre una superficie horizontal en un momento específico, y se expresa en watt por metro cuadrado ( $\text{W/m}^2$ ). La irradiancia difusa es fundamental para la evaluación del rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, ya que proporciona una medida precisa de la energía disponible para la generación eléctrica en condiciones variables de luz solar.

### **5.3.3 Radiación reflejada**

La radiación reflejada es aquella parte de la energía solar que llega a la superficie terrestre y rebota de nuevo hacia la atmósfera o el espacio. Este rebote puede

ocurrir en diversos elementos de la superficie, como el agua, la nieve, el hielo, el suelo, las nubes y estructuras artificiales reflectantes como edificios y vehículos. La cantidad de radiación reflejada varía según el tipo y color de la superficie; generalmente, las superficies más claras reflejan más radiación que las oscuras. La radiación reflejada es un factor importante en el equilibrio energético global y en el clima terrestre. Sus unidades son el watt-hora por metro cuadrado ( $\text{Wh/m}^2$ ) o julios por metro cuadrado ( $\text{J/m}^2$ ).

#### **5.3.4 Radiación global**

La radiación global representa la suma total de energía solar que llega a la superficie terrestre desde todas las direcciones del cielo, siendo un factor crucial para el entendimiento del equilibrio energético del planeta. Sus componentes principales son: la irradiancia directa (DNI), y la irradiancia difusa (DHI). La irradiancia global (GHI), que resulta de la combinación de ambas componentes y se expresa en watt por metro cuadrado ( $\text{W/m}^2$ ), es fundamental para evaluar el potencial solar disponible, proporcionando información valiosa sobre la energía total que puede ser utilizada en procesos naturales, como la fotosíntesis, así como en la generación de electricidad a través de sistemas fotovoltaicos.

#### **5.3.5 Dirección de la radiación solar**

Las relaciones geométricas entre un plano con una orientación específica respecto a la Tierra en cualquier momento (ya sea que este plano esté estático o en movimiento en relación con la Tierra) y la radiación solar que incide sobre él, es decir, la posición del sol en relación con ese plano, pueden ser descritas utilizando varios ángulos. (Benford & Bock, 1938)

Algunos de los ángulos son descritos a continuación:

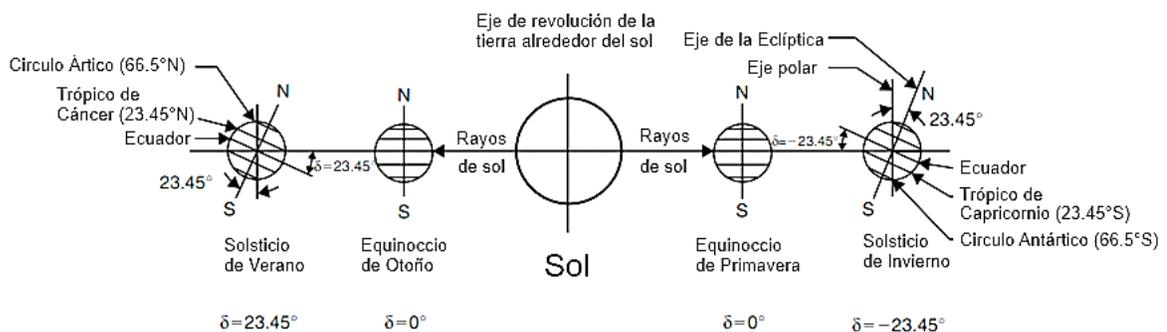
**Longitud (L):** La longitud es la medida angular que indica la distancia al este o al oeste del meridiano de Greenwich en el globo terrestre. También se mide en grados, minutos y segundos, y varía desde  $0^\circ$  en el meridiano de Greenwich hasta  $180^\circ$  al este y al oeste.

**Latitud ( $\Phi$ ):** La latitud es la medida angular que indica la distancia al norte o al sur del ecuador de la Tierra. Se mide en grados, minutos y segundos, y varía desde  $0^\circ$  en el ecuador hasta  $90^\circ$  en los polos norte y sur.

**Declinación ( $\delta$ ):** El eje de rotación de la Tierra, conocido como el eje polar, siempre está inclinado en un ángulo de  $23,45^\circ$  con respecto al eje de la eclíptica, el cual es perpendicular al plano de la órbita terrestre alrededor del Sol. Durante el recorrido de traslación de la tierra, esta inclinación causa un efecto que hace parecer que el eje polar se desplaza con respecto al Sol. La declinación solar, se refiere a la distancia angular entre los rayos solares y el ecuador, considerándose positiva cuando se dirige hacia el norte y negativa cuando se dirige hacia el sur. Este ángulo se determina como la diferencia entre la línea central que une al Sol y la Tierra y su proyección sobre el plano ecuatorial. Durante el verano en el hemisferio norte, las declinaciones son positivas al norte del ecuador, mientras que en el sur son negativas. La Figura 1 (Kalogirou, 2023) ilustra cómo varía la declinación a lo largo de los equinoccios y solsticios, desde  $0^\circ$  en el equinoccio de primavera hasta  $23,45^\circ$  en el solsticio de verano, regresando a  $0^\circ$  en el equinoccio de otoño y alcanzando  $-23,45^\circ$  en el solsticio de invierno.

**Figura 1**

*Variación anual de la declinación solar*



*Nota.* Adaptado de *Solar Energy Engineering-Processes and Systems* (p. 60), por Soteris A. Kalogirou, 2023, Elsevier.

Existen modelos matemáticos que proporcionan el ángulo de declinación en función del día solar “n”, uno de los más usados es el desarrollado por Spenser (2017) el cual está definido por la siguiente ecuación:

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right) (0.006918 - 0.399912(\cos B) + 0.07025(\sin B) - 0.006758(\cos 2B) + 0.000907(\sin 2B) - 0.002697(\cos 3B) + 0.00148(\sin 3B)) \quad 5.4.1$$

donde B está definida por la ecuación 5.2.2.

**Inclinación ( $\beta$ ):** La inclinación es el ángulo entre el plano de la superficie en consideración y la horizontal, se encuentra en el rango de 0 a 180 grados, donde 0 grados indica que la superficie está completamente horizontal. Un ángulo mayor a 90 grados implica que la superficie tiene una inclinación descendente, es decir, tiene un componente dirigido hacia abajo.

**Ángulo de acimut de la superficie ( $\gamma$ ):** Es la desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie desde el meridiano local, con cero hacia el sur, al este negativo y oeste positivo;  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ .

**El Ángulo horario ( $\omega$ ):** Es el desplazamiento angular del Sol hacia el este o el oeste del meridiano local debido a la rotación de la Tierra sobre su eje a una velocidad de 15 grados por hora. Se considera negativo en la mañana y positivo en la tarde.

**Ángulo de incidencia ( $\Phi$ ):** Se refiere a el ángulo entre la radiación directa del sol incidente sobre una superficie y la normal a esa superficie.

Los ángulos que se han descrito con antelación, son referidos a la superficie de estudio, al captador solar o como en nuestro caso, al panel solar. Adicional a lo anterior, también existen ángulos que nos sitúan al sol en el cielo, estos son:

**Ángulo cenital ( $\Phi_z$ ):** Nos referimos a el ángulo entre la vertical y la línea hacia el sol, es decir, el ángulo de incidencia de la radiación directa del sol sobre una superficie horizontal.

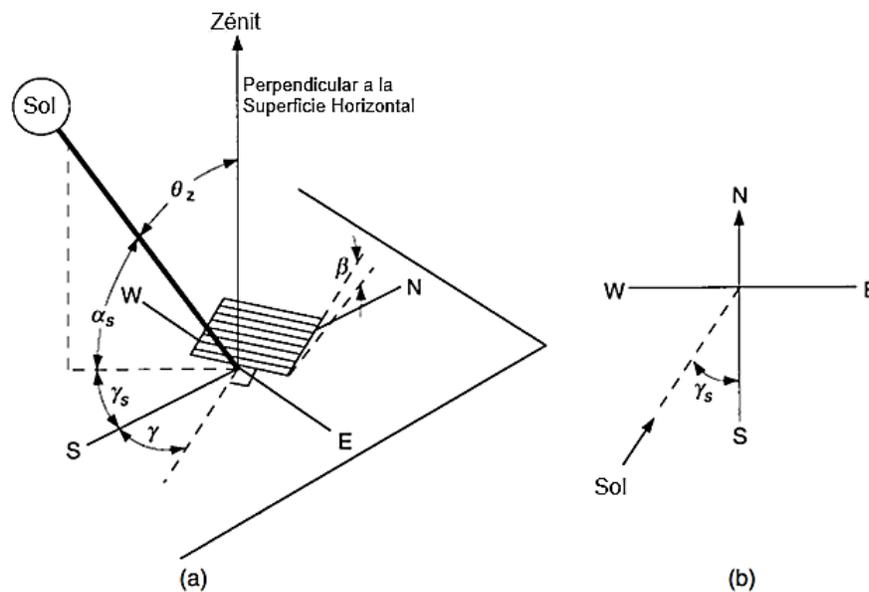
**Ángulo de altitud solar ( $\alpha_s$ ):** Este es el ángulo complementario al ángulo cenital, por lo tanto, es el ángulo entre la horizontal y la línea de la radiación solar directa.

**Ángulo azimutal solar ( $\gamma_s$ ):** Nos identifica el desplazamiento angular desde el sur de la proyección de la radiación solar directa en el plano horizontal. Los desplazamientos al este del sur son negativos y al oeste del sur son positivos.

Los ángulos descritos en los párrafos anteriores se encuentran representados en la figura 2. (Duffe, Beckman, & Blair, 2020)

### Figura 2

(a) Ángulo Cenital, Inclinación, Ángulo de Acimut de la Superficie y Ángulo de Azimutal solar para una superficie inclinada. (b) Vista en Planta del Ángulo Azimutal Solar



*Nota.* Adaptado de *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind.* (p.13), por John A. Duffe, William A. Beckman and Nathan Blair, 2020, John Wiley & Sons, Inc.

## 5.4 La celda solar y sus características

Se puede definir que una celda solar, también denominada célula fotovoltaica o más coloquialmente como panel solar, es un dispositivo que transforma la energía proveniente del sol en electricidad a través del efecto fotovoltaico. Los materiales

con los que se fabrican son principalmente semiconductores, como el silicio, que tienen la capacidad de absorber fotones de la luz solar y liberar electrones, produciendo con ello una corriente eléctrica. Estas celdas solares agrupadas y conectadas en serie, son comúnmente utilizadas para construir los ya tan conocidos paneles solares que vemos en la actualidad en aplicaciones, residenciales, comerciales o industriales. Son la base de la tecnología solar fotovoltaica y desempeñan un papel fundamental en la producción de energía renovable.

#### **5.4.1 Características eléctricas de las celdas solares**

Cuando consultamos la ficha técnica de una celda solar, se nos proporcionan una serie de características que describen su rendimiento eléctrico. Nos referimos a las especificaciones eléctricas de los paneles solares. Los fabricantes miden los parámetros característicos de una celda solar en condiciones estándar (STC=standard test conditions), que incluyen una irradiancia de  $1000\text{W/m}^2$ , una temperatura de celda de  $25^\circ\text{C}$  y una distribución espectral de masa de aire de AM 1,5G.

Las principales características eléctricas de una celda solar se describirán a continuación:

**El voltaje a circuito abierto ( $V_{oc}$ ):** Representa el voltaje máximo que la celda puede generar cuando no está conectada a ningún circuito externo y no hay corriente fluyendo a través de ella. En esencia, es el voltaje que la celda solar produce en su estado sin carga cuando está expuesta a la irradiación solar máxima. Esta medida es significativa, ya que indica el máximo potencial de voltaje que puede proporcionar la celda en condiciones óptimas.

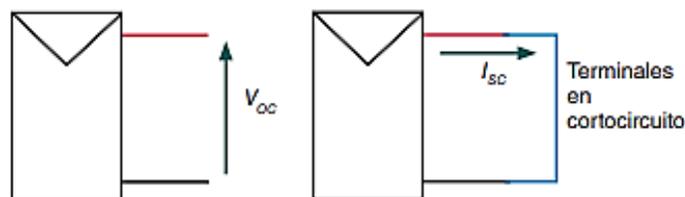
**La corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ):** La corriente de cortocircuito de una celda solar es la máxima corriente que puede generar cuando sus terminales de salida se conectan directamente entre sí, es decir, cuando no hay carga externa conectada y la resistencia externa es nula. En resumen, es la corriente que la celda

solar produce cuando fluye libremente sin encontrar resistencia externa. Esta medida es crucial, ya que ofrece detalles sobre la capacidad máxima de corriente que puede proporcionar la celda en condiciones óptimas.

La figura 3 nos muestra el lugar en que se mide el voltaje de circuito abierto y la corriente de corto circuito, el símbolo en forma de sobre representa la celda solar. (Carmona Rubio & Díaz Corcobado, 2018)

### Figura 3

*Lugar en que se mide  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$  de una celda solar*

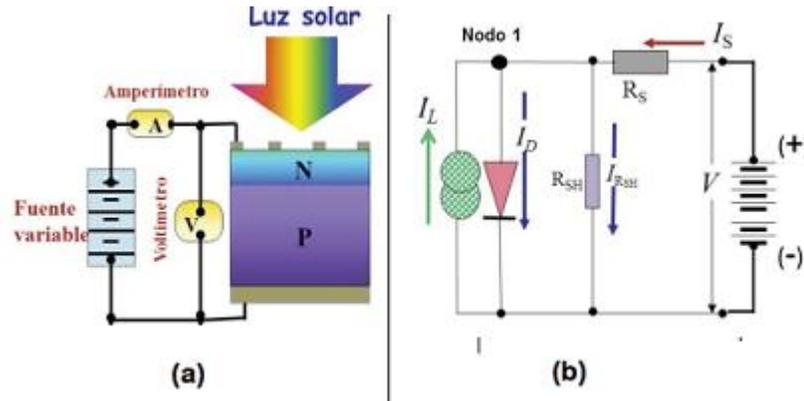


*Nota.* Adaptado de *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*, (p.14) por Carmona Rubio , G., & Díaz Corcobado, T. (2018), McGraw Hill Education 2024, McGraw Hill Education (<https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>).

**El circuito equivalente de una celda solar:** Al iluminar una celda solar, esta genera una diferencia de potencial entre sus terminales y una corriente que sale de ellas. El circuito equivalente de una celda en iluminación se describe en la figura 4 tomada de (Sánchez 2017), la magnitud de la corriente de iluminación es directamente proporcional a la magnitud de la irradiancia o potencia de la radiación solar. (Sánchez Juárez, Martínez Escobar, Santos Magdaleno, Ortega Cruz, & Sánchez Pérez, 2017)

**Figura 4**

(a) Dispositivo Experimental para Medir el Comportamiento  $I$  vs  $V$  de una Celda Solar en Iluminación; (b) Circuito Equivalente



*Nota.* Adaptado de *Aplicaciones fotovoltaicas de la energía solar en los sectores residencial, servicio e industria.* (p.122), por Aarón Sánchez, Dalia Martínez, Rocío Santos, José Ortega y Pedro Sánchez, 2017, IER.

La ecuación que describe el comportamiento de una celda solar en iluminación se conoce como la ecuación de la corriente fotogenerada. Esta ecuación se utiliza para modelar la corriente generada por una celda solar bajo la influencia de la luz incidente. La forma general de esta ecuación es la siguiente:

$$I_S = I_D - I_L + I_{RSH} \quad 5.5.1$$

$$I_D = I_0 \text{Exp}[q(V - I_S R_S) / AKT] - 1 \quad 5.5.2$$

$$I_{RSH} = (V + I_S R_S) / R_{SH} \quad 5.5.3$$

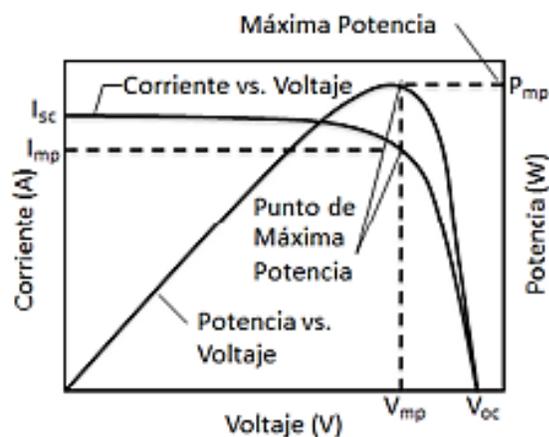
En la ecuación anterior,  $I_L$  es la corriente generada mediante la radiación incidente,  $I_0$  es la corriente inversa de saturación,  $V$  el voltaje de la celda,  $I_S$  y  $R_S$  corriente y resistencia en serie,  $q$  la carga elemental del electrón ( $q=1.6 \times 10^{-19}$  C),  $A$  una constante que proporciona información de la calidad de la unión p-n,  $K$  la constante de Boltzman ( $K=1.38 \times 10^{-23}$  J/K),  $R_{SH}$  es la resistencia en paralelo o resistencia de

shunt y  $T$  la temperatura absoluta (K). Para el caso de una unión p-n ideal se tiene que  $R_s=0$  y  $A=1$ .

**Curva I-V de la celda solar:** El comportamiento de una celda solar o dispositivo fotovoltaico, puede ser representada por una gráfica a la que la industria le nombra como curva I-V, en dicha grafica se muestra la relación entre la corriente y el voltaje a medida que se modifica la carga a la que está conectada la celda solar, desde la condición sin carga (corto circuito), hasta la condición de máximo voltaje que sería la de circuito abierto. La figura 5 muestra una curva I-V típica para una celda solar.

**Figura 5**

*Curva de productos corriente-voltaje y curva I-V*



*Nota.* Adaptado de “Trazador de curvas IV de código abierto para monitoreo de rendimiento de paneles fotovoltaicos en Bolivia” (p.102) por T. Vargas y A. Abrahamse, 2014, *Investigación & desarrollo*, 1 (14).

Para esta grafica el eje horizontal muestra el voltaje de la celda solar medido en volts, mientras que el eje vertical representa la corriente de la celda solar medido en amperes. La curva I-V se genera conectando una resistencia variable en paralelo a la celda solar y sometiendo, a la celda solar, a los STC. Variando la resistencia de carga se encuentran la combinación de puntos de corriente y voltaje que permite graficar el comportamiento de la celda bajo distintos regímenes de carga. En la

figura 5 se puede observar  $I$  vs  $V$ , corta a los ejes voltaje y corriente en un punto, respectivamente. Dichas intersecciones crean una "área" entre los ejes  $I$  y  $V$  y la curva  $I$  vs  $V$ . Esta "área" es potencia eléctrica.

**Curva P-V de la celda solar:** La curva  $P=V \times I$  mostrada en la figura 5 está formada por un conjunto de puntos de la forma  $(V_i, I_i)$ , cuyo producto proporciona la potencia generada  $P_i$  en dicha combinación, es decir,  $P_i = V_i \times I_i$ . Dicha curva muestra que hay un punto  $(V, P)$  para el cual, la potencia es máxima, es decir, hay uno y solo un valor de  $V$ , simbolizado en este caso como  $V_{mp}$  para  $P_{max}$ , por lo tanto, la expresión para calcular la potencia máxima es:

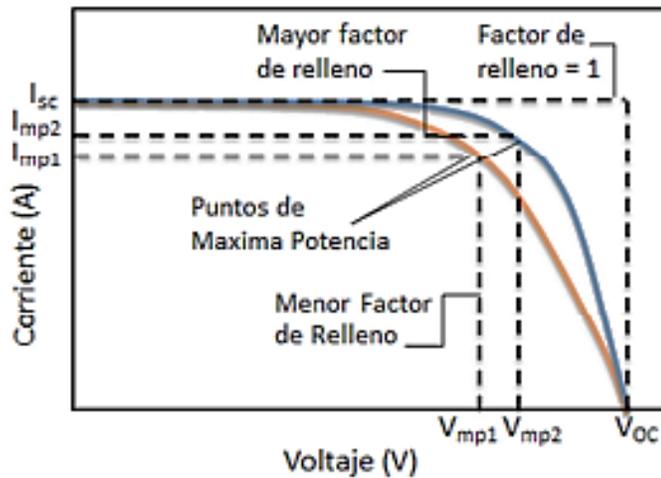
$$P_{max} = V_{mp} \times I_{mp} \quad 5.5.4$$

**El factor de relleno (fill factor):** La corriente de cortocircuito y el voltaje de circuito abierto, representan la corriente y el voltaje máximos que una celda solar puede generar. Pero como ya se explicó con anterioridad, en esos puntos de operación, la potencia de la celda solar es cero. El "factor de relleno" (FF), es un parámetro que, junto con  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$ , determina la potencia máxima de una celda solar. El FF se define como la relación entre la potencia máxima de la celda solar y el producto de  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$ . En términos gráficos, el FF es una medida de la "cuadratura" de la celda solar y también representa el área del rectángulo más grande que puede encajar en la curva I-V. Por lo tanto, el factor de relleno es la relación entre la máxima potencia que una celda solar puede suministrar a la carga y el producto de la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito. La expresión para calcular dicho factor se muestra a continuación:

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad 5.5.5$$

**Figura 6**

*Comportamiento de una celda con bajo y alto factor de relleno*



*Nota.* Adaptado de “Trazador de curvas IV de código abierto para monitoreo de rendimiento de paneles fotovoltaicos en Bolivia” (p.103) por T. Vargas y A. Abrahamse, 2014, *Investigación & desarrollo*, 1 (14).

### 5.4.2 La energía generada por una celda solar

Como ya sabemos, la energía es una propiedad o capacidad de un sistema que le permite realizar un trabajo o producir un cambio. La energía generada por una celda solar fotovoltaica depende de muchos factores:

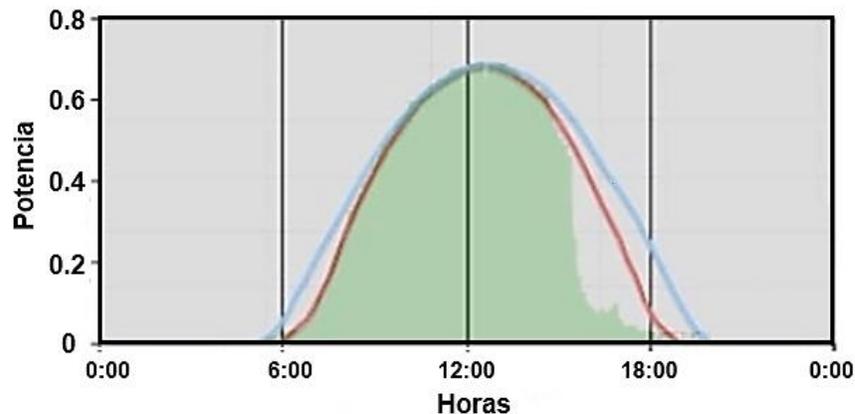
La energía generada por una celda solar, panel o arreglo fotovoltaico, no sólo depende de la potencia de la celda solar, si no que depende de la cantidad de radiación solar disponible en el sitio, así como de factores geográficos y de orientación. A la cantidad de radiación solar que recibe una localidad se le conoce como el recurso solar,  $H$ , el que está definido como la energía disponible calculada al integrar la variación de la irradiancia en las horas solares. Generalmente  $H$  se expresa en  $\text{Joule/m}^2$ , pero para aplicaciones solares fotovoltaicas se usan las unidades de  $\text{Wh/m}^2$ , o bien “hora-pico”, h-pico, entendiéndose como la cantidad de horas en que hipotéticamente el sol

entregó el 100% de la Irradiancia ( $1,000 \text{ W/m}^2$ ). (Sánchez Juárez, Martínez Escobar, Santos Magdaleno, Ortega Cruz, & Sánchez Pérez, 2017).

Para calcular la energía generada por un panel solar a lo largo de un día, se necesita conocer la potencia generada por el panel solar en cada momento del día y luego sumar todas estas contribuciones de potencia durante el período de tiempo de un día completo. La figura 7 extrada de ( Ferrer Vallin, Santos Fuentefria, & Llamo Laborí, 2018) muestra la curva de salida de potencia típica de una celda solar. Al integrar el área bajo la curva se puede obtener la energía generada a lo largo del día por la celda solar en cuestión. En este trabajo utilizaremos la unida del sistema internacional que comúnmente es utilizada para cuantificar la energía solar generada por una fuente solar fotovoltaica, es decir, watts-horas (*Wh*).

### Figura 7

*Curva de salida de potencia típica de una celda solar*



*Nota.* Adaptado de *Análisis del factor de carga de un sistema eléctrico aislado con fuentes renovables de energía*. (p.20), por M. Ferrer, A Santos, H. Llamo, 2018, Ingeniería Energética.

## 5.5 Estimación de la incertidumbre

La incertidumbre de medición es un parámetro que cuantifica la duda asociada al resultado de una medición. Representa el rango dentro del cual se espera que se encuentre el valor verdadero de la magnitud medida, teniendo en cuenta todas las

posibles fuentes de error. La incertidumbre de medición refleja tanto los errores sistemáticos, que introducen un sesgo constante en los resultados, como los errores aleatorios, que causan variabilidad en las mediciones. Esta incertidumbre es esencial para interpretar correctamente los resultados experimentales y determinar su grado de confiabilidad y precisión.

Según la definición de la GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) la incertidumbre es el “parámetro asociado al resultado de una medida, que caracteriza la dispersión de los valores que razonablemente pueden ser atribuidos al mensurando”.

### 5.5.1 Evaluación de la incertidumbre de medición

La GUM describe un enfoque sistemático para identificar y cuantificar todas las fuentes de incertidumbre en un proceso de medición. Estas fuentes pueden incluir tanto errores aleatorios como sistemáticos. Se clasifica la evaluación de la incertidumbre en dos tipos:

**Tipo A:** Basada en análisis estadístico de series de mediciones (usando datos experimentales). La incertidumbre tipo A se calcula como la “*incertidumbre estándar*” de la media de esas mediciones.

Para una magnitud de entrada  $x_i$  determinada a partir de  $n$  observaciones repetidas e independientes, la incertidumbre típica de su estimación es:

$$u(x_i) = s(\bar{X}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad \mathbf{5.6.1}$$

Donde  $u(x_i)$  es la incertidumbre estándar de la media,  $s(x_i)$  es la desviación estándar de la muestra,  $n$  número de mediciones y  $\bar{X}_i$  es la media de las mediciones.

**Tipo B:** Basada en otros medios distintos al análisis estadístico, como datos anteriores, experiencia, especificaciones del fabricante, etc.

Pérez (2022) afirma lo siguiente respecto a la evolución de la incertidumbre tipo B:

La evaluación tipo B de la incertidumbre típica se utiliza cuando la estimación  $x_i$  de una magnitud de entrada  $X_i$  no ha sido obtenida a partir de observaciones repetidas. La varianza estimada asociada  $u^2(x_i)$ , o la incertidumbre típica  $u(x_i)$ , se obtiene entonces mediante decisión científica basada en la información disponible acerca de la variabilidad posible de  $X_i$ . Según la fuente de la que se obtiene esa incertidumbre tipo B, ésta se estimará de distinta manera. Algunos ejemplos de evaluación tipo B son: incertidumbre debida al patrón o instrumento calibrado, incertidumbre debida a la resolución e incertidumbre debida a la deriva del patrón por mencionar algunos. (Pérez Hernández, 2022)

### 5.5.2 Propagación de errores

Cuando se realiza una investigación, la mayoría de las ocasiones se obtienen magnitudes (mensurando) de forma indirecta, es decir, que dicha magnitud se determina a partir de otras magnitudes que sí se miden directamente, utilizando una función. Esto ocurre cuando no es factible o no es práctico emplear un instrumento de medición de manera directa.

Si el mensurando  $Y$  es una función de las variables de entrada  $x_1$  y  $x_2$  medidos directamente,  $Y=f(X_1, X_2)$  mismo que a su vez tiene una incertidumbre ( $X_1=(x_1 \pm \Delta x_1)$  unidades  $X_2=(x_2 \pm \Delta x_2)$ ) unidades, la función  $f$  representa al mensurando y se conoce como modelo matemático del proceso de medición. Asumiendo que las variables de entrada son independientes entre sí, es decir que no están correlacionadas, y teniendo en cuenta el desarrollo en serie de Taylor de primer orden en torno al valor esperado, gracias a las propiedades de la varianza podemos obtener la ley de propagación de incertidumbre. Esta ley es fundamental para garantizar que los errores en las mediciones no se propaguen sin control, afectando la precisión y confiabilidad del resultado final.

Matemáticamente, la incertidumbre combinada en el resultado se calcula utilizando las derivadas parciales de la función respecto a cada variable medida, multiplicadas por las incertidumbres estándar de esas variables. De esta manera, la ley de la propagación de errores permite cuantificar el impacto de cada medición individual

en el resultado global, proporcionando una estimación rigurosa de la incertidumbre total asociada al proceso de medición (Taylor, 1997).

Derivado de lo anterior, la forma general para funciones con más de  $n$  variables de entrada queda:

$$u_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 u^2_{x_1} + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 u^2_{x_2} + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 u^2_{x_n}} \quad \mathbf{5.6.2}$$

$$u_y = \sqrt{\sum_i^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2_{x_i}} \quad \mathbf{5.6.3}$$

Donde:

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$  : Derivada parcial de la función  $f$  respecto a la variable  $x_i$ .

$u^2_{x_1}$ : Incertidumbre estándar asociada a la medición de la variable  $x_i$ .

$u_y$  : Incertidumbre estándar combinada en el resultado  $y$ .

### **5.5.3 Propagación de errores para la energía**

La propagación de errores en el cálculo de la energía generada por una celda solar se realiza utilizando las mediciones de voltaje (V) y corriente (I). La energía se obtiene a partir de la integración de la potencia máxima (ecuación 5.5.5) a través del tiempo. Dado que tanto el voltaje como la corriente están sujetos a incertidumbres experimentales, es necesario aplicar la propagación de errores para obtener una estimación precisa de la incertidumbre en el cálculo de la energía. Cabe destacar que la contribución del error del tiempo es insignificante frente a la del voltaje y la corriente, por lo que se considera razonable despreciarlo para simplificar el cálculo de la propagación de los errores. Esta aproximación permite concentrarse en las fuentes de error más significativas, sin comprometer la precisión del cálculo final de la energía generada.

Si aplicamos la propagación de errores a la ecuación de la energía utilizando la ecuación 5.6.2, el error total ( $u_E$ ) se determina a partir de las incertidumbres en el voltaje ( $u_V$ ) y la corriente ( $u_I$ ), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$u_E = FF \times t \times \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)^2 u_V^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I}\right)^2 u_I^2} \quad \mathbf{5.6.4}$$

$$u_E = FF \times t \times \sqrt{(I \times u_V)^2 + (V \times u_I)^2} \quad \mathbf{5.6.5}$$

Donde:

$u_E$  : Error total de la energía.

FF: Factor de forma de la celda.

t: Tiempo.

$\frac{\partial P}{\partial V}$  : Derivada parcial de la potencia respecto al voltaje.

$\frac{\partial P}{\partial I}$  : Derivada parcial de la potencia respecto a la corriente.

$u_V$  : Error asociado al voltaje.

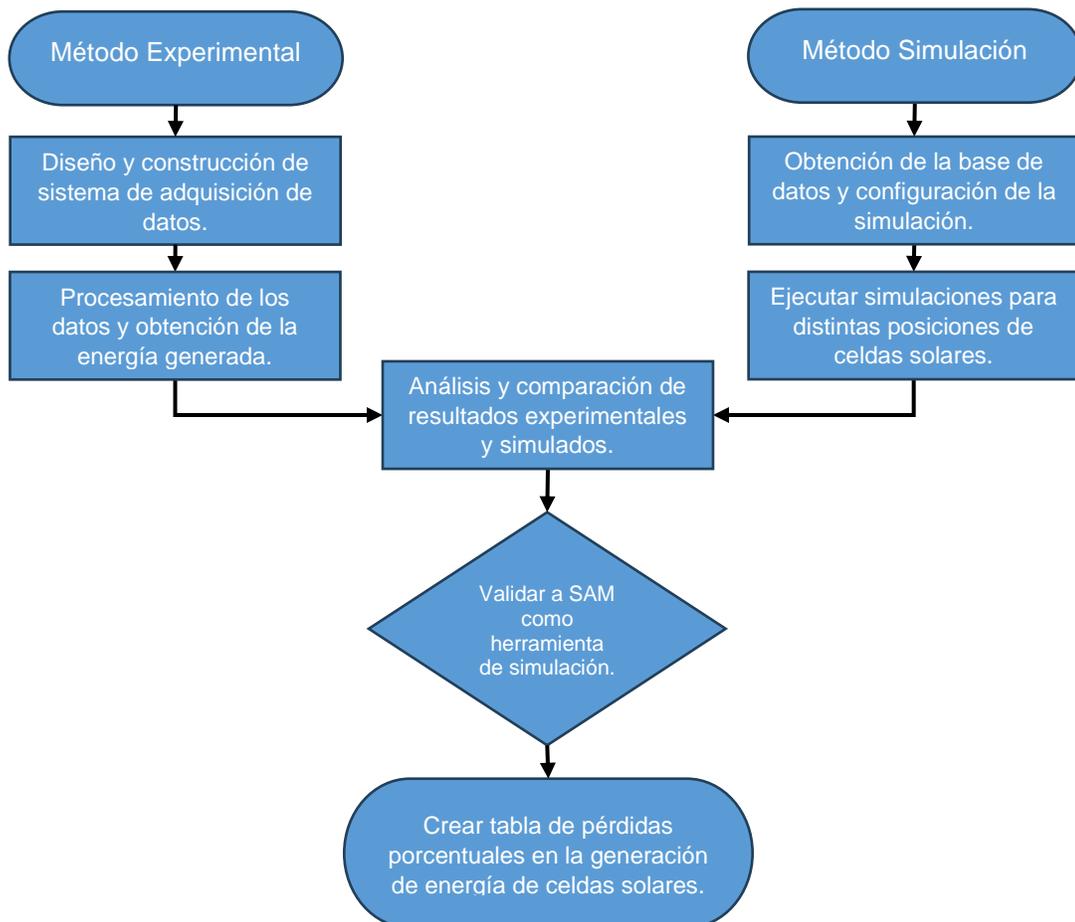
$u_I$  : Error asociado a la corriente.

## 6 Metodología

La metodología desarrollada en el presente estudio tiene como objetivo principal la creación de una tabla de pérdidas porcentuales en la generación de energía para celdas solares instaladas en orientaciones distintas a la posición óptima anual para la ciudad de Tepic, Nayarit. Para alcanzar este propósito, se evalúa la viabilidad del uso del software System Advisor Model (SAM) como herramienta de simulación, mediante la comparación de sus resultados con los obtenidos de un experimento realizado a lo largo de un año, en el que se expusieron celdas solares en diversas posiciones. El procedimiento se muestra en el diagrama de flujo mostrado en la figura 8, el cual resume los pasos del proceso.

**Figura 8**

*Diagrama de flujo del procedimiento metodológico desarrollado para la realización de la tesis*



La presente investigación tiene como inicio una fase experimental, la cual requiere del diseño y fabricación de un sistema de adquisición de datos provenientes de celdas solares expuesta a distintas posiciones (combinación de ángulo azimutal e inclinación).

### 6.1 Estructura de montaje de celdas

La estructura de montaje fue diseñada para que todas las celdas solares fueran expuestas prácticamente en el mismo punto, solo variando su posición. Para lograr dicho propósito, se construyó un mástil de tubo de acero al carbón calibre 20 de 1 pulgada de diámetro, soldado perpendicularmente a una base en forma de "H", construida de perfil tubular de 1 pulgada. Para el montaje de las celdas, se construyeron brazos de distintas longitudes de perfil tubular de 0.75 pulgadas, mismos que en un extremo contiene una base basculante fabricada en solera de dos pulgadas de acero, como se muestra en la figura 9.

#### Figura 9

*Estructura de montaje de celdas solares en experimento*



## 6.2 Celdas solares

Las celdas solares utilizadas son del tipo monocristalinas de silicio grado A. Sus dimensiones son 125mm x 125mm x 200µm, fabricados por la empresa VICKOCELL.

Las celdas solares fueron encapsuladas entre dos vidrios naturales de 2 mm de espesor y para el sello se utilizó sellador 100% silicón uso general.

Para la conexión de la celda con el sistema de adquisición de datos se utilizaron dos tipos de cable, cordón pot de cobre 2x14 AWG (cable de acometida) y tabbing wire para la interfaz celda solar – cable de acometida como se muestra en la figura 10.

**Figura 10**

*Encapsulado de celdas solares*



## 6.3 Sistema de adquisición y almacenamiento de datos

Para poder evaluar la operación de la celda, es necesario conocer su desempeño cuando se encuentra expuesta a la radiación solar. Los parámetros eléctricos que

nos permiten evaluar su desempeño serán el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ) y el factor de forma (FF) de la celda solar. Con el producto de estos parámetros conocemos el comportamiento de la potencia generada por la celda solar y, a su vez, multiplicada por las horas de operación diaria, obtenemos la energía generada por esa celda solar.

Con el fin de obtener los valores de  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$ , se desarrolló un código de programación en la plataforma de desarrollo ARDUINO, el cual fue incorporado a una tarjeta ATmega 2560 micro controlada, la cual incorpora 54 pines entre analógicos y digitales para su operación.

El valor de  $V_{oc}$  es leído directamente por la tarjeta Mega2560 mediante un pin analógico configurado como entrada.

Por su parte la  $I_{sc}$ , es medida a través de un sensor de efecto hall ACS712 invasivo, conectado a un pin analógico de la tarjeta Mega2560 y colocado en el polo positivo del cable de acometida de la celda. Para poder generar la  $I_{sc}$ , es necesario poner en corto circuito las terminales de la celda solar, en nuestro sistema, esto se realiza mediante relevadores electromecánicos comandados por la tarjeta Mega2560.

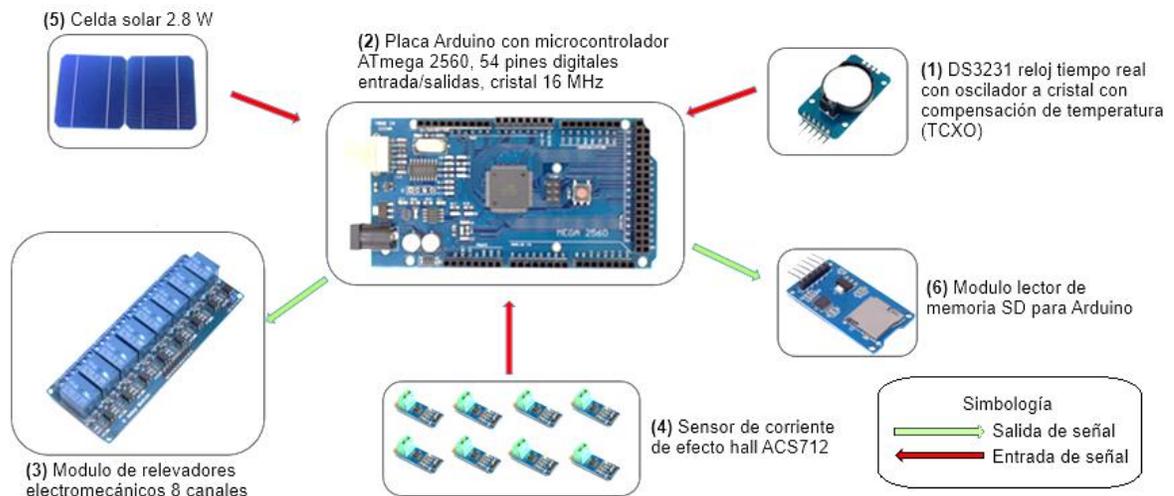
Los datos de  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$  se toman en intervalos de 30 minutos. Para coordinar la toma de datos se programó y conecto a la tarjeta Mega2560, un reloj del tipo RTC DS3231, dicho reloj aporta las condiciones de hora y fecha al sistema.

El almacenamiento de los datos se realiza mediante un módulo de memoria micro SD conectado a la tarjeta Mega2560, los cuales son almacenados en un archivo con extensión txt para posteriormente ser procesado en hoja de cálculo.

Todo el sistema se encuentra instalado 50 cm. debajo de la estructura de montaje, dentro del edificio donde se encuentra ubicado el experimento. La figura 11 muestra el diagrama de flujo de datos del experimento.

**Figura 11**

*Diagrama del sistema de adquisición de datos*



La operación del sistema de adquisición de datos se desarrolla en los siguientes pasos:

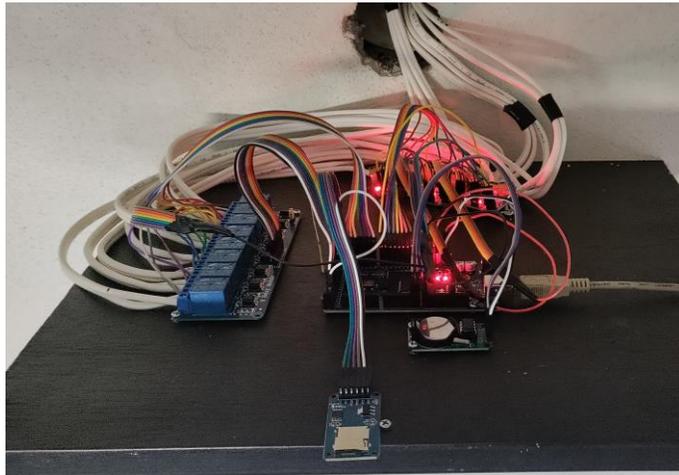
1. Sincronización de tiempo: El reloj DS3231 proporciona la referencia temporal, permitiendo un control preciso del intervalo de medición.
2. Inicio de adquisición cada 30 minutos: La tarjeta ATmega 2560 cuenta el tiempo y, al transcurrir un intervalo de 30 minutos, envía una señal de comando para cerrar los relevadores electromecánicos.
3. Activación de relevadores y generación de corto circuito: Los relevadores electromecánicos se activan a partir de la señal enviada por la tarjeta, generando un corto circuito controlado en las terminales de las celdas solares.
4. Medición de corriente: Una vez establecido el corto circuito, se realizan 500 mediciones de corriente mediante el sensor de efecto hall ACS712. Los valores obtenidos se promedian para obtener un valor representativo de la corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ).
5. Toma de la  $V_{oc}$ : Tras un intervalo de 500 milisegundos, los relevadores se abren, eliminando el corto, y se mide el valor de la tensión en circuito abierto ( $V_{oc}$ ).

6. Almacenamiento de datos: Los valores promedio de  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$ , junto con la fecha y hora de la medición, se almacenan en una tarjeta microSD para su posterior análisis.

En la figura 12 se presenta las conexiones físicas y estado real del sistema de adquisición de datos.

### **Figura 12**

*Estado físico del sistema de adquisición de datos*



### **6.4 Selección de las posiciones de las celdas solares en el experimento**

El sistema de adquisición de datos tiene una capacidad máxima para evaluar el rendimiento de hasta 7 celdas solares, por lo que se definieron cuidadosamente sus ubicaciones en el experimento. Tomando como referencia el rango de ángulos de azimut e inclinación típicos de una aplicación solar en el hemisferio norte terrestre, y considerando poco probable una instalación en la que la radiación solar incida en la parte trasera de las celdas, esta investigación se limita a orientaciones que van desde el este hasta el oeste (ángulos azimutales entre  $90^\circ$  y  $270^\circ$ ), pasando por el sur ( $180^\circ$ ), y con inclinaciones de  $0^\circ$  (horizontal) a  $90^\circ$  (vertical).

La estrategia para la selección de combinaciones fue elegir los puntos donde la variación en la captación de energía solar es más significativa. Por ejemplo, en el caso del ángulo azimutal se dividió en 5 direcciones:  $90^\circ$  (Este),  $135^\circ$  (Sureste),  $180^\circ$  (Sur),  $225^\circ$  (Suroeste) y  $270^\circ$  (Oeste). Para el ángulo de inclinación, se

consideraron como ángulos importantes: uno cercano a la horizontal (10°) que simula una instalación en un techo plano, un ángulo intermedio de 45°, y los ángulos próximos e incluyendo el ángulo óptimo anual, que en este caso corresponde a la latitud de la ubicación, 21.5°.

## 6.5 Simulación por SAM

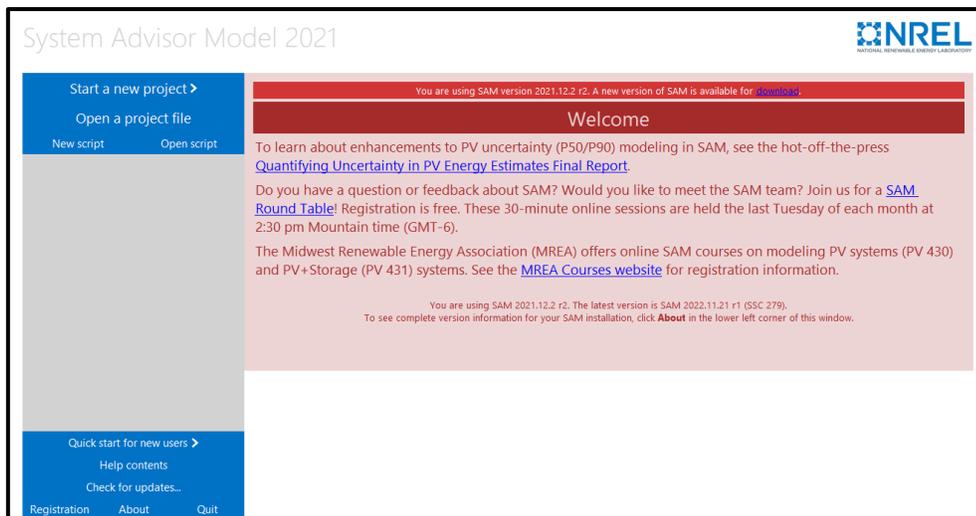
En paralelo al método experimental descrito en los párrafos anteriores, se desarrolla el análisis de datos por el método simulado utilizando la plataforma SAM. De acuerdo al sitio web de la National Renewables Energy Laboratory (s.f.):

[...] El *System Advisor Model* (SAM) es un modelo de software tecnológico gratuito que facilita la toma de decisiones a las personas en la industria de las energías renovables. SAM es un proyecto de código abierto, por lo que su código fuente está disponible para el público. Los investigadores pueden estudiar el código para comprender los algoritmos del modelo, y los programadores de software pueden contribuir sus propios modelos y mejoras al proyecto.

SAM utiliza distintas ventanas que permiten aportar los datos necesarios para general la modelación. La figura 13 muestra la ventana de inicio de SAM

**Figura 13**

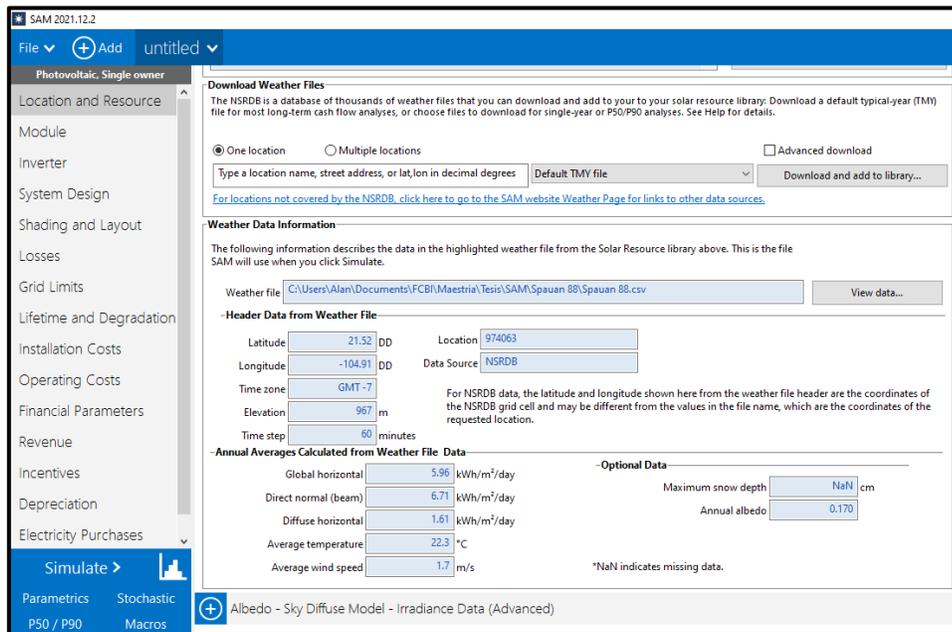
*Venta de inicio en SAM*



El sistema SAM requiere de suministrarle valores como geolocalización del punto de instalación. Con dicho dato, SAM le asigna valores climatológicos y de radiación solar a la modelación. Los valores obtenidos, provienen de la base de datos con que cuenta la National Renewables Energy Laboratory (NREL). La figura 14 muestra la ventana de SAM para la localización del proyecto.

**Figura 14**

*Ventana de geolocalización en SAM*



Una vez geolocalizado el punto de instalación, es necesario definir el panel solar. A pesar de que SAM cuenta con una gran base de datos de paneles solares comerciales, ninguno es semejante al utilizado en nuestra investigación, por ello, es necesario definir los parámetros de nuestra celda solar con el fin de empatar los valores del método experimental de nuestro proyecto con el simulado. Los valores de la celda solar utilizada se ilustran en la figura 15, la cual es un extracto de la ficha técnica que proporciona el fabricante de la celda solar.

**Figura 15**

Ficha técnica fabricante VikoCell

**MONO-CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELL**

MECHANICAL DATA AND DESIGN		TEMPERATURE COEFFICIENTS	
Dimension	125mm*125mm, tolerance ± 0.5mm	TkCurrent	+0.10%/°C
Thickness	200 μm ± 20 μm	TkVoltage	-0.38%/°C
Front(-)	Blue silicon nitride anti-reflection coating	TkPower	-0.47%/°C
Back(+)	Aluminum back surface field		

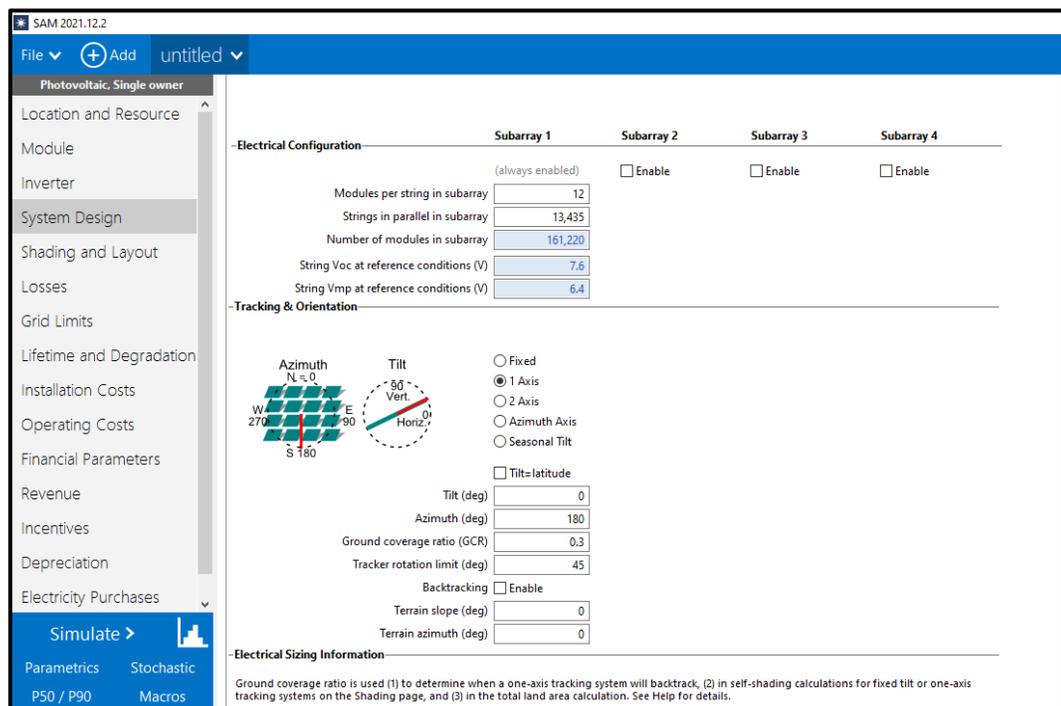
Eff	Pmax	Vmp	Imp	Voc	Isc
20.00%	3.078W	0.575V	5.353A	0.665V	5.997A
19.80%	3.047W	0.570V	5.346A	0.660V	5.948A
19.60%	3.017W	0.560V	5.388A	0.655V	5.901A
19.40%	2.986W	0.550V	5.429A	0.650V	5.851A
19.20%	2.955W	0.545V	5.422A	0.645V	5.803A
19.00%	2.924W	0.540V	5.415A	0.640V	5.753A
18.80%	2.893W	0.530V	5.408A	0.635V	5.802A
18.60%	2.863W	0.530V	5.401A	0.635V	5.744A


Posterior a modelar la celda solar, se requiere definirle la posición en la que se encuentra la celda solar. Es en este punto donde se especifican las diferentes combinaciones entre ángulos azimutales e inclinaciones, uno a la vez. La ventana para esta operación se muestra en la figura 16.

**Figura 16**

Ventana de diseño del sistema en SAM



**Photovoltaic, Single owner**

Location and Resource

Module

Inverter

**System Design**

Shading and Layout

Losses

Grid Limits

Lifetime and Degradation

Installation Costs

Operating Costs

Financial Parameters

Revenue

Incentives

Depreciation

Electricity Purchases

**Simulate >**

Parameters Stochastic

P50 / P90 Macros

---

**Electrical Configuration**

	Subarray 1	Subarray 2	Subarray 3	Subarray 4
(always enabled)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Modules per string in subarray	12			
Strings in parallel in subarray	13,435			
Number of modules in subarray	161,220			
String Voc at reference conditions (V)	7.6			
String Vmp at reference conditions (V)	6.4			

---

**Tracking & Orientation**

Azimuth

N = 0

W 270° E 90° S 180°

Tilt

90° Vert

0° Horiz

Fixed

1 Axis

2 Axis

Azimuth Axis

Seasonal Tilt

Tilt=latitude

Tilt (deg)

Azimuth (deg)

Ground coverage ratio (GCR)

Tracker rotation limit (deg)

Backtracking  Enable

Terrain slope (deg)

Terrain azimuth (deg)

---

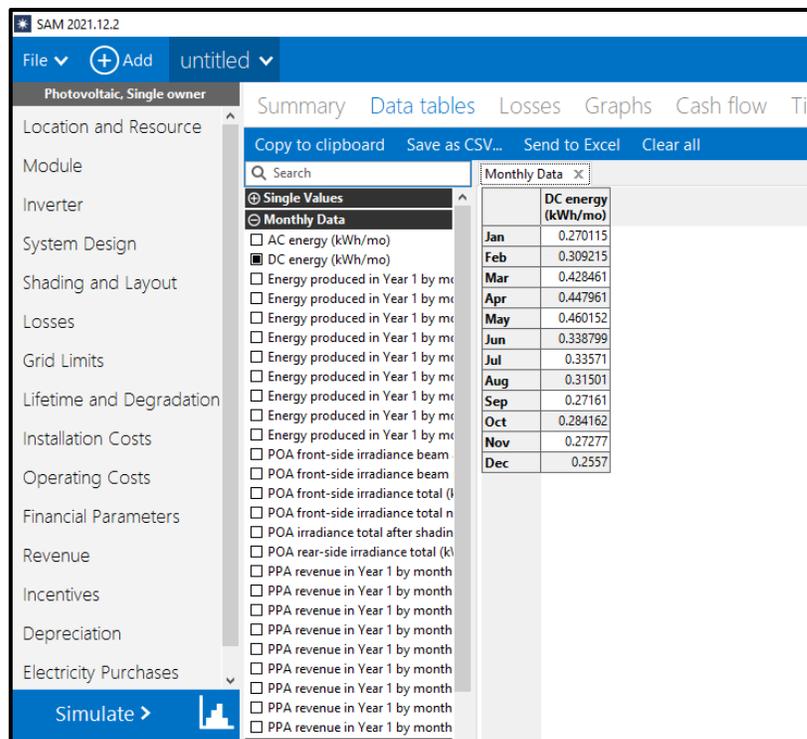
**Electrical Sizing Information**

Ground coverage ratio is used (1) to determine when a one-axis tracking system will backtrack, (2) in self-shading calculations for fixed tilt or one-axis tracking systems on the Shading page, and (3) in the total land area calculation. See Help for details.

Con las condiciones descritas con antelación, se puede simular. SAM proporciona una gran cantidad de datos, sin embargo, lo que nos interesa en nuestra investigación, es la energía generada por la celda solar en las condiciones de instalación y con ello, comparar cada una de las posiciones, calculando la desviación de cada una de ellas respecto a la óptima anual, que, para el caso de Tepic, Nayarit es: azimutal 180° e inclinación de 21.5°. En la figura 17 se presenta la ventana en la que SAM expone los valores de la simulación.

**Figura 17**

*Ventana de valores simulados en SAM*



## 7 Resultados y discusiones

### 7.1 Resultados método experimental

El sistema de adquisición de datos del método experimental, permitió obtener los valores de  $I_{sc}$  y el  $V_{oc}$  cada media hora de siete celdas solares colocadas en distintas posiciones incluyendo la óptima anual que en el experimento es la celda No. 2 con un ángulo azimutal de  $180^\circ$  y una inclinación de  $21.5^\circ$ . Las posiciones de cada una de las celdas que integran el experimento, se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1**

*Orientación de celdas en experimento*

No. de Celda	Posición
No. 1	Azimutal $180^\circ$ e inclinación $10^\circ$
No. 2	Azimutal $180^\circ$ e inclinación $21.5^\circ$
No. 3	Azimutal $135^\circ$ e inclinación $45^\circ$
No. 4	Azimutal $180^\circ$ e inclinación $30^\circ$
No. 5	Azimutal $270^\circ$ e inclinación $21.5^\circ$
No. 6	Azimutal $90^\circ$ e inclinación $21.5^\circ$
No. 7	Azimutal $180^\circ$ e inclinación $40^\circ$

#### 7.1.1 Corrección de los valores experimentales

Con la finalidad de tener mayor certeza en los valores obtenidos y registrados en el proceso de experimentación fue necesario llevar a cabo el ajuste o corrección de los datos provenientes del sistema de adquisición.

Para lograr la corrección de los datos, se utilizó un equipo de alta precisión “SMU (source-measure unit) Keithley 2450”, propiedad de la Unidad Especializada en Energías Renovables del CENITT-UAN, el cual proporciona valores controlados de corriente y voltaje. Utilizando este equipo como referencia, se registraron valores de corriente y voltaje, además de las lecturas entregadas por el sistema de adquisición de datos del experimento. Posteriormente, empleando técnicas de regresión lineal, se ajustó una curva que relacionara los valores registrados de los sensores los valores generados por el SMU. Este proceso permitió establecer una relación

matemática entre las lecturas de los sensores y los valores reales, proporcionando así una curva de calibración confiable y precisa para el experimento.

Las relaciones matemáticas obtenida en el proceso de calibración para cada uno de los sensores se encuentran registradas en la tabla No. 2.

**Tabla 2**

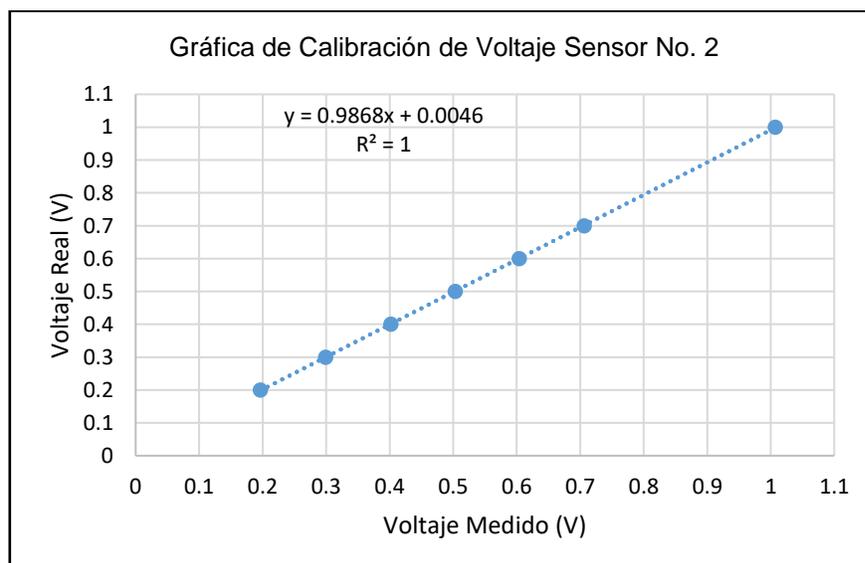
*Relaciones matemáticas para calibración de sensores del experimento*

Celda	Voltaje	Corriente
No. 1	$y = 0.9875x + 0.0056$	$y = 1.0121x - 0.258$
No. 2	$y = 0.9868x + 0.0046$	$y = 1.0105x - 0.1954$
No. 3	$y = 0.9857x + 0.008$	$y = 1.0105x - 0.2715$
No. 4	$y = 0.9895x + 0.0032$	$y = 1.0097x - 0.2944$
No. 5	$y = 0.9899x + 0.0061$	$y = 0.9928x - 0.0792$
No. 6	$y = 0.9831x + 0.0063$	$y = 1.0145x - 0.1681$
No. 7	$y = 0.9912x + 0.0059$	$y = 1.0105x - 0.3763$

La figura 18 muestra la curva de calibración del sensor de voltaje para la celda No. 2 (azimutal 180° e inclinación 21.5°), además de la función que genera al realizar la regresión con la cual se pudo recalculer el valor obtenido por el sistema de adquisición de datos.

**Figura 18**

*Gráfica de calibración para el sensor de voltaje No. 2*



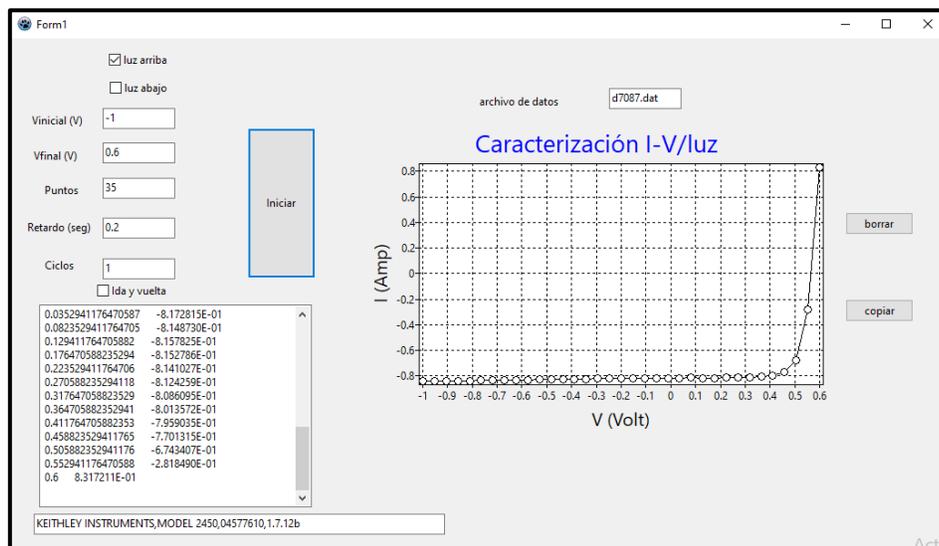
### 7.1.2 Obtención del factor de forma

Para la obtención del factor de forma (FF) para las celdas solares utilizadas en el experimento, se utilizó el SMU Keithley 2450”, propiedad de la Unidad Especializada en Energías Renovables del CENITT-UAN, el cual permitió la obtención de valores para el trazo de la curva I-V de la celda solar. Utilizando la expresión 5.5.4 obtenemos el FF que se utilizó para calcular la potencia máxima.

La medición del FF en la aplicación rápida bajo el ambiente de desarrollo Lazarus se encuentra ilustrada en la figura 19.

**Figura 19**

*Medición del factor de forma en ambiente Lazarus*

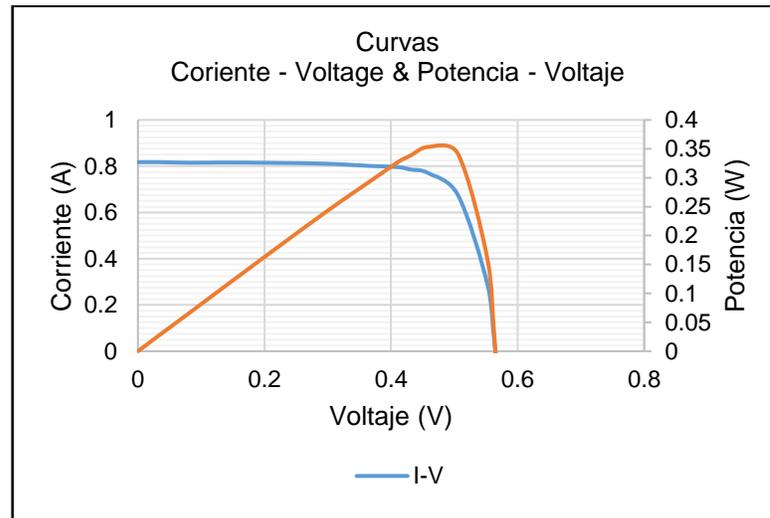


Para el caso del estudio, las corrientes obtenidas en la prueba son negativas ya que van en contra de las corrientes que captura el SMU, dando por resultado datos en el cuarto cuadrante.

Con los valores absolutos de las mediciones en la prueba para generar la curva I-V se obtiene la gráfica que se muestra en la figura 20 la cual, a su vez, contiene la curva potencia voltaje. Con ambas curvas podemos definir el FF de la celda solar.

**Figura 20**

Curva I-V y P-V para la celda solar utilizada en el experimento



El factor de forma calculado para celda solar utilizada en el experimento es de 0.77

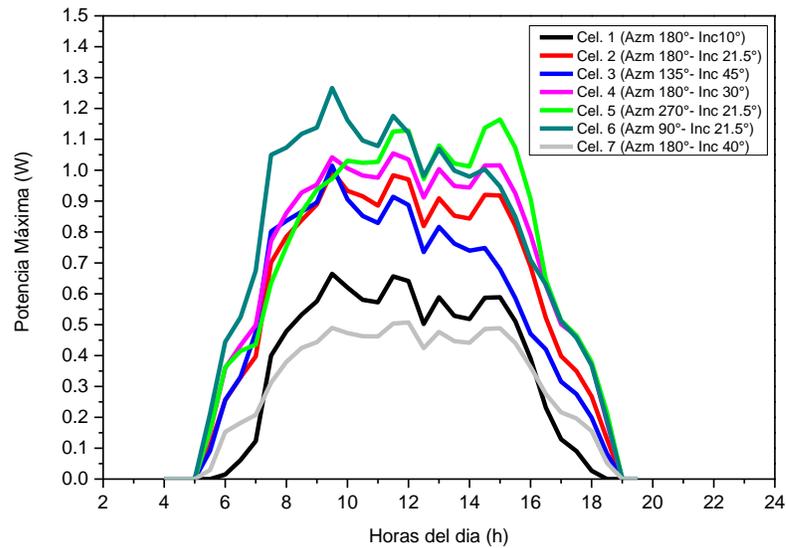
### 7.1.3 Comportamiento de la potencia a lo largo del día

Con los valores obtenidos por el sistema de adquisición de datos en el experimento y una vez corregidos para cada una de las celdas solares, además del factor de forma (FF) y utilizando la expresión 5.5.5, resuelta para la potencia máxima,  $P_{max}(W) = V_{mp} \times I_{mp}$  se obtuvo el comportamiento de la potencia máxima a lo largo del día.

Este cálculo se hace para las 7 celdas durante todo el año de medición. La figura 21 muestra el comportamiento de la potencia el día 15 de abril para todas las celdas en el experimento. En esta figura se aprecia que la Celda No. 6 registra una potencia superior en comparación con las otras seis celdas evaluadas. Este comportamiento es coherente con lo esperado, dado que en ese periodo del año y en la hora en que se observa el valor máximo, la combinación del ángulo azimutal y la inclinación de la celda optimizan la captación de radiación solar. Esto se debe a que los rayos solares inciden con mayor perpendicularidad sobre la Celda No. 6, en contraste con las demás celdas del experimento, lo que resulta en una mayor eficiencia en la conversión de energía.

**Figura 21**

*Comportamiento de la potencia para el día 15 de abril para las celdas en el experimento*

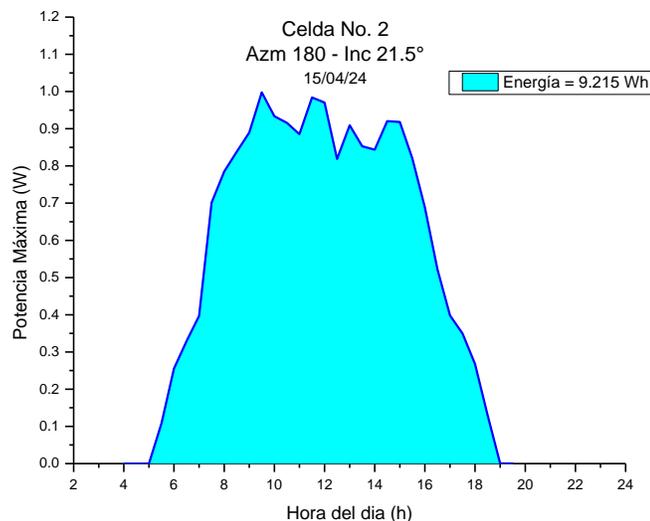


### 7.1.4 Cálculo de la energía generada por cada celda del experimento

Una vez obtenido el comportamiento de la potencia durante el día, integrando el área bajo la curva, se obtiene la energía generada durante el día por cada celda que componen el experimento. La gráfica de la energía generada por una celda en el experimento se muestra en la figura 22. La energía calculada para el día 15 de abril por la celda No. 2 fue de 9.215 Wh.

**Figura 22**

*Energía generada por la celda No. 2 el día 15 de abril*

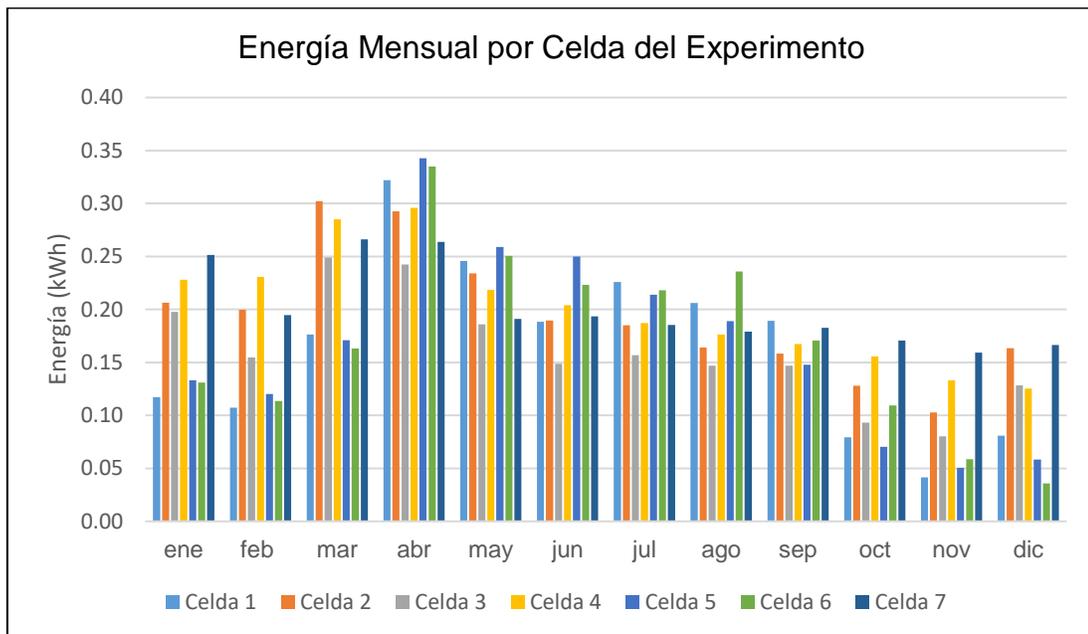


El cálculo de la energía diaria generada por la celda, permitió obtener la producción de energía en los periodos de interés. En nuestra investigación, el periodo de estudio abarcó un año completo. No obstante, para el análisis de los resultados, se decidió segmentar la generación de energía en intervalos mensuales, con el objetivo de calcular posteriormente la energía total anual producida por cada celda del experimento.

La gráfica de la generación mensual para cada celda del experimento se muestra en la figura 23 y los datos se presentan en la tabla 3.

**Figura 23**

*Generación de energía mensual por cada celda del experimento*



*Nota:* Celda 1: azm.180°, inc.10°; celda 2: azm.180°, inc.21.5°; celda 3: azm.135°, inc.45°; celda 4: azm.180°, inc.30°; celda 5: azm.270°, inc.21.5°; celda 6: azm.90°, inc.21.5°; celda 7: azm.180°, inc.40°.

**Tabla 3***Generación de energía mensual por cada celda del experimento*

Mes	Energía (kWh/mes)						
	<b>Cel. 1</b> <b>180/10</b>	<b>Cel. 2</b> <b>180/21.5</b>	<b>Cel. 3</b> <b>135/45</b>	<b>Cel. 4</b> <b>180/30</b>	<b>Cel. 5</b> <b>270/21.5</b>	<b>Cel. 6</b> <b>90/21.5</b>	<b>Cel. 7</b> <b>180/40</b>
Enero	0.117	0.206	0.198	0.228	0.133	0.131	0.251
Febrero	0.107	0.200	0.155	0.231	0.120	0.114	0.195
Marzo	0.176	0.302	0.249	0.285	0.171	0.163	0.266
Abril	0.322	0.293	0.242	0.296	0.343	0.335	0.264
Mayo	0.246	0.234	0.186	0.218	0.259	0.251	0.191
Junio	0.188	0.189	0.149	0.204	0.250	0.223	0.194
Julio	0.226	0.185	0.157	0.187	0.214	0.218	0.185
Agosto	0.206	0.164	0.147	0.176	0.189	0.236	0.179
Septiembre	0.189	0.158	0.147	0.167	0.148	0.171	0.183
Octubre	0.079	0.128	0.093	0.156	0.070	0.110	0.171
Noviembre	0.041	0.103	0.080	0.133	0.051	0.059	0.159
Diciembre	0.081	0.163	0.128	0.125	0.058	0.036	0.167
Total	1.980	2.327	1.931	2.406	2.006	2.045	2.404

*Nota:* 180/21.5 indica el ángulo de azimut (180°) y el ángulo de inclinación (21.5°).

En la gráfica se puede observar que la posición de la celda con orientación hacia el ecuador terrestre y con una inclinación igual a la latitud del sitio de instalación (en nuestro estudio la celda No. 2) considerada como óptima anual, no es la más eficiente para todos los meses del año, por el contrario, si se plantea la aplicación de una celda solar bajo una exigencia de energía en un periodo determinado del año, es necesario modificar dicha posición para optimizar la captación de la luz solar.

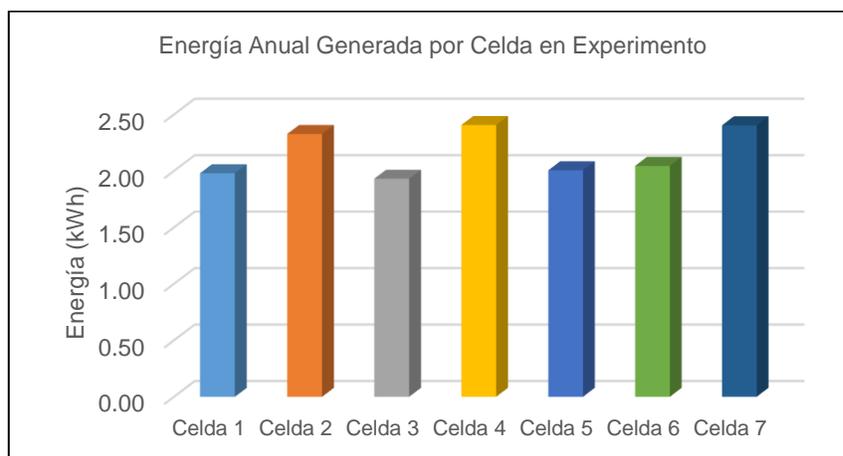
Como se puede apreciar, las celdas con mayor generación de energía en cada mes son las siguientes: en enero, la celda No. 7 con 0.251 kWh; en febrero, la celda No. 4 con 0.231 kWh; en marzo, la celda No. 2 con 0.302 kWh. Para los meses de abril, mayo y junio, la celda No. 5 destacó con una mayor generación de energía, alcanzando 0.343 kWh, 0.259 kWh y 0.250 kWh, respectivamente. En julio, la celda

No. 1 generó 0.226 kWh; en agosto, la celda No. 6, con 0.236 kWh; y en septiembre, la celda No. 1 volvió a sobresalir con 0.189 kWh. Finalmente, durante los meses de octubre, noviembre y diciembre, la celda No. 7 presentó la mayor generación de energía, con valores de 0.171 kWh, 0.159 kWh y 0.167 kWh, respectivamente.

En el presente estudio, se realizó la sumatoria de las generaciones diarias de energía de cada celda solar involucrada en el experimento, acumulando los datos a lo largo de un año. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla No. 4 y se ilustran gráficamente en la figura 24. Además, se realizó el cálculo del error en la energía generada empleando la ecuación 5.6.5, permitiendo con ello, conocer el error acumulado asociado al cálculo de la energía generada.

#### Figura 24

*Energía anual generada por cada celda en el experimento*



*Nota:* Celda 1: azm.180°, inc.10°; celda 2: azm.180°, inc.21.5°; celda 3: azm.135°, inc.45°; celda 4: azm.180°, inc.30°; celda 5: azm.270°, inc.21.5°; celda 6: azm.90°, inc.21.5°; celda 7: azm.180°, inc.40°

**Tabla 4**

*Generación de energía anual por cada celda del experimento*

No. De celda	Energía Anual (kWh)	
1	1.980	±0.106
2	2.327	±0.156
3	1.931	±0.092
4	2.406	±0.117
5	2.006	±0.079
6	2.045	±0.110
7	2.404	±0.159

Los resultados del experimento (figura 23) indican que las celdas solares 2 (óptima anual), 4 y 7 orientadas hacia el sur demostraron ser las más eficientes en términos de generación de energía anual ( $2.327 \pm 0.106$  kWh,  $2.406 \pm 0.117$  kWh y  $2.404 \pm 0.159$  kWh respectivamente). Esta orientación maximiza la exposición a la radiación solar, aprovechando al máximo la trayectoria del sol a lo largo del año.

El tener los valores de generación anual por celda, permitió hacer las comparaciones necesarias entre nuestro método experimental y el simulado, observando las desviaciones entre los dos métodos.

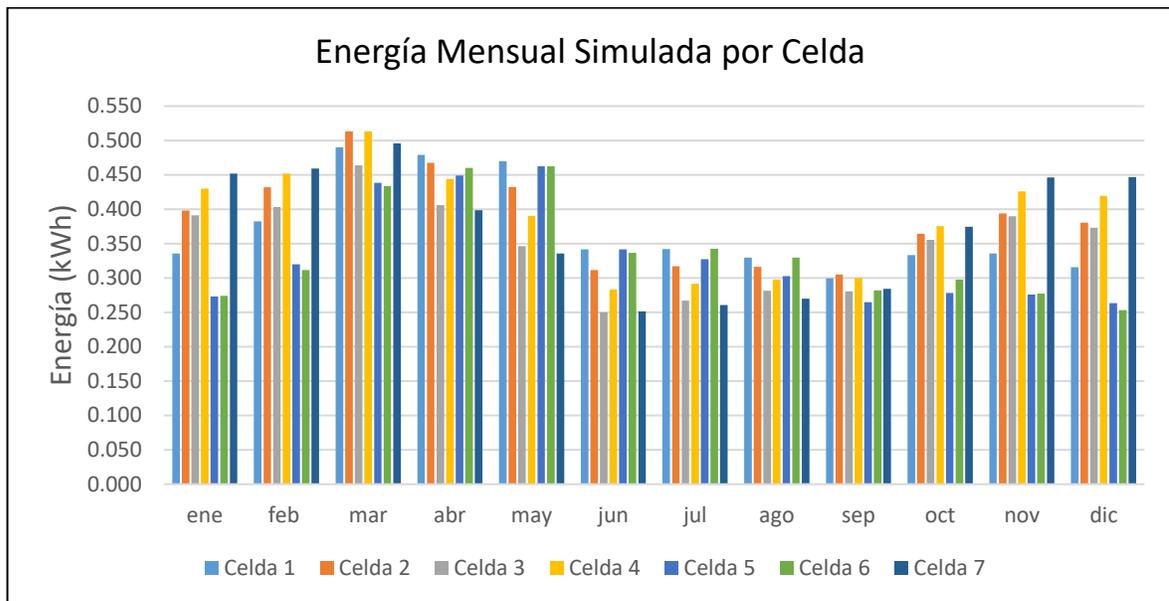
## **7.2 Resultados método simulado**

Tras alimentar la plataforma de simulación SAM con las especificaciones de las celdas empleadas y la ubicación geográfica del experimento, se obtiene la energía generada simulada anual para cada una de las posiciones consideradas en el experimento y, con ello, poder comparar la simulación contra la experimentación.

Los valores obtenidos por mes mediante simulación para las posiciones iguales a las siete celdas solares que se utilizaron en el método experimental se encuentran plasmados en la tabla No. 5 y graficadas en la figura 25.

**Figura 25**

Generación de energía mensual por simulación para las posiciones equivalentes a las 7 celdas utilizadas en el método experimental



Nota: Celda 1: azm.180°, inc.10°; celda 2: azm.180°, inc.21.5°; celda 3: azm.135°, inc.45°; celda 4: azm.180°, inc.30°; celda 5: azm.270°, inc.21.5°; celda 6: azm.90°, inc.21.5°; celda 7: azm.180°, inc.40°

**Tabla 5**

Energía generada por simulación al mes por cada celda incluida en el experimento

Mes	Energía (kWh/mes)						
	Cel. 1 180/10	Cel. 2 180/21.5	Cel. 3 135/45	Cel. 4 180/30	Cel. 5 270/21.5	Cel. 6 90/21.5	Cel. 7 180/40
Mes	Cel. 1	Cel. 2	Cel. 3	Cel. 4	Cel. 5	Cel. 6	Cel. 7
Enero	0.336	0.398	0.391	0.430	0.273	0.274	0.452
Febrero	0.382	0.432	0.403	0.452	0.320	0.311	0.459
Marzo	0.176	0.302	0.249	0.285	0.171	0.163	0.266
Abril	0.322	0.293	0.242	0.296	0.343	0.335	0.264
Mayo	0.246	0.234	0.186	0.218	0.259	0.251	0.191
Junio	0.188	0.189	0.149	0.204	0.250	0.223	0.194
Julio	0.226	0.185	0.157	0.187	0.214	0.218	0.185
Agosto	0.206	0.164	0.147	0.176	0.189	0.236	0.179
Septiembre	0.189	0.158	0.147	0.167	0.148	0.171	0.183
Octubre	0.079	0.128	0.093	0.156	0.070	0.110	0.171
Noviembre	0.041	0.103	0.080	0.133	0.051	0.059	0.159
Diciembre	0.081	0.163	0.128	0.125	0.058	0.036	0.167
Total	1.980	2.327	1.931	2.406	2.006	2.045	2.404

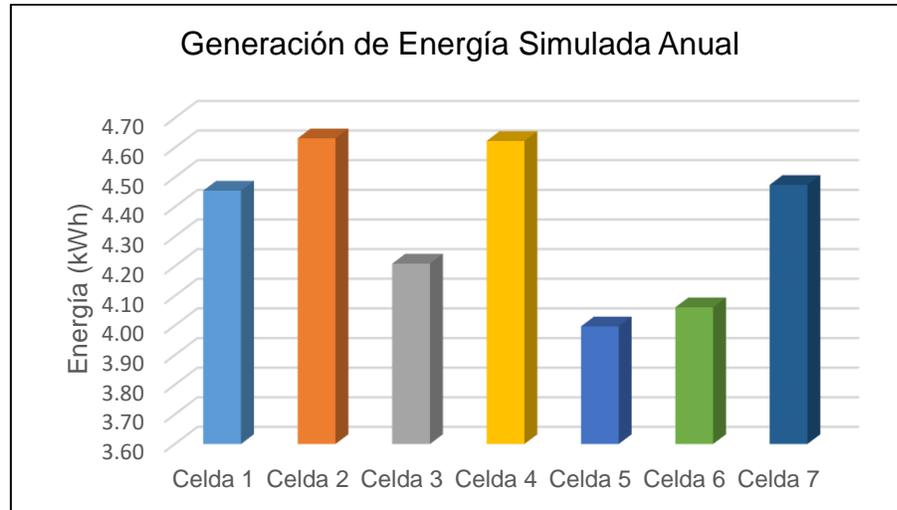
Nota: 180/21.5 indica el ángulo de azimut (180°) y el ángulo de inclinación (21.5°).

De manera similar a lo observado en el método experimental, la posición designada como óptima anualmente (celda No. 2) no es la que genera la mayor cantidad de energía en la simulación a lo largo de todos los meses. Por ejemplo, en los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre, la celda No. 7 (sur, 40°) es la que presenta la mayor generación de energía, con valores de 0.452 kWh, 0.459 kWh, 0.446 kWh y 0.447 kWh, respectivamente. En contraste, para marzo y septiembre, la celda No. 2 exhibe los niveles más altos de generación, alcanzando 0.513 kWh y 0.305 kWh, respectivamente. Por otro lado, la celda No. 1 (sur, 10°) se destaca en términos de generación de energía durante los meses de abril, mayo y agosto, con cifras de 0.479 kWh, 0.470 kWh y 0.330 kWh, respectivamente. En junio, la celda No. 5 (oeste, 21.5°) fue la que mayor energía generó, alcanzando 0.342 kWh; en julio, la celda No. 6 (este, 21.5°) mostró un rendimiento de 0.343 kWh, y en octubre, la celda No. 4 (sur, 30°) presentó la mayor generación de energía simulada con un total de 0.375 kWh.

Con el objetivo de establecer un parámetro de comparación entre los valores obtenidos por simulación y la generación de energía de las celdas involucradas en el experimento, se llevó a cabo la suma de todos los valores de generación de energía simulada mensuales proporcionados por el software SAM a lo largo de un año, los resultados se muestran en la tabla No. 6 y se ilustran de manera gráfica en la figura 26.

**Figura 26**

*Generación de energía anual por simulación para las posiciones equivalentes a las 7 celdas utilizadas en el método experimental*



*Nota:* Celda 1: azm.180°, inc.10°; celda 2: azm.180°, inc.21.5°; celda 3: azm.135°, inc.45°; celda 4: azm.180°, inc.30°; celda 5: azm.270°, inc.21.5°; celda 6: azm.90°, inc.21.5°; celda 7: azm.180°, inc.40°

**Tabla 6**

*Generación de energía anual por simulación para cada celda que integra el experimento*

No. De celda	Energía Anual (kWh)
1	4.455
2	4.631
3	4.209
4	4.622
5	3.997
6	4.061
7	4.474

Como lo muestra la figura 26, la celda 2 (sur, 21.5°) que corresponde a la posición óptima anual, es la que genera mayor energía. No obstante, las celdas 1, 4 y 7, que también se encuentran orientadas al sur (azimut de 180°) con inclinaciones de 10°, 30° y 40°, generan valores de energía muy similares. La diferencia máxima en la energía producida por estas celdas es del 3.80%.

Por otra parte, las celdas que menos generan energía simulada son las celdas 5 y 6, las cuales se encuentran orientadas completamente al este y oeste terrestre (ángulo azimutal  $90^\circ$  y  $270^\circ$ ) presentando una pérdida máxima de energía generada por simulación del 13.69% con respecto a la celda 2.

### **7.3 Comparación de resultados del método experimental y simulado**

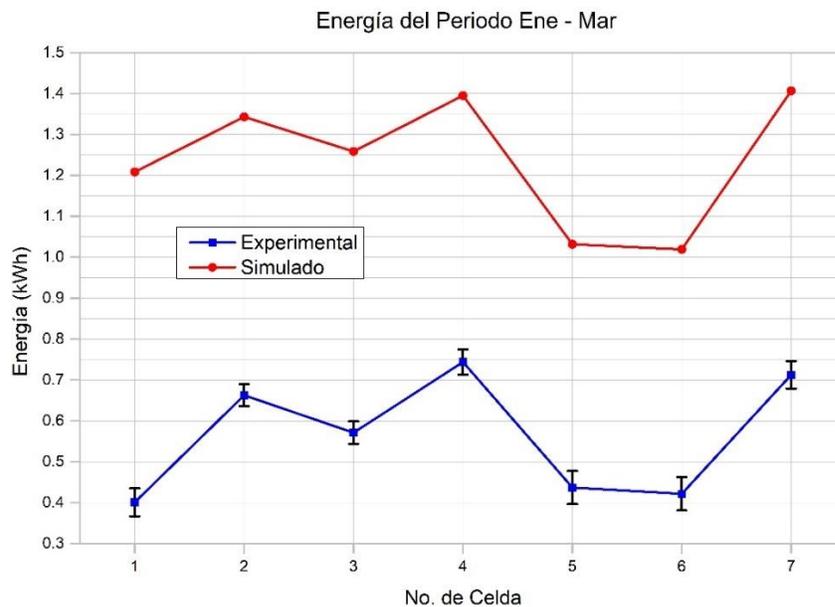
Para realizar la comparación y análisis de los resultados se agrupó la energía generada por simulación y experimentación en periodos de tres meses, consiguiendo con ello la energía acumulada en cuatro periodos que en esencia representan las estaciones del año (invierno, primavera, verano y otoño)

Los valores de energía obtenidos por experimentación, junto con su correspondiente error acumulado, así como los valores de energía generados por simulación, se presentan en las tablas 7 a la 10 y se ilustran gráficamente en las figuras 27 a 30. Los resultados de los cuatro períodos de análisis, así como del período anual, muestra que las curvas creadas con los valores de energía generados a partir de la experimentación, junto con sus respectivos errores y, los valores obtenidos a través de simulación, exhiben un comportamiento similar. Esto sugiere que la distribución de la energía generada por las celdas a lo largo de los períodos estudiados sigue una tendencia comparable en ambas series de datos. No obstante, se observa una diferencia en la magnitud de las curvas, ya que la simulada muestra valores de energía más altos para todas las celdas, tal como se puede corroborar en las figuras. Esta discrepancia sugiere que, aunque la variación en la generación de energía entre las distintas celdas es coherente tanto en los resultados experimentales como en los simulados, los factores considerados en la simulación para el cálculo de la energía difieren de las condiciones reales a las que estuvieron expuestas las celdas solares durante el experimento. Las diferencias en los resultados de generación de energía entre el experimento y las simulaciones realizadas en el software SAM (System Advisor Model) pueden deberse a diversos factores, entre ellos las condiciones ambientales, que juegan un rol crucial. Cabe resaltar que las bases de datos solares empleadas por SAM representan promedios

de mediciones a largo plazo (TMY), mientras que la presente investigación se basa en mediciones específicas durante un año (mayo de 2023 a abril de 2024). Las condiciones reales, como la temperatura, irradiancia y nubosidad, pueden variar significativamente, afectando la eficiencia de las celdas solares. Además, las celdas solares del experimento enfrentan pérdidas adicionales debido a sombras, acumulación de suciedad en las celdas solares y resistencias en los cables conductores, que no son tomadas por SAM.

**Figura 27**

*Gráfica de la energía generada por experimentación y simulación para el periodo enero a marzo*



**Tabla 7**

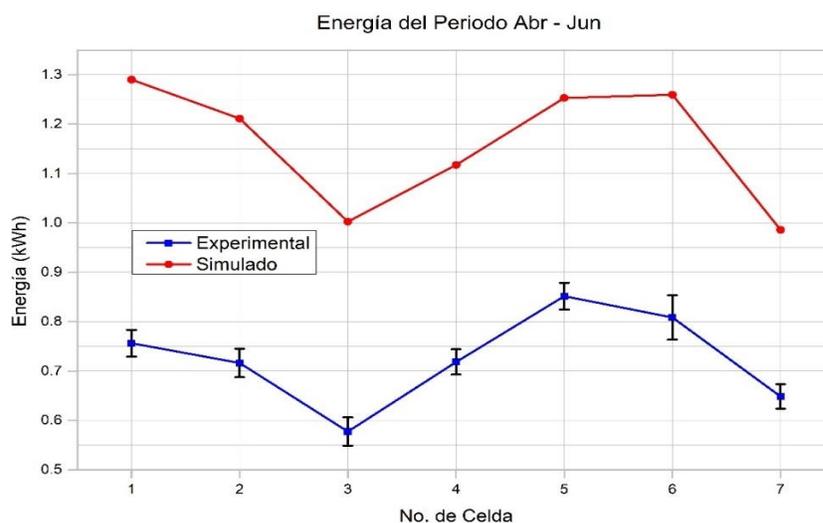
*Valores de energía experimental y simulados para el periodo enero a marzo*

Energía (kWh)		
Enero - Marzo		
No. Celda	Experimental	Simulado
1	0.401 ± 0.034	1.208
2	0.709 ± 0.027	1.343
3	0.601 ± 0.027	1.258
4	0.744 ± 0.031	1.395
5	0.424 ± 0.041	1.032
6	0.408 ± 0.041	1.019
7	0.712 ± 0.034	1.407

Como se puede observar en la figura 27 y la tabla 7, durante el periodo de enero a marzo, la celda No. 7 orientada al sur con una inclinación de 40°, presentó la mayor generación de energía en la simulación con un valor de 1.407 kWh. Este comportamiento concuerda con el experimental, una vez tomados en cuenta los errores acumulados, ya que para dicha celda se obtuvo una energía de  $0.712 \pm 0.034$  kWh. En contraste, la celda No. 6 orientada al este con una inclinación de 21.5°, presentó la menor generación de energía durante el mismo periodo, con un valor simulado de 1.019 kWh. Dicho resultado es congruente con el valor experimental una vez tomando en cuenta el error ( $0.408 \pm 0.041$  kWh).

**Figura 28**

*Gráfica de la energía generada por experimentación y simulación para el periodo abril a junio*



**Tabla 8**

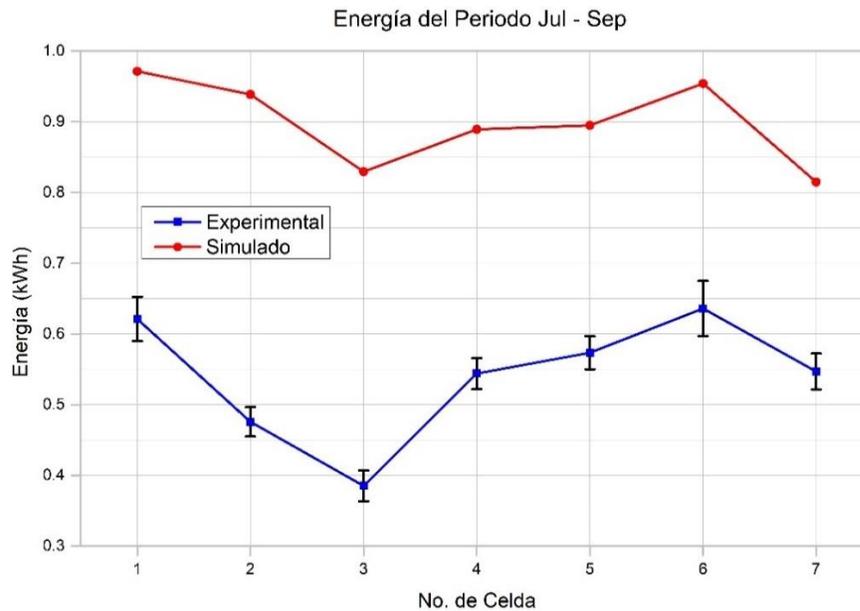
*Valores de energía experimental y simulados para el periodo abril a junio*

No. Celda	Energía (kWh)	
	Experimental	Simulado
1	0.756 ± 0.027	1.290
2	0.716 ± 0.029	1.211
3	0.577 ± 0.029	1.002
4	0.718 ± 0.026	1.117
5	0.851 ± 0.027	1.253
6	0.808 ± 0.045	1.259
7	0.648 ± 0.025	0.986

La figura 28 y la tabla 8 muestran los resultados de la energía experimental y simulada para el periodo de abril a junio. Como se observa, la celda No. 5 en el experimento, orientada al oeste con una inclinación de  $21.5^\circ$ , alcanzó el valor máximo de generación de energía, con un registro de  $0.851 \pm 0.027$  kWh. En paralelo, en la simulación, la celda No. 1 orientada al sur con una inclinación de  $10^\circ$  presentó el valor máximo de  $1.259$  kWh. Por otro lado, la celda No. 3 en el experimento orientada al sureste con una inclinación de  $45^\circ$  y la celda No. 7 en la simulación orientada al sur con una inclinación de  $40^\circ$  mostraron los menores niveles de generación de energía, con valores de  $0.577 \pm 0.029$  kWh y  $0.986$  kWh, respectivamente. La discrepancia entre los resultados de la simulación y el experimento respecto a qué celdas generan la mayor y menor cantidad de energía podría deberse a los datos empleados en SAM para este periodo, ya que toma el año típico meteorológico (TMY) como base para las simulaciones. De acuerdo con los datos proporcionados por la estación solar Tepic sede UAN de la red solarimétrica mexicana ubicada en el techo de la biblioteca magna de la Universidad Autónomas de Nayarit ( $21.49^\circ$ ,  $-104.89^\circ$ ), durante este periodo, los valores de irradiancia fueron superiores a los registrados en el TMY. Esta condición favoreció en una mayor producción de energía en las celdas solares con una inclinación cercana al ángulo perpendicular a los rayos solares, celdas 5 (oeste,  $21.5^\circ$ ) y 6 (este,  $21.5^\circ$ ) en el experimento. Sin embargo, al contener el TMY valores de irradiancia menores, en la simulación se obtiene una disminución en la generación de energía para estas celdas. Esta situación también influye para las celdas 3 (sureste,  $45^\circ$ ) y 7 (sur,  $40^\circ$ ) que son las que generan menor energía.

**Figura 29**

Gráfica de la energía generada por experimentación y simulación para el periodo julio a septiembre



**Tabla 9**

Valores de energía experimental y simulados para el periodo julio a septiembre

Energía (kWh) Julio - Septiembre		
No. Celda	Experimental	Simulado
1	0.621 ± 0.031	0.971
2	0.508 ± 0.021	0.939
3	0.451 ± 0.044	0.830
4	0.531 ± 0.022	0.889
5	0.551 ± 0.023	0.895
6	0.624 ± 0.039	0.954
7	0.547 ± 0.025	0.815

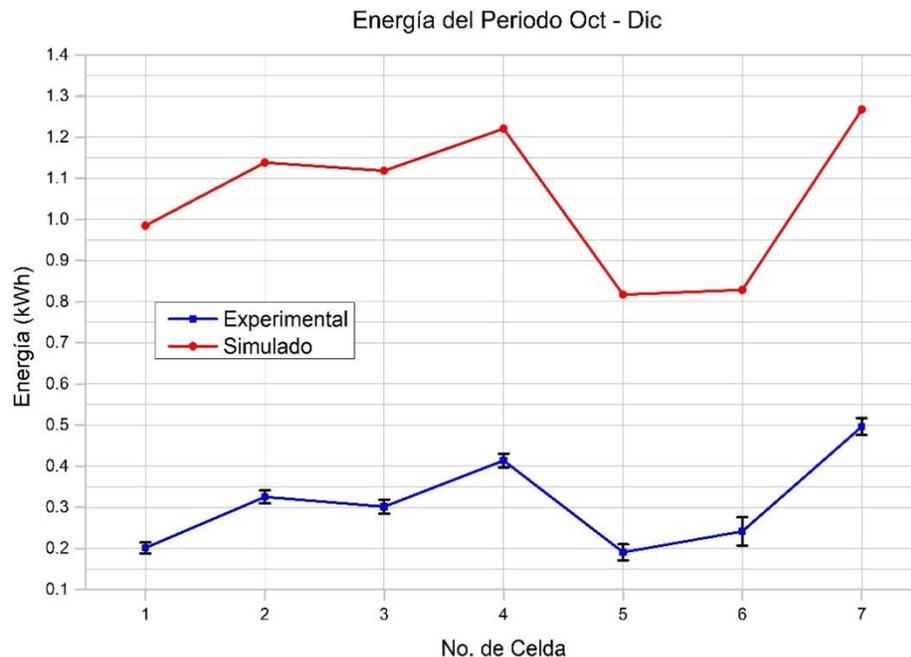
La figura 29 muestra los resultados presentados en la tabla 9, correspondientes a los valores obtenidos tanto por experimentación como por simulación durante el periodo de julio a septiembre. La celda No. 1, orientada al sur con una inclinación de 10°, destacó por generar la mayor cantidad de energía en la simulación, registrando un valor de 0.971 kWh. Este comportamiento es coherente al experimental al considerar los errores acumulados. Dicha celda alcanzó un valor de

0.621 ± 0.031 kWh de energía generada. Por otro lado, las celdas con la menor generación de energía tanto en la simulación como en la experimentación fueron: la celda No. 7, orientada al sur con una inclinación de 40°, que registró un valor simulado de 0.815 kWh, y la celda No. 3, orientada al sureste con una inclinación de 45°, que presentó un valor experimental de 0.451 ± 0.044 kWh.

La diferencia en la celda que genera la menor cantidad de energía entre el método simulado y el experimental en este periodo podría deberse a que los datos utilizados por SAM, muestran menores niveles de irradiancia en el segundo y tercer tercios del día, lo que origina que las celdas orientadas del sur al oeste tengan menores valores de generación de energía por simulación como la celda 7 (sur, 40°). Así mismo, los datos de irradiancia obtenidos de la estación solarimétrica UAN, indican que durante este periodo los menores valores de irradiancias se registran en el primer tercio del día, lo que propicia que sea la celda 3 (sureste, 45°) la que presente la menor generación de energía.

### Figura 30

Gráfica de la energía generada por experimentación y simulación para el periodo octubre a diciembre



**Tabla 10**

Valores de energía experimental y simulados para el periodo octubre a diciembre

Energía (kWh)		
Octubre - Diciembre		
No. Celda	Experimental	Simulado
1	0.202 ± 0.013	0.985
2	0.394 ± 0.015	1.138
3	0.302 ± 0.017	1.118
4	0.414 ± 0.017	1.221
5	0.179 ± 0.019	0.817
6	0.204 ± 0.034	0.829
7	0.496 ± 0.021	1.267

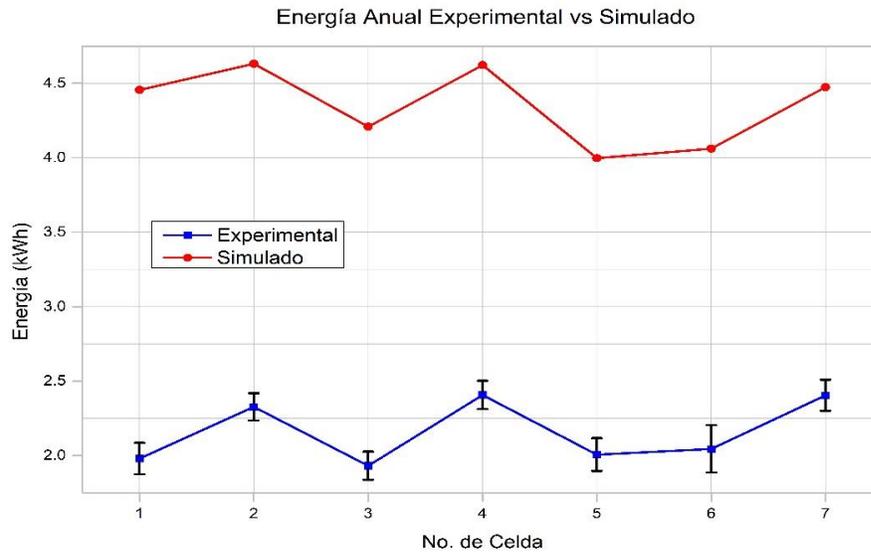
Como se puede observar en la figura 30 y la tabla 10, durante el periodo de octubre a diciembre, los valores de la energía generada por las celdas presentaron una correspondencia clara entre los resultados experimentales y simulados. La celda No. 7 orientada al sur con una inclinación de 40° mostró la mayor generación de energía en ambos casos, con un valor simulado de 1.267 kWh y un valor experimental de  $0.496 \pm 0.021$  kWh. De manera similar, la celda No. 5 orientada al oeste con una inclinación de 21.5°, registró la menor generación de energía, con un valor simulado de 0.817 kWh y un valor experimental de  $0.179 \pm 0.019$  kWh.

Si bien el análisis de datos de generación de energía tanto simulado como experimental se dividieron en periodos de tres meses para su estudio, el objetivo principal de la investigación es tomar los resultados de un año y, con ello, poder generar la tabla porcentual de pérdidas para una celda que se encuentra instalada en una posición fuera de la considerada como óptima anual.

Para evaluar la generación anual se sumó la energía diaria tanto para las celdas que integran el experimento como para la simulación, obteniendo los resultados que se ilustran en la gráfica de la figura 31, y se reportan en la tabla 11.

**Figura 31**

*Valores de energía experimental y simulados para un año*



**Tabla 11**

*Energía generada anual por experimentación y simulación para las siete posiciones del experimento*

No. Celda	Energía Anual (kWh)	
	Experimental	Simulado
1	1.980 ± 0.106	4.455
2	2.327 ± 0.092	4.631
3	1.931 ± 0.095	4.209
4	2.406 ± 0.095	4.622
5	2.006 ± 0.110	3.997
6	2.045 ± 0.159	4.061
7	2.404 ± 0.105	4.474

Como se puede observar en la tabla 11, además de la figura 31, la curva trazada con los valores de energía generados para cada una de las celdas es similar en

ambos casos (experimental y simulado). Así, la evaluación de la energía generada a lo largo del año sugiere que los patrones de generación de energía reflejan una concordancia entre ambos métodos.

Sin embargo, los valores simulados son mayores que los obtenidos experimentalmente. Uno de los factores que propician esta diferencia es que, para la simulación, la base de datos que SAM utiliza para sus cálculos, contiene valores climatológicos y de irradiancias del año meteorológico típico (TMY) actualizado al año 2022, base de datos que no toma en cuenta condiciones atípicas o muy puntuales.

Otro de los factores es la temperatura ambiente. De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional, el año 2023 presentó condiciones atípicas de temperatura.

El promedio de la temperatura media nacional en 2023 fue de 22.7 °C, 1.3 °C por arriba del promedio climatológico 1991-2020. Este año se sumó a la tendencia que se observa desde el 2005, donde cada año ha superado la normal climatológica de referencia, además de ser el año más cálido de acuerdo al registro histórico desde 1953. (Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2023)

Cuando la temperatura de una celda solar aumenta, la eficiencia de conversión de energía puede disminuir. Esto se debe a varios factores: aumento de la resistencia interna, reducción de la tensión de circuito abierto, aumento de la corriente de fuga, cambios en la estructura cristalina, etc.

Un factor más que propicia la diferencia entre los valores simulados y experimentales es la contaminación. La Reserva San Juan experimentó un incendio que consumió gran parte de ella. Este evento también generó una gran cantidad de humo que se extendió sobre toda la ciudad de Tepic y principalmente en las zonas aledañas a la reserva, afectando la calidad del aire y disminuyendo considerablemente la captación de radiación solar (14 de abril del 2023).

De igual forma, en el año 2024, la ciudad de Tepic experimentó dos nuevas contingencias ambientales. Una vez más, la Reserva San Juan se incendió (14 de abril del 2024) generando una nube densa de humo sobre la ciudad que se sumó a la contaminación generada por un incendio en el basurero municipal de “El Iztete” (20 de abril del 2024).

En el análisis de la energía acumulada a lo largo del año, la celda No. 2 se destaca al presentar la mayor generación de energía en la simulación con un valor de 4.631 kWh. Asimismo, al integrar toda la energía en el año de experimentación y considerando su error acumulado, dicha celda presenta también la mayor generación de energía experimental ( $2.327 \pm 0.092$  kWh). El resultado observado en la celda No. 2 que muestra la mayor generación de energía, coincide con la literatura (Gevorkian, 2018; Pareja, 2020) y lo utilizado en las prácticas del sector solar fotovoltaico, ya que dicha celda se encuentra en la posición considerada como óptima anual (con una orientación hacia el ecuador terrestre y, una inclinación igual a la latitud del sitio de instalación). Además, se puede notar que las celdas 4 (sur, 30°) y 7 (sur, 40°) muestran altos niveles de generación de energía, lo cual se atribuye a su orientación hacia el sur y a sus inclinaciones que se aproximan a la latitud de Tepic. Varios estudios, concluyen que la posición considerada como óptima para la instalación de paneles solares durante todo el año no siempre maximiza la generación de energía. En cambio, posiciones ligeramente diferentes a la considerada como óptima anual pueden resultar más eficientes en la producción de energía. Por ejemplo, Ghosh et al. (2010), en su investigación desarrollada en Daca, capital de Bangladés, concluyó que “para los colectores orientados al sur con una inclinación fija a lo largo del año, el ángulo de inclinación óptimo es ligeramente mayor (alrededor de 28°) en comparación con el ángulo de latitud (23,73) para Dhaka” (Ghosh, Bhowmik, & Hussain, 2010). Por su parte, Ben et al. (2021), calculó que la inclinación anual óptima para maximizar la generación de energía en Dhahran, Riyadh, Jeddah, Arar y Abha era de 27,3°, 26,0°, 22,7°, 32,7° y 20,1°, respectivamente, lo que revela que el ángulo de inclinación óptimo anual estimado se aproxima a la latitud de las ciudades analizadas en Arabia Saudita.

En contraste, en nuestro estudio, aunque la celda 1 también está orientada al sur, su inclinación de  $10^\circ$  al ser más próxima a la horizontal, provoca una menor generación de energía.

Por otro lado, la celda que mostró la menor generación de energía acumulada anual en las simulaciones fue la No. 5 (oeste,  $21.5^\circ$ ), con un valor de 3.997 kWh, el cual concuerda con lo observado en la experimentación, una vez ajustado por el error, dado que esta celda reportó una generación de  $2.006 \pm 0.110$  kWh. Adicionalmente, la celda 6 (este) le sigue con menor energía generada, con un valor de 4.061 kWh en las simulaciones y  $2.045 \pm 0.159$  kWh en la medición experimental, resultados que coinciden al considerar el error acumulado experimental. Por lo que se concluye que las celdas orientadas hacia el este y el oeste son las que presentan la menor generación de energía. Este hallazgo es predecible, dado que reciben radiación solar directa únicamente durante la mitad del día (en el este por la mañana y en el oeste por la tarde) ya que, durante el resto del día, las celdas quedan orientadas en dirección opuesta al sol.

Con el objetivo de cuantificar las variaciones en la generación de energía, debido a la modificación en la inclinación y orientación de las celdas con respecto a la configuración óptima anual (celda 2, orientación sur, inclinación  $21.5^\circ$ ), se calculó la diferencia porcentual de la generación de energía en relación con la celda 2. De este cálculo se obtuvo que la celda número 4 (sur,  $30^\circ$ ) en el experimento, presenta una pérdida de energía anual del 0.50% en comparación con la celda 2, mientras que en la simulación la pérdida anual fue de apenas el 0.19%. Esto representa la menor diferencia obtenida entre ambos métodos, resultado un valor del 0.31%. En contraste, la mayor variación se observó al comparar la celda número 1 (sur,  $10^\circ$ ) con la celda número 2. En este caso, la celda número 1 presentó una pérdida del 13.76% en el experimento, mientras que en la simulación la pérdida fue del 3.38%, lo que representa una diferencia del 9.95% entre ambos métodos.

Además, se calculó la desviación estándar restando los valores de la diferencia porcentual para el método simulado y experimental de cada celda respecto a la celda 2. Este valor fue del 5.35%, lo que representa la diferencia en la generación

de energía anual entre los valores obtenidos por simulación utilizando el programa SAM y los resultados experimentales.

#### 7.4 Obtención de la tabla de pérdidas porcentuales en la generación de energía por una inadecuada orientación de las celdas solares

Se llevaron a cabo un total de 130 simulaciones a través del software SAM para diversas posiciones de celdas solares, incluida la óptima anual, sur (180°), 21.5°, con el fin de obtener la generación de energía simulada. A partir de los resultados de energía obtenidos, se calculó la desviación con respecto a la posición óptima anual, determinando así el porcentaje de pérdida para cada una de las 130 posiciones. Estos datos de pérdida fueron agrupados y se presentan en forma de tabla, misma que se muestra en la figura 32.

Para hacer uso de esta tabla, basta con conocer las condiciones de instalación de una celda solar, esto es: ubicar el correspondiente ángulo azimutal en el eje horizontal y el ángulo de inclinación en el eje vertical, trazando una línea en ambos sentidos, se puede encontrar la intersección que representa el valor porcentual de pérdida al colocar la celda en esa posición diferente a la óptima anual. Esta metodología proporciona una forma de evaluar el impacto de la posición de las celdas solares en la generación de energía.

**Figura 32**

*Tabla de pérdidas de energía de una celda instalada con una orientación distinta a la óptima anual para la ciudad de Tepic*

		DESVIACIÓN RESPECTO A LA ORIENTACIÓN ÓPTIMA ANUAL													Pérdida (%)		
		Azimet Este	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180° Sur	195°	210°	225°	240°	255°	270° Oeste	Por encima de	Hasta e incluido
Inclinación	0°	9.85%	9.85%	9.85%	9.85%	9.85%	9.85%	9.85%	9.85%	9.85%	9.85%	9.85%	9.85%	9.85%	9.85%	9.85%	9.85%
	10°	10.06%	8.41%	6.87%	5.55%	4.55%	3.96%	3.81%	4.12%	4.86%	5.99%	7.42%	9.02%	10.69%			
	21.5°	12.31%	8.94%	5.82%	3.15%	1.33%	0.34%	0.00%	0.53%	1.99%	4.15%	7.00%	10.27%	13.70%			
	30°	15.17%	10.72%	6.79%	3.79%	1.44%	0.38%	0.19%	0.74%	2.42%	4.94%	8.28%	12.44%	16.98%			
	40°	19.58%	14.36%	9.86%	6.74%	4.71%	3.45%	3.39%	3.91%	5.66%	8.02%	11.77%	16.46%	21.81%			
	50°	25.09%	19.40%	15.04%	12.06%	10.29%	9.21%	9.16%	9.69%	11.17%	13.73%	17.04%	21.81%	27.54%			
	60°	31.51%	26.09%	22.00%	19.36%	18.01%	17.42%	17.53%	17.90%	18.95%	20.94%	24.11%	28.36%	33.94%			
	70°	38.56%	33.78%	30.19%	28.20%	27.58%	27.65%	28.06%	28.16%	28.56%	29.70%	31.98%	35.94%	40.79%			
	80°	45.60%	41.52%	38.85%	37.77%	38.03%	38.86%	39.62%	39.39%	38.99%	39.13%	40.50%	43.40%	47.55%			
	90°	51.98%	49.03%	47.34%	47.18%	48.19%	49.59%	50.37%	50.04%	49.03%	48.35%	48.78%	50.58%	53.65%			

## 8 Conclusiones

En el presente estudio se desarrolló e implementó un sistema de adquisición de datos diseñado para registrar las variables necesarias para calcular la generación de energía en celdas solares instaladas en siete posiciones en Tepic durante un año, lo que permitió obtener resultados que evidencian las variaciones en la producción de energía cuando las celdas no están en la posición considerada como óptima anual. Al estar montadas en una misma estructura y localización, las variables como la radiación solar y las condiciones climáticas se mantuvieron constantes para todas las celdas lo que asegura que las diferencias en la generación de energía observadas entre las celdas del experimento se deben únicamente a su posición.

A partir de los datos obtenidos en el experimento y su posterior análisis, se observó que las celdas solares instaladas en posiciones distintas a la óptima anual (celda 2, sur,  $21.5^\circ$ ) presentan una disminución en la generación de energía, valores que se muestran en la tabla generada. Estos resultados confirman que la orientación y la inclinación son factores determinantes para el rendimiento energético de una celda solar, subrayando el papel crucial que juega la posición para la generación de energía de una celda.

Adicionalmente, se utilizó el programa System Advisor Model (SAM) para realizar simulaciones bajo las mismas condiciones del experimento, lo que permitió evaluar el desempeño de las celdas solares en múltiples configuraciones de ángulo azimutal y ángulo de inclinación, específicamente para la ubicación en la que se desarrolló el estudio. Esto incluyó distintas posiciones de celda solar, incluyendo las del experimento.

Además de lo mencionado anteriormente, se llevó a cabo un análisis comparativo entre los datos obtenidos por simulación y experimentación. Para este análisis, el estudio se dividió en cinco periodos, correspondientes a los meses más representativos de las estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno), además de un quinto periodo que abarcó el análisis anual. La comparación entre

los resultados experimentales y los de simulación mostró una buena correlación ya que la diferencia entre las desviaciones porcentuales generadas por simulación y experimentación fue de tan solo el 5.35%, lo que respalda la viabilidad de SAM como herramienta de simulación, considerando las condiciones específicas bajo las cuales se empleó.

Con los resultados obtenidos de la comparación entre los métodos experimental y simulado, y tras verificar la viabilidad del programa SAM como herramienta de simulación, se simuló la generación de energía para 130 posiciones, incluida la óptima anual. A partir de esta información, se construyó una tabla que ofrece un acceso fácil y rápido a los valores porcentuales de la disminución en la generación de energía que experimentaría una celda solar instalada en la ciudad de Tepic, cuando no se encuentra en la posición óptima anual. Esta tabla puede ser una herramienta esencial para los instaladores de tecnología solar fotovoltaica en la región, ya que, mediante un proceso sencillo, les permitirá identificar rápidamente la reducción en la generación de energía en aplicaciones solares específicas, lo que les ayudará a compensar estas pérdidas para optimizar sus instalaciones. Por otro lado, el estudio integral realizado puede incentivar un uso responsable de la tecnología solar fotovoltaica. Aunque esta tecnología representa una excelente alternativa para la generación de energía limpia, su implementación desmedida y sin un adecuado control, debido a la falta de conocimiento sobre las pérdidas asociadas a orientaciones distintas de la óptima, podría generar problemas de contaminación en el futuro.

## 9 Referencias bibliográficas

- Ambrojo, J. (2015). Células solares eficientes para días nublados. *Técnica industrial*, 310, 10. Recuperado el 14 de junio de 2022, de Técnica Industrial: <https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/100/4206/a4206.pdf>
- Arancibia Bulnes, C., & Best y Brown, R. (abril - junio de 2010). *Revista Ciencia, Academia Mexicana de Ciencias*. Recuperado el 10 de junio de 2022, de Revista Ciencia, Academia Mexicana de Ciencias.: [https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61\\_2/PDF/EnergiaSol.pdf](https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/EnergiaSol.pdf)
- Arias, F. G. (2012). *El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica* (6 ed.). Caracas, Venezuela : Episteme. Recuperado el 15 de junio de 2022, de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=W5n0BgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA11&dq=investigacion+explicativa&ots=kYnMcnrvh2&sig=kgj87Ur0naJuuJIID8vaQWW7Zlg#v=onepage&q&f=false>
- Asociación Española Ingenieros de Telecomunicación. (s.f.). *Foro Histórico de las Telecomunicaciones*. Recuperado el 14 de junio de 2022, de Foro Histórico de las Telecomunicaciones: <https://forohistorico.coit.es/index.php/personajes/personajes-internacionales/item/ohl-russell>
- Astronomía, C. d. (20 de noviembre de 1992). *SEA Astronomia*. Recuperado el 10 de junio de 2022, de SEA Astronomia.
- AulaFacil. (2000). *AulaFacil*. Recuperado el 16 de junio de 2022, de AulaFacil: <https://www.aulafacil.com/cursos/estadisticas/gratis/introduccion-a-la-estadistica-descriptiva-l11213#:~:text=La%20estad%C3%ADstica%20descriptiva%20es%20una,el%20comportamiento%20de%20estas%20variables.>
- Aziz Ali, F. (2018). Optimum Tilt Angle of Photovoltaic Panels for Some Iraq Cities. *Journal of Babylon University-Engineering Sciences*, 26(1).
- BEN MANSOUR, R., MATEEN KHAN, M. A., ABDULAZIZ ALSULAIMAN, F., & BEN MANSOUR, R. (2021). Optimizing the Solar PV Tilt Angle to Maximize the Power Output: A Case Study for Saudi Arabia. *IEEEAcces*, 15914-15928.
- Benford, F., & Bock, J. E. (1938). *A Time Analysis of Sunshine*.
- Buzra, U., Mitrushi, D., Serdari, E., Halili, D., & Muda, V. (2022). Fixed and adjusted optimal tilt angle of solar panels in three cities in Albania. *Jurnal of Energy Systems*, 6(2), 153-164. doi:10.30521/jes.952260
- Carmona Rubio, G., & Díaz Corcobado, T. (12 de 3 de 2018). *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. España: McGraw-Hill. Obtenido de McGraw-Hill: <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>

- Cassini, A., & Levinas, M. (2008). La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico: un análisis histórico-epistemológico. *Revista latinoamericana de filosofía*, 34(1), 5-38. Recuperado el 14 de junio de 2022, de [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1852-73532008000100001&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1852-73532008000100001&script=sci_arttext&tlng=en)
- Confederación de Consumidores y Usuarios. (s.f.). *La Energía que nos Une*. Recuperado el 14 de junio de 2022, de La Energía que nos Une: <https://cecu.es/laenergiaquenosune/index.php/energia-solar-fotovoltaica>
- Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. (2023). *Reporte Anual del Clima en México 2023*. CONAGUA, Ciudad de México. Obtenido de [smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2023.pdf](http://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2023.pdf)
- Díaz Narváez, V. P. (may/agos de 2014). El concepto de ciencia como sistema, el positivismo, neopositivismo y las “investigaciones cuantitativas y cualitativas”. *Revista Salud Uninorte*, 30(2), 227-244. Recuperado el 16 de junio de 2022, de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-55522014000200014](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-55522014000200014)
- Duffe, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*.
- Fabri, M. (1998). *Instituciones Humanas*. Recuperado el 16 de junio de 2022, de Instituciones Humanas: <http://institutocienciashumanas.com/wp-content/uploads/2020/03/Las-t%C3%A9cnicas-de-investigaci%C3%B3n.pdf>
- Ferrer Vallin, M., Santos Fuentefria, A., & Llamo Laborí, H. S. (enero de 2018). Análisis del factor de carga de un sistema eléctrico aislado con fuentes renovables de energía. *Ingeniería Energética*, 39(1), 13-20.
- Foro Histórico de las Telecomunicaciones. (s.f.). *Foro Histórico de las Telecomunicaciones*. Recuperado el 14 de junio de 2022, de Foro Histórico de las Telecomunicaciones: <https://forohistorico.coit.es/index.php/personajes/personajes-internacionales/item/becquerel-alexandre-edmond>
- Gevorkian, P. (2018). *Solar power in building design: the engineer's complete design resource*. Los Angeles, California, Estados Unidos de America: Mc Graw Hill. doi:10.1036/0071485635
- Ghosh, H., Bhowmik, N., & Hussain, M. (enero de 2010). Determining seasonal optimum tilt angles, solar radiations on variously oriented,. *Renewable Energy*, 35(6), 1292-1297.
- Gueymard, C. A. (2018). A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations. *Solar Energy*, 2(9), 168.
- Jiménez, J. R. (7 de noviembre de 2017). *iluminet.com*. Obtenido de [iluminet.com](https://iluminet.com/modulos-fotovoltaicos-hoja-datos-solar/#:~:text=La%20primera%2C%20llamada%20Condiciones%20de,y%20permite%20evaluar%20los%20diferentes): <https://iluminet.com/modulos-fotovoltaicos-hoja-datos-solar/#:~:text=La%20primera%2C%20llamada%20Condiciones%20de,y%20permite%20evaluar%20los%20diferentes>

- Kalogirou, S. A. (2023). *Solar Energy Engineering-Processes and Systems*. Elsevier.
- Mechleri, E. D., Zervas, P., Haralambos, S., Palyvos, J. A., & Markatos, N. (2010). Determination of the optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays. *Renewable energy*, 35(11), 2468-2475. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.006>
- Milosavljević, D. D., Kevkić, T. S., & Jovanović, S. J. (2022). Review and validation of photovoltaic solar simulation tools/software based on case study. *Open Physics*, 20(1), 431-451. Recuperado el Enero de 2024
- National Renewable Energy Laboratory. (s.f.). *System Advisor Model - SAM*. Recuperado el Mayo de 2023, de System Advisor Model - SAM.: <https://sam.nrel.gov/>
- Nfaoui, N., & El-Hami, K. (2020). Optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays: case of Settat city in Morocco. *International Journal of Ambient Energy*, 41(2), 214-223. doi:10.1080/01430750.2018.1451375
- Noguera-Salas, O., Pinto-García, R., & Villarreal-Padilla, J. (2018). La eficiencia de los nuevos materiales fotosensibles usados en la fabricación de paneles solares. *Iteckne*, 15(1), 7-16. Recuperado el 15 de junio de 2022, de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1692-17982018000100007](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-17982018000100007)
- Pareja Aparicio, M. (2020). *Energía Solar Fotovoltaica, Cálculo de una Instalación Asilada* (3ra ed.). Marcombo.
- Pep Puig, M. J. (s.f.). Energía Solar Fotovoltaica. (H. Comunicación, Ed.) *Energías Renovables*. Recuperado el 14 de junio de 2022, de <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2007/09/Cuadernos-energias-renovables-para-todos-solar-fotovoltaica-fenercom.pdf>
- Pérez Hernández, M. (2022). Estimación de incertidumbres. Guía GUM. *e-Medida Revista Española de Metrología*, 114-130.
- Sánchez Juárez, A., Martínez Escobar, D., Santos Magdaleno, R. d., Ortega Cruz, J., & Sánchez Pérez, P. A. (2017). *Aplicaciones Fotovoltaicas de la Energía Solar en los Sectores Residencial, Servicio e Industria*. Temixco, Morelos: IER.
- Taylor, J. R. (Julio de 1997). *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. Sausalito, California, Estados Unidos: University Science Books. Recuperado el agosto de 2024, de Universidad de Buenos Aires.
- Vargas, T., & Abrahamse, A. (2014). Trazador de curvas IV de código abierto para monitoreo de rendimiento de paneles fotovoltaicos en Bolivia. *Investigación & Desarrollo Universidad Pontificia Bolivariana*, 1(14), 100-116.
- Zang, H., Guo, M., Wei, Z., & Sun, G. (2016). Determination of the Optimal Tilt Angle of Solar Collectors for Different Climates of China. *MDPI*.