

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO
COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE ENERGÍA

**Estudio y monitoreo comparativo de un
piranómetro comercial con un medidor
prototipo de radiación solar de CdTe**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE LICENCIATURA EN:

**INGENIERÍA EN
SISTEMAS ENERGÉTICOS**

P R E S E N T A

LESLIE AMÉRICA TORRES BAUTISTA

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Rogelio Mendoza Pérez

Profesor-Investigador de la Academia de Matemáticas, UACM

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera, UACM

Profesor-Investigador del Programa de Energía, UACM

Ciudad de México, junio de 2021

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

Integración del jurado:

Presidente: Dr. José Joaquín Lizardi Del Ángel, UACM
Secretario: Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera, UACM
Vocal: Dr. Rogelio Mendoza Pérez, UACM
1^{er}. Suplente: Dr. José Alfredo Del Oso Acevedo, UACM
2^{do}. Suplente: Dr. Léster Augusto Alfonzo Díaz, UACM

Lugar donde se realizó la carrera:

PLANTEL SAN LORENZO TEZONCO, UACM.

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Rogelio Mendoza Pérez
Universidad Autónoma de la Ciudad de México

Resumen

En el presente trabajo, en una zona determinada de la Ciudad de México, se realizó el monitoreo del recurso solar, durante el proceso se estableció la comparación entre un piranómetro Delta OHM y prototipos de medición de radiación solar basados en celdas solares de CdTe. Los prototipos implementados presentaron una configuración en superestrato de Vidrio-SnO₂/n-CdS/p-CdTe+CdCl₂-TT/Cu-Mo, estos fueron aislados e interconectados, como estrategia se realizó una interconexión eléctrica en serie y otra en paralelo, identificándose como CSserie y CSparalelo, asimismo se realizó el encapsulado de CSserie, mientras que intencionalmente CSparalelo no se sometió a este proceso, sin embargo, se le proporcionó una elevación de 6 cm y un ángulo de inclinación de 18.2°, cercano a la latitud de la Ciudad de México.

Para ambos prototipos, por medio del Simulador Solar certificado Oriel Clase AAA, se obtuvieron las curvas I-V con niveles de irradiancia solar de 300 a 1000 W/m², los valores restantes fueron interpolados, estableciendo una relación entre los datos de I_c (corriente de carga), V_{oc} (voltaje a circuito abierto) y la I_r (irradiancia solar) en un rango de 0 a 1000 W/m², parámetros que sirvieron de referencia cuando se realizó el montaje de los prototipos al exterior, para la asociación de I_c y V_{oc} medidos en campo a los valores detectados por el Simulador Solar. El montaje del piranómetro, CSserie y CSparalelo, se realizó sobre una base sólida, estable y horizontal, lejos de cualquier elemento que pudiese proyectar sombra, sin embargo, debido a las afectaciones directas que se observaron en I_c y V_{oc}, se determinó para cada uno, un factor de corrección que permitiera obtener los resultados ideales de detección con valores aplicados de FC_{V_{oc}}= -27 mV/°C y FC_{I_c}=1.5; coeficiente de temperatura y factor de resistencia, respectivamente. Los promedios de la irradiación solar detectados con CSserie y CSparalelo fueron de 6.09 y 4.00 kW-h/m², con un margen de error de 6.88 y 38.84%, respecto al valor detectado por el piranómetro. El prototipo CSparalelo mostró un margen de error considerable y su falta de encapsulado no permitió terminar su estudio; mientras que, el prototipo CSserie encapsulado obtuvo un margen de error mínimo y fue con el que se finalizó el estudio comparativo de medición del recurso solar. Por último, considerando los valores de la irradiación solar promedio detectados únicamente por el piranómetro y CSserie, se concluye que, para el mes de marzo en la zona de monitoreo, se alcanzó un nivel de irradiación solar entre 6 a 6.5 kW-h/m².

Dedicatorias

A mi padre, Andrés Torres Simón:

A quien admiro, respeto y amo inmensamente. Papá, eres un ser lleno de luz, eres mi mayor motivación y mi ejemplo a seguir. Gracias por creer en mí, por amarme incondicionalmente, por apoyarme, guiarme y cuidarme en todos los trayectos de mi vida, de ti aprendí que a base de esfuerzo y dedicación se pueden alcanzar grandes sueños y hoy alcanzamos uno, un logro tan significativo que te dedico con el corazón y con un profundo reconocimiento, porque gracias a ti, fue posible.

A mi madre, Rosa Elia Bautista Ramírez:

A quien me dio la vida y me ha amado sin recibir nada a cambio, a quien me ha acompañado y ha estado presente en todos los momentos de mi vida. Mamá, gracias por amarme y cuidarme en mi camino, gracias por enseñarme la importancia de la sinceridad y la humildad, que hasta el día de hoy me identifican como la persona que soy. Con amor y de todo corazón, mereces este logro tan especial, porque no hay duda de que, sin ti, no hubiese sido alcanzado.

A mi hermano Alan Junior Torres Bautista:

Te dedico este presente con mucho amor y te agradezco con el corazón, por formar parte en cualquier instante de mi camino personal y profesional. Recuerda que, ante cualquier suceso bueno o malo en nuestras vidas, siempre serás el hermano pequeño al que cuidaré y amaré, sin importar nada.

A mis tíos, Rafael Torres Simón y Edgar Lima Pérez:

Sin ustedes este paso tan importante en mi vida no sería posible, gracias por su apoyo y por confiar en mí. Sin duda desempeñaron un papel muy importante durante mi carrera universitaria, además me brindaron lo más valioso, un hogar y una segunda familia.

A la Familia Mayor Bautista:

A Cecilia Bautista, a Javier Mayor que me observa desde el cielo, a mis primos Irving, Beatriz y Olaf, quienes en todo momento han estado y confiado firmemente en mí, gracias por el amor, el apoyo y la confianza.

A las Familias Torres Simón y Bautista Ramírez:

A cada uno de los que confiaron y creyeron en mí, a los que me ofrecieron su apoyo, a los que me brindaron palabras de aliento y a los que me impulsaron a ser mejor persona.

Agradecimientos

Al *Dr. Rogelio Mendoza Pérez*, por compartir sus conocimientos y por brindarme su apoyo incondicional antes y durante la realización de este proyecto de tesis. Agradezco infinitamente su paciencia y el empeño que al igual que yo, ofrecimos a este tema de investigación. Sin duda, usted y su familia fueron parte importante para la culminación de este trabajo, gracias por creer en mí, por su amistad y su confianza.

Al *Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera*, por aceptar formar parte de este proyecto de tesis, agradezco su apoyo y sus sabios consejos que han resultado de gran ayuda para el desarrollo de esta investigación.

A la *Coordinación de Ciencia y Tecnología y a las autoridades del plantel San Lorenzo Tezonco* de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, por aprobar el préstamo temporal de los equipos fundamentales para la obtención de los resultados de este trabajo.

Al *profesor Rafael Torres Simón*, por estar al pendiente de mi trayecto universitario, por sus consejos, por compartir sus conocimientos y por brindarme su apoyo en todo momento. Usted será siempre mi ejemplo a seguir.

Al *profesor Medina Manuel Fernández Villanueva*, por su apoyo incondicional, por desde un inicio ser parte de mi formación como estudiante, gracias por compartir todos sus conocimientos y experiencias académicas.

A mis *compañeros y amigos* de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, en especial a Jeanette y Adrián, por su apoyo brindado durante la carrera y por su valiosa amistad. Gracias por todas las experiencias que compartimos juntos.

Al *Laboratorio de Ciencias y Tecnología Sustentable (LACyTES)*, por abrirme las puertas para llevar a cabo el desarrollo central de este tema de investigación. A todos los estudiantes y profesores que forman parte de este gran equipo, agradezco su amistad incondicional y su apoyo.

Al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*, por el apoyo brindado a través del proyecto de investigación No. 263488 “Diseño e Instalación de un laboratorio de pruebas y certificación para colectores solares destinados al calentamiento de agua” del fondo sectorial CONACyT-SENER.

Al *Programa de Becas* de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, por el apoyo otorgado para la impresión y empastado de tesis.

A la convocatoria interna UACM proyectos de investigación del Colegio de Ciencia y Tecnología (CCyT) – 2019.

Índice

Resumen	III
Dedicatorias	IV
Agradecimientos	V
Índice de Figuras	VIII
Índice de Tablas	X

Introducción	1
Objetivo general	4
Objetivos particulares	4

CAPÍTULO 1. GEOMETRÍA Y RECURSO SOLAR

1.1. Movimientos de la Tierra	5
1.2. Ángulo de declinación solar	6
1.3. Ángulo horario	7
1.4. Movimiento aparente del Sol en el cielo	8
1.5. Espectro solar	9
1.6. Tipos de radiación solar	11
1.7. La radiación solar mundial y en México	12

CAPÍTULO 2. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

2.1. Antecedentes de instrumentos de medición de energía solar	14
2.2. Piranómetros	15
2.2.1. Principio de funcionamiento	16
2.2.2. Clasificación	16
2.2.3. Elementos principales	17
2.2.4. Calibración	18
2.2.5. Instalación y montaje	20
2.2.6. Mantenimiento	20

CAPÍTULO 3. CELDAS SOLARES

3.1. Principio de funcionamiento	21
3.2. Circuito eléctrico equivalente de una celda solar	22

3.3. Clasificación de celdas solares	23
3.4. Procesamiento de celdas solares de telurio de cadmio (CdTe)	24
3.5. Parámetros eléctricos de una celda solar	26
3.5.1. Curva I-V	27
3.5.2. Corriente de corto circuito (Isc).....	28
3.5.3. Voltaje a circuito abierto (Voc)	28
3.5.4. Potencia máxima (Pmax).....	28
3.5.5. Factor de llenado (FF)	29
3.5.6. Eficiencia de conversión (η).....	29
3.6. Influencia de la radiación solar y la temperatura en los parámetros fotovoltaicos de una celda solar	30

CAPÍTULO 4. DESARROLLO Y MONITOREO DE LA RADIACIÓN SOLAR

4.1. Metodología.....	31
4.2. Estructura de los prototipos de medición de radiación solar con celdas solares de CdTe	32
4.3. Principio de funcionamiento de prototipos de medición de radiación solar de CdTe... 38	
4.3.1. Medición de curvas I-V variando los niveles de la radiación solar (Ir)	38
4.3.2. Tablas y gráficas de la Ir con los prototipos de medición de CdTe.....	42
4.4. Monitoreo de radiación solar.....	45
4.4.1. Prueba comparativa de piranómetros y celda de calibración del Simulador Solar certificado Oriel Clase AAA.....	45
4.4.2. Piranómetro comercial Delta OHM.....	47
4.4.3. Medición de la radiación solar con piranómetro Delta OHM	48
4.4.4. Medición de la radiación solar con prototipos de medición de CdTe	57

RESULTADOS	67
-------------------------	----

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN	70
---------------------------------------	----

REFERENCIAS	72
--------------------------	----

Índice de Figuras

Figura 1.1. Emisiones de GEI por sector. Fuente: The World Resources Institute, 2020.....	2
Figura 1.2. Producción total de energía primaria por combustible. Fuente: IEA, 2020.....	3
Figura 1.3. a) Eje de rotación respecto al plano ecuatorial, b) Movimientos de la Tierra respecto al Sol. Fuente: Elaboración propia.	5
Figura 1.4. Variación anual de la declinación solar. Fuente: Duffie & Beckman, 2013.....	6
Figura 1.5. Variación anual de la Ecuación del tiempo. Fuente: Duffie & Beckman, 2013..	7
Figura 1.6. Geometría solar básica de acuerdo al ángulo de incidencia de los rayos del Sol. Fuente: Polo et al., 2019.	8
Figura 1.7. Irradiancia espectral a diferentes longitudes de onda. Fuente: Dornelles, 2011.	10
.....	12
Figura 1.8. Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre. Fuente: UPME, 2005.	12
.....	12
Figura 1.9. Mapa de la irradiación global horizontal a nivel mundial y nacional. Fuente: Global Solar Atlas & NREL.....	13
Figura 2.1. Partes de un piranómetro. Fuente: Kipp & Zonen, 2010.	18
Figura 3.1. Efecto fotovoltaico en una celda solar. Fuente: Elaboración propia.....	21
Figura 3.2. Circuito eléctrico equivalente. Fuente: Elaboración propia.	22
Figura 3.3. Configuración en a) supestrato y b) substrato de una celda solar de CdTe. Fuente: Elaboración propia.....	25
Figura 3.4. Curva I-V de una celda solar. Fuente: Ramos et al., 2013.....	28
Figura 3.5. Comportamiento de curvas I-V bajo distintas condiciones de a) radiación solar y b) temperatura. Fuente: Willians, 2012.	30
Figura 4.1. Procedimiento para el monitoreo de la radiación solar. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 4.2. Procesamiento de celdas solares de CdTe. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 4.3. Transmitancia de ZnO+CdS de CSserie y CSparalelo.....	34

Figura 4.4. Aislamiento e interconexión eléctrica de a) CSserie y b) CSparalelo. Fuente: Reyes, 2021.	36
Figura 4.5. a) CSserie encapsulada y b) CSparalelo con elevación, ángulo de inclinación y sin encapsulado.....	37
Figura 4.6. Curvas I-V de a) CSserie y b) CSparalelo a diferentes niveles de la Ir.	39
Figura 4.7. Comparación de parámetros I_c y V_{oc} en relación a los niveles de la Ir, a) CSserie y b) CSparalelo.	43
Figura 4.8. Prueba comparativa entre celda de calibración de Simulador Solar certificado Oriel Clase AAA y piranómetros marca EKO y Delta OHM.	46
Figura 4.9. Piranómetro Delta OHM LP PYRA 02.....	47
Figura 4.10. Montaje de piranómetro Delta OHM en la zona de estudio.	49
Figura 4.11. Mediciones de la Ir cada a) 30 segundos, b) 15 minutos y c) 1 hora con piranómetro Delta OHM.....	51
Figura 4.12. Curvas de la irradiancia solar (W/m^2) y promedio semanal de la irradiación solar ($kW-h/m^2$) con piranómetro Delta OHM.....	54
Figura 4.13. Montaje de prototipos de medición de CdTe, en conjunto con piranómetro Delta OHM.....	57
Figura 4.14. Prueba de medición de variables I_c y V_{oc} con multímetro Fluke 189.	58
Figura 4.15. Curva típica de la Ir (mW/cm^2), T_{amb} ($^{\circ}C$) y T_{oc} ($^{\circ}C$).	59
Figura 4.16. Curvas de la irradiancia solar (W/m^2) y promedio semanal de la irradiación solar ($kW-h/m^2$) con CSserie.....	62
Figura 4.17. a) Circuito eléctrico equivalente con R_L y b) conexión de R_L a CSparalelo....	63
Figura 4.18. Reducción del circuito eléctrico a) resistencias en paralelo y b) R_T	64
Figura 4.19. Curvas de la irradiancia solar (W/m^2) y promedio semanal de la irradiación solar ($kW-h/m^2$) con CSparalelo.	66
Figura 4.20. Curvas de la Ir detectados por el piranómetro, CSserie y CSparalelo.	68
Figura 4.21. Irradiación solar por día, detectado con el piranómetro Delta OHM, CSserie y CSparalelo.	69

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Clasificación de piranómetros.	17
Tabla 4.1. Parámetros de depósito de ZnO y CdS.....	33
Tabla 4.2. Parámetros de depósito de CdTe.	34
Tabla 4.3. Parámetros de depósito de CdCl ₂	35
Tabla 4.4. Parámetros de depósito de Cu y Mo.....	35
Tabla 4.5. Valores de I _c y V _{oc} a diferentes niveles de la I _r	40
Tabla 4.6. Valores de I _c y V _{oc} , en referencia a los niveles de la I _r	43
Tabla 4.7. Especificaciones técnicas del piranómetro Delta OHM LP PYRA 02.....	48
Tabla 4.8. Distribución semanal de medición del recurso solar.	52

Introducción

El ser humano a través del tiempo ha desarrollado diferentes estrategias que le han permitido su evolución en el planeta Tierra. El aprovechamiento de los recursos naturales, representa un acontecimiento importante en la historia de la humanidad, debido a que desde su exploración y manipulación fue posible emprender un gran avance científico y tecnológico, que hasta el día de hoy resultan significativos para la realización de actividades cotidianas.

La generación de energía ha sido parte fundamental para el desarrollo a nivel mundial, en la mayoría de sus procesos de obtención existe una gran dependencia de combustibles fósiles como el crudo, gas natural, carbón y sus derivados; estos se identifican como recursos finitos que generan daños irreversibles al ambiente debido a la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), como por ejemplo: CO₂, CO, NO_x, SO_x, SO₂. Aunque algunas de ellas pueden degradarse en la atmósfera, deponerse en tierra o en los océanos o integrarse en los ciclos biogeoquímicos, sus emisiones crecientes han sido la causa de algunos de los problemas ambientales más importantes que enfrentamos en la actualidad (SEMARNAT, 2016).

Las emisiones de GEI son procedentes de los sectores de los que actualmente dependen las naciones para su desarrollo económico, durante el año 2016 acorde con los reportes publicados por The World Resources Institute, el transporte y las industrias para la generación de electricidad y calor representaron el 73.2% del total de emisiones de gases de efecto invernadero, seguido de la agricultura (18.4%), la industria química y del cemento (5.2%) y los residuos (3.2%), ver Figura 1.1.

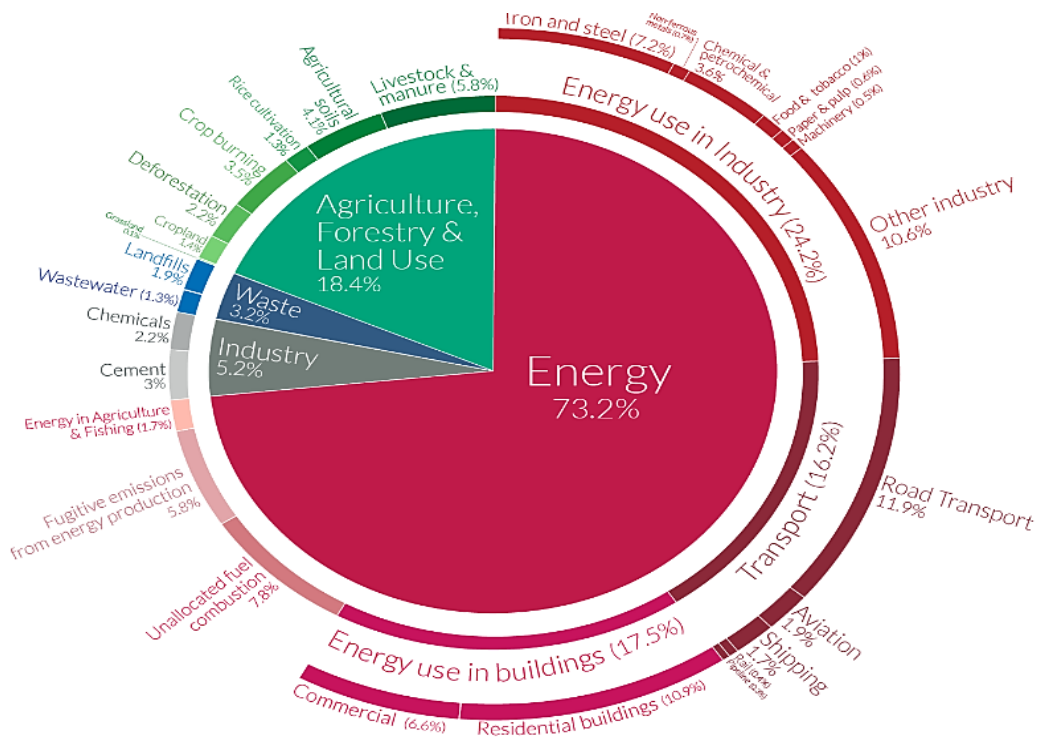


Figura 1.1. Emisiones de GEI por sector. Fuente: The World Resources Institute, 2020.

En relación a lo anterior y como parte de la solución a esta problemática mundial, el sector energético ha iniciado una nueva transición hacia un modelo sustentable para la generación de energía a través del aprovechamiento de energías alternativas que utilicen fuentes naturales (infinitos a escala humana) como el Sol, el viento, el agua y el hidrógeno; en conjunto con el estudio y la fabricación de nuevas tecnologías que sean rentables, que permitan disminuir el impacto al medio ambiente, reducir los costos de producción y garantizar el acceso de energía a futuro. Conjuntamente con el establecimiento de acuerdos internacionales, como el Protocolo de Kioto (en vigor desde 2005) y el Acuerdo de París (2016), como parte de las estrategias para combatir el cambio climático y promover el uso de energías renovables.

Actualmente las formas de producción de energía siguen siendo en general transitorios, como se observa en la Figura 1.2 con base al reporte estadístico de la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), durante el 2018 la proporción de producción mundial de energía primaria, se mantuvo liderada por los petrolíferos con una aportación del 31%, mientras que el resto le correspondió a renovables y nuclear. Además, en el mismo periodo el consumo final de electricidad total mundial fue de 22 315 TWh, un 4.0% más que el 2017 y en donde el consumo mayor fue reflejado por el sector económico industrial con el 29.2%, seguido del sector transporte con 28.8% (Secretaría de Energía, 2018), lo que quiere decir que la búsqueda de formas eficientes de generación eléctrica y el consumo responsable de energéticos sigue siendo un reto para la humanidad.

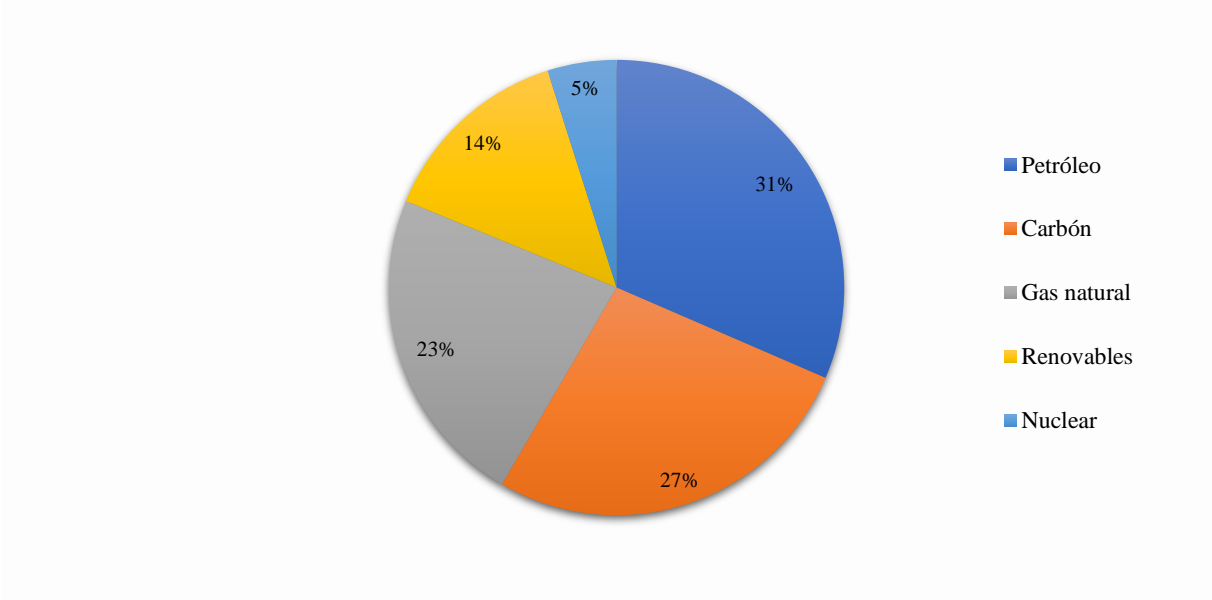


Figura 1.2. Producción total de energía primaria por combustible. Fuente: IEA, 2020.

Objetivo general

Estudiar y monitorear de forma comparativa la medición de la radiación solar detectada por un piranómetro comercial, en conjunto con prototipos de medición basados en celdas solares de CdTe.

Objetivos particulares

1. Realizar la instalación de un piranómetro comercial marca Delta OHM modelo LP PYRA 02, en la zona de estudio.
2. Seleccionar los prototipos de medición de radiación solar basados en celdas solares de CdTe.
3. Obtener las curvas I-V de las celdas solares, a través del Simulador Solar certificado Oriel Clase AAA.
4. Efectuar la asociación de los valores fotovoltaicos de las celdas solares, con los valores de la radiación solar.
5. Realizar el monitoreo de la radiación solar con el piranómetro Delta OHM, en conjunto con los prototipos de medición de CdTe.
6. Establecer una comparativa y evaluar los datos de la radiación solar obtenidos por el piranómetro Delta OHM y los prototipos de medición de CdTe.

CAPÍTULO 1. GEOMETRÍA Y RECURSO SOLAR

1.1. Movimientos de la Tierra

En lo que respecta a los desplazamientos de la Tierra, ésta ejerce dos tipos de movimientos, el que realiza sobre su propio eje con una duración de 24 horas se le conoce como rotación. El eje de rotación terrestre no es perpendicular al plano de la eclíptica (línea que une a la Tierra con el Sol) y su oblicuidad es aproximadamente de $23^{\circ} 27'$. El movimiento de traslación transcurre en un año solar de 365 días 5 h 48 m 46 s, consiste en el desplazamiento de la Tierra alrededor del Sol y sigue una trayectoria en forma elíptica. En su recorrido, la distancia que existe entre el Sol y la Tierra es variable, se le reconoce como afelio cuando el Sol se encuentra más lejos del planeta y es la distancia más larga con 152 millones de kilómetros, por otro lado, el perihelio es la distancia más corta y cuenta con aproximadamente 147 millones de kilómetros, ver Figura 1.3.

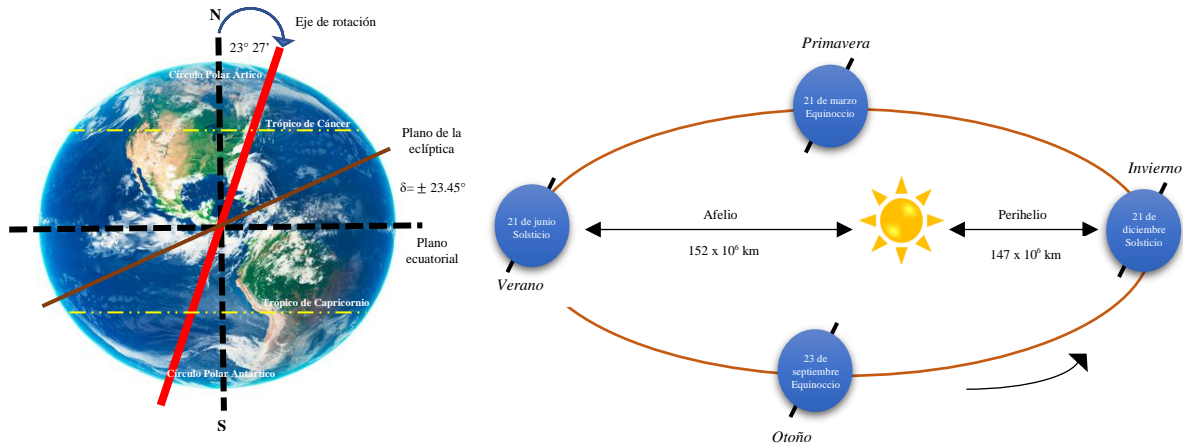


Figura 1.3. a) Eje de rotación respecto al plano ecuatorial, b) Movimientos de la Tierra respecto al Sol. Fuente: Elaboración propia.

La variación del ángulo entre el plano ecuatorial y el plano de la eclíptica es el responsable de la formación de las cuatro estaciones del año: primavera, verano, otoño e invierno; y también de la diversidad de climas manifestados en las diferentes regiones del mundo. Asimismo, es el fenómeno que causa que algunos días sean más largos en verano, por ejemplo, el 21 de junio aquellas regiones que se encuentran a una latitud de $+23.45^{\circ}$ al norte del ecuador, experimentan el solsticio de verano, es decir, el mayor número de horas de luz diurna, en cambio, el solsticio de invierno (el menor número de horas de luz diurna), ocurre el 21 de diciembre a una variación opuesta de -23.45° respecto al ecuador.

Además, durante el año también existen fechas como el 21 de marzo y 23 de septiembre en el que el día y la noche presentan una misma duración de horas en todo el planeta, este fenómeno es conocido como equinoccio de primavera y otoño (Lacomba, 1991).

1.2. Ángulo de declinación solar

El ángulo de declinación solar (δ) es variable a lo largo del año, debido a la inclinación de la Tierra en relación a su eje de rotación y a la posición que presenta respecto a su trayectoria con el Sol, es decir, la estación del año correspondiente. La declinación es cero en los equinoccios de primavera y otoño, por lo que el día y la noche tienen la misma duración, para el solsticio de verano tiene un valor aproximado de $+23.45^\circ$ y de -23.45° para el solsticio de invierno; de esta manera, si se desea calcular la declinación solar para un día en específico, dicho valor suele mantenerse constante a lo largo del día.

El valor de la declinación solar se obtiene a través de la ecuación 1.1, en donde la variable n , representa el número acumulativo de días en relación a la fecha en que se desea realizar la medición.

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad (1.1)$$

En la Figura 1.4, se observa la variabilidad de la declinación solar mensual, donde de acuerdo a la gráfica, los valores comprenden rangos de $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$.

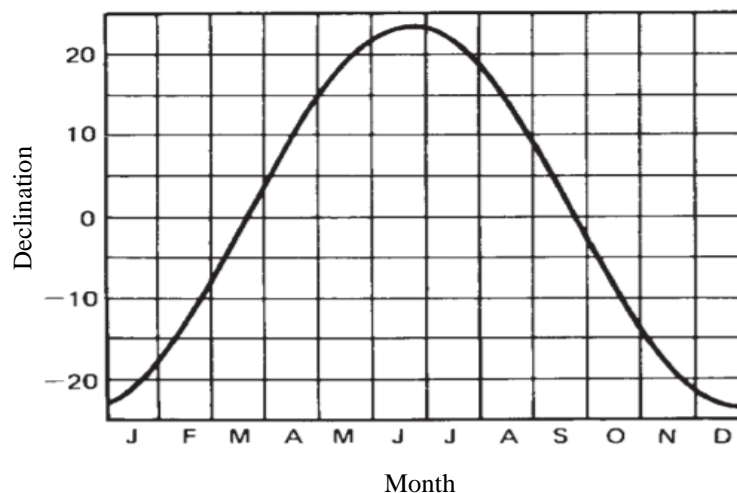


Figura 1.4. Variación anual de la declinación solar. Fuente: Duffie & Beckman, 2013.

1.3. Ángulo horario

El ángulo horario (ω) en grados, es una variable que depende de la exactitud con que se determine el paso del Sol sobre el lugar de observación (Benavides *et al.*, 2017). Este describe el desplazamiento angular del Sol desde su salida por el lado este, hasta su ocultamiento en el oeste y sirve como una variable del movimiento del Sol en coordinación con el mediodía solar, por hora existe un desplazamiento del Sol de 15° y en 24 horas se cumple el giro de 360° . Para su determinación, es necesario conocer la hora real del paso del Sol, es decir, la hora solar exacta. Por lo tanto, se debe realizar la conversión de hora civil a hora solar, a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Hora solar} = \text{Hora civil} + 4(L_s - L_{loc}) + E \quad (1.2)$$

En donde:

Hora solar = Tiempo solar en función del movimiento del Sol.

Hora civil = Hora exacta del lugar en minutos.

L_s = Longitud geográfica del meridiano de referencia.

L_{loc} = Longitud geográfica del meridiano local.

E = Es la variable que describe cuántos minutos se le deben sumar o restar a la ecuación 1.2, debido al cambio de velocidad que experimenta la Tierra durante su movimiento de traslación alrededor del Sol. En el momento en que la Tierra se encuentra más cerca del Sol su velocidad disminuye y en la distancia más lejana su velocidad aumenta. Por lo tanto, con esta diferencia de velocidad se genera un desbalance entre la hora solar y la hora civil la cual debe de ser corregida. En la Figura 1.5 se muestra la diferencia anual en minutos de la *Ecuación del tiempo*.

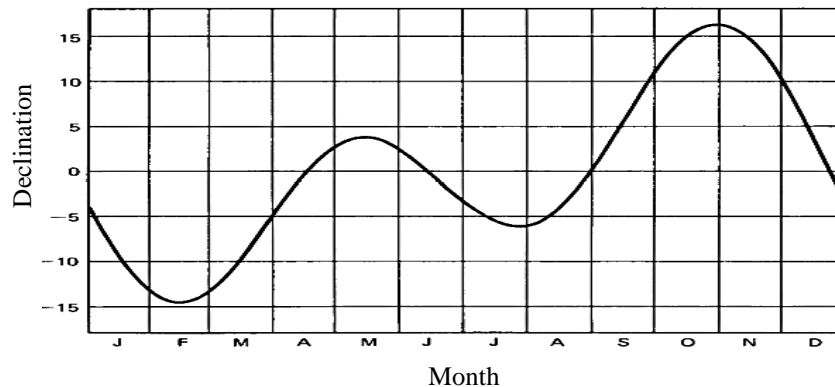


Figura 1.5. Variación anual de la Ecuación del tiempo. Fuente: Duffie & Beckman, 2013.

Una vez determinada la *hora solar* se prosigue con la determinación del ángulo horario, éste se calcula en magnitud tiempo, como se muestra en la ecuación 1.3.

$$\omega = 12 - \text{hora solar} \quad (1.3)$$

1.4. Movimiento aparente del Sol en el cielo

Durante el movimiento del Sol, contemplada por un observador desde la superficie terrestre, se van formando diferentes rutas y ángulos a lo largo del día o del año, dichos trayectos han permitido al ser humano establecer análisis de estudio de la posición del Sol respecto a cierta área de selección. Para localizar un punto en el planeta Tierra se utilizan las coordenadas geográficas latitud y longitud (medidos en grados). Se le denomina latitud a cualquier distancia media que existe entre cualquier paralelo y la línea del ecuador, su medida varía entre 0 y 90°, en el hemisferio norte los valores son positivos y en el hemisferio sur negativos. La longitud es la separación que existe entre el meridiano de Greenwich (meridiano cero), este mide entre 0 a 180°, al este son positivos y al oeste negativos. Las coordenadas solares se denominan altitud (0 a 90°) y acimut (0 a 180°), de acuerdo a la Real Academia de Ingeniería, son un sistema de coordenadas que permiten determinar en cada instante la situación y movimientos del Sol. Con base a la Figura 1.6, se determina la relación del estudio de la geometría solar, en él, se observan los ángulos formados en los planos eclíptico y ecuatorial, sin embargo, los ángulos que describen la posición del Sol en el cielo son los siguientes.

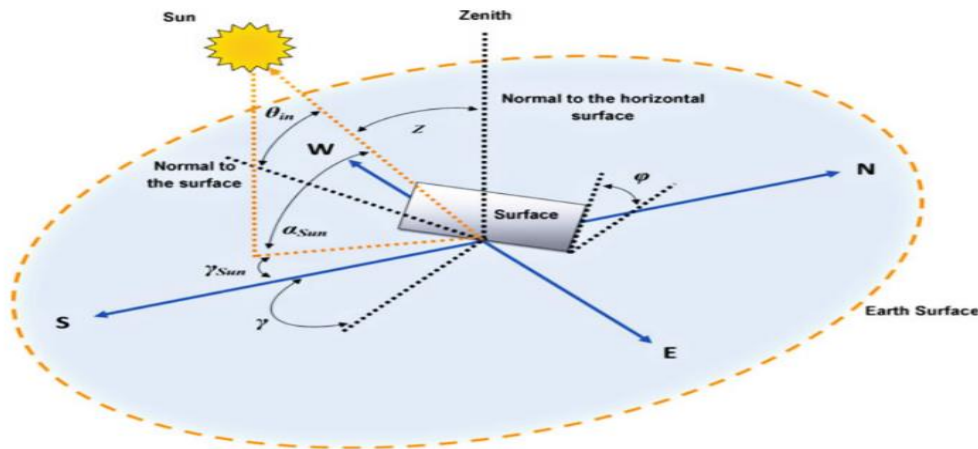


Figura 1.6. Geometría solar básica de acuerdo al ángulo de incidencia de los rayos del Sol.

Fuente: Polo et al., 2019.

El cenit corresponde a la elevación del Sol en su punto más alto cuando éste se sitúa sobre la vertical del observador, y nadir, es el punto diametralmente opuesto. El ángulo cenital en grados (Z), es el ángulo entre la vertical y la línea de incidencia del haz solar sobre una superficie horizontal, su complemento α_{Sun} , se define como el ángulo de altitud solar o elevación solar, y es el ángulo formado entre la horizontal y la línea de incidencia del Sol, el cual se puede expresar de la siguiente manera $\alpha_{\text{Sun}} = 90 - Z$. El ángulo de acimut solar (γ_{Sun}), es medido en el plano horizontal formado por el Sol y la dirección sur. En síntesis, la posición del Sol depende de lo siguiente: el ángulo de declinación, el ángulo horario y la latitud. Así la posición del Sol estará determinada por sus coordenadas altitud y acimut (Lacomba, 1991).

1.5. Espectro solar

El Sol es la fuente de energía más importante que existe, sin ella la vida en el planeta no hubiese sido posible, es una estrella enorme que en su composición química se encuentran elementos como el hidrógeno 73%, helio 23% y el resto corresponde al oxígeno, hierro, nitrógeno, etcétera (López, 2019). En su superficie alcanza los 5800 K, la energía total de salida es de aproximadamente 64 millones de W/m^2 y al planeta Tierra sólo intercepta 1367 W/m^2 , energía proveniente del Sol que, por unidad de tiempo, es recibida por unidad de área, es una variable medida en una superficie perpendicular en la parte externa de la atmósfera terrestre y conocida como constante solar (Gallegos, 2005). En el interior de la estrella se producen reacciones de fusión nuclear, es así como se propaga la energía hacia el exterior en forma de ondas electromagnéticas y la energía que llega hasta nuestro planeta se le conoce como radiación solar, en donde su aprovechamiento y aplicación depende de la caracterización de la longitud de onda, en la Figura 1.7 se observa la densidad de flujo de energía de radiación recibida por unidad de superficie.

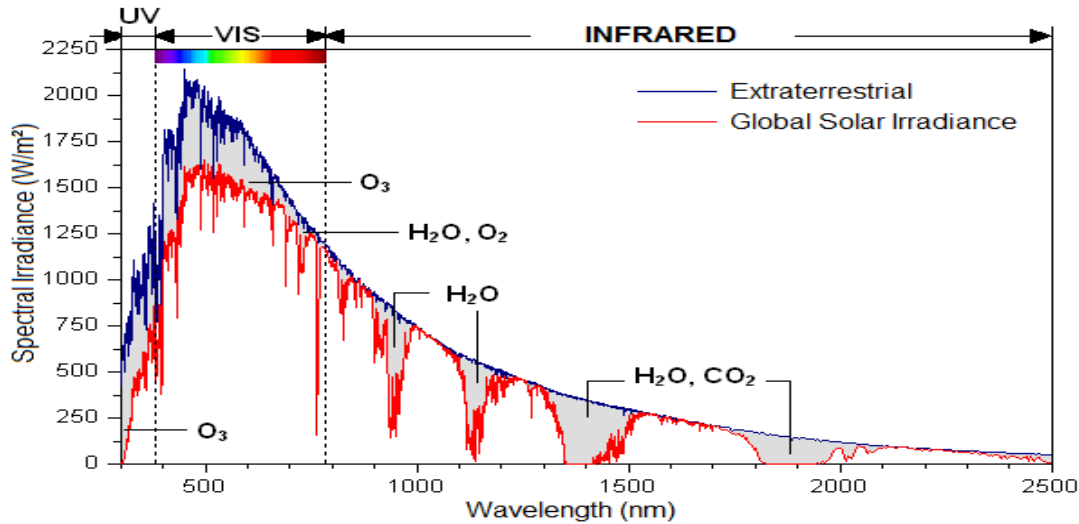


Figura 1.7. Irradiancia espectral a diferentes longitudes de onda. Fuente: Dornelles, 2011.

La longitud de onda del espectro de la radiación solar suele ser tan pequeña que su unidad de medida se expresa en nanómetros (nm) o micrómetros (μm), lo que equivale a una milmillonésima o millonésima de metro. El rango de longitudes de onda corta es conocido como radiación ultravioleta y corresponde a valores menores a 380 nm con frecuencias muy altas como los rayos X y rayos gamma, seguido de la radiación visible o luz visible, zona en donde el ojo humano es capaz de percibir colores como el violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo, con longitudes de onda que abarcan desde 380 hasta 780 nm. Por último, se encuentra la radiación infrarroja que se extiende a partir de 780 nm hasta longitudes de 4000 nm aproximadamente.

La longitud de onda (λ) y la frecuencia (f) de ondas electromagnéticas, representadas en la siguiente ecuación: $\lambda f = C$, en donde C es la velocidad de la luz, son importantes para determinar su energía, su visibilidad y su poder de penetración. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad de $C = 300,000 \text{ km/s}$. El espectro electromagnético no tiene definidos límites superior ni inferior y la energía de una fracción diminuta de radiación, llamada fotón, es inversamente proporcional a su longitud de onda, por lo tanto a menor longitud de onda mayor contenido energético (IDEAM, 2014), cierta diferencia, es lo que ha permitido desarrollar diferentes aplicaciones destinadas al área de medicina, de telecomunicaciones, en

dispositivos electrónicos, en la utilización de la radiación ionizante y no ionizante y en las formas de generación de energía eléctrica a través de celdas solares.

1.6. Tipos de radiación solar

La radiación solar extraterrestre (TSI, por sus siglas en inglés), es la energía recibida por el Sol, por unidad de área y por unidad de tiempo, esta es medida por encima de la atmósfera terrestre, en una superficie horizontal respecto a los rayos del Sol; su medición resulta variable debido a su posición y a la distancia de la Tierra y el Sol, no obstante, una medida de referencia inicial durante este proceso es la constante solar (I_{sc}). La energía emitida por el Sol se modifica cuando ésta sobrepasa la atmósfera, fenómenos específicos como la absorción y reflexión generan distinción entre los diferentes tipos de radiación solar que llega a cada sitio terrestre, como la radiación global, directa y difusa. Una aproximación de la cantidad de energía incidente en la Tierra y de cómo se transforma en la atmósfera y la superficie terrestre, se puede establecer de la siguiente manera: de la radiación solar total incidente, 173,000 Teravatios, el 30% es reflejado hacia el espacio exterior y del 70% restante, el 47% calienta la superficie terrestre, la atmósfera y los océanos, y el 23% se absorbe en la evaporación de agua (Benavides, 2017).

En la Figura 1.8, se observa las diferentes atenuaciones de la radiación solar en su paso por la atmósfera terrestre, presentándose las siguientes clasificaciones:

Radiación solar directa: Es la radiación o rayos del Sol que llegan de manera directa a la superficie terrestre, sin haber pasado por un momento de absorción o reflexión que modifique su trayectoria.

Radiación solar difusa o albedo: Es la radiación solar recibida por la superficie después de haber modificado su trayectoria, es decir, parte de la radiación fue obstruida por nubes, partículas sólidas suspendidas o gases presentes en la atmósfera.

Radiación solar global: Es la suma total de la radiación solar directa y difusa sobre una superficie horizontal. La radiación solar global diaria es el promedio total de la energía solar durante el día y sus valores típicos están dentro del rango de 1 a 35 MJ/m², es decir, entre 0.3 kWh/m² y 9.5 kWh/m² (Benavides, 2017).

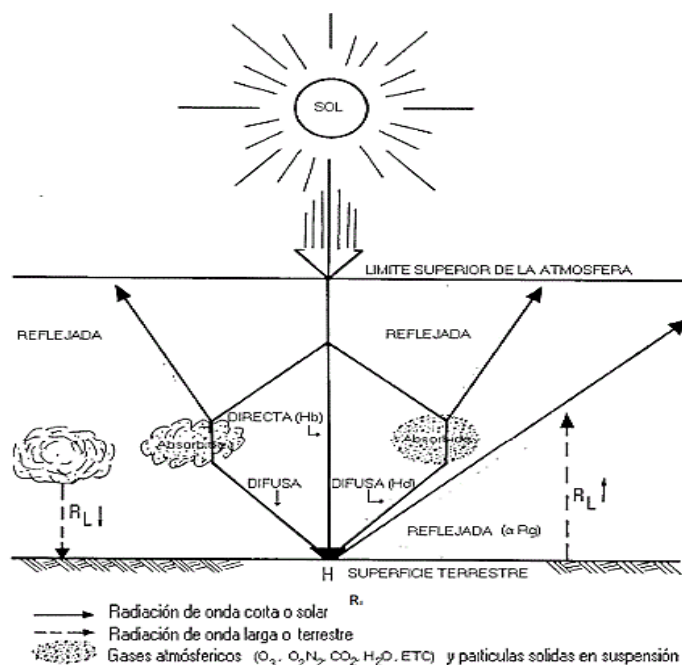


Figura 1.8. Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre. Fuente: UPME, 2005.

1.7. La radiación solar mundial y en México

La energía solar, es considerada una de las más importantes en el mundo debido a la competitividad de aprovechamiento de la luz y el calor solar. Las tecnologías de energía solar, manifestadas como calefacción solar, electricidad solar fotovoltaica, electricidad solar térmica y arquitectura solar, presentan un sinnúmero de aplicaciones a nivel industrial (López *et al.*, 2011). En la Figura 1.9, de acuerdo a la European Photovoltaic Industry Association (EPIA), son 66 los países que pertenecen al área denominada cinturón solar, región en donde se recibe la mayor cantidad de radiación solar en el planeta, ubicado entre -35° y $+35^{\circ}$ respecto al Ecuador, entre ellos destacan países como China, India, Australia, México, Singapur, etcétera., y en total cuentan con aproximadamente 5 mil millones de habitantes, lo que representa el 75% de la población a nivel mundial, además de que algunos son economías altamente desarrolladas que cuentan con una considerable demanda energética.

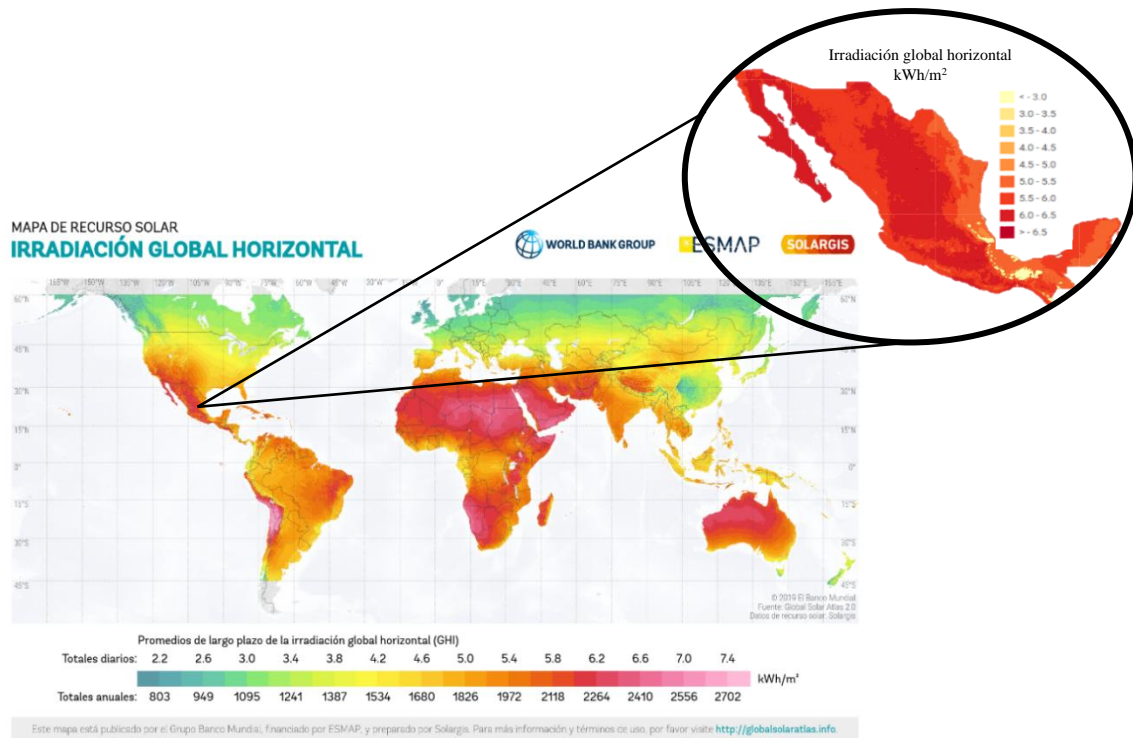


Figura 1.9. Mapa de la irradiación global horizontal a nivel mundial y nacional. Fuente: Global Solar Atlas & NREL.

Como caso particular, con base a los datos de la Secretaría de Relaciones Exteriores, México es un país que abarca una extensión territorial de 1,964,375 km², de los cuales 1,959,248 km² son superficie continental y 5,127 km² son superficie insular. En su superficie, entidades de la zona noroeste y centro del país como: Baja California, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Aguascalientes, San Luis Potosí e Hidalgo, cuentan con una alta incidencia de radiación solar, con valores que abarcan desde los 5.0 hasta los 6.0 kWh/m² por día (BANCOMEXT, 2019). Sonora se caracteriza por ser uno de los estados con mayor potencial a nivel mundial debido a que presenta el valor promedio más alto de 6.0 kWh/m² diarios, sin embargo, uno de los estudios realizados por la Universidad Nacional Autónoma de México concluyó que se han alcanzado valores entre 7.0 y 8.0 kWh/m² por día, lo que a futuro resulta bastante prometedor para la inversión en proyectos fotovoltaicos o térmicos.

CAPÍTULO 2. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

2.1. Antecedentes de instrumentos de medición de energía solar

La medición de la radiación solar, es de suma importancia para su aplicación en las diferentes ramas de la ciencia, por ejemplo, benefician al estudio de la variabilidad del clima y pronóstico del tiempo, al análisis de las propiedades y distribución de los componentes en la atmósfera y al estudio de las transformaciones de la energía en el sistema Tierra-atmósfera. Por otra parte, resulta fundamental para el sector solar, debido a que es posible analizar la inestabilidad del recurso solar en un determinado lugar, lo que resulta significativo durante la evaluación para el reconocimiento de la viabilidad en la instalación de tecnología solar, asimismo permite estimar la cantidad de electricidad que se puede generar en una planta eléctrica en donde utilicen tecnologías tipo solar fotovoltaica o termosolar, en función de la cantidad de energía solar que se presente para días soleados, nublados o en las diferentes condiciones meteorológicas manifestados a lo largo de un periodo (WMO, 2017).

El radiómetro, es un instrumento capaz de medir la radiación electromagnética en sus diferentes formas y rangos espectrales (longitud de onda), es utilizado para medir la radiación solar a través de diferentes diseños de instrumentos y técnicas empleadas durante la medición. Por ejemplo, el piranómetro se utiliza para medir la irradiancia solar global, el pirheliómetro, montado en un seguidor solar, se utiliza en las mediciones de la irradiancia solar directa, y una técnica común para las mediciones de la irradiancia solar difusa es el uso de un piranómetro equipado con un disco de sombra para protegerlo del rayo solar directo (Lysko, 2006).

Los sensores termoelectricos basados en efectos térmicos, son los dispositivos más comunes en el área de la energía solar, el elemento sensor es una termopila en dos uniones, una se encuentra en contacto con una placa absorbente negra expuesta al Sol (temperatura alta) y la otra a la parte trasera/interna del instrumento (temperatura baja o de ambiente), por lo tanto, la desigualdad de temperaturas entre ambas, produce una diferencia de voltaje que es proporcional a la irradiancia solar absorbida en la placa frontal, los instrumentos que se fundamentan en este principio son los piranómetros y pirheliómetros.

Asimismo, se encuentran los efectos fotónicos, sensores tipo fotón manifestados a través de dispositivos fotoeléctricos tipo fotovoltaicos (PV), fotodiodos y celdas solares. El principio de funcionamiento es el efecto fotovoltaico, este consiste en la conversión directa de energía solar a energía eléctrica, en donde su rendimiento depende de sus propiedades de los materiales semiconductores y las aleaciones en conjunto, para así mejorar la producción de pares electrón-hueco debido a la absorción de fotones de la radiación solar (Polo *et al.*, 2019). El uso de instrumentos basados en efectos fotónicos, permite la implementación de nuevas alternativas tecnológicas para la medición de la radiación solar, a causa de que en la actualidad los instrumentos comerciales resultan demasiado costosos limitando de esa forma su acceso a agrupaciones de investigación y al público en general. Ya en la literatura, existen diferentes estudios y desarrollos de instrumentos caseros a nivel laboratorio con características comerciales similares a los dispositivos de primera calidad, estos ofrecen la posibilidad de obtener casi la misma respuesta espectral y además son construidos con materiales de bajo costo y de fácil acceso.

2.2. Piranómetros

El piranómetro es un instrumento utilizado para medir la irradiancia solar, en el campo de aplicaciones, es el dispositivo que ofrece una mejor respuesta (en lo que se refiere a longitudes de onda corta) debido a que su intervalo espectral oscila entre los 300 a 3000 nm aproximadamente.

La medición se determina de acuerdo al campo de visión seleccionado, por ejemplo, cuando el piranómetro se coloca en una superficie horizontal, mide la Irradiancia Horizontal Global (GHI, por sus siglas en inglés), como resultado de dos elementos como la Irradiancia Normal Directa (DNI) y la Irradiancia Horizontal Difusa (DHI). Del mismo modo, el piranómetro se puede sombrear parcialmente por medio de un anillo de sombra para evitar la aportación de DNI y medir únicamente DHI (medición de salida). Los piranómetros también se colocan en superficies inclinadas paralelas al plano o zona de medición, en donde exista algún equipo de referencia como puede ser un calentador solar o un módulo fotovoltaico, de esta manera se efectúa un análisis de la cantidad de recurso solar absorbido. Además, el piranómetro se puede instalar en una superficie invertida para realizar la medición de la irradiancia global

reflejada en el suelo, si en este proceso se adiciona un piranómetro horizontal, se obtiene la medición de GHI sobre la superficie y la reflejada por ésta, a este tipo de configuración en unión de dos piranómetros se le conoce como albedómetro.

2.2.1. Principio de funcionamiento

Los piranómetros se utilizan normalmente como sensores termoelectricos y fotoelectricos, como están siempre expuestos a todo tipo de condiciones meteorológicas deben tener un diseño robusto y resistir a los efectos corrosivos del aire húmedo, especialmente en las proximidades del mar (OMM, 2014).

En referencia a la literatura, existen dos clasificaciones generales que determinan el principio de funcionamiento del instrumento, estos son los piranómetros termoelectricos y fotovoltaicos. La primera clasificación contiene como elemento sensor a una termopila (un par de metales que, al presentarse un gradiente de temperaturas, se genera una diferencia de voltaje que es proporcional a la irradiancia solar medida). Por otra parte, los piranómetros fotovoltaicos, poseen como elemento sensor a una superficie de silicio, en general de tipo monocristalino, que al recibir un flujo de radiación solar genera una diferencia de potencial proporcional a la irradiancia solar, la respuesta emitida no es plana sino selectiva pues depende de la longitud de onda del espectro solar (Grossi, 2001).

2.2.2. Clasificación

En la práctica, los principales parámetros que afectan la medición de la radiación solar están relacionados con el tiempo de respuesta (s), la resolución (W/m^2), la respuesta a la temperatura (% de error), la incertidumbre alcanzable en % (con un nivel de confianza del 95%), etcétera., los cuales determinan el rendimiento, la categorización y la aplicación del instrumento.

En la Tabla 2.1 se reúne de forma general la clasificación de piranómetros que establece la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Organización Internacional de Normalización (ISO), de acuerdo a la norma ISO 9060:1990, actualizada por ISO 9060:2018

“Solar energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation”.

Tabla 2.1. Clasificación de piranómetros.

OMM	ISO 9060:1990 / ISO 9060:2018	Aplicaciones
Calidad alta	Clase A / Patrón secundario	Es utilizado en meteorología y pruebas en sistemas fotovoltaicos (PV, por sus siglas en inglés), energía solar fotovoltaica de concentración (CPV) y concentración de energía solar (CSP).
Buena calidad	Clase B / Primera clase	Aceptables para aplicaciones de red, investigación atmosférica y plantas fotovoltaicas.
Calidad moderada	Clase C / Segunda clase	Mediciones de práctica en estaciones meteorológicas y pruebas de campo, presentan un menor costo y se acepta un rendimiento bajo.

2.2.3. Elementos principales

Cúpula: Este elemento define el rango de medición espectral del piranómetro y depende del material de construcción, cristal o cuarzo. En algunos casos, los piranómetros incluyen dos cúpulas que funcionan como amortiguador de radiación, aquello se debe a que normalmente las cúpulas orientadas hacia arriba intercambian radiación con su entorno y pierden energía debido a la transferencia por radiación, lo que provoca que la cúpula esté a una temperatura inferior al resto del instrumento, formando un gradiente de temperaturas que emitirá el sensor como una señal negativa pequeña, conocida como Offset cero tipo A.

Carcasa: La carcasa está fabricada comúnmente con aluminio anodinado, material ligero que sirve de protección a la corrosión y al deterioro superficial. Ésta contiene en su interior a todas las piezas fundamentales del piranómetro, por lo tanto, debe de estar muy bien sellada.

Detector: El elemento es una termopila, basado en un método de detección por efectos térmicos, está conformada por múltiples termopares conectados en serie o en serie/paralelo

(según sea el caso). El detector se protege con un revestimiento color negro, de esta manera se garantiza una mejor estabilidad durante el funcionamiento del piranómetro. Lo conforma dos tipos de uniones, activas y pasivas, generalmente la parte activa se encuentra debajo de la superficie negra y es una zona caliente debido a la absorción de radiación solar. La unión pasiva mantiene un contacto con la carcasa del piranómetro por lo que es una zona fría, por lo tanto, la diferencia de temperaturas que existe entre las uniones producirá una señal de voltaje que será proporcional al parámetro medido.

Cartucho desecante: Es un elemento de gel de sílice que regula el nivel de humedad en caso de que ingrese al interior del piranómetro.

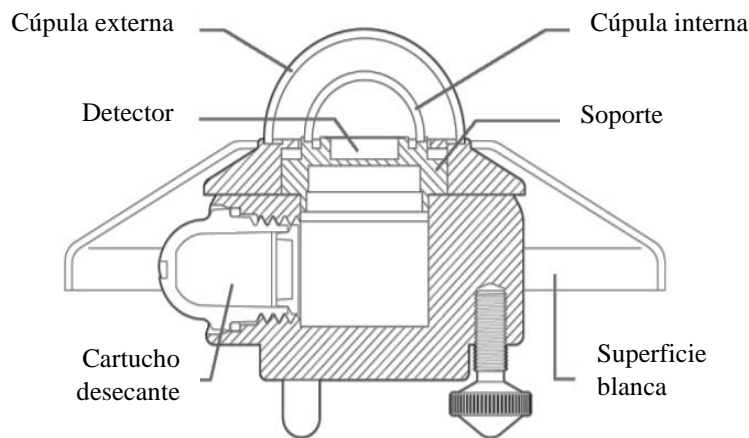


Figura 2.1. Partes de un piranómetro. Fuente: Kipp & Zonen, 2010.

2.2.4. Calibración

La calibración de instrumentos permite determinar la relación entre los valores de entrada y salida, para calibrar un piranómetro hay que encontrar la constante de sensibilidad que determine esta relación. Para los piranómetros de campo, es decir, aquellos que se encuentran en uso constante en exteriores, se recomienda una recalibración cada dos años, ya que sus propiedades cambian en el tiempo debido a la exposición de factores ambientales (Villarreal, 2015). El periodo de calibración puede variar de acuerdo al fabricante, por ejemplo, Kipp & Zonen recomienda una calibración periódica cada dos años, debido a que la sensibilidad del

piranómetro cambia con el tiempo y con la exposición a la radiación solar, por otro lado, Delta OHM aconseja verificar la calibración de forma anual.

La sensibilidad del piranómetro o factor de calibración ($\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$), permite determinar la radiación solar (W/m^2), después de haber obtenido una señal de salida o diferencia de potencial (μV); lo anterior se describe en la ecuación 2.1.

$$E_{solar} = \frac{DDP}{S} \quad (2.1)$$

En donde:

Esolar = Medición de radiación solar.

DDP = Salida del piranómetro o diferencia de potencial.

S = Coeficiente de sensibilidad.

Los piranómetros son calibrados de manera individual, por lo que cada uno presenta un coeficiente de sensibilidad distinto, el cual difiere del método de calibración empleado y de las condiciones ambientales registradas durante las pruebas, los cuales deberán especificarse en el certificado de calibración.

Los métodos de calibración son expresados en normas internacionales como ISO 9846 e ISO 9847, en donde se establecen dos métodos de calibración, el primero está basado en la calibración de piranómetros en relación a un pirheliómetro de referencia y el segundo, respecto a un piranómetro de referencia. En la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos publicado por la OMM, se enlistan otros métodos de calibración que utilizan el Sol como fuente de radiación o fuentes de luz artificial en laboratorios, en donde se especifica que el piranómetro deberá calibrarse únicamente en la posición de utilización y que las principales variaciones del factor de calibración exceptuando las fluctuaciones de las condiciones atmosféricas y las limitaciones de observación, residen en condiciones como, la respuesta no lineal del instrumento y una nivelación imperfecta de la superficie receptora (OMM, 2014).

2.2.5. Instalación y montaje

La instalación de un piranómetro puede variar de acuerdo al tipo de medición, como: medición de la radiación solar en superficies inclinadas, medición de la radiación global reflejada, difusa y albedo. Sin embargo, desde un inicio es importante colocar el piranómetro firmemente sobre el soporte que se utilice, éste debe ser una base sólida, estable y horizontal.

La zona de instalación debe ser de fácil acceso para efectuar el mantenimiento respectivo al instrumento, éste tiene que estar libre de obstáculos, es recomendable instalar lejos de árboles o construcciones que puedan generar sombra o reflexión solar ya que pueden afectar considerablemente la medida de irradiancia solar directa. Posteriormente, con los tornillos de ajuste se nivela la posición del instrumento para situar el nivel de burbuja al centro del círculo señalado y finalmente se asegura correctamente al piranómetro.

2.2.6. Mantenimiento

El piranómetro debe recibir un mantenimiento periódico para garantizar la precisión en sus mediciones, si el monitoreo de la radiación solar es constante, algunos fabricantes recomiendan limpiar e inspeccionar todas las mañanas la cúpula externa del piranómetro, para mantenerlo en buen estado y no intervenir directamente en la desviación de la medición. En el manual de usuario de Delta OHM, se recomienda limpiar la cúpula utilizando agua y papel, si esta operación no fuese suficiente, se aconseja el uso de alcohol etílico puro, después de haber limpiado con alcohol es necesario volver a limpiar el cristal con agua. También es importante verificar el estado del cartucho desecante, no existe un periodo exacto puede ser en varios meses, sin embargo, es posible observar su deterioro cuando éste se vuelve casi transparente o de un color más claro, cuando esto pase debe ser remplazado por uno nuevo para garantizar la absorción de humedad al interior de la cúpula, debido a las oscilaciones de temperaturas durante el día y la noche.

CAPÍTULO 3. CELDAS SOLARES

3.1. Principio de funcionamiento

La celda solar es un dispositivo que por aprovechamiento de la radiación solar (energía proveniente del Sol), produce una corriente eléctrica. La conversión directa de energía solar a energía eléctrica se debe al efecto fotovoltaico, éste se origina por la propagación de radiación solar en el espacio en forma de ondas electromagnéticas, las partículas que transportan la energía se conocen como fotones, los cuales según su longitud de onda pueden diferir principalmente en su energía o frecuencia. El proceso comienza cuando los fotones inciden de manera directa en la celda solar (en donde se emplean uniones con semiconductores tipo p-n), por cada fotón absorbido se produce un par electrón- hueco, que a su vez produce un campo eléctrico dentro del dispositivo, este campo separa las cargas eléctricas positivas y negativas producidas por la luz absorbida. La región tipo n presenta un exceso de electrones (carga negativa) y la región tipo p proporciona huecos (carga positiva), normalmente el flujo de electrones se dirige desde la región tipo n al tipo p y los huecos se difunden desde la región tipo p al tipo n. La celda solar con un solo material semiconductor, es nombrado como homounión p-n, sin embargo, si se trata de dos materiales semiconductores con diferente tipo de conductividad, lo constituye una heterounión p-n (Gurevich, 2013).

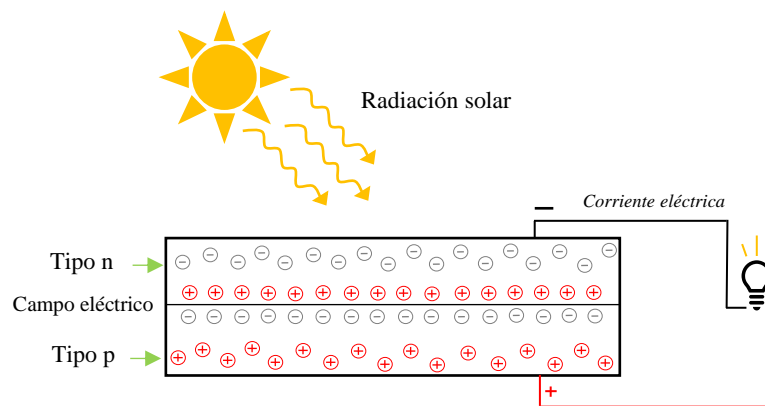


Figura 3.1. Efecto fotovoltaico en una celda solar. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Circuito eléctrico equivalente de una celda solar

La Figura 3.2 muestra el circuito eléctrico equivalente empleado para una celda solar, el circuito está formado por una fuente de corriente (I_c), cuyo valor es proporcional a la cantidad de radiación solar incidente. La unión p-n de la celda solar está representado por un diodo en paralelo, la corriente (I_d) es la corriente asociada al diodo equivalente, que a su vez está compuesta por una corriente de saturación inversa (I_0), debido a la generación de portadores de carga en la unión.

El efecto de pérdidas de conducción y de potencia en el circuito equivalente, están asociados a las resistencias en serie (R_s) y paralelo (R_p), donde R_s representa la suma de todas las resistencias en serie, cuyo valor equivalente debe ser mínimo para la generación de una corriente óptima (I) de operación. Por otro lado, las pérdidas asociadas a I en una celda solar, se deben principalmente a defectos originados por el proceso de fabricación, por fronteras de grano entre los materiales y por pequeños circuitos locales, entre otros, pérdidas que comúnmente suelen asociarse a R_p , por lo tanto, presenta un valor equivalente elevado, así se logra conseguir que I viaje directamente hasta las terminales de la celda, porque de lo contrario, I se verá afectado considerablemente debido a su desviación a través de R_p en el circuito.

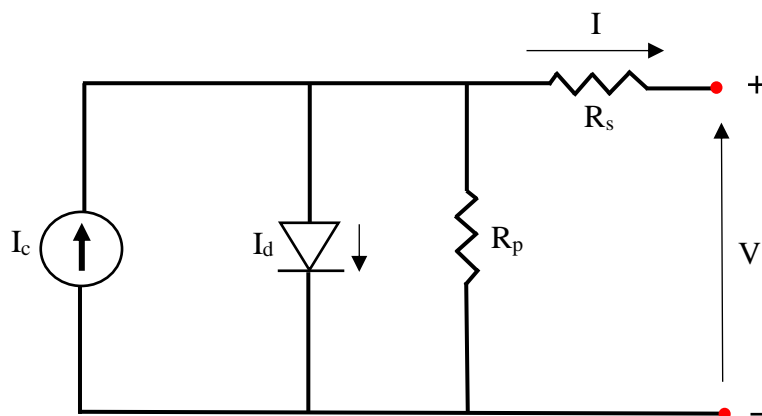


Figura 3.2. Circuito eléctrico equivalente. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Clasificación de celdas solares

Actualmente, la producción a nivel comercial de celdas solares se enfrenta a grandes retos que están relacionados con la reducción de costos de producción y el aumento de la eficiencia. Desde el año 1976 hasta la fecha actual, el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos (NREL, por sus siglas en inglés), publica frecuentemente gráficos de celdas solares, en donde se reúnen las eficiencias de conversión más altas, realizados en diferentes laboratorios de investigación, institutos y universidades a nivel mundial. Las eficiencias reportadas se dividen de acuerdo a los semiconductores empleados, los cuales han valido como referencia para establecer una clasificación general, como la que a continuación se menciona: celdas de multiunión, unión simple de GaAs (arseniuro de galio), celdas de Si (silicio) cristalinos, tecnologías de película delgada y PV emergentes.

El silicio en estructuras monocristalino, policristalino y amorfo, es el material más destacado en la fabricación de celdas solares, por requerimientos de conductividad son dopados con otros elementos como el fósforo (P) y el boro (B). Sin embargo, este material conlleva una serie de limitaciones, tales como el costo de inversión, eficiencia y ambientalmente son poco sostenibles debido al proceso de fabricación y a la generación de residuos contaminantes al final de su vida útil. La tendencia actual, encaminada hacia la búsqueda y desarrollo de nuevos materiales de celdas solares, conjuga características generales, tales como la absorción de la luz solar, bajos costos de inversión, alternativas sostenibles y de menor impacto para el medio ambiente. Una de las tendencias más dinámicas se ve reflejada en la fabricación de celdas solares de película delgada, con espesores del orden de micrómetros y nanómetros, lo que reduce la cantidad del material semiconductor utilizado, en especial en materiales policristalinos de adsorción, como el CdTe, el cobre, indio, galio y selenio (CIGS) y las denominadas celdas solares orgánicas OPV (Cucaita y Orlando, 2017).

Las eficiencias más altas correspondientes a las tecnologías mencionadas, medidas bajo el espectro global AM 1.5, a 1000 W/m^2 y $25 \text{ }^\circ\text{C}$, fueron las siguientes, para tecnologías de película delgada de CdTe se obtuvo una eficiencia máxima de 22.1% alcanzada por First Solar; para la tecnología CIGS se logró una eficiencia de 23.4% por Solar Frontier y por

último, una celda orgánica fabricada por la Universidad de Beihang consiguió una eficiencia de 18.2% (Green *et al.*, 2017).

3.4. Procesamiento de celdas solares de telurio de cadmio (CdTe)

Actualmente la tecnología de película delgada, también denominada tecnología fotovoltaica de segunda generación, ha demostrado su potencial de bajo costo desde hace muchos años en aplicaciones con módulos PV y celdas solares, aquellos basados comúnmente en semiconductores como el CdTe y CIGS, que hoy en día se encuentran en el mercado con eficiencias superiores al 17% (Bosio *et al.*, 2018). En el sector energético, existen dos fabricantes importantes que han liderado comercialmente, debido a la fabricación de módulos fotovoltaicos basados en CdTe, reconocidos como Antec solar ubicado en Alemania y First Solar en Estados Unidos; conforme a la última publicación realizada en 2020 por NREL, el rendimiento más alto alcanzado por celdas solares de CdTe, fue conseguida por First Solar con una eficacia del 22.1%.

En particular, la película delgada de CdTe, se puede obtener a través de diversas técnicas de depósito como la erosión catódica magneto planar a radiofrecuencia (Sputtering RF), por transporte de vapor en espacio cerrado (Closed Space Vapor Transport, CSVT) y por sublimación en espacio cercano (Closed Spaced Sublimation, CSS), en donde el depósito por CSS presenta un mejor control para el crecimiento del material (Fierro, 2020).

En una celda solar de película delgada II-VI, el semiconductor de CdTe es empleado comúnmente como material absorbente, tipo p en una configuración de heterounión p-n, debido a su valor de banda prohibida de $E_g \approx 1.45$ eV, que es casi el ideal para la conversión de energía solar a energía eléctrica, en el máximo del espectro solar. El CdTe es un material de banda prohibida directa, por lo que solo se requieren unos pocos micrómetros de CdTe para absorber todos los fotones con una energía superior a la energía de banda prohibida (Jäger *et al.*, 2016) y de acuerdo a Bosio (2018), una capa de 1 μm de espesor es suficiente para capturar toda la luz visible.

La celda solar de CdTe presenta dos configuraciones distintas, estas son identificadas como superestrato y substrato, véase Figura 3.3, su diferencia de operación consiste básicamente en la secuencia de capas delgadas que lo conforman, lo que permite establecer un orden en las técnicas de depósito.

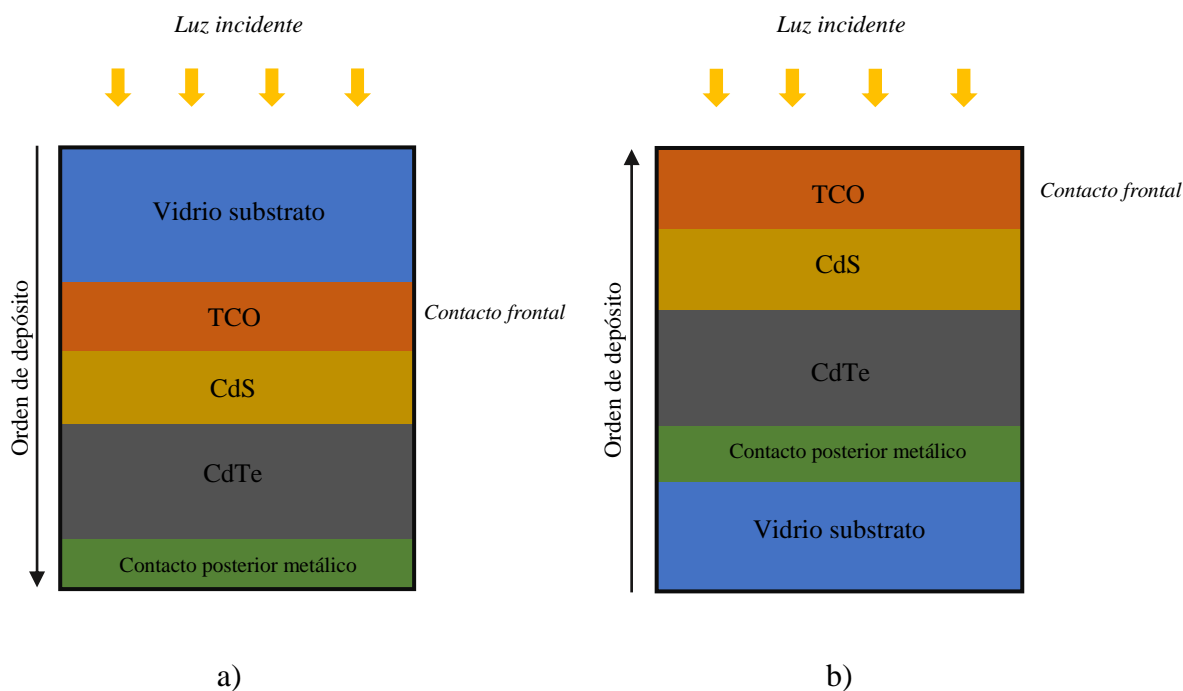


Figura 3.3. Configuración en a) superestrato y b) substrato de una celda solar de CdTe.
Fuente: Elaboración propia.

En la configuración superestrato, todas las capas son depositadas sobre el vidrio substrato por donde ingresa la luz incidente, por lo tanto, debe de cumplir con ciertas características, que el vidrio sea transparente y posea una buena conductividad eléctrica, debido a que la luz debe atravesar el substrato hasta llegar al absorbente (CdTe). Por otro lado, en la configuración substrato, las capas son depositadas en forma inversa y la luz incidente ingresa por el lado sombreado, en este caso comúnmente se utilizan substratos opacos, incluyendo polímeros y láminas flexibles.

En la estructura de una celda solar a base de CdTe, podemos encontrar un vidrio substrato, un óxido conductor transparente (TCO) que funciona como contacto frontal, una capa ventana (n-CdS), seguida de una capa absorbente (p-CdTe) y una capa metálica para el contacto posterior.

Entre los TCO con transmitancias por encima del 80% (porcentaje de energía que atraviesa la celda solar por unidad de tiempo), se encuentran materiales como óxido de indio y estaño (ITO) dopado con flúor (F) o antimonio (Sb), óxido de estaño (SnO_2) dopado con F o Sb y óxido de zinc (ZnO) posiblemente dopado con boro (B) o aluminio (Al) (Poortmans y Arkhipov, 2006). Cuando se utilizan técnicas de depósito por CSS o CSVT, las películas delgadas de CdTe crecen naturalmente como tipo p, y se ven obligadas a seleccionar un socio de tipo n para formar la unión p-n. La arquitectura de la heterounión permite que la luz del Sol pase a través de la capa de tipo n para alcanzar el CdTe, donde tiene lugar la fotogeneración; hasta la fecha, la mejor configuración encontrada es la estructura CdS/CdTe, donde el sulfuro de cadmio (CdS) es el material “ventana” y el CdTe el material “absorbente” (Bosio *et al.*, 2020). Para el contacto posterior, en la práctica comúnmente se han empleado combinaciones de metales a partir de estructuras cobre-oro (Cu-Au) y cobre-molibdeno (Cu-Mo), durante su aplicación uno de los aspectos críticos a considerar es la formación de contactos “óhmicos” con el CdTe; un contacto óhmico se relaciona con la unión metal-semiconductor (CdTe), en donde se requiere una resistencia de unión casi despreciable, con la finalidad de llevar a cabo la conducción de los portadores de carga generados, debido a que el semiconductor tiene una función de trabajo muy alto, se necesita que el metal a elegir tenga una función de trabajo aún mayor que la del CdTe (Mendoza, 2007).

3.5. Parámetros eléctricos de una celda solar

Los principales parámetros que describen el funcionamiento y el rendimiento de una celda solar, son la potencia máxima (P_{max}), la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}), el voltaje a circuito abierto (V_{oc}), el factor de llenado (FF) y la eficiencia de conversión (η).

Aquellos parámetros son medidos bajo una serie de condiciones internacionales de trabajo, actualmente conocidas como Condiciones Estándar de Medida (CEM o STC, por sus siglas

en inglés, Standard Test Conditions), las anteriores presentan características de operación de 1000 W/m^2 de irradiancia solar ideal, a una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, con una distribución espectral AM1.5G estándar (la G significa global e incluye la radiación directa y difusa) o AM1.5D (que incluye únicamente radiación directa); para alcanzar detalladamente ciertas condiciones, normalmente se someten a pruebas en un Simulador Solar, sin embargo, dichas condiciones no siempre se alcanzan en las pruebas reales de campo, por lo tanto, la estimación de las características eléctricas de un dispositivo o sistema FV requiere de la traslación de dichas características a condiciones de exterior.

3.5.1. Curva I-V

La curva I-V de una celda solar describe los parámetros de corriente y voltaje que se pueden alcanzar bajo condiciones estándar de medida.

En la Figura 3.4, se muestran las curvas características de corriente-voltaje (I-V) y potencia-voltaje (P-V) de una celda solar, en donde se observa la relación existente entre dichos parámetros eléctricos, los cuales pueden modificarse de acuerdo a ciertas condiciones, como los niveles de la radiación solar y la temperatura. El eje horizontal, representa el voltaje de operación en volts (V), el eje vertical izquierdo, la corriente producida en amperes (A) y el derecho la potencia en watts (W); cuando no hay corriente circundante a través de la celda, se alcanza el voltaje máximo representado como V_{oc} y de lo contrario, cuando no hay valores de tensión, la celda produce una corriente máxima que se conoce como I_{sc} . Durante el funcionamiento, la celda solar experimenta diferentes niveles de potencia, su variación depende considerablemente de la corriente y el voltaje (debido a la proporcionalidad del producto entre ambas variables, ver ecuación 3.1), no obstante, cuando la celda adquiere el valor de potencia más alto, se describe como el punto máximo de potencia o potencia máxima (P_{MPP} o P_{max}); a este se le asocia un voltaje y corriente a máxima potencia (V_{MPP} y I_{MPP}).

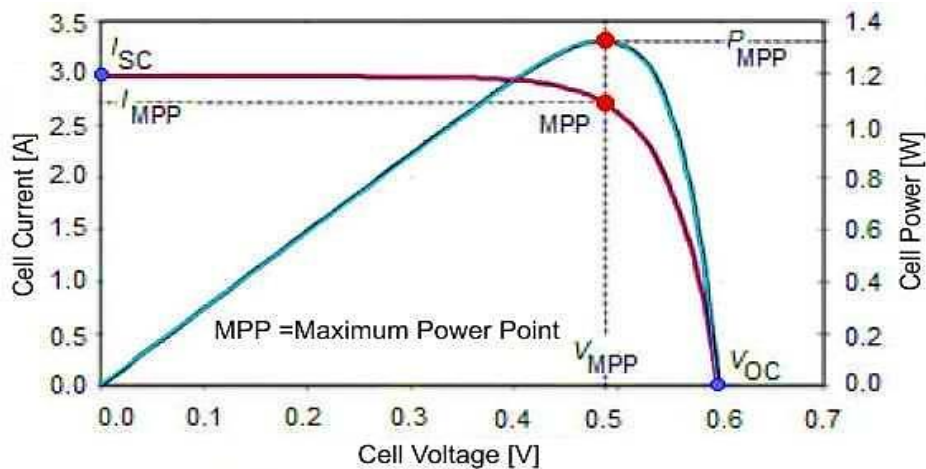


Figura 3.4. Curva I-V de una celda solar. Fuente: Ramos et al., 2013.

3.5.2. Corriente de corto circuito (I_{sc})

La corriente máxima que alcanza la celda solar se denomina corriente de cortocircuito (I_{sc}), esta existirá cuando la resistencia entre las terminales del circuito sea mínima y cuando el voltaje de operación sea nulo. El parámetro eléctrico I_{sc} , depende de la densidad de fotones absorbidos, que a su vez están determinados por el espectro solar de incidencia y por el área de apertura de la celda solar, sin embargo, para eliminar la dependencia del área de I_{sc} a menudo se utiliza la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}), relacionado por unidad de área ($J_{sc} = I_{sc} / A$) para describir la corriente máxima entregada (Ramos *et al.*, 2013).

3.5.3. Voltaje a circuito abierto (V_{oc})

Es el voltaje máximo alcanzado en una celda solar, ocurre cuando la corriente es cero (sin carga) debido al circuito abierto, este parámetro se representa como V_{oc} .

3.5.4. Potencia máxima (P_{max})

En relación a la Figura 3.4, el P_{MPP} está determinado por el producto del voltaje máximo (V_{MPP}) y la corriente máxima (I_{MPP}) adquiridos en dicho punto, además el producto de las dos variables, representa el área del rectángulo más grande que se forma dentro de la curva

característica I-V. Durante su funcionamiento, en el instante en que se produce la potencia más alta, la celda solar también opera con un mayor rendimiento. Debido a la dependencia proporcional que mantiene con las variables, si estas disminuyen la potencia también, una reducción se ve afectada comúnmente por los niveles de la radiación solar, por lo tanto, para alcanzar la potencia ideal, lo adecuado será operar a condiciones estándar de 1000 W/m² y 25 °C.

$$P_{max} = V_{MPP} * I_{MPP} = J_{max} * V_{max} \quad (3.1)$$

3.5.5. Factor de llenado (FF)

El factor de llenado (FF) se define como la potencia máxima alcanzada por la celda solar entre el producto de la densidad de corriente de cortocircuito y el voltaje a circuito abierto, como se muestra en la ecuación 3.2. Una forma de comprobar la calidad de la celda, es verificando el índice de FF, si su valor se acerca o es igual a 1, quiere decir que la potencia real entregada se aproxima a la potencia ideal.

$$FF = \frac{J_{max} * V_{max}}{J_{sc} * V_{oc}} = \frac{P_{max}}{J_{sc} * V_{oc}} \quad (3.2)$$

3.5.6. Eficiencia de conversión (η)

La eficiencia de conversión de una celda solar, se determina a partir de la ecuación 3.3 y depende de la Pmax otorgada y la potencia incidente (P_{in}), en unidades de W/m². El valor de referencia estándar para conocer la eficiencia de conversión de las celdas solares, son a través de 1000 W/m² de irradiancia solar correspondiente a P_{in}, para un espectro solar AM1.5 (Jäger *et al.*, 2016).

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{max} * V_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{sc} * V_{oc} * FF}{P_{in}} \quad (3.3)$$

3.6. Influencia de la radiación solar y la temperatura en los parámetros fotovoltaicos de una celda solar

En la Figura 3.5 inciso a), se observa que la radiación solar afecta ampliamente a la corriente producida (I), por su comportamiento se determina una relación proporcional, es decir, si la radiación solar disminuye también I y viceversa; asimismo los valores de voltaje (V) se ven afectados, aunque en menor proporción, concluyendo que la radiación solar no perjudica de forma significativa a los niveles de tensión producidos por la celda.

En la gráfica del inciso b), se observa que el incremento de temperatura perjudica en mayor medida al voltaje producido, generando una relación inversamente proporcional; si la temperatura de la celda va en aumento, V disminuye considerablemente afectando su rendimiento. Por otro lado, la variable de corriente presenta variaciones mínimas e incluso en la literatura refiere a que sus cambios se consideran casi despreciables.

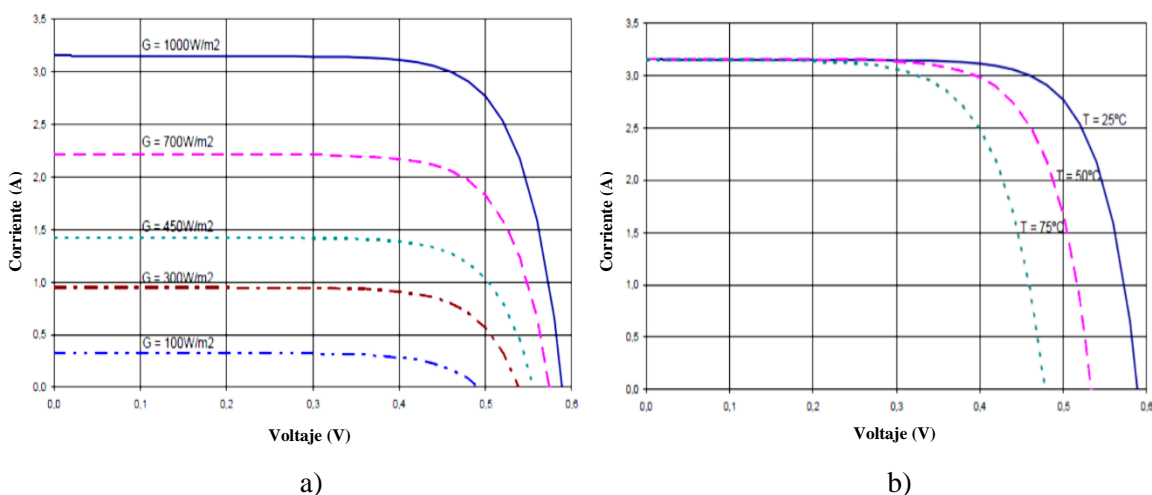


Figura 3.5. Comportamiento de curvas I-V bajo distintas condiciones de a) radiación solar y b) temperatura. Fuente: Willians, 2012.

CAPÍTULO 4. DESARROLLO Y MONITOREO DE LA RADIACIÓN SOLAR

4.1. Metodología

En este capítulo se abordarán los procesos y métodos empleados para el monitoreo de radiación solar en la zona de estudio (ver Figura 4.1), en específico se realiza una breve descripción de los parámetros de fabricación y el funcionamiento de los prototipos de medición basados en celdas solares de CdTe, asimismo se menciona la estrategia de medición en conjunto con el piranómetro comercial, incluyendo el análisis de resultados y la verificación comparativa entre ambas mediciones.

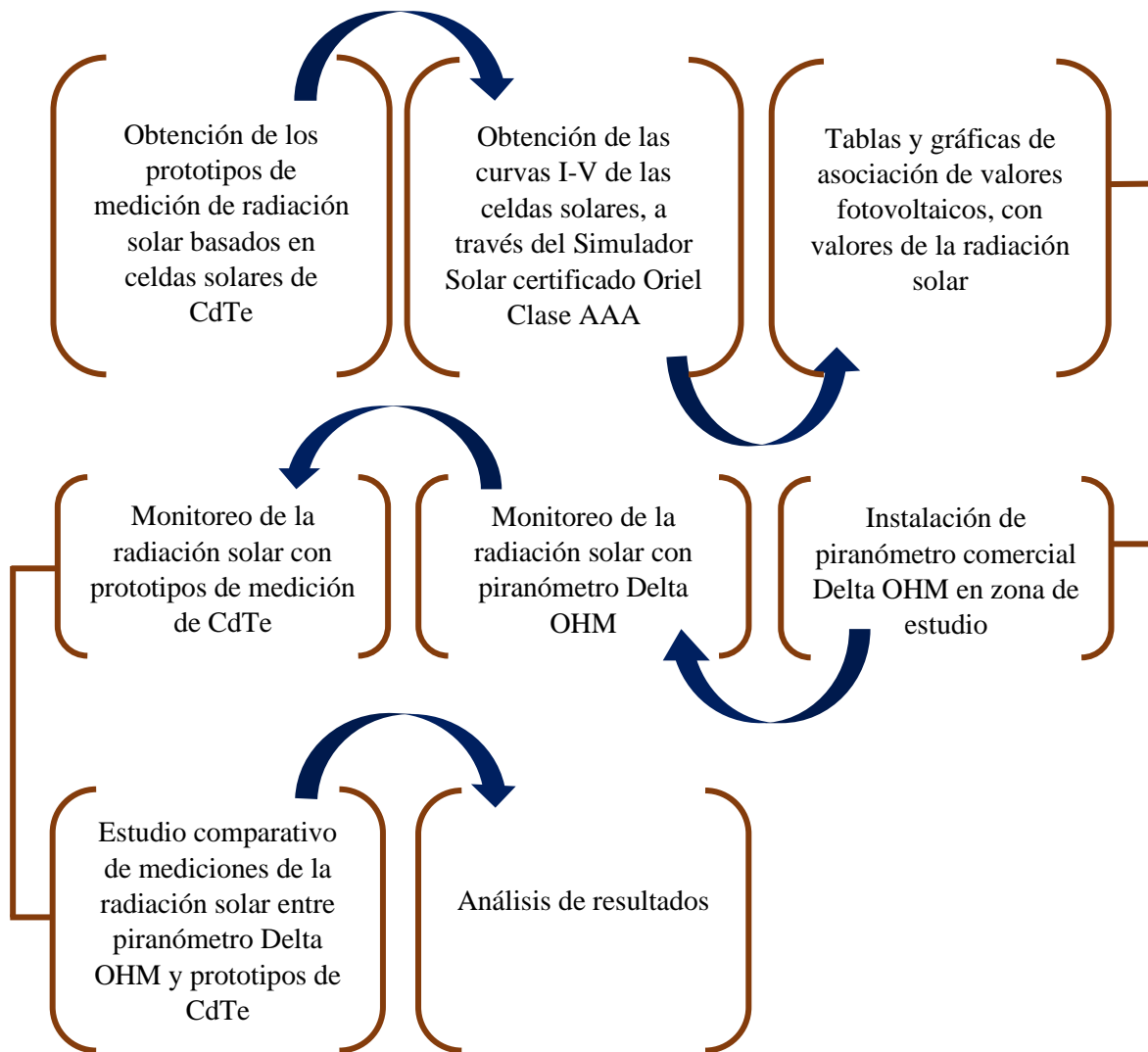


Figura 4.1. Procedimiento para el monitoreo de la radiación solar. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Estructura de los prototipos de medición de radiación solar con celdas solares de CdTe

En este trabajo, se implementaron dos prototipos de medición de radiación solar, identificados como CSserie y CSparalelo, su elaboración se llevó a cabo en el Laboratorio de Ciencias y Tecnología Sustentable (LACyTES), perteneciente a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México. El desarrollo y parámetros de depósito, se describen brevemente en la Figura 4.2, para conocer el proceso detalladamente ver Reyes, D. “Diseño y construcción de un piranómetro basado en celdas de telurio de cadmio (CdTe) para la medición del recurso solar”. Universidad Politécnica de Sinaloa.

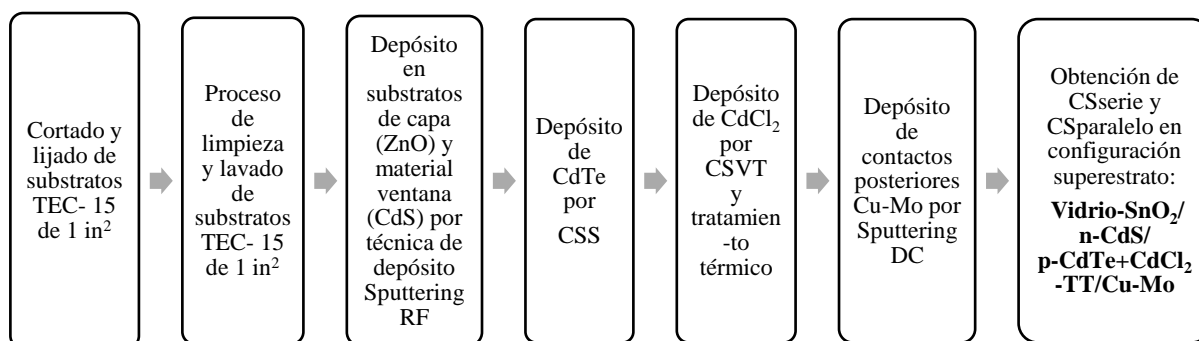


Figura 4.2. Procesamiento de celdas solares de CdTe. Fuente: Elaboración propia.

Preparación de substratos

Cuando los vidrios se encontraron cortados y lijados, se llevó a cabo un proceso de limpieza y lavado, con una disolución de agua destilada y detergente alcalino, seguido de acetona y alcohol isopropílico, por último, se sometieron a un secado con nitrógeno seco industrial y se envolvieron en papel aluminio para después almacenarlos en un espacio libre de polvo y humedad. El proceso anterior consistió en disminuir y/o eliminar cualquier tipo de impurezas previo al depósito de materiales de ZnO y CdS por el sistema Sputtering RF.

Depósito de ZnO y CdS por técnica de depósito Sputtering RF

Para ZnO y CdS depositados por Sputtering RF en CSserie y CSparalelo, se establecieron los siguientes parámetros de depósito, ver Tabla 4.1. El espesor (d) obtenido para CSserie y CSparalelo, después del crecimiento de materiales de ZnO + CdS, fue de 218 y 225 nm, respectivamente. El valor de transmitancia (T) en porcentaje (%), indicó la cantidad de energía que pasó a través de ZnO + CdS, a cierto intervalo de longitud de onda. En la Figura 4.3, se muestran las curvas de transmitancia óptica promedio, obteniendo transmitancias de 75 a 95%, entre longitudes de onda de 500 hasta 900 nm. Asimismo, para ambas curvas de transmitancia (CSserie y CSparalelo), se observó el cambio del punto de inflexión del material de ZnO (a 370 y 360 nm, respectivamente) y CdS (a 500 y 490 nm), lo anterior, permitió determinar la banda prohibida de energía (E_g) de cada material, en función de la ecuación 4.1, simplificando el producto de $hc = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}$.

$$E_g = \frac{hc}{\lambda_c} \quad (4.1)$$

Donde:

E_g = banda prohibida de energía.

h = constante de Planck ($4.14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$).

c = velocidad de la luz ($3 \times 10^{17} \text{ nm/s}$).

λ_c = longitud de onda de corte para CSserie y CSparalelo.

Tabla 4.1. Parámetros de depósito de ZnO y CdS.

CS	Material	Presión (mTorr)	P (W)	Temp (°C)	t_d (min)	d (nm) ZnO+ CdS	T (%) ZnO+ CdS	E_g (eV)
CSserie	ZnO	10	140	250	90	218	88.5	3.35
	CdS	15	100	225	120			2.48
CSparalelo	ZnO	10	140	250	90	225	76.8	3.44
	CdS	15	100	225	120			2.53

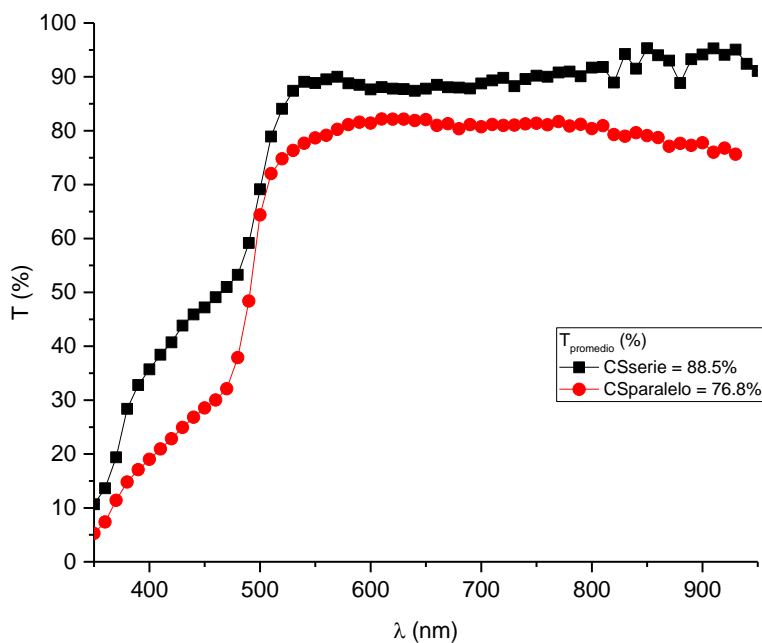


Figura 4.3. Transmitancia de ZnO+CdS de CSserie y CSparalelo.

Depósito de CdTe por CSS

El depósito del material absorbente de CdTe se realizó por la técnica de sublimación en espacio cercano (CSS, por sus siglas en inglés), al igual que la técnica de depósito por Sputtering RF, este proceso también se efectuó en condiciones de alto vacío.

Tabla 4.2. Parámetros de depósito de CdTe.

CS	Material	Presión (mTorr) Ar + O ₂	T _f (°C)	T _s (°C)	t _a (min)	d (μm)
CSserie	CdTe	50+50	580	500	4	5.2
CSparalelo						7.6

T_f – Temperatura de fuente.

T_s – Temperatura de sustrato.

Depósito de CdCl₂ por CSVT

Después del depósito de la capa de CdTe, como se observa en la Tabla 4.3, se llevó a cabo un depósito de cloruro de cadmio (CdCl₂) por transporte de vapor en espacio cerrado (CSVT, por sus siglas en inglés) y al finalizar en una mufla, se realizó un tratamiento térmico durante 30 minutos a una temperatura de 400 °C.

Tabla 4.3. Parámetros de depósito de CdCl₂.

CS	Material	Presión (mTorr) Ar	T _f (°C)	T _s (°C)	t _d (min)
CSserie	CdCl ₂	100	220	360	3
CSparalelo					

Depósito de contactos posteriores Cu-Mo

El depósito de los contactos se efectuó mediante la técnica de erosión catódica magneto planar en corriente directa (Sputtering DC), como arreglo particular del equipo, los magnetrones que lo conforman, cuentan con cobre (Cu) y molibdeno (Mo) como targets de material sólido. El proceso de depósito es semejante al que se llevó a cabo por Sputtering RF, no obstante, se establecieron distintas condiciones de temperatura, presión de trabajo, potencia suministrada y tiempo de depósito.

Tabla 4.4. Parámetros de depósito de Cu y Mo.

CS	Material	Presión (mTorr)	P (W)	Temp (°C)	t _a (min)	d (nm) ZnO+CdS
CSserie y CSparalelo	Cu	9	100	100	1:20	10
	Mo	6	250	200	18:30	300

Proceso de aislamiento e interconexión de CSserie y CSparalelo

Para el aislamiento eléctrico se realizó un rayado al área total de aprovechamiento de las celdas solares e individualmente se obtuvieron nueve subceldas, el proceso se desarrolló a través de un sistema de escritura láser que consiste en el uso de un láser Explorer UV DPSS 120 uJ @ 1kHz de 349 nm a 4000 Hz y 4 A de corriente, con un sistema de movimiento XY por medio de dos servomotores, todo el sistema de escritura láser fue controlado por el software LabVIEW. A pesar de que se logró un aislamiento eléctrico, este mismo proceso dejó al descubierto materiales depositados, lo que puede causar cortocircuitos entre los materiales (Fierro, 2020). Por este motivo, se planeó un nuevo proceso de aislamiento, el cual se efectuó con policat sobre las líneas de rayado de escritura láser, mediante la técnica de serigrafía.

La interconexión eléctrica entre las subceldas se llevó a cabo a través de un plumón conductivo de níquel (Ni), debido a que reduce las pérdidas por conducción en el circuito. En particular, la planeación para el tipo de interconexión en las celdas, se estableció de la siguiente manera, CSserie con una interconexión en serie (donde la corriente entregada es constante y los valores de voltaje se suman) y CSparalelo con una interconexión en paralelo (donde el voltaje entregado es constante y los valores de corriente se suman), ver Figura 4.4.



Figura 4.4. Aislamiento e interconexión eléctrica de a) CSserie y b) CSparalelo. Fuente: Reyes, 2021.

Estrategia de encapsulado

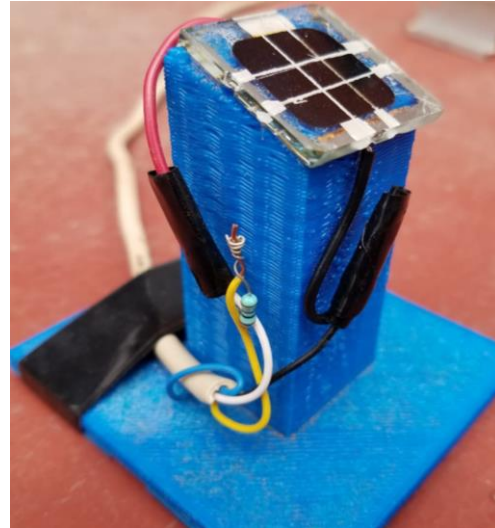
En este trabajo, de forma estratégica se propuso el encapsulado de CSserie a excepción de CSparalelo, al que se le proporcionó por medio de una base, una elevación de 6 cm y un ángulo de inclinación de 18.2° cercano a la latitud de la Ciudad de México, obtenido a través de una impresora 3D de la marca MakerMex, modelo MM1, ver Figura 4.5 a) y b).

Durante el proceso de encapsulado de CSserie, se requirió de material endurecedor basado en una resina epóxica blanca para circuitos eléctricos con algunas propiedades como: rigidez dieléctrica 100 Kv/c; temperatura de operación máxima 120-130 °C; contracción 0.05 % y resistencia a la tensión 400 Kgf/cm² (Fierro, 2020).

Realizar el encapsulado o no, tiene como propósito comparar el rendimiento de operación en campo y la factibilidad de conservación de las celdas solares, ante las diferentes condiciones meteorológicas manifestadas a lo largo del día.



a)



b)

Figura 4.5. a) CSserie encapsulada y b) CSparalelo con elevación, ángulo de inclinación y sin encapsulado.

4.3. Principio de funcionamiento de prototipos de medición de radiación solar de CdTe

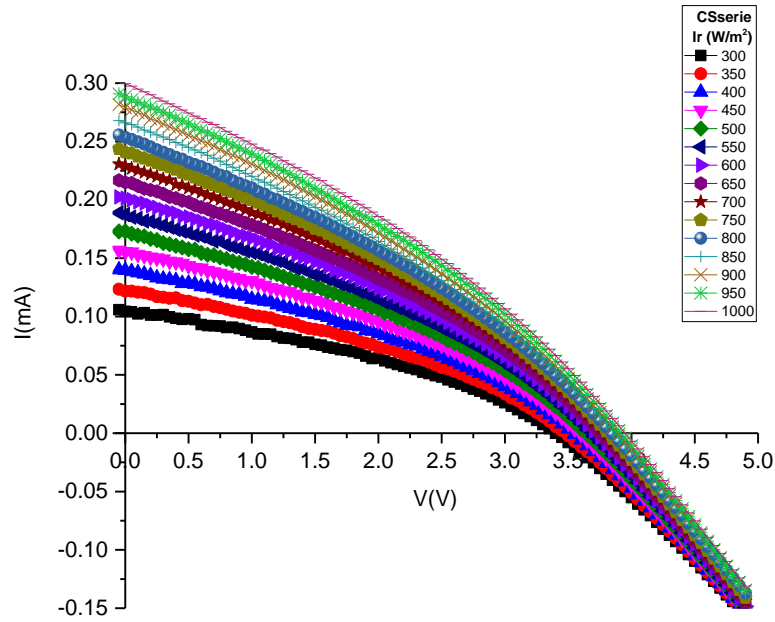
Una celda solar es sensible a los niveles de la irradiancia solar (I_r) y a las diferentes condiciones meteorológicas como la temperatura, humedad, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, entre otros; sus variaciones afectan directamente a los parámetros fotovoltaicos, mismos que determinan el rendimiento de operación de la celda. En particular, la variable de referencia utilizada fue la I_r , sus modificaciones permitieron determinar los cambios en los parámetros de corriente de carga (I_c) y voltaje a circuito abierto (V_{oc}), emitidos por los prototipos de medición de CdTe.

Para ambas celdas, CSerie y CSparalelo, se realizaron pruebas para la obtención de I_c y V_{oc} , por medio del Simulador Solar certificado Oriel Clase AAA, bajo condiciones ideales (STC) a 1000 W/m^2 , AM1.5 y $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (ver apartado 3.5). Durante las mediciones de I_c y V_{oc} , se emplearon variaciones de radiación solar de 50 W/m^2 , en un rango comprendido de 300 a 1000 W/m^2 . Para valores de 0 a 300 W/m^2 , los cuales no fueron entregados por el Simulador Solar, debido a su nivel de medición limitante especificado en su hoja de certificación, se desarrolló una interpolación de datos a través del software OriginPro para determinar los valores restantes de I_c y V_{oc} . Al obtener los datos complementarios, se observó una relación existente entre las variables: I_c , V_{oc} y la I_r , en un rango de medición de la radiación solar comprendido entre 0 a 1000 W/m^2 , valores que se fueron agrupando y almacenando para posteriormente asociarlos a datos de I_c y V_{oc} detectados por CSerie y CSparalelo, pero ahora bajo condiciones de operación real al exterior.

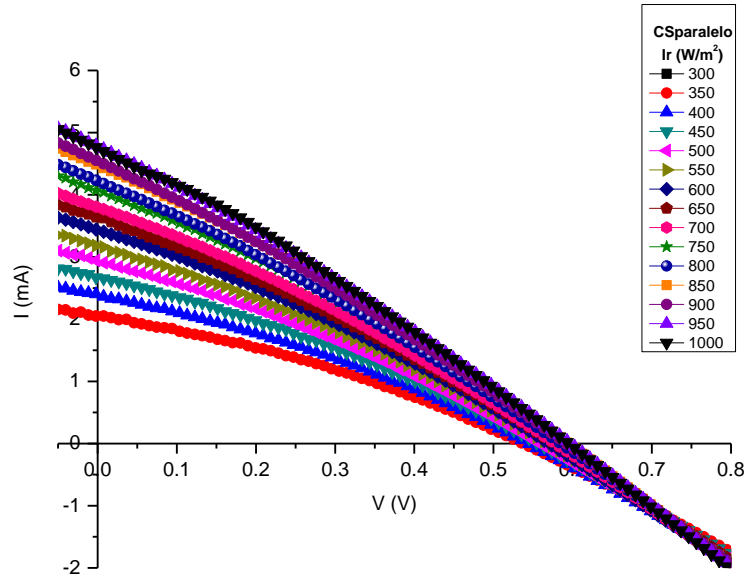
4.3.1. Medición de curvas I-V variando los niveles de la radiación solar (I_r)

En la Figura 4.6, se observan las curvas características I-V de CSerie y CSparalelo, medidas bajo condiciones STC, con variaciones en la I_r de 300 a 1000 W/m^2 , a través del Simulador Solar certificado Oriel Clase AAA. En las curvas de CSerie, se precisaron valores de voltaje de 3.388 a 3.943 V y valores de corriente de 0.105 a 0.300 mA; mientras tanto para CSparalelo, se alcanzaron valores de voltaje de 0.522 a 0.597 V y valores de corriente de 2.054 a 4.825 mA, mismos que se especificaron en la Tabla 4.5 y en donde se establecieron

los valores exactos correspondientes a I_c y V_{oc} , en relación a las variaciones que presentó la I_r .



a)



b)

Figura 4.6. Curvas I-V de a) CSserie y b) CSparalelo a diferentes niveles de la I_r .

Tabla 4.5. Valores de I_c y V_{oc} a diferentes niveles de la I_r .

Niveles de I_r (W/m^2)	CSserie		CSparalelo	
	I_c (mA)	V_{oc} (V)	I_c (mA)	V_{oc} (V)
300	0.105	3.388	2.054	0.522
350	0.122	3.464	2.386	0.537
400	0.140	3.527	2.678	0.544
450	0.156	3.580	2.936	0.556
500	0.172	3.629	3.177	0.558
550	0.187	3.670	3.434	0.568
600	0.201	3.706	3.631	0.570
650	0.215	3.743	3.800	0.577
700	0.229	3.775	4.066	0.578
750	0.241	3.806	4.221	0.585
800	0.254	3.838	4.472	0.587
850	0.266	3.862	4.542	0.592
900	0.279	3.888	4.748	0.594
950	0.288	3.911	4.780	0.595
1000	0.300	3.943	4.825	0.597

Como se observa en la Figura 4.6 y en la Tabla 4.5, en un intervalo de 300 a 1000 W/m² de la Ir, CSserie presentó una variación de 195 μA de Ic y 555 mV de Voc. En incrementos de 50 W/m², para Ic y Voc, prevalecieron variaciones promedio de 17 μA y 76 mV respectivamente; observando las modificaciones mínimas en Ic, esto puede resultar inconveniente al momento de su aplicación al exterior, debido a la minúscula variación de Ic detectado, al cual será difícil asociar un valor puntual de la Ir. De acuerdo a lo anterior y haciendo referencia a su interconexión en serie, donde el voltaje cambia y la corriente se mantiene casi constante; se tomó la decisión que, durante su medición en campo, las variaciones de Ic no serán adecuadas, a causa de sus valores imperceptibles de cambio; por lo tanto, para CSserie se seleccionó únicamente la medición de Voc.

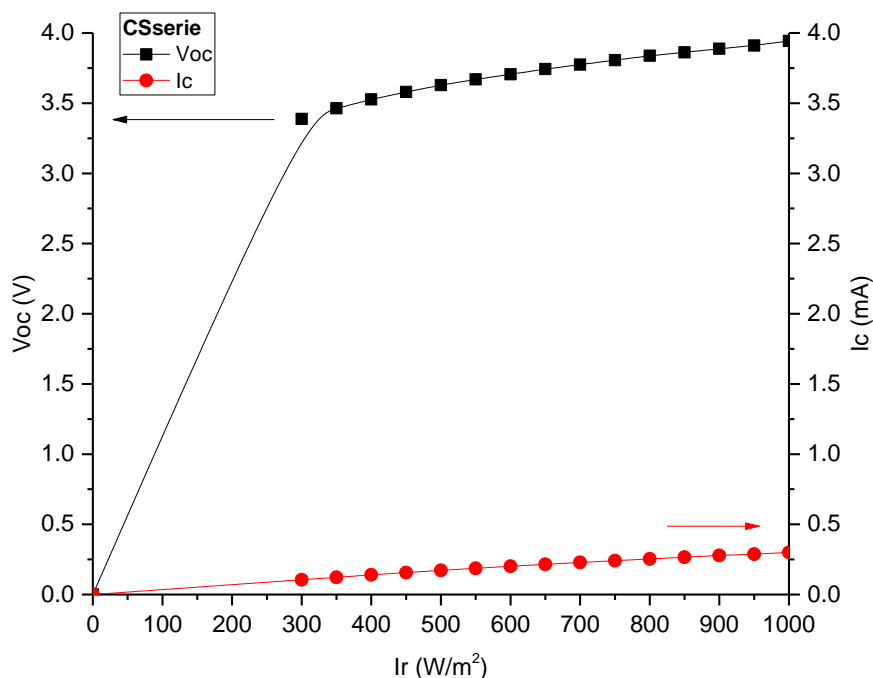
En el caso de CSparalelo, en un intervalo de 300 a 1000 W/m² de la Ir, mostró una variación de 2.771 mA de Ic y 75 mV de Voc. En incrementos de 50 W/m², para Ic y Voc, sus variaciones promedio fueron de 332 μA y 15 mV respectivamente, aunque Ic presentó la menor variación, se puede ver en la Tabla 4.5 que Voc varía poco en función de los cambios de la Ir, por lo tanto, resulta impreciso asociar un valor cuando este se encuentra instalado al exterior, además de considerar su interconexión en paralelo, donde el voltaje se mantiene casi constante y la corriente cambia, se determinó realizar la medición de Ic.

La planeación de medición y monitoreo de las variables de Ic en CSparalelo y de Voc en CSserie, consistió en obtener los valores de dichos parámetros cuando estos se encontraran montados al exterior y sujetos a las condiciones de operación real, con la finalidad de asociarles los niveles de la Ir mostrados en la tabla anterior y conjuntamente establecer una comparativa entre los resultados de la Ir obtenidos por ambas celdas y los niveles de radiación solar detectados por el piranómetro comercial.

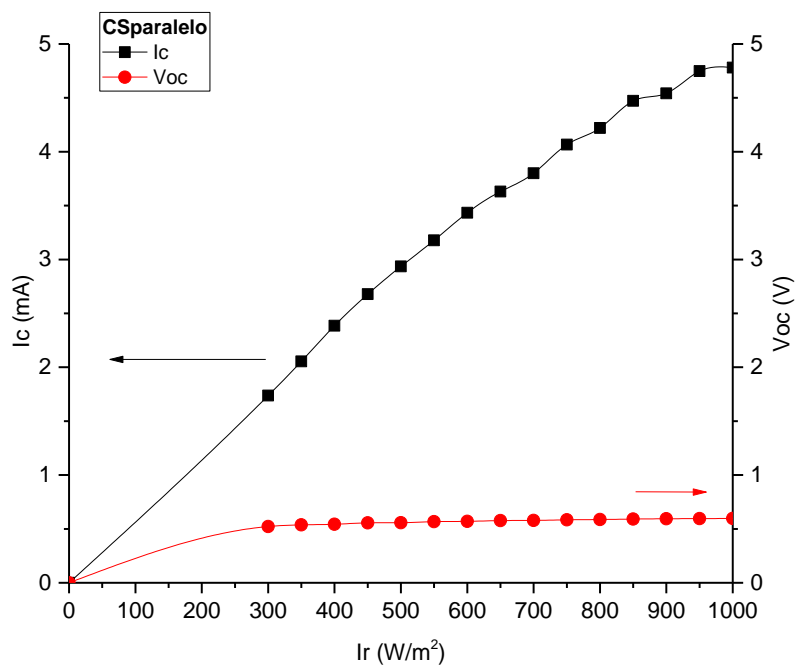
4.3.2. Tablas y gráficas de la I_r con los prototipos de medición de CdTe

De acuerdo a los datos de la Tabla 4.5, se realizaron gráficas de I_c , V_{oc} y la I_r , como los que se muestran en la Figura 4.7. En el inciso a), correspondiente a CS_{serie} se observó significativamente el incremento de V_{oc} en función del aumento de la I_r ; considerando que, cuando el nivel es de 0 W/m^2 , el valor de V_{oc} debe ser nulo, de modo que, si no hay incidencia de radiación solar, CS_{serie} no ofrece ningún tipo de respuesta y a 1000 W/m^2 , alcanza el valor máximo proporcionado de 3.943 V .

En el inciso b) de $CS_{paralelo}$, se observa que también no existe respuesta de I_c y V_{oc} a valores nulos de la I_r , no obstante, se mostró que el incremento de I_c fue más representativo y el valor de corriente máxima alcanzado fue de 4.825 mA a 1000 W/m^2 , a diferencia de V_{oc} , donde sus valores proporcionados no presentaron una gran variación y se observaron casi equivalentes.



a)



b)

Figura 4.7. Comparación de parámetros I_c y V_{oc} en relación a los niveles de la I_r , a) CS_{serie} y b) $CS_{paralelo}$.

Finalmente, en la Tabla 4.6, se incluyeron los valores complementarios de I_c y V_{oc} , a partir de 0 a 300 W/m^2 , cuyo procedimiento se basó en una interpolación de datos a través del software OriginPro. En este trabajo, los datos mostrados de I_c y V_{oc} en el rango de 0 a 1000 W/m^2 , se utilizaron como referencia principal para cuando los prototipos se encuentren montados al exterior y en el proceso asociativo de I_c y V_{oc} correspondientes a los niveles de I_r .

Tabla 4.6. Valores de I_c y V_{oc} , en referencia a los niveles de la I_r .

$CS_{serie} - V_{oc} \text{ (V)}$	$CS_{paralelo} - I_c \text{ (mA)}$	$I_r \text{ (W/m}^2\text{)}$
0	0	0
0.591	0.286	50

1.128	0.562	100
1.698	0.860	150
2.249	1.135	200
2.769	1.445	250
3.388	1.737	300
3.464	2.054	350
3.527	2.386	400
3.580	2.678	450
3.629	2.936	500
3.670	3.177	550
3.706	3.434	600
3.743	3.631	650
3.775	3.800	700
3.806	4.066	750
3.838	4.221	800
3.862	4.472	850
3.888	4.542	900
3.911	4.748	950
3.943	4.780	1000

4.4. Monitoreo de radiación solar

El monitoreo de radiación solar se pretendía realizar en las instalaciones de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, sin embargo, debido a la contingencia sanitaria por COVID-19, este no pudo llevarse a cabo. Por ese motivo, con el apoyo del Dr. Rogelio Mendoza Pérez y la administración académica, se aprobó el préstamo temporal de los equipos necesarios para la obtención de los resultados que se mostrarán más adelante.

La zona de estudio donde se realizaron las mediciones de la irradiancia solar, se encuentra ubicado en la Ciudad de México, el sitio cuenta con una latitud de 19.27613 (19°16'34.0667" N), longitud de -99.12556 (99°7'32.0277" O) y altitud de +2,207.3 msnm. Algunas variables meteorológicas promedio anual en Ciudad de México son: temperatura entre 16.7 °C y 19.4 °C, humedad relativa de 57.1%, precipitación acumulada de 786.2 mm, presión barométrica de 584.9 mmHg, velocidad de viento de 2 m/s y conforme a Global Solar Atlas del Banco Mundial, una irradiación solar global horizontal promedio de 5.64 kW-h/m² por día; además las concentraciones promedio de los contaminantes más comunes en Ciudad de México son: dióxido de azufre (SO₂) con 4.3 ppb (partes por billón), óxidos de nitrógeno (NO_x) con 41 ppb, monóxido de carbono (CO) con 0.4 ppm, ozono (O₃) con 30 ppb y partículas suspendidas PM₁₀ con 74 µg/m³ (Sedema, 2018).

La estrategia de monitoreo se fundamentó en la utilización de CSserie y CSparalelo, para la medición y cuantificación del recurso solar, en función de la corriente (I_c) y voltaje producido (V_{oc}). Los datos obtenidos fueron estudiados y comparados con un instrumento comercial de medición, con la finalidad de realizar un comparativo extenso entre los prototipos fabricados a menor costo y los instrumentos comerciales, actualmente operativos en las prácticas de medición de energía solar.

4.4.1. Prueba comparativa de piranómetros y celda de calibración del Simulador Solar certificado Oriel Clase AAA

En este apartado, se efectuó una prueba comparativa de tres puntos bajo condiciones STC, donde se incluyó a la celda de calibración del Simulador Solar certificado Oriel Clase AAA y dos piranómetros comerciales marca EKO y Delta OHM. Lo anterior permitió visualizar y

asociar el porcentaje de error existente en las mediciones de radiación solar detectados por los piranómetros, tomando como referencia a la celda de calibración del Simulador Solar certificado, además conjuntamente se aseguró la proporción de datos mucho más confiables y con un menor porcentaje de error asociado.

En la Figura 4.8, se señaló en la pantalla azul las mediciones detectadas por los piranómetros EKO y Delta OHM, cuyos valores de radiación solar alcanzados fueron de 1003.2 y 1000.4 W/m² respectivamente, mientras tanto, el valor de radiación solar proporcionado por la celda de calibración del Simulador Solar fue de 960.2 W/m². La diferencia de medición de la Ir en porcentaje, entre el piranómetro EKO (pantalla azul, lado izquierdo) y la celda de referencia del Simulador, fue de 4.29%, en cambio, el piranómetro Delta OHM (pantalla azul, lado derecho) sostuvo una diferencia de 4.02%.

Debido al menor porcentaje de error alcanzado por el piranómetro Delta OHM, este se seleccionó estratégicamente para su aplicación en la medición del recurso solar en campo, el cual sirvió como referencia fundamental y como método de comparación con los prototipos CSserie y CSparalelo.

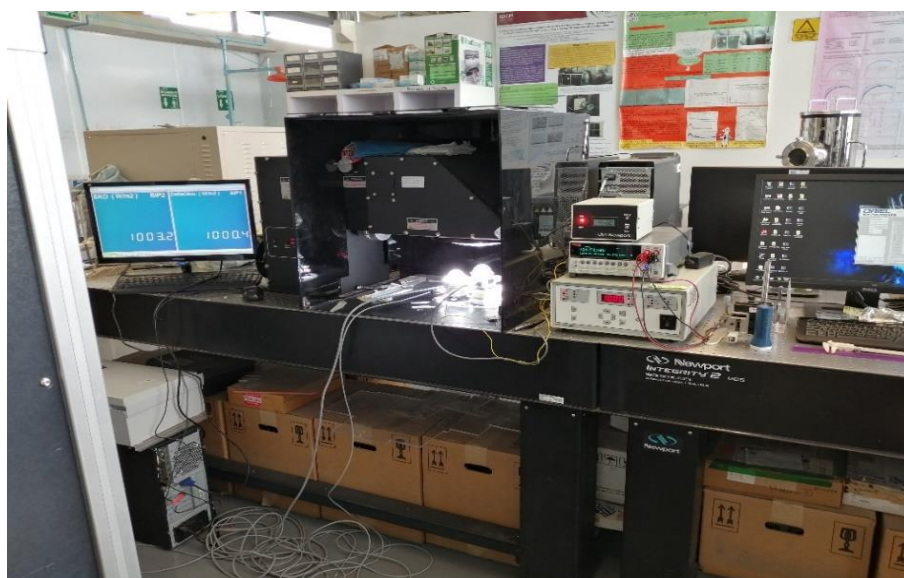


Figura 4.8. Prueba comparativa entre celda de calibración de Simulador Solar certificado Oriel Clase AAA y piranómetros marca EKO y Delta OHM.

4.4.2. Piranómetro comercial Delta OHM

El piranómetro seleccionado para llevar a cabo el monitoreo de la radiación solar, se observa en la Figura 4.9, su clasificación pertenece a la Clase B (Primera clase), en concordancia con la norma ISO 9060:2018 y con los criterios de la OMM (como se mencionó en la sección 2.2.2); este presenta un diseño robusto e incluye dos cúpulas concéntricas de 32 y 50 mm de diámetro individual, asimismo posee como elemento sensor a una termopila, que al recibir un flujo de radiación solar genera una diferencia de potencial proporcional a la irradiancia solar global detectada.



Figura 4.9. Piranómetro Delta OHM LP PYRA 02.

El equipo fue calibrado desde fábrica y se entregó con su respectivo informe, no obstante Delta OHM aconseja verificar la calibración de forma anual. El coeficiente de sensibilidad del piranómetro es de $12.32 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$, variable que, en conjunto con la diferencia de potencial presentada, permite determinar la irradiancia solar global en W/m^2 ; las especificaciones técnicas se encontraron en el manual de operación LP PYRA 02 Delta OHM y también fueron resumidas a continuación:

Tabla 4.7. Especificaciones técnicas del piranómetro Delta OHM LP PYRA 02.

Especificaciones técnicas	
Sensor	Termopila
Sensibilidad típica	6÷12 $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
Rango de medición	0÷2000/4000 W/m^2
Campo espectral (transmisión de las cúpulas)	305 nm ÷ 2800 nm W/m^2 (50%)
	335 nm ÷ 2200 nm W/m^2 (95%)
Temperatura/humedad de operación	-40÷80 °C / 0÷100%
Longitud de cable	2 m – 10 m
Peso	0.9 kg
Especificaciones técnicas de acuerdo a ISO 9060:2018	
Tiempo de respuesta (95%)	< 28 sec
Ajuste a Cero	
a) Respuesta a 200 W/m^2 de radiación térmica	< 15 W/m^2
b) Respuesta a un cambio de 5 K/h en temperatura ambiente	< $ \pm 4 \text{ W}/\text{m}^2$
No linealidad (a 1000 W/m^2)	< $ \pm 1 \text{ W}/\text{m}^2$
Respuesta a la temperatura (-10...+ 40°C)	< 4 %
Respuesta de inclinación	$ \pm 2 \%$

4.4.3. Medición de la radiación solar con piranómetro Delta OHM

El piranómetro se colocó firmemente sobre una base sólida, estable y horizontal, con orientación hacia el sur y fijación de captación de rayos solares desde el lado este hasta el oeste, se verificó que la zona permaneciera libre de obstáculos y lejos de cualquier elemento que pudiese proyectar sombra; con los tornillos de ajuste se niveló la posición del instrumento para situar el nivel de burbuja al centro del círculo señalado y se aseguró con cinchos de nylon (ver Figura 4.10).

El almacenamiento de datos se realizó por medio de una conexión múltiple; con un cable de longitud de 10 metros se acopló el piranómetro hasta el sistema de adquisición de datos Data

Logger HD32MT.1, posteriormente con un cable adaptador (RS-32 a USB) se fijó una comunicación serial entre el adquisidor de datos y un equipo de cómputo, para realizar la transferencia y almacenamiento de datos cada 30 segundos, en el Software HD32MTLogger de Delta OHM.



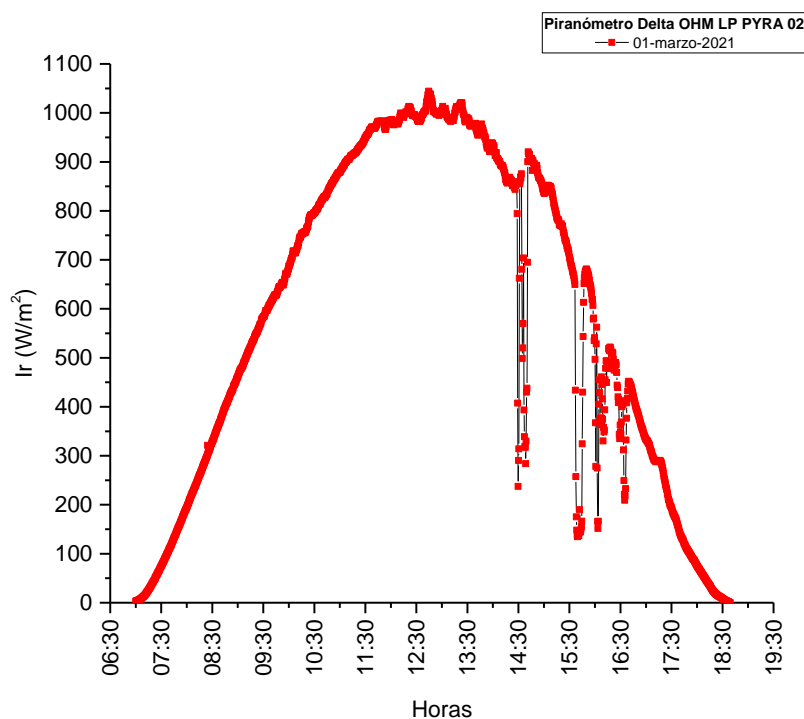
Figura 4.10. Montaje de piranómetro Delta OHM en la zona de estudio.

Previo al inicio de la medición de radiación solar, en los días 27 y 28 de febrero de 2021, se realizaron pruebas de supervisión al piranómetro, durante el proceso se observó que horas antes de las 07:00 y después de las 19:00, los valores de irradiancia solar eran ceros o negativos, por lo tanto, fuera de ese horario no se consideraron los datos registrados.

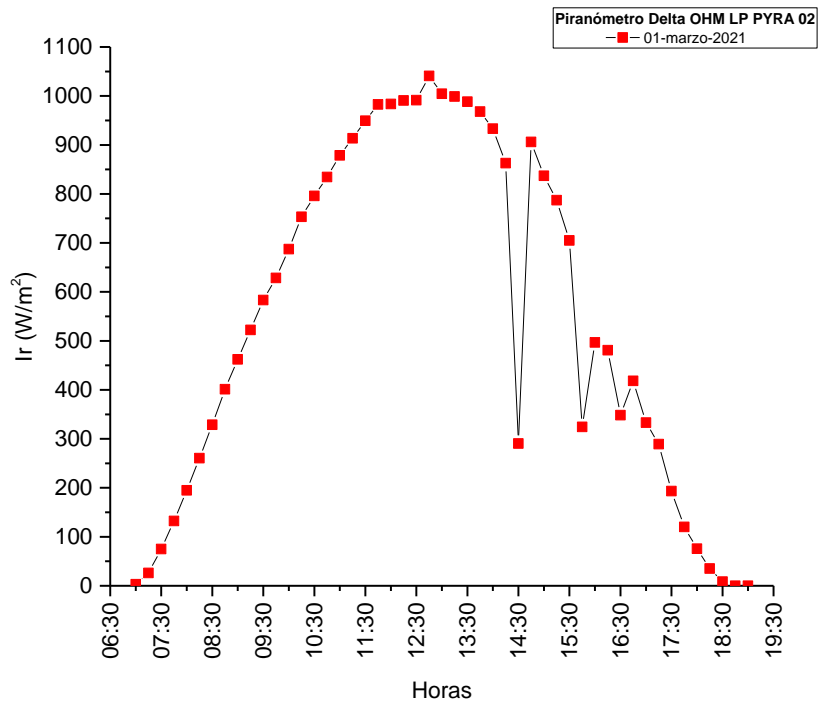
Formalmente el periodo de medición se estableció desde el día 1 hasta el 31 de marzo, en un horario de 07:00 a 19:00 horas; sin embargo, al finalizar el registro del primer día de marzo, como se observa en el inciso a) de la Figura 4.11, se consiguió un total de 1440 datos de la irradiancia solar por el almacenamiento continuo de cada 30 segundos. Esto resultó complicado luego de que el método de comparación en conjunto con CSserie y CSparalelo, se pretendía obtener de forma manual, por consiguiente, en un intervalo de tiempo muy corto, la medición de variables de I_c y V_{oc} resultaría impreciso y poco confiable.

Como se muestra en la Figura 4.11, incisos b) y c), se establecieron lapsos de tiempo que pudiesen ser ajustables en relación a la obtención de I_c y V_{oc} , por lo tanto, se implantaron intervalos de medición de la irradiancia solar en periodos de 15 minutos y 1 hora.

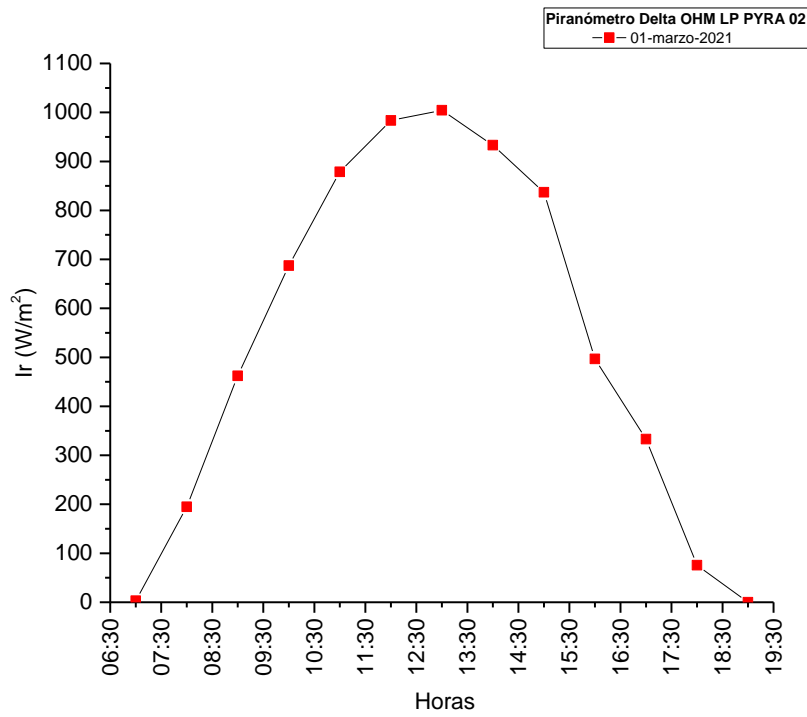
Las curvas de la irradiancia solar de la Figura 4.11, incisos b) y c) parecieron conservar el mismo comportamiento a la inicial, no obstante, en c) se omitieron ciertos picos y caídas de radiación solar, por ejemplo, en las curvas a) y b), se observó la disminución de la I_r alrededor de las 14:30 a 17:00 horas debido a la nubosidad presente en ese momento, mientras que en c) por la omisión de datos en el largo intervalo de tiempo, no se mostraron aquellas reducciones. Por consiguiente, para optimizar la comparación de datos adquiridos entre el piranómetro - CSserie y CSparalelo, en el horario ya señalado anteriormente y sin que esto represente una pérdida significativa de información, se decidió para los días siguientes obtener el registro de datos en un intervalo de tiempo definido de cada 15 minutos.



a)



b)



c)

Figura 4.11. Mediciones de la Ir cada a) 30 segundos, b) 15 minutos y c) 1 hora con piranómetro Delta OHM.

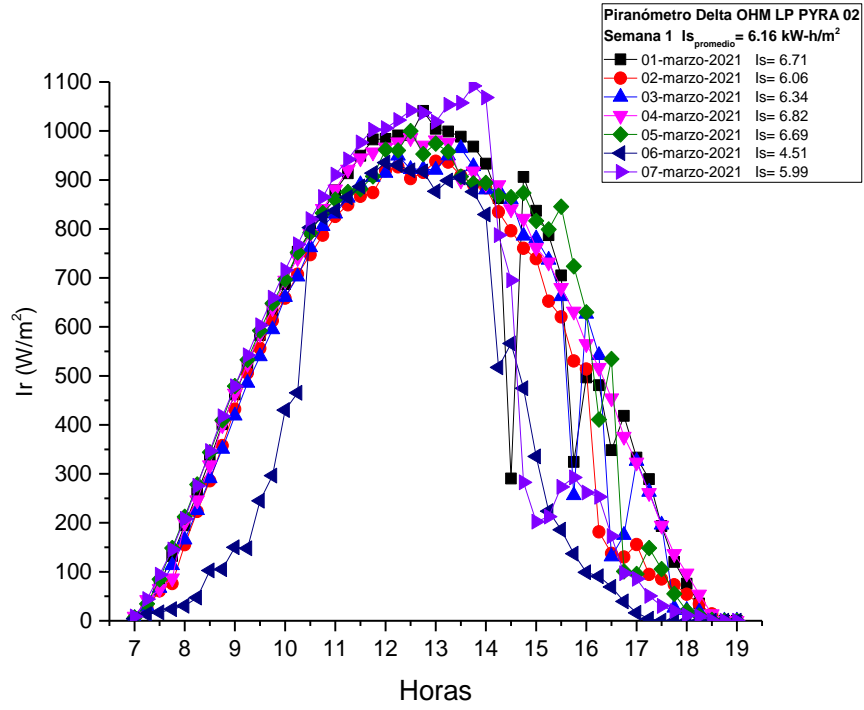
En seguida se muestran las curvas de la irradiancia solar correspondientes al mes de marzo, la distribución de las mediciones se realizó con base a la Tabla 4.8, agrupados en un promedio de 7 curvas por semana, este mismo arreglo fue empleado para CSserie y CSparalelo, con la finalidad de observar la distribución de datos, en relación a los valores arrojados por cada periodo semanal.

Tabla 4.8. Distribución semanal de medición del recurso solar.

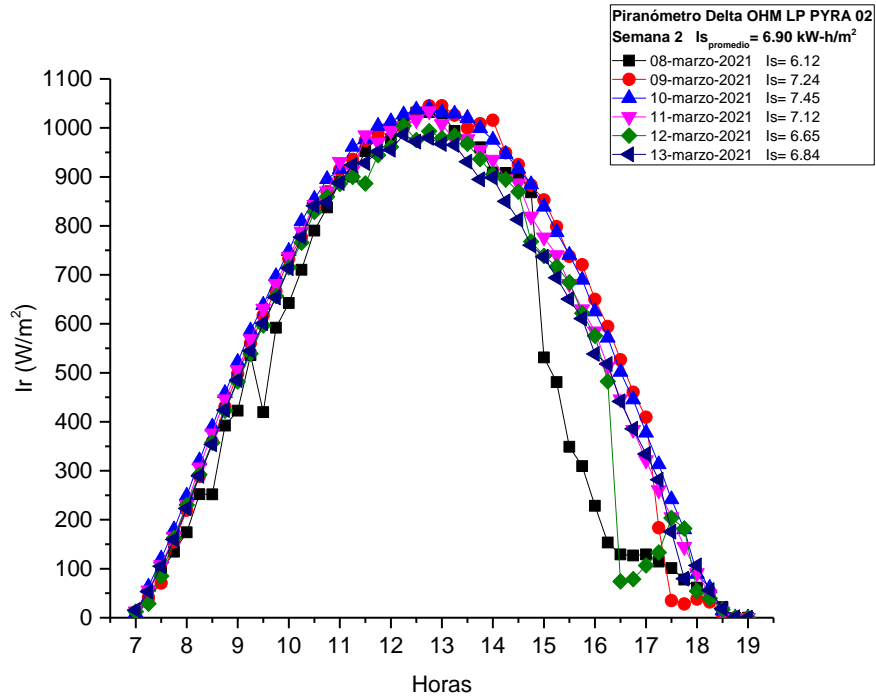
MARZO 2021			
(Piranómetro Delta OHM - CSserie y CSparalelo)			
Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
01 al 07	08 al 13	15 al 22	23 al 31

En la Figura 4.12, se encuentran las curvas por semana de la radiación solar, cuyos comportamientos se asimilan a una distribución normal estadística conocida como campana de Gauss, el inciso a) corresponde a la semana 1, el inciso b) a la semana 2 y así sucesivamente. Para todas y cada una de las curvas, se realizó el cálculo por día y el promedio semanal de la irradiancia solar, también denominado insolación solar (I_s) en unidades de $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$; el término refiere al flujo de energía solar máximo absorbido en un determinado tiempo, es decir, el equivalente al número de horas al día que se recibió energía del Sol a $1000 \text{ W}/\text{m}^2$. El procedimiento se basó en determinar el área bajo la curva de la irradiancia solar a través del software OriginPro, sin embargo, para su representación gráfica se consideró que el área bajo la curva de la I_r era igual al área de un rectángulo, determinado por $A_r = b \times h$; donde b = número de horas de radiación solar máxima absorbida (eje x) y h = energía del Sol a $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ (eje y).

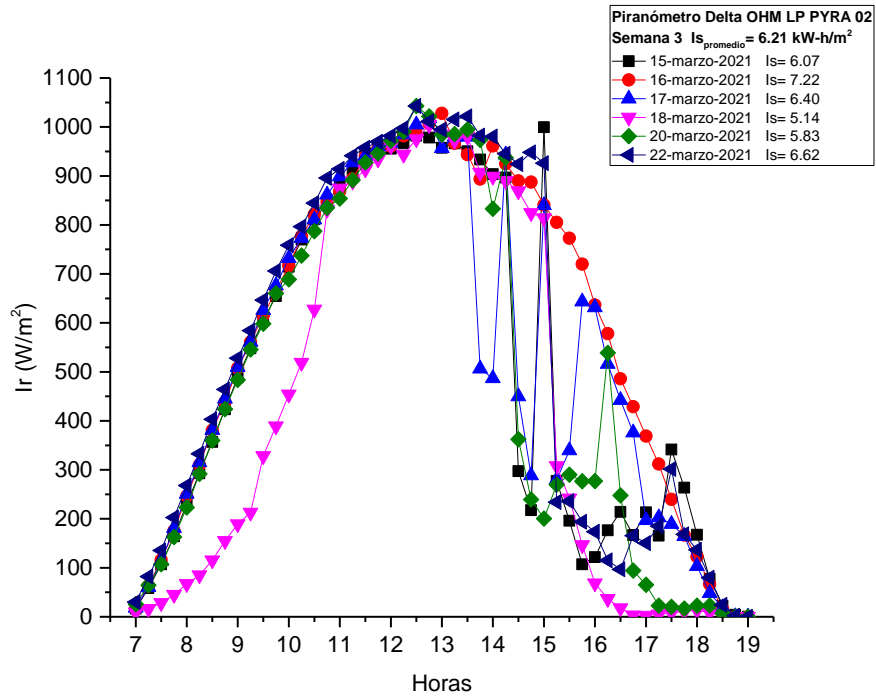
Los primeros datos semanales de la I_r fueron monitoreados en invierno y fue hasta el 21 de marzo que dio inicio la primavera; en la primera semana, la hora de amanecer se presentó entre las 06:55 (01 de marzo) y 06:50 (07 de marzo), los datos de la I_r fueron despreciables incluso a las 07:00 iniciando a $0 \text{ W}/\text{m}^2$, sin embargo, con el transcurso de las semanas, los niveles de la I_r alcanzaron valores más altos a horas de amanecer más anticipados, por ejemplo, en la cuarta semana, con horarios de amanecer de 06:37 (23 de marzo) y 06:30 (31 de marzo), los niveles de la I_r presentaron valores promedio de 15 a $30 \text{ W}/\text{m}^2$, inclusive a las 07:00 horas se alcanzaron datos de 40 a $50 \text{ W}/\text{m}^2$, en consecuencia, las curvas de la I_r iniciaron con un ligero desplazamiento del eje x, ver inciso d) de la Figura 4.12.



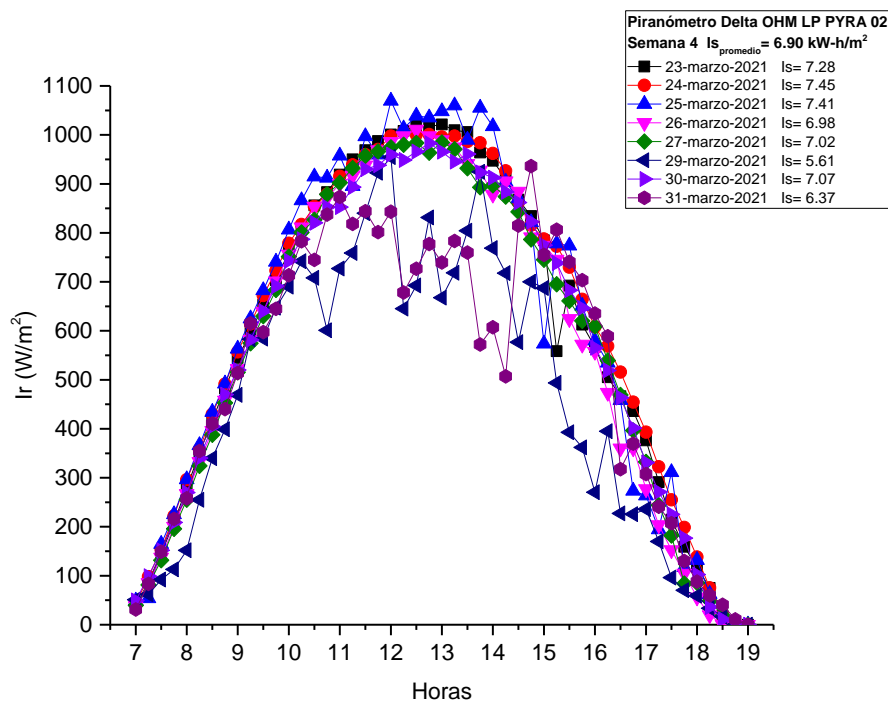
a)



b)



c)



d)

Figura 4.12. Curvas de la irradiancia solar (W/m^2) y promedio semanal de la irradiación solar (kW-h/m^2) con piranómetro Delta OHM.

De manera muy similar se presentó al atardecer; en la primera semana entre las 18:42 (01 de marzo) y 18:43 (07 de marzo), los datos de la I_r ya eran insignificantes, no obstante, en la cuarta semana, con horarios de atardecer relativamente más prolongados entre 18:48 (23 de marzo) y 18:50 (31 de marzo), los niveles de la I_r apenas alcanzaron 0 W/m^2 . De lo anterior se concluye que, de la semana 1 a la semana 4 se obtuvo un mayor recurso solar de aprovechamiento, debido al tiempo agregado de exposición del Sol, consiguiendo datos de la I_r a horarios más anticipados por la mañana y a horarios más retardados por la tarde; acorde al cambio de las estaciones invierno-primavera.

En el inciso a) de la Figura 4.12, se muestran las curvas de la primera semana, en donde se registraron temperaturas máximas promedio de 20 a $30 \text{ }^\circ\text{C}$, temperaturas mínimas promedio de 9 a $11 \text{ }^\circ\text{C}$ y velocidad de viento promedio de 15 km/h , según el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Presentándose días soleados con cielos despejados durante la mayor parte del día y por las tardes parcialmente nubladas, en ocasiones con lluvias ligeras, consiguiendo un promedio semanal de la $I_s = 6.16 \text{ kW-h/m}^2$. El 04 de marzo se caracterizó por ser un día soleado y con escasa nubosidad, además se alcanzó el valor más alto de la $I_s = 6.82 \text{ kW-h/m}^2$, sin embargo, los días 06 y 07, se registraron valores mínimos de 4.51 y 5.99 kW-h/m^2 , dado que el 06 de marzo se mantuvo con un clima fresco por la mañana y por la tarde, y con un registro de vientos fuertes y lluvias aisladas a partir de las 15:00 horas; en cambio el 07 de marzo presentó cielo despejado en la mayor parte del día y después de las 14:30 existieron caídas drásticas de la I_r por presencia de nubosidad, cambiando de un cielo medio nublado a totalmente nublado con lluvias livianas, no obstante, para aquel día se registró el valor más alto de la I_r con 1091.60 W/m^2 .

En el inciso b) de la Figura 4.12, se obtuvo un promedio semanal de la $I_s = 6.90 \text{ kW-h/m}^2$ (el valor más alto del mes, igual que en la semana 4), por día se registraron niveles superiores a los de la semana anterior, obteniendo hasta 7 kW-h/m^2 , con temperaturas máximas promedio de 24 a $32 \text{ }^\circ\text{C}$, temperaturas mínimas promedio de 14 a $19 \text{ }^\circ\text{C}$ y velocidad de viento promedio entre 10 a 20 km/h . En la mayoría de la semana se registraron días soleados y despejados, se consiguieron curvas más definidas y con minúsculas alteraciones debido a los efectos climatológicos. El 10 de marzo se registró un total de 7.45 kW-h/m^2 el valor máximo de la I_s registrado en el mes, de la misma forma se alcanzó un nivel de la $I_r = 1037.2 \text{ W/m}^2$, el

segundo valor más alto de la semana, el primero se obtuvo el 09 de marzo con 1045.3 W/m^2 . Mientras tanto aquellas curvas que presentaron disminuciones de la Ir, correspondieron a los días 08 y 12, donde se registraron los datos más bajos de la Ir y la Is, debido a intervalos nubosos durante el día y a cielos parcialmente nublados por las tardes.

En la tercera semana, inciso c) de la Figura 4.12, se omitió un día de pruebas (19 de marzo) debido a fallas técnicas con el servicio de energía eléctrica, donde se observó que el Software HD32MTLogger no almacenó de forma automática los datos capturados a lo largo del día y hubo pérdida de información total. Por otra parte, se obtuvo un promedio semanal de la Ir = 6.21 kW-h/m^2 , se registraron temperaturas máximas promedio de 24 a $30 \text{ }^\circ\text{C}$, temperaturas mínimas promedio de 12 a $18 \text{ }^\circ\text{C}$ y velocidad de viento promedio entre 20 a 25 km/h ; en la semana se observaron cielos despejados la mayor parte del día, tardes parcialmente nubladas a muy nubladas, lluvias registradas el 15 y 18 de marzo y con caídas significativas de la Ir los días 15, 17, 18 y 22 a partir de las 14:00 a 19:00 horas. El 22 de marzo se alcanzó el nivel más alto registrado de la Ir = 1042.6 W/m^2 y el 16 de marzo se consiguió un valor máximo de la Is = 7.22 kW-h/m^2 , por esa razón se puede observar que en la semana fue la única curva de Is que presentó cierta estabilización durante el día a diferencia de la estrecha curva del 18 de marzo que obtuvo el valor más bajo con la Is = 5.14 kW-h/m^2 .

En el inciso d) de la Figura 4.12, se presentaron temperaturas máximas promedio de 35 a $32 \text{ }^\circ\text{C}$, temperaturas mínimas promedio de 15 a $19 \text{ }^\circ\text{C}$ y velocidad de viento promedio de 20 km/h . En la semana aconteció el cambio de invierno a primavera, se registraron días mayormente soleados y con buenos niveles de la Ir, los valores máximos alcanzados fueron el 25 de marzo con la Ir = 1069.5 W/m^2 y el 24 de marzo con un nivel de la Is = 7.45 kW-h/m^2 . Sin embargo, los días 29 y 31, debido a las atenuaciones por nubosidad en un horario de 11:00 a 17:00 horas se alcanzaron los valores mínimos de la Is con 5.61 y 6.37 kW-h/m^2 , respectivamente.

Por último, la irradiación solar promedio detectada durante el mes de marzo fue de 6.54 kW-h/m^2 , valor que coincide con la cantidad de recurso solar promedio detectada en algunas zonas del país, donde se han alcanzado valores de hasta 7.0 kWh/m^2 , además refiere a que la zona de estudio donde se realizó el monitoreo presenta un alto potencial, debido a las 6 horas y

media promedio por día, en que se recibe energía del Sol a 1000 W por m^2 , lo cual resulta de interés para proyectos a futuro en las aplicaciones del área de energía solar.

4.4.4. Medición de la radiación solar con prototipos de medición de CdTe

La medición de la I_r con el piranómetro Delta OHM, se realizó conjuntamente con CSserie y CSparalelo, como se observa en la Figura 4.13; el montaje de los prototipos se ubicó en el mismo sitio que el piranómetro, con la finalidad de obtener la misma captación de recurso solar. El periodo definido para la medición de parámetros eléctricos de I_c y V_{oc} , fue de cada 15 minutos en un horario de 07:00 a 19:00 horas, el mismo que se estableció con el piranómetro.



Figura 4.13. Montaje de prototipos de medición de CdTe, en conjunto con piranómetro Delta OHM.

En un inicio, hasta el día 10 de marzo, se llevó a cabo la medición de I_c y V_{oc} con un multímetro marca Adir modelo 441, con especificaciones técnicas de, Voltaje CD: 200 mV a 1000 V, Corriente CD: 200 μA a 10 A y Resistencia: 200 Ω a 2000 k Ω , sin embargo, su resolución de lectura de 2 cifras resultó inadecuado a intervalos de tiempo prolongados, ya que constantemente no se detectaban las variaciones de cambio en mA y V.

Por lo tanto, se realizaron pruebas con otro multímetro (ver Figura 4.14) marca FLUKE modelo 189, con resolución de lectura de 3 ½ hasta 4 ½ cifras y especificaciones técnicas de, Voltaje CD: 2.5 mV a 1000 V, Corriente CD: 25 μ A a 10 A, Resistencia: 0 a 500 M Ω y Temperatura: -200 °C a 1350 °C; al observar una mejor amplitud en las variaciones mínimas detectadas y al ofrecer la posibilidad de medición de temperatura de operación de la celda (Toc), se decidió utilizar el multímetro FLUKE 189 para los siguientes días restantes.



Figura 4.14. Prueba de medición de variables I_c y V_{oc} con multímetro Fluke 189.

CSserie

En seguida se muestran las curvas típicas de la I_r medidas con CSserie, el procedimiento se basó en la medición de V_{oc} cada 15 minutos y en la asociación de dichos valores a los detectados por el Simulador Solar. En el procedimiento de medición, se pudo observar que el aumento de la temperatura ambiente (T_{amb}) a lo largo del día, fomentaba el incremento de T_{oc} y afectaba considerablemente a V_{oc} , provocando una disminución en el valor detectado de medición, lo anterior, se debió principalmente a la relación inversamente proporcional que existe entre T_{oc} y V_{oc} , como ya se había mencionado en el apartado 3.6, si T_{oc} aumenta, V_{oc} disminuye, afectando el rendimiento.

A continuación, se observa la curva típica del 1 de marzo de la I_r , detectado por CSserie, en un rango de 0 a 100 mW/cm^2 , la modificación de escala se estableció como estrategia para visualizar en conjunto los cambios de T_{amb} y T_{oc} (ver Figura 4.15). Los datos de T_{amb} se adquirieron de una Estación Meteorológica Automática del SMN, identificada como Estación ECOGUARDAS, esta fue seleccionada debido a su cercanía con el sitio de monitoreo, con latitud de 19.27154 y longitud de -99.19889.

Los datos correspondientes a Toc, fueron medidos con el termopar del multímetro FLUKE 189, a través del contacto directo del termopar con la superficie externa de CSserie.

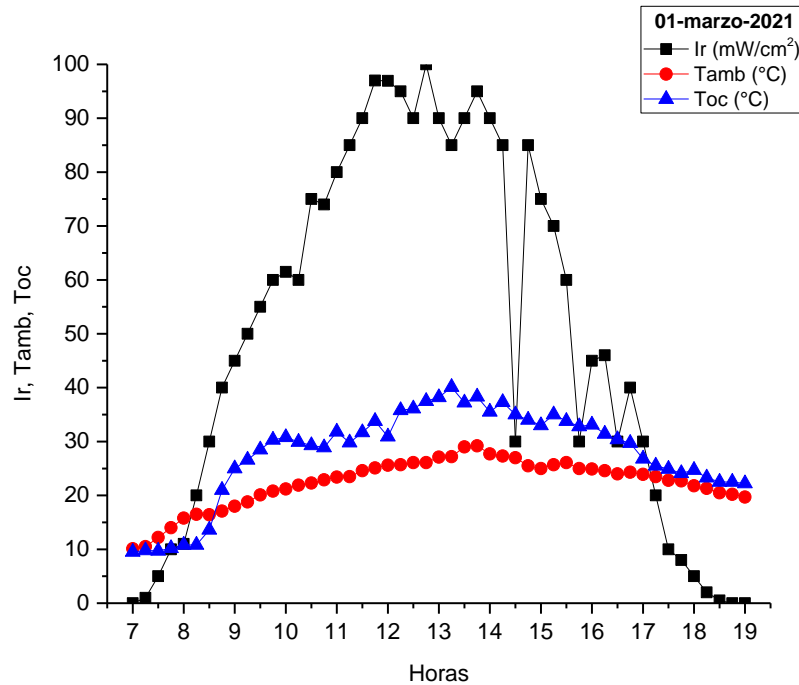


Figura 4.15. Curva típica de la Ir (mW/cm²), Tamb (°C) y Toc (°C).

Como se muestra anteriormente, la curva de Ir no depende en su totalidad de la curva de Tamb, ya que las caídas de la Ir no se atribuyen directamente a una disminución radical de Tamb, pero si a factores por presencia de nubosidad o alguno de otro tipo.

Para las variables Tamb y Toc, es importante destacar los valores alcanzados de Toc en función de Tamb, observando la gráfica de color rojo, Tamb presenta un ligero incremento por la mañana hasta parte del medio día, alcanzando Tamb máximas en un horario de 13:00 a 16:00 hasta que esta comienza a disminuir paulatinamente. En cambio, la curva Toc llega a ser superior a Tamb a partir de las 09:00 inclusive hasta la tarde, donde apenas empieza a estabilizarse. La superioridad de Toc respecto a Tamb, deriva el efecto de calentamiento de CSserie afectando la respuesta de Voc. Por lo tanto, se tomó en cuenta un factor de corrección (FC_{Voc}) que buscaba aplicarse a partir de que CSserie experimentaba el efecto de calentamiento por el incremento de Toc.

El procedimiento para determinar FC_{Voc} se realizó a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{dV}{dT} = \frac{V_{SS} - V_T}{T_{amb} - T_{oc}} = \frac{3.943 V - 3.670 V}{25^\circ C - 35^\circ C} = 0.027 \frac{V}{^\circ C} = -27 \frac{mV}{^\circ C} \quad (4.2)$$

Donde:

V_{SS} = Voc detectado en el Simulador Solar a 1000 W/m^2 .

V_T = Voc máximo medido durante su operación en campo.

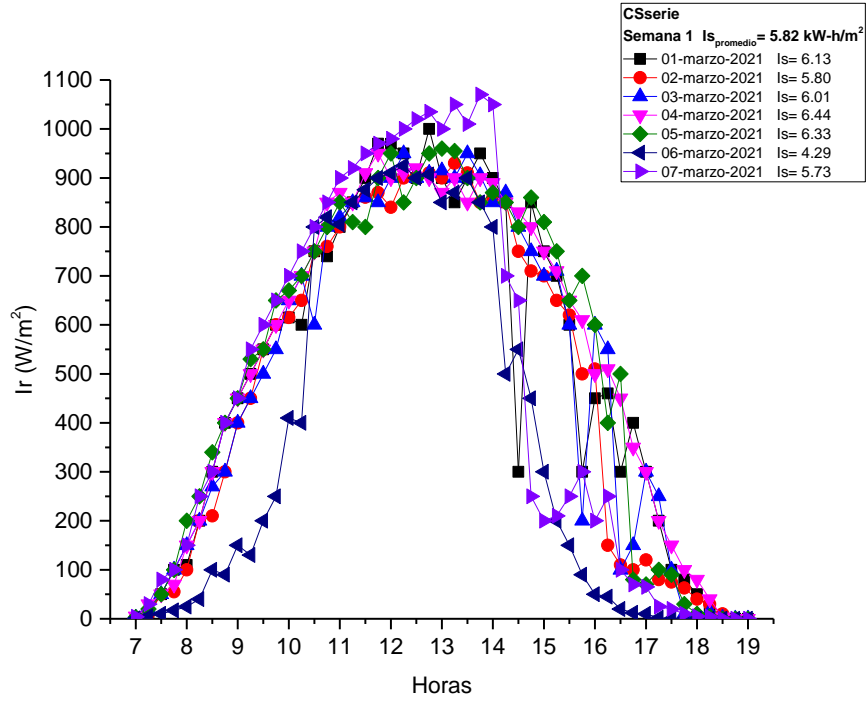
T_{amb} = Temperatura ambiente promedio.

T_{oc} = Temperatura máxima de operación de la celda.

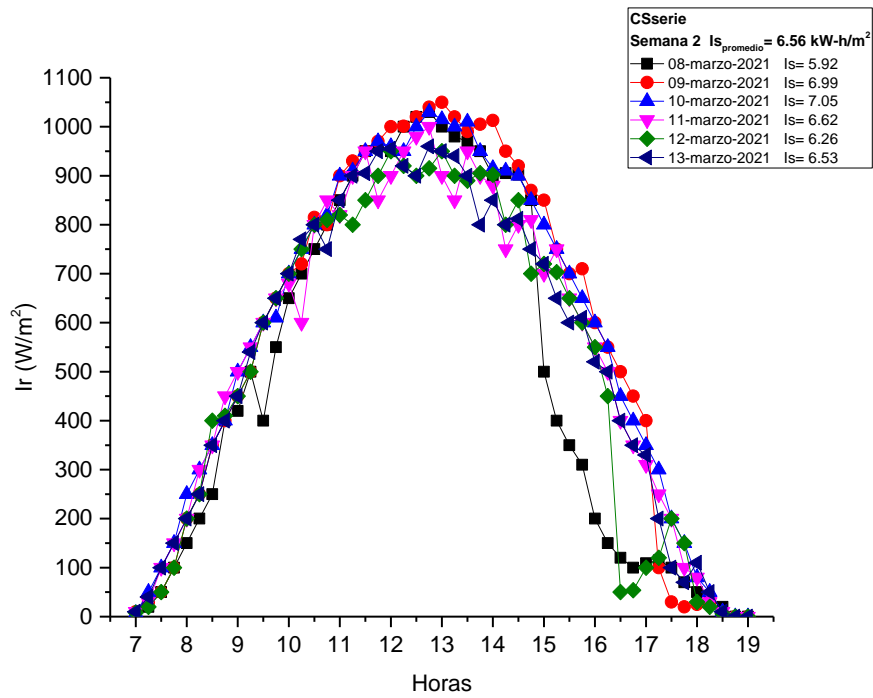
El resultado de $-27 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, indicó cuánto voltaje disminuye en relación al incremento de T_{oc} , por consiguiente, dicho factor se consideró como corrección para sumarse a cada uno de los datos de Voc medidos al exterior a partir de un horario de 09:00 a 17:00 horas (periodo de efecto de calentamiento de CSserie) y aplicado también a los siguientes días de monitoreo para la asociación de la Ir a los valores de Voc ya corregidos.

En la Figura 4.16, se observan las curvas de la Ir correspondientes a cada periodo, las variables meteorológicas y las condiciones por semana se especificaron en la sección 4.4.3. La desigualdad de las curvas en la Ir obtenidos por CSserie y el piranómetro, se relacionó con la diferencia del campo espectral entre el sensor del piranómetro y el semiconductor CdTe de CSserie, debido a que el sensor del piranómetro presenta una respuesta espectral en un rango de longitud de onda de 335 a 2200 nm (como se registra en la tabla 4.7), mientras que el CdTe tiene un rango espectral de respuesta entre 300 a 900 nm.

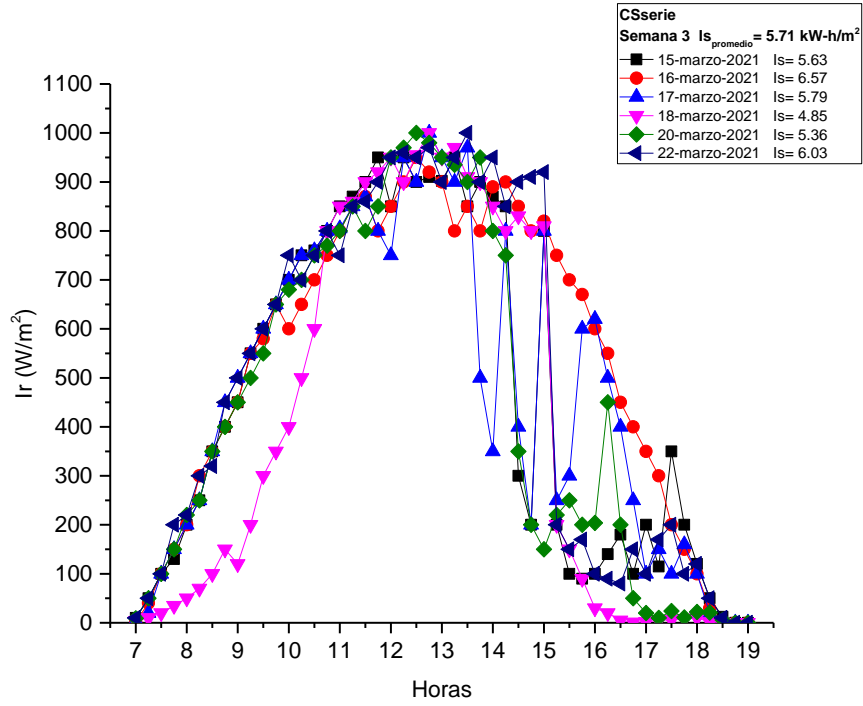
De acuerdo a las gráficas, el nivel máximo reportado de la I_s fue de 6.56 kW-h/m^2 (semana 2), el valor mínimo fue de 5.71 kW-h/m^2 (semana 3) y el promedio de la irradiación solar detectado en el mes de marzo fue de 6.09 kW-h/m^2 , con un margen de error de 6.88% respecto al valor detectado con el piranómetro, por lo tanto, se concluye que el prototipo CSserie resultó factible para su aplicación en la medición del recurso solar.



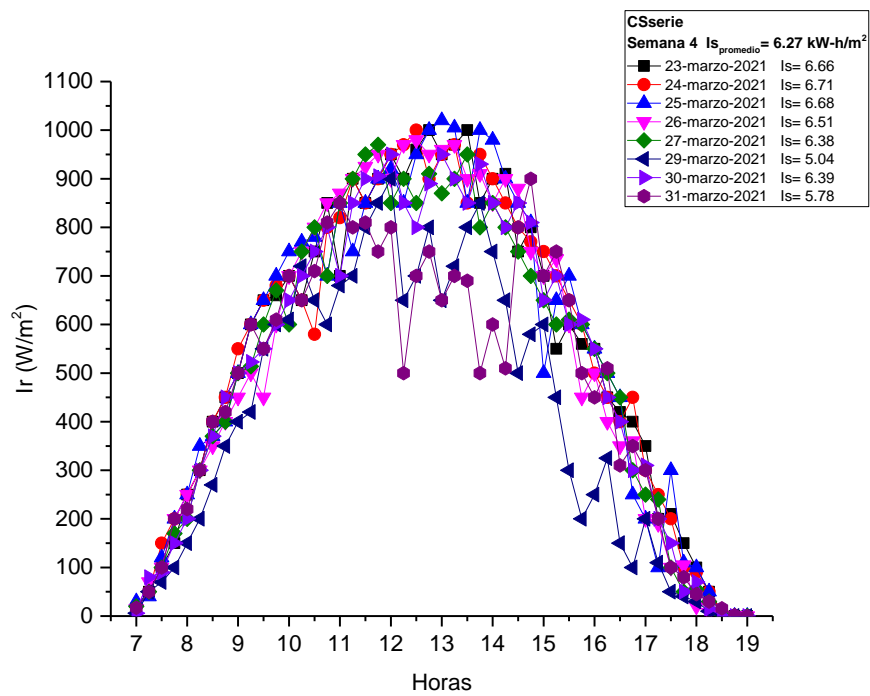
a)



b)



c)



d)

Figura 4.16. Curvas de la irradiancia solar (W/m^2) y promedio semanal de la irradiación solar (kW-h/m^2) con CSserie.

CSparalelo

Con base al diagrama del apartado 3.2, se estableció que, para realizar la medición de I_c entre las terminales de CSparalelo, se requiere agregar una resistencia de carga (R_L). Por lo tanto, para este trabajo y por disponibilidad comercial, se añadió una resistencia de 100Ω ; su representación eléctrica y conexión se observa en la Figura 4.17.

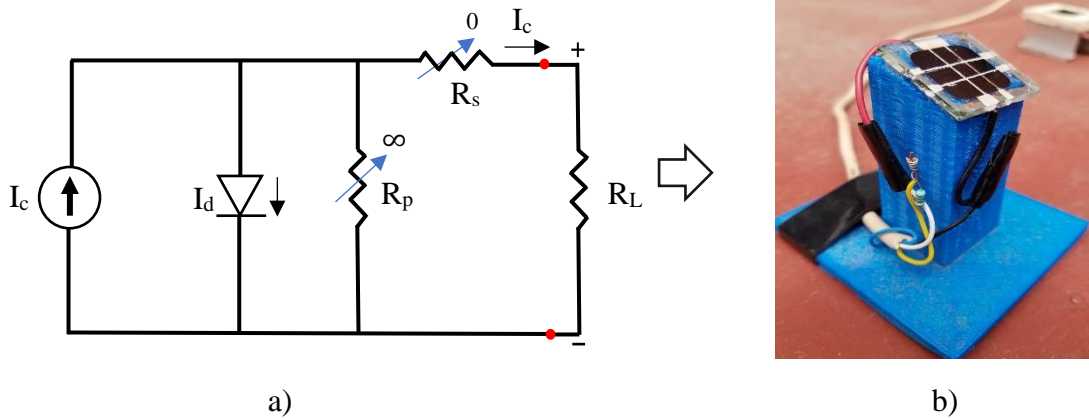


Figura 4.17. a) Circuito eléctrico equivalente con R_L y b) conexión de R_L a CSparalelo.

De acuerdo al diagrama eléctrico anterior, para permitir el avance de I_c hacia las terminales, la resistencia en paralelo (R_p) debe tener un valor alto para evitar la desviación de I_c ($R_p \rightarrow \infty$), en cambio, la resistencia en serie (R_s) debe poseer un valor muy pequeño ($R_s \rightarrow 0$) para admitir el paso de I_c .

Por otra parte, considerando las pérdidas asociadas a I_c debido a la reducción de la I_r (sección 4.4.3), se calculó un nuevo factor de corrección (FC_{I_c}). La determinación de FC_{I_c} , se basó en contemplar a R_p , R_s y R_L , con la finalidad de obtener el valor de reducción de I_c a través del circuito. Para encontrar FC_{I_c} , primero se determinó la resistencia interna total del circuito (R_{int}), realizándose la suma en paralelo de R_p y R_s (ecuación 4.3).

$$R_{int} = \frac{R_p R_s}{R_p + R_s} = \frac{(158 \Omega)(100 \Omega)}{158 \Omega + 100 \Omega} = 61 \Omega \quad (4.3)$$

Donde:

$R_p = 158 \Omega$ (valor máximo alcanzado)

$R_s = 100 \Omega$ (valor mínimo alcanzado)

} Reportados por el Simulador Solar certificado Oriel Clase AAA, durante la medición de las curvas I-V a diferentes niveles de la I_r .

Posteriormente se realizó el cálculo de la resistencia total (R_T), donde primero se sumaron en serie R_S y R_L (ecuación 4.4), se consiguieron dos resistencias en paralelo R_p y R_{eq1} , que también se sumaron en paralelo (ecuación 4.5) para determinar R_T del circuito eléctrico, ver inciso a) y b) de la Figura 4.18.

$$R_{eq1} = R_S + R_L = 100 \Omega + 100 \Omega = 200 \Omega \quad (4.4)$$

$$R_T = \frac{R_{eq1} R_p}{R_{eq1} + R_p} = \frac{(200 \Omega)(158 \Omega)}{200 \Omega + 158 \Omega} = 89 \Omega \quad (4.5)$$

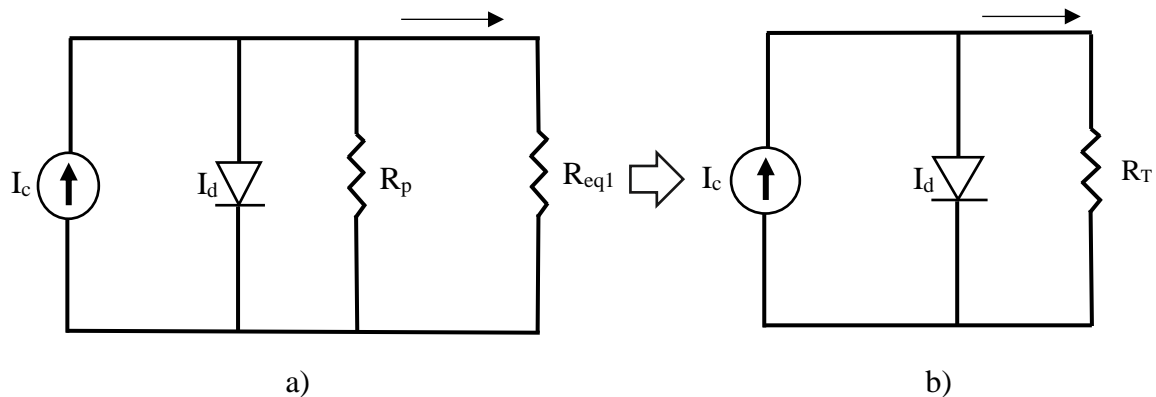


Figura 4.18. Reducción del circuito eléctrico a) resistencias en paralelo y b) R_T .

En relación a lo anterior, FC_{Ic} quedó en términos de R_T y R_{int} , por lo tanto:

$$FC_{Ic} = \frac{R_T}{R_{int}} = \frac{89 \Omega}{61 \Omega} = 1.5 \quad (4.6)$$

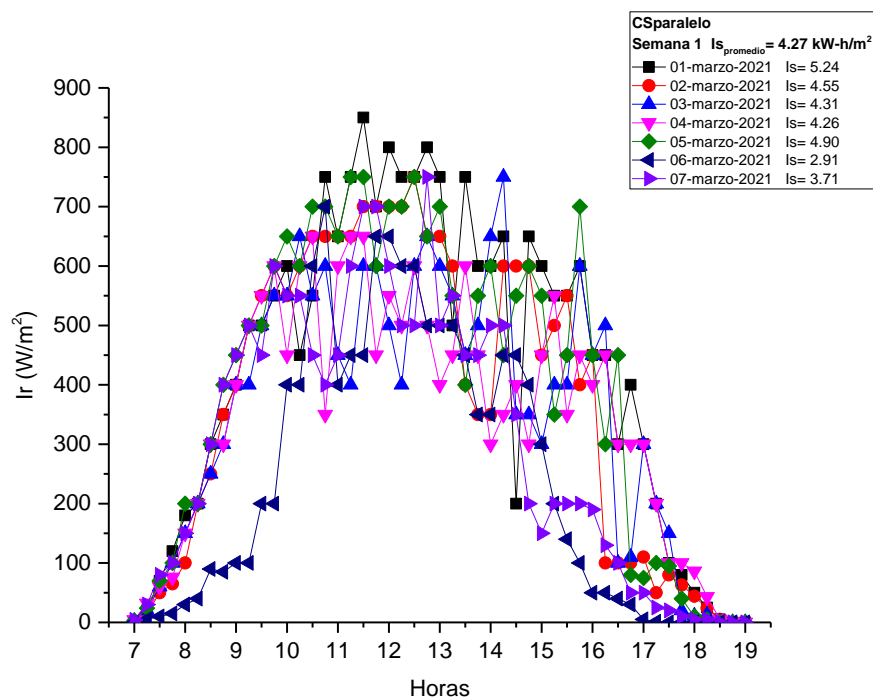
Al obtener el resultado de FC_{Ic} , este fue agregado a cada uno de los valores de I_c medidos al exterior, para posteriormente asociarlos a los niveles de la I_r proporcionados por el Simulador Solar.

En la Figura 4.19, se observan las curvas de la I_r obtenidos con CSparalelo, sin embargo, debido a su inestabilidad de funcionamiento, los valores fueron reportados hasta la semana 3, ya que en la semana 4 no se obtuvieron datos. Lo anterior, resultó de la exposición directa a las diferentes condiciones del medio, debido a que CSparalelo no se encontraba encapsulado, provocando un efecto de calentamiento superior al que se midió con CSserie, además con la exposición a los días lluviosos, la humedad afectó su interconexión eléctrica,

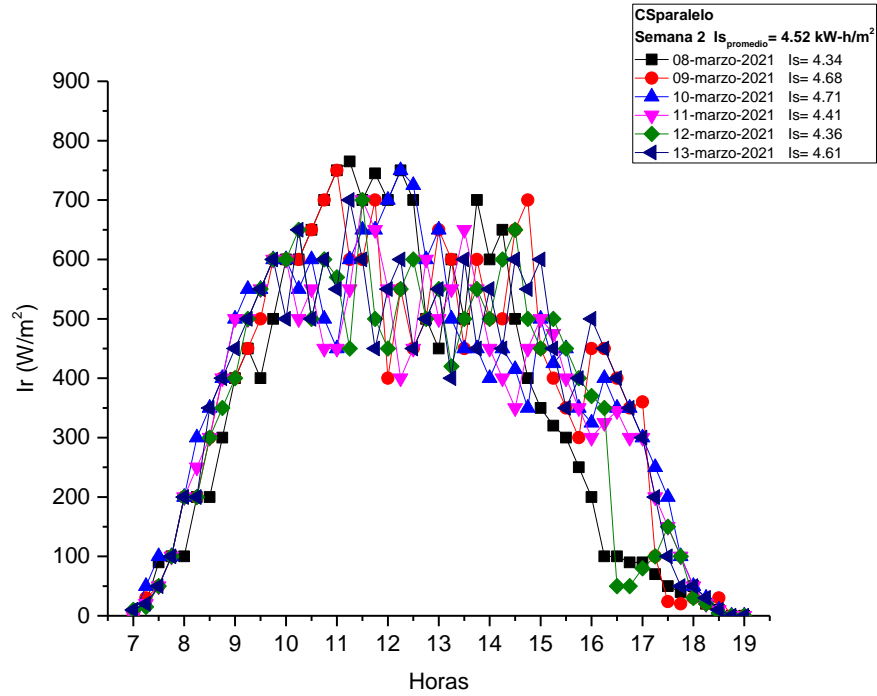
causando degradación de los materiales y una inestabilidad mayor en su capacidad de respuesta.

Debido a los resultados insatisfactorios, se decidió detener la medición desde el 18 y 20 de marzo, ya que como se observa en el inciso c) de la Figura 4.19, los valores máximos de la Ir reportados por CSparalelo apenas alcanzaron 650 W/m^2 , mientras que el piranómetro y CSserie detectaron valores superiores a 1000 W/m^2 ; aparte de que en los últimos días en un horario de 10:00 a 15:00 horas, la Ir presentó demasiadas fluctuaciones e inclusive ya no brindó respuesta de detección arrojando valores de 0 W/m^2 .

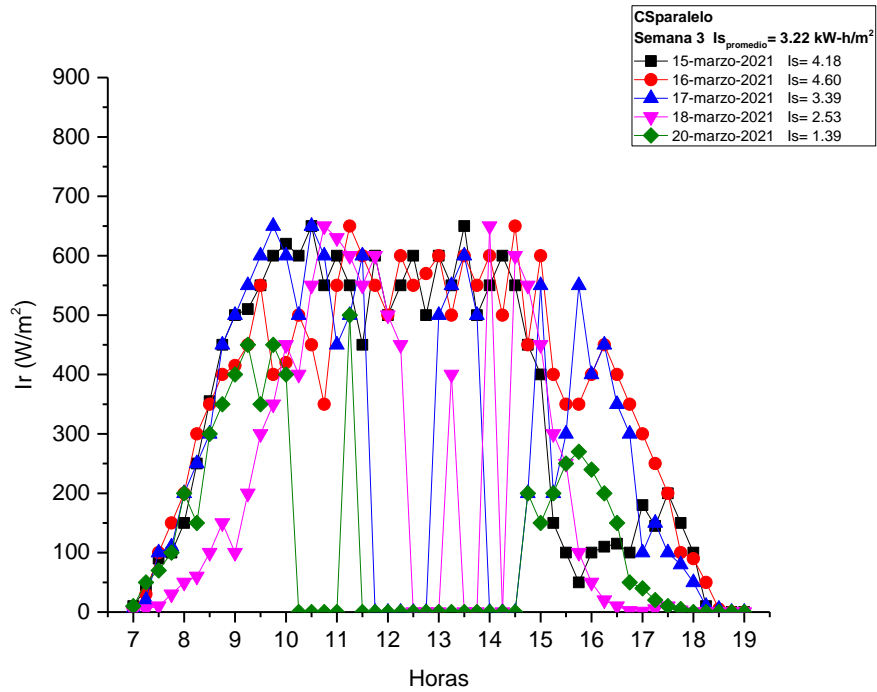
No obstante, el nivel máximo reportado fue en la $I_s = 4.52 \text{ kW-h/m}^2$ (semana 2), el valor mínimo registrado fue de 3.22 kW-h/m^2 (semana 3) y el promedio de la irradiación solar detectado en el mes de marzo fue de 4.00 kW-h/m^2 , con un margen de error de 38.84% respecto al valor detectado con el piranómetro, diferencia considerable que reduce la oportunidad de ser utilizado como un prototipo de referencia para la detección de la Ir.



a)



b)



c)

Figura 4.19. Curvas de la irradiancia solar (W/m^2) y promedio semanal de la irradiación solar ($kW-h/m^2$) con CSparalelo.

RESULTADOS

Después de obtener las mediciones de la Ir con el piranómetro, CSserie y CSparalelo, se observó detenidamente las diferencias que existieron entre los prototipos de CdTe y el medidor comercial.

Los valores de la Ir detectados por CSserie, fueron satisfactorios debido a la ligera diferencia que presentaron respecto a los detectados por el piranómetro, inclusive hasta el último día de monitoreo, el prototipo continuó funcionando correctamente y no se observó algún tipo de deterioro, la ventaja del encapsulado permitió conservar su interconexión eléctrica y los materiales que lo conforman, por lo tanto, CSserie adquiere la capacidad de utilizarse como un prototipo de referencia para la medición de la radiación solar, proporcionando datos confiables y con un mínimo margen de error en comparación con un piranómetro comercial.

Por otro lado, en la tercera semana de marzo, CSparalelo fue el primer prototipo que mostró inestabilidad de funcionamiento, donde se presentaron algunos inconvenientes durante su instalación al exterior, aquellos se relacionaron con el deterioro de materiales, en consecuencia, su interconexión eléctrica, detectando valores de la Ir menores a los reportados por el Simulador Solar inclusive agregando el factor de corrección a I_c , además con el ángulo de inclinación y su exposición directa a los niveles de la Ir, el parámetro que principalmente se vio afectado fue I_c , perjudicando su capacidad de respuesta y disminuyendo la corriente de salida. De lo anterior, se concluye que, para garantizar una buena conservación del prototipo, se requiere de un encapsulado para evitar el deterioro acelerado y conservarse ante las diferentes condiciones meteorológicas, en específico, la humedad.

En la Figura 4.20, se establecen las curvas comparativas de la Ir detectados el 04 de marzo por el piranómetro y ambos prototipos de CdTe, su selección se relacionó a que presentó las menores fluctuaciones a lo largo del mes. El comportamiento de las curvas del piranómetro y CSserie, resultaron similares con pequeñas variaciones a medio día reportadas por CSserie, probablemente como resultado del incremento de T_{oc} causando un ligero calentamiento en la celda, no obstante, el valor promedio de I_s al día detectado por ambos, obtuvo una diferencia total del 5.57%, un valor prometedor, para la comparación del piranómetro con un prototipo de CdTe.

Por otro lado, la curva de Ir detectado por CSparalelo, reportó una estabilidad de funcionamiento por las mañanas y las tardes, resultando casi semejantes a las detectadas por el piranómetro y CSserie; sin embargo, en un horario de 10:00 a 17:00 horas, se observó una gran diferencia, obteniendo valores por debajo de hasta 385 W/m² y una desigualdad promedio de Is del 35.70% respecto al piranómetro y CSserie.

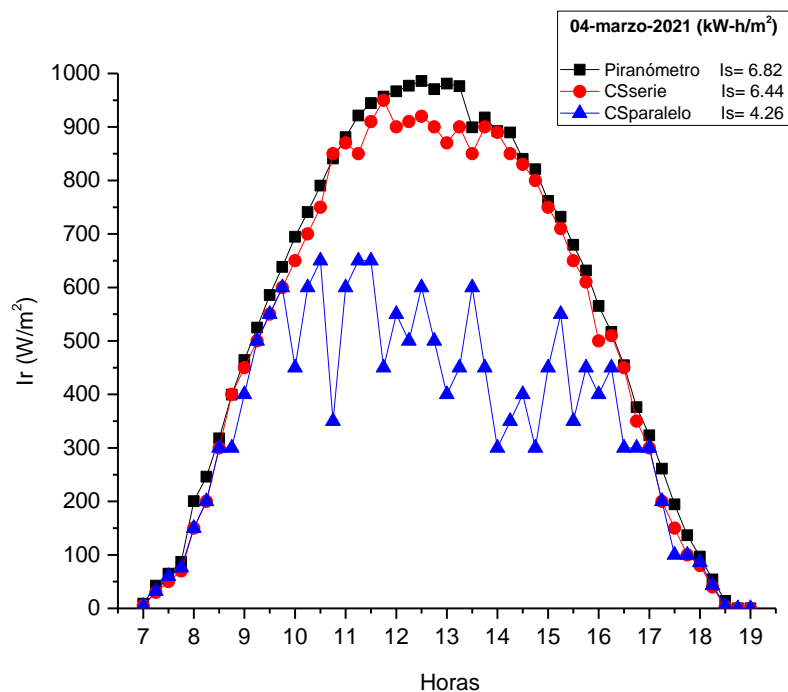


Figura 4.20. Curvas de la Ir detectados por el piranómetro, CSserie y CSparalelo.

En seguida, se muestran los niveles de la Is detectados durante el mes de marzo, en donde el piranómetro y CSserie constantemente registraron valores por encima de 6 kW-h/m², mientras que las caídas generalmente se asociaron a los días nublados y a las lluvias por las tardes. Aunque, los niveles de la Is obtenidos con CSparalelo figuren un comportamiento similar a los detectados con el piranómetro y CSserie, los valores se encontraron por debajo, con una diferencia del 38.84 y 34.31% respectivamente, deteniendo la medición a partir del 20 de marzo, ya que los niveles de la Is disminuyeron considerablemente hasta alcanzar 1.4 kW-h/m².

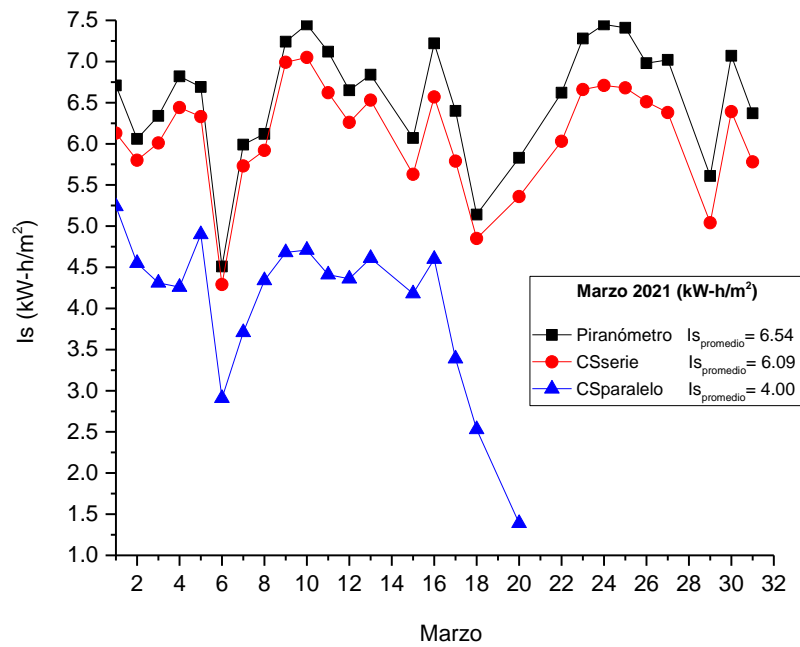


Figura 4.21. Irradiación solar por día, detectado con el piranómetro Delta OHM, CSserie y CSparalelo.

Por último, considerando los valores de $I_{s\text{promedio}}$ detectados por el piranómetro y CSserie, se concluye que, para el mes de marzo en la zona de monitoreo de recurso solar, se alcanzó un nivel de irradiación solar entre 6 a 6.5 kW-h/m².

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Se logró obtener dos prototipos de medición de CdTe, uno con interconexión en serie (CSserie) y otro en paralelo (CSparalelo). A través del Simulador Solar certificado Oriel Clase AAA y una interpolación de datos, se consiguieron las curvas I-V a niveles de 0 a 1000 W/m², estableciendo una relación entre los datos de I_c , V_{oc} y la I_r , parámetros que sirvieron de referencia cuando se realizó el montaje de los prototipos al exterior, para la asociación de I_c y V_{oc} medidos en campo, a los valores detectados por el Simulador Solar.

En la zona de estudio se realizó la instalación del piranómetro Delta OHM, se monitoreó el recurso solar y se estableció una comparativa entre los valores obtenidos por CSserie y CSparalelo.

Asimismo, se realizó el montaje de CSserie y CSparalelo, donde se monitoreó la I_r y se calculó el valor de la I_s . Sin embargo, debido a las afectaciones directas que se observaron en I_c y V_{oc} , se determinó para cada uno, un factor de corrección que permitiera obtener los resultados ideales de detección con valores aplicados de $FC_{V_{oc}} = -27 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ y $FC_{I_c} = 1.5$, con los que se consiguieron las gráficas semanales de la I_r y el respectivo promedio de la I_s .

Se estudiaron y analizaron los resultados obtenidos por CSserie y CSparalelo, los bajos niveles detectados y la inestabilidad de funcionamiento manifestado por CSparalelo, se relacionaron con la variedad de condiciones meteorológicas (en particular los días nublados y lluviosos), el efecto de calentamiento por incremento de T_{oc} , la degradación de la celda y daños a la interconexión eléctrica como consecuencia del ingreso de humedad, entre otros. Por lo tanto, se concluye que el encapsulado de los prototipos, es necesario para garantizar una buena operación en campo, ya que puede conservarse mejor y proteger la interconexión eléctrica.

Se demostró que con el encapsulado de CSserie, se consiguieron mejores resultados con un margen de error de 6.88% respecto a los detectados por el piranómetro, añadiendo que durante el monitoreo se observó su resistencia a las diferentes condiciones del medio, conservando intacta su interconexión eléctrica y ofreciendo una buena estabilidad en su capacidad de respuesta.

En términos generales, se estudió el comportamiento de los prototipos de medición de radiación solar basados en celdas solares de CdTe (CSserie y CSparalelo) y se compararon sus valores de la I_r y la I_s detectados, con los obtenidos por un piranómetro comercial Delta OHM, obteniendo durante el mes de monitoreo una diferencia porcentual de alrededor del 6% entre el piranómetro y el prototipo CSserie (6.5 y 6.1 kW-h/m², respectivamente).

Algunas de las observaciones que podrán aplicarse en trabajos a futuro, corresponden a realizar un detector de medición de la radiación solar interconectado en paralelo, ya que la corriente no se ve afectado por el efecto de la temperatura, debidamente encapsulado y con la inclinación del sitio, con una resistencia adecuada y con terminales borneras para una fácil interconexión con el multímetro, también es conveniente realizar una interfaz con una tarjeta Arduino, para el almacenamiento de forma automática de los valores I_c y V_{oc} hacia un ordenador y considerando la determinación del cálculo de incertidumbre de las mediciones detectadas por los prototipos de CdTe.

REFERENCIAS

Banco Mundial. *Mapa de recurso solar Irradiación Global Horizontal*. Recuperado de: <https://globalsolaratlas.info/download?c=11.523088,8.261719,3>. Consultado el 14 de octubre de 2020.

Banco Mundial. *Mapa de recurso solar Irradiación Global Horizontal, Ciudad de México*. Global Solar Atlas. Recuperado de: <https://globalsolaratlas.info/map?c=19.162292,-99.115647,10&s=19.243996,-99.101917&m=site>. Consultado el 21 de abril de 2021.

Banco Nacional de Comercio Exterior (BANCOMEXT). (2019). *Energías Renovables. Construyendo un México sustentable*.

Beltrán-Telles, A., Morera-Hernández, M., López-Monteagudo, F. E., & Villela-Varela, R. (2017). *Prospectiva de las energías eólica y solar fotovoltaica en la producción de energía eléctrica*. CienciaUAT, 11(2), 105-117.

Benavides, H. O., Simbaqueva, O., & Zapata, H. J. (2017). *Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia*. Bogotá DC, Colombia.: Atlas IDEAM. Recuperado de <http://www.andi.com.co/Uploads/RADIACION.compressed.pdf>

Bosio, A., Pasini, S., & Romeo, N. (2020). *The history of photovoltaics with emphasis on CdTe solar cells and modules*. Coatings, 10(4), 344.

Bosio, A., Rosa, G., & Romeo, N. (2018). *Past, present and future of the thin film CdTe/CdS solar cells*. Solar Energy, 175, 31-43.

Climate Watch, the World Resources Institute. (2020). *Global greenhouse gas emissions by sector*.

Cucaita, O. y Orlando, I. (2017). *Tendencias en ingeniería de materiales para la fabricación de células solares fotovoltaicas*. Ingeniería Solidaria, vol. 13, n. o 23, pp. 151-162. Recuperado de: <https://doi.org/10.16925/in.v13i23.2070>

Delta OHM. *Manual de usuario LP PYRA 02*.

Dornelles, K., Roriz, M., Roriz, V., & Caram, R. (2011). *Thermal Performance of White Solar-Reflective Paints for Cool Roofs and the Influence on the Thermal Comfort and*

Building Energy. Use in Hot Climates. In Solar World Congress. ISES. International Solar Energy Society.

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*, fourth edition.

European Photovoltaic Industry Association (EPIA). (2010). *Unlocking the sunbelt potential of photovoltaic.*

Fierro, J. (2020). *Procesamiento, interconexión y encapsulado de prototipos de módulos fotovoltaicos nacionales de CdTe.* Universidad Politécnica de Sinaloa.

Gallegos, H. G. (2005). *Disponibilidad y características de la Radiación solar en Latinoamérica.*

Green, M., Hishikawa, Y., Warta, W., et al. (2017). *Solar cell efficiency tables (version 50).* Prog Photovolt Res Appl. 2017; 25:668–676. Available at: <https://doi.org/10.1002/pip.2909>

Grossi, H. (2001) *Medición de la radiación solar en la superficie de la Tierra: instrumental y errores asociados.* Universidad Nacional de Luján.

Gurevich, Y. (2013). *Fenómenos de contacto y sus aplicaciones en celdas solares.* Fondo de Cultura Económica.

IEA (2020), *World Energy Balances: Overview*, IEA, Paris. Recuperado de: <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>. Consultado el 4 de octubre de 2020.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2014). *Radiación solar.* Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta>

Jäger, K. D., Isabella, O., Smets, A. H., van Swaaij, R. A., & Zeman, M. (2016). *Solar energy: fundamentals, technology and systems.* UIT Cambridge.

Kipp & Zonen. (2010). *Manual de usuario.*

Lacomba, R. (1991). *Manual de arquitectura solar.* México.

López, G. (2019). *Estimación de la distribución espectral de la radiación solar en función de las condiciones del emplazamiento*.

López, S., Correa, M. y Rodríguez, D. (2011). *Concentradores solares en Iberoamérica: una perspectiva para la educación en Colombia*. *Revista Científica*, 1(13), pp. 364-369.

Lysko, M. D. (2006). *Measurement and Models of Solar Irradiance*.

Mendoza, R. (2007). *Desarrollo de celdas solares prototipo de CdTe con CdS procesado por baño químico*. Instituto Politécnico Nacional.

NREL. *Renewable Energy Data Explorer*. Consultado el 14 de octubre de 2020.

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2014). *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos*.

Polo, J., Martín-Pomares, L., & Sanfilippo, A. (Eds.). (2019). *Solar Resources Mapping: Fundamentals and Applications*. Springer.

Poortmans, J., & Arkhipov, V. (Eds.). (2006). *Thin film solar cells: fabrication, characterization and applications* (Vol. 18). John Wiley & Sons.

Ramos, J., Campayo, J., Zulueta, E., Barambones, O., Eguía, P. & Zamora, I. (2013). *Obtaining the characteristics curves of a photocell by different methods*. In *International Conference on Renewable Energies and Power Quality* (Vol. 11, pp. 1-6).

Real Academia de Ingeniería. *Coordenadas solares*. Recuperado de: <http://diccionario.raing.es/es/lema/coordenadas-solares>

Reyes, D. (2021). *Diseño y construcción de un piranómetro basado en celdas de telurio de cadmio (CdTe) para la medición del recurso solar*. Universidad Politécnica de Sinaloa.

Secretaría de Energía (SENER). (2019). *Balance Nacional de Energía 2018*. México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde*. México.

Secretaria de Relaciones Exteriores. *Datos básicos de México*. México.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2018*. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.

Shallenberg, J., Piernavieja, G., Hernández, C., Unamunzaga, P., García, R., Díaz, M. y Subiela, V. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Santa Cruz de Tenerife: Instituto Tecnológico de Canarias, S.A.

Tejeda Martínez, A., & Gómez Azpeitia, G. (2015). *Prontuario solar de México*.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2005). *Atlas de radiación solar en Colombia*. Recuperado de: http://www.upme.gov.co/atlas_radiacion.htm

Villarreal, A. (2015). *Comparación de métodos de calibración de piranómetros por intercomparación para un centro regional OMM*. Recuperado de: <http://132.248.9.195/ptd2015/marzo/0726294/0726294.pdf>

Willians, R. (2012). *Análisis del comportamiento de módulos fotovoltaicos. Diagnóstico, modelado matemático de curvas I-V y P-V, y construcción de prototipo trazador de curvas I-V*. Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão

World Meteorological Organization (WMO). (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. WMO-No. 8, 7th ed. Geneva, Switzerland: WMO

World Meteorological Organization (WMO). (2017). *La medición de la luz solar*. Recuperado de: <https://worldmetday.wmo.int/es/la-medicion-de-la-luz-solar>