



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo
Tecnológico

Tesis de Maestría

Caracterización de un módulo de celdas
fotovoltaicas transparentes

presentada por

Ing. HUGO SEBASTIAN VALLE DIAZ

como requisito para la obtención del grado de
**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis

Dra. Ma. Guadalupe López López

Codirector de tesis

Dr. Victor Manuel Alvarado Martinez

Cuernavaca, Morelos, México. Noviembre de 2023.



Cuernavaca, Mor.,

08/noviembre/2023

No. de Oficio:

DIE/087/2023

Asunto:

Aceptación de documentos de tesis

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Hugo Sebastián Valle Díaz**, con número de control **M21CE088** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "**Caracterización de un Módulo de Celdas Fotovoltaicas Transparentes**" y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

Dra. Ma. Guadalupe López López
Doctora en Ciencias en Ingeniería Química
Cédula profesional 7980045

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 8031070

REVISOR 1

Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5999002

REVISOR 2

Dra. Susana Estefany De León Aldaco
Doctora en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 10458245

C.p. M.T.I. Maria Elena Gómez Torres. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
JGM/kmqh





Cuernavaca, Mor.,

13/noviembre/2023

No. De Oficio:

SAC/175/2023

Asunto:

Autorización de
impresión de tesis

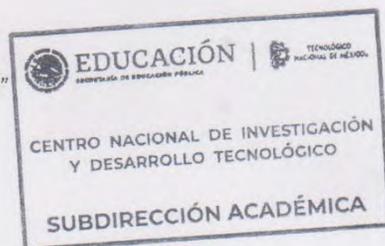
**HUGO SEBASTIÁN VALLE DÍAZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Caracterización de un Módulo de Celdas Fotovoltaicas Transparentes”**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica®
“Conocimiento y tecnología al servicio de México”*



**CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**

C. c. p. Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



Resumen

La tesis que aquí se presenta se enfoca en la caracterización de una celda fotovoltaica transparente, una tecnología de vanguardia que se encuentra entre los desarrollos más recientes en el campo de los sistemas fotovoltaicos. Esta investigación presenta los parámetros clave que influyen de manera significativa en el desempeño de la Celda Solar Transparente (CST). El objetivo principal es proporcionar una base sólida para futuros estudios e investigaciones que busquen comprender en mayor profundidad el comportamiento y la eficiencia de estas celdas fotovoltaicas transparentes.

Uno de los logros de esta tesis es la creación de un modelo matemático que representa la dinámica eléctrica de la CST. Este modelo se obtiene mediante el uso de una técnica de identificación que se basa en el análisis de datos experimentales. La elección de una estructura matemática Hammerstein-Wiener para un sistema no lineal de entrada múltiple y salida única (MISO, por sus siglas en inglés, Multiple Input–Single Output) se fundamenta en la capacidad de esta estructura para capturar la complejidad inherente de la CST. Este enfoque permite una representación precisa de las relaciones no lineales entre los parámetros de entrada y salida, lo que es esencial para comprender y predecir con precisión el comportamiento de la celda fotovoltaica transparente en diversas condiciones de funcionamiento.

La relevancia de esta investigación es que se encuentra entre las primeras tesis que abordan la caracterización y modelado de celdas solares transparentes. Dado el creciente interés en las tecnologías fotovoltaicas transparentes debido a su potencial para su integración en edificios, ventanas y otros sustratos transparentes, esta tesis contribuye significativamente al avance de este campo. Proporciona una base sólida para la optimización y el diseño de sistemas fotovoltaicos transparentes, lo que podría tener un impacto positivo en la eficiencia energética y la sostenibilidad en diversas aplicaciones. Además, la metodología utilizada en esta investigación puede servir como un punto de partida valioso para futuros estudios relacionados con la mejora de las celdas solares transparentes y su integración en la infraestructura urbana y arquitectónica.

Abstract

The thesis presented here focuses on the characterization of a transparent photovoltaic cell, a cutting-edge technology among the most recent developments in the field of photovoltaic systems. This research outlines the key parameters that significantly influence the performance of the Transparent Solar Cell (TSC). The main objective is to provide a solid foundation for future studies and investigations aimed at gaining a deeper understanding of the behavior and efficiency of these transparent photovoltaic cells.

One of the achievements of this thesis is the creation of a mathematical model that represents the electrical dynamics of the TSC. This model is obtained using an identification technique based on the analysis of experimental data. The choice of a Hammerstein-Wiener mathematical structure for a non-linear multiple-input, single-output (SIMO) system is based on its ability to capture the inherent complexity of the TSC. This approach allows for a precise representation of the non-linear relationships between input and output parameters, which is essential for accurately understanding and predicting the behavior of the transparent photovoltaic cell under various operating conditions.

The significance of this research lies in being among the first theses to address the characterization and modeling of transparent solar cells. Given the growing interest in transparent photovoltaic technologies due to their potential for integration into buildings, windows, and other transparent substrates, this thesis makes a substantial contribution to advancing this field. It provides a solid foundation for optimizing and designing transparent photovoltaic systems, which could have a positive impact on energy efficiency and sustainability in various applications. Furthermore, the methodology used in this research can serve as a valuable starting point for future studies aimed at enhancing transparent solar cells and their integration into urban and architectural infrastructure.

Dedicatoria

A mis padres Victor Hugo Valle Martinez y Viridiana Ivette Diaz Alcantara, por todo el esfuerzo que han hecho para que yo llegue hasta aquí, por su apoyo incondicional que me ha brindado a cada momento y por el amor que me han demostrado. Este es un logro que sin ellos a mi lado no sería posible.

A mi hermana Montserrat Valle Diaz por el apoyo incondicional en esta etapa de mi vida.

A mis amigos y conocidos dentro y fuera del CENIDET siempre han sido personas que me ha inspirado y motivado a seguir superándome a mí mismo, por compartir conmigo momentos buenos y malos que me han traído hasta este momento tan importante.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo constante y las oportunidades brindadas para la realización de una meta más en mi vida.

Al Tecnológico Nacional de México (TECNM) por haber ofertado la maestría en Electrónica, con especialidad en Energía Renovable y por motivar en mi el interés por la investigación tecnológica.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) y a todo el personal que conforma la institución por hacer posible este logro.

Este logro no es solo mío es de todos los que me han ayudado a llegar hasta este punto de mi vida, que han estado siempre para brindarme una mano. A mis padres y mi hermana de los cuales siempre me han brindado su apoyo y confianza en tiempos donde los he necesitado.

A mis asesores Dra. Guadalupe López López y Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez de los cuales siempre he recibido consejos que me han ayudado al correcto desempeño de mis labores, también agradecerles por parte del conocimiento que han compartido conmigo y su apoyo para todo lo relacionado con este trabajo de investigación.

A los miembros de mi comité revisor Dra. Susana Estefany de Leon Aldaco y Dr. Victor Hugo Olivares Peregrino por brindarme sus observaciones durante el desarrollo de este trabajo y consejos que me han permitido mejorar y corregir de manera constante.

A mis compañeros y amigos con los que he tenido la fortuna de convivir durante esta etapa, de igual forma a los profesores con los cuales he tenido el placer de convivir en esta etapa de mi vida, al Dr. Manuel Adam Medina y Dr. Jarniel García por el apoyo y consejos brindados.

Contenido

Lista de Figuras	xI
Lista de Tablas	xv
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes.	3
1.2. Estado del arte.	4
1.3. Justificación.	9
1.4. Metas.	10
1.5. Objetivos.	10
1.5.1. Generales.	10
1.5.2. Particulares.	10
1.6. Organización del documento.	11
2. Marco teórico.	12
2.1. Radiación solar.	12

2.2. Efecto Fotovoltaico.	15
2.3. Transmitancia.	16
2.4. Película fotovoltaica transparente.	17
2.5. Teluro de cadmio	19
3. Metodología.	21
3.1. Identificación de parámetros.	21
3.1.1. Identificación de parámetros Eléctricos.	21
3.1.2. Identificación de parámetros de Transparencia.	26
3.2. Adquisición de la CST.	28
3.3. Norma IEC 61215	29
3.4. Protocolo de Pruebas	30
3.4.1. Pruebas Eléctricas	32
3.4.2. Pruebas de Transparencia	39
4. Pruebas y resultados.	43
4.1. Resultados de las pruebas eléctricas.	43
4.1.1. Curvas características I-V & P-V.	43
4.1.2. Curvas características en función de la radiación solar, obtenidas en condiciones controladas.	45
4.1.3. Prueba con carga dinámica y fija.	51

4.1.4. Comparativa con un panel opaco.	53
4.2. Pruebas de transparencia	56
4.2.1. Validar luz utilizada eficientemente.	56
4.2.2. Neblina de transmisión.	57
4.3. Modelado matemático de la CST.	58
4.4. Dimensionamiento.	74
5. Conclusiones.	79
Bibliografía	82
Anexo A. Código del programa para la estimación de modelo SISO para el panel solar.	89
Anexo B. Código del programa para la estimación de modelo MISO para el panel solar.	91
Anexo C. Código del programa para la estimación de modelo MISO para el panel solar con señales de entrada experimentales.	95
Anexo D. Ficha técnica del panel solar considerado en el dimensionamiento.	99
Anexo E. Ficha técnica del micro-inversor APsystems Microinverter DS3D.	100

Lista de Figuras

1.1. Panel Fotovoltaico Transparente con 50 % de transparencia elaborado de CdTe.	2
1.2. Esquema de radiación absorbida por una CST [2].	3
2.1. Espectro Electromagnético ©2006 por Horst Frank utilizado bajo licencia CCBY-SA 3.0.	13
2.2. Composición de la luz y calidad de la luz a partir del cuerpo que emite ©2011 por Livinus utilizado bajo licencia CCBY-SA 3.0.	14
2.3. Efecto Fotovoltaico [34].	15
2.4. Relación entre la transmitancia y la eficiencia de conversión en celdas solares transparentes inorgánicas[36, 37, 38, 39, 40, 41], a partir de estos datos se puede considerar a que aplicación se orienta [4].	16
2.5. Película fotovoltaica transparente, elaborada por ASCA®[42].	17
3.1. Circuito equivalente para modelar una CST [23].	22
3.2. Celda Solar Transparente, elaborada por SolarFirst.	28
3.3. Banco de pruebas.	32

3.4. Mapa de irradiancia y temperatura del 3 de Marzo del 2023.	33
3.5. Pruebas eléctricas de una CST en irradiancia solar.	33
3.6. Datos de entrada del bloque PV Array de simulink.	34
3.7. Diagrama esquemático del banco de pruebas experimentales.	35
3.8. Conexiones de Arduino para pruebas en irradiancia experimentales.	36
3.9. Conexiones de Arduino y CST para pruebas con carga en irradiancia solar.	37
3.10. Conexiones de Arduino para pruebas en irradiancia solar para un panel oscuro.	38
3.11. Diagrama esquemático de las pruebas de transparencia.	40
3.12. Medición luz incidente directa.	40
3.13. Medición luz difusa.	41
3.14. Conexión de sensor BHT1750.	41
4.1. Curva característica V-I y P-V, generado a partir de los parámetros del fabricante.	44
4.2. Curvas características V-I y P-V, con irradiancia de $250 W/m^2$, $500 W/m^2$, $750 W/m^2$ y $1000 W/m^2$ a una temperatura de $25^\circ C$	44
4.3. Curvas características V-I y P-V, con temperatura de $25^\circ C$, $35^\circ C$, $45^\circ C$ a una irradiancia de $1000 W/m^2$	45
4.4. Gráficas de I-V y P-V en condiciones controladas.	47
4.5. Gráficas de I-V y P-V en irradiancia solar.	48
4.6. Gráficas de I-V y P-V en condiciones controladas e irradiancia solar.	49

4.7. Gráficas de I-V y P-V en irradiancia solar y modelo del fabricante.	51
4.8. Prueba dinámica de la CST.	52
4.9. Prueba con cargas fijas en la CST.	53
4.10. Comparativa del desempeño de una CST y un panel opaco en condiciones de irradiancia solar.	54
4.11. Luz utilizada eficientemente en las regiones UV-VIS-IR.	56
4.12. Neblina de transmisión de la CST en las regiones UV-VIS-IR.	57
4.13. Circuito eléctrico equivalente con un diodo y elementos resistivos. Parámetros estimados a partir de datos que se obtienen de las pruebas de campo con la CST.	58
4.14. Simulación del sistema en Simulink con modelo parametrizado.	59
4.15. Comparación de las curvas Corriente-Voltaje y Potencia-Voltaje obtenidas con el bloque Simulink y las curvas obtenidas en las pruebas de campo con irradiancia solar.	59
4.16. Datos de entrada y salida utilizados para la estimación del modelo con irradiancia variable.	60
4.17. Comparación de los resultados del bloque PV-Array y los modelos calculados.	61
4.18. Comparación del diagrama de BODE de los datos y los modelos estimados.	62
4.19. Ubicación de polos y ceros de los modelos identificados.	62
4.20. Prueba de residuos de los modelos identificados.	63
4.21. Comparación de la respuesta del sistema experimental con el modelo Box-Jenkins (BJ) obtenido.	64

4.22. Datos de entrada y salida utilizados para la estimación del modelo MISO.	65
4.23. Variación de corriente para la estimación del modelo MISO.	65
4.24. Estructura del modelo Hammerstein-Wiener para un sistema MISO.	66
4.25. Comparación de los datos base del sistema y el modelo Hammerstein-Wiener.	68
4.26. Datos de entrada y salida experimentales utilizados para la estimación del modelo MISO.	69
4.27. Variación de corriente (una de las variables de entrada) para la estimación del modelo MISO.	70
4.28. Comparación de los datos experimentales base y el modelo Hammerstein-Wiener.	71
4.29. Irradiancia medida el día 10 de Septiembre del 2023.	72
4.30. Comparación entre la señal de entrada, el modelo estimado y el modelo validado.	73
4.31. Irradiancia promedio anual en las coordenadas 18.81 N, -98.95 E, en los últimos 22 años.	74

Lista de Tablas

1.1. Ventajas y desventajas de las CST.	5
3.1. Datos del fabricante de la CST.	29
3.2. Parámetros del Panel Opaco.	38
3.3. Material usado en las pruebas experimentales para medir el desempeño del panel opaco.	39
3.4. Material para pruebas experimentales de transparencia.	42
4.1. Datos de la prueba experimental en condiciones controladas.	46
4.2. Datos de la prueba experimental con radiación solar.	48
4.3. Datos de la prueba experimental en irradiancia solar.	50
4.4. Resultados de las pruebas experimentales en irradiancia solar.	55
4.5. Datos de los bloques no lineales del modelo Hammerstein-Wiener.	67
4.6. Datos de los bloques no lineales del modelo Hammerstein-Wiener a partir de datos experimentales.	71
4.7. Datos de consumo eléctrico y facturación anual en el último año.	75

Simbología

$\%$	Porcentaje
μ_{sc}	Coefficiente de corto circuito
μm	Micrómetro
A	Ampere
A_c	Área de la celda
AM	Masa de Aire
C	Centígrados
D	Diodo
dI	Derivada de la corriente
dV	Derivada del voltaje
E	Este
E_p	Energía producida por panel solar
FF	Factor de llenado, por sus siglas en inglés
G	Mundial
G_a	Radiación solar incidente
G_{cem}	Irradiación en condiciones Estándar de Prueba
G_{dm}	Irradiancia media del lugar
G_{ref}	Irradiancia de referencia
G_{tc}	Irradiancia en condiciones de prueba
$H(\%)$	Neblina de transmisión
I	Corriente
I_D	Corriente del diodo
I_L	Corriente generada por la celda solar
I_{max}	Corriente máxima
I_{sc}	Corriente en corto circuito
I_{SH}	Corriente en corto circuito
k	Constante de Boltzmann de $1,38 \times 10^{-23} J/K$

K	Kelvin
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt hora
kWh/dia	Kilowatts hora entre día
kWp	Pico de kilowatt
ln	Logaritmo natural
m	Metros
m^2	Metros cuadrados
mm	Milímetros
$MWh/año$	Megawatt hora entre año
MXN	Peso mexicano
N	Norte
nm	Nanómetro
N_s	Numero de celdas solares en serie
P_{max}	Potencia Máxima
P_{mfv}	Potencia del módulo en kW
P_R	Factor de pérdidas
q	Carga de un electrón que es igual a $1,6 \times 10^{-19} C$
R	Resistencia
R_s	Resistencia interna de la celda
R_{sh}	Resistencia de derivación
T	Temperatura ambiente
T_c	Temperatura en condiciones de prueba
T_d	Transmitancia difusa
T_{eff}	Luz utilizada eficientemente
T_{ref}	Temperatura de referencia
T_t	Transmitancia total
V	Volts

V_{max}	Voltaje máximo
V_o	Voltaje
V_{oc}	Voltaje en circuito abierto
V_t	Voltaje térmico
W	Watts
W/m^2	Watt entre metro cuadrado
δ	Constante de idealidad del diodo
η	Eficiencia máxima de la celda solar
λ	Longitud de onda
τ_v	Transmitancia visible
v	Coefficiente de absorción
Ω	Ohms

Acrónimos

ARMAX	Modelos auto-regresivos (AR) y la media móvil (MA) con variables exógenas (X)
ARX	Modelo auto-regresivo (AR) con variables exógenas (X)
ASCA	Empresa dedicada a la fabricación de paneles solares
a-SI	Silicio Amorfo
AVT	Transmitancia visible promedio, por sus siglas en ingles
BJ	Modelo polinómico de Box-Jenkins
CdTe	Telururo de Cadmio
CIGS	Seleniuro de Cobre-Indio-Galio
c-SI	Silicio Monocristalino
CSP	Celda Solar de Polímero
CST	Celda Solar Transparente
CY	Carbono de Itrio
HITCI	Yoduro de 3-Trimetil-3H-Indolio
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional, por sus siglas en ingles
IR	Infrarrojo
LUE	Eficiencia de utilización de la luz, por sus siglas en ingles
MISO	Entrada Múltiple y Salida Única, por sus siglas en ingles
MIT	Instituto Tecnológico de Massachusetts, por sus siglas en ingles

OE	Modelo polinómico de error-salida
OPV	Fotovoltaica Orgánica, por sus siglas en ingles
PV	Fotovoltaico, por sus siglas en ingles
SISO	Entrada Única y Salida Única, por sus siglas en ingles
TONC	Temperatura de Operación Nominal de la Celda
UV	Ultravioleta
VIS	Espectro Visible

Capítulo 1

Introducción

La radiación solar es un recurso disponible para todas las personas, esto ha impulsado el desarrollo de diferentes tecnologías que usan este recurso energético, tales como los paneles y concentradores fotovoltaicos; su funcionamiento se basa en aprovechar la luz del sol para producir energía eléctrica. Este tipo de sistemas pueden aplicarse a gran escala en granjas solares o en menor escala en la parte superior de algunos edificios.

En los últimos años, el avance de nuevas tecnologías de celdas solares ha captado la atención de muchos científicos. Entre los desarrollos que más se destacan están las Celdas Solares Transparentes (CST), las cuales pueden ser instaladas en áreas poco explotadas para satisfacer necesidades energéticas relacionadas con nuestra vida diaria. De acuerdo con [1], son aproximadamente nueve las tecnologías aplicadas al desarrollo de las celdas fotovoltaicas transparentes (película fotovoltaica delgada, celda solar transparente de infrarrojo cercano, celda solar de polímero (CSP), concentrador solar luminiscente transparente, celda solar de perovskita, deposición electroforética, recubierto por inmersión, deposición por pulverización y celda solar de punto cuántico), todas ellas se enfocan en poder solventar la demanda del mercado y además ofrecen una mayor variedad de productos para diferentes aplicaciones. Los países que al día de hoy han registrado éxito en el desarrollo de esta nueva tecnología son Japón, Alemania, Estados Unidos, China y la India.

El objetivo de esta tesis es caracterizar una CST. El concepto de caracterización aplicado a un sistema implica evaluar los parámetros que miden el desempeño y la eficiencia del sistema. Para lograr esto se adquirió una CST con las siguientes características: vidrio 50 % transparente, sin marco, con 6.5 % de eficiencia y elaborada de Telururo de Cadmio (CdTe), como la que se muestra en la Figura 1.1.

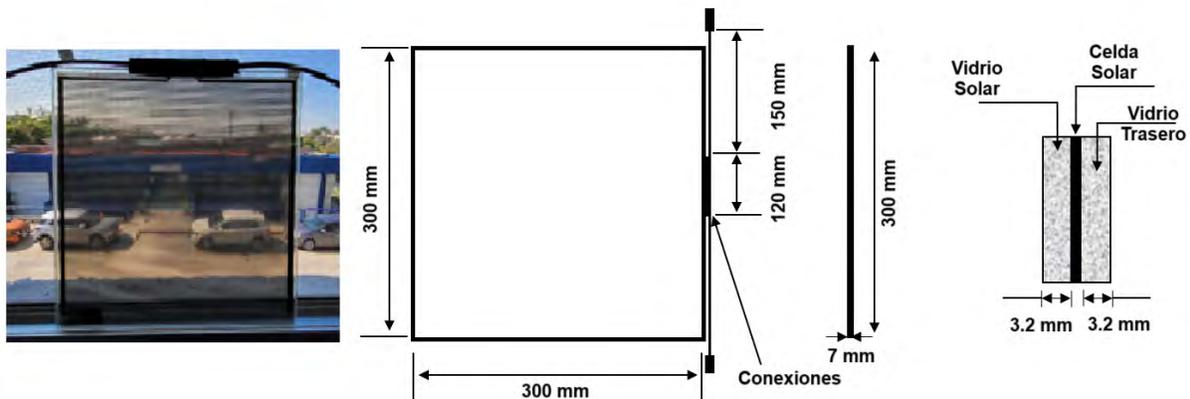


Figura 1.1: Panel Fotovoltaico Transparente con 50 % de transparencia elaborado de CdTe.

En primer lugar, una revisión del estado del arte permitió identificar los parámetros que determinan las características de las CSTs. Es importante considerar que el desempeño eléctrico de este tipo de panel es más bajo que el de un panel fotovoltaico convencional debido a que el panel transparente no absorbe toda la longitud de onda proveniente del sol. En su mayoría, una CST absorbe la radiación infrarroja y ultravioleta [2], mientras que un porcentaje del espectro visible pasa a través del panel, lo que le da la transparencia que puede ser aprovechada para algunas aplicaciones. La Figura 1.2 nos ayuda a tener una idea más clara. Donde la abreviatura IR (Infra-Rojo) es la luz que se queda en la CST y el espectro visible (VIS) es la parte de la radiación que pasa a través de ella.

En este documento se explica la metodología seguida para determinar los parámetros que miden el desempeño de un panel solar transparente. Se detallan los protocolos de pruebas experimentales para medir en la celda solar transparente su desempeño eléctrico básico. Otro propósito de la tesis es formular un modelo matemático para representar el comportamiento

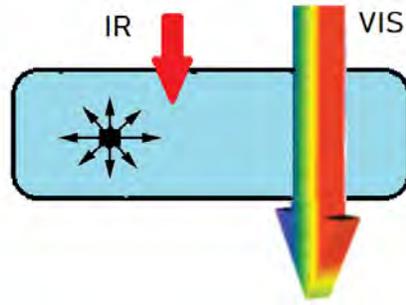


Figura 1.2: Esquema de radiación absorbida por una CST [2].

del módulo experimental. Finalmente se presenta el dimensionamiento para una aplicación específica.

1.1. Antecedentes.

Desde el año 2014 se han logrado avances en la investigación sobre el diseño y funcionamiento de celdas solares transparentes. Una primera consideración es que en estos dispositivos, para lograr la transparencia, se captura la radiación infrarroja y ultravioleta para generar una corriente eléctrica directa por medio del bien conocido efecto fotoeléctrico, pero se deja pasar la luz visible. Para hacer esto posible, la propuesta ha sido utilizar algunos compuestos químicos como los descritos por Zhao [2] entre los que destacan las soluciones orgánicas como el yoduro de 3-trimetil-3H-indolio (HITCI) y Carbono de itrio (CY). En varios artículos se destaca la importancia de medir parámetros como la absortancia y transmitancia de paneles o celdas transparentes.

Entre los trabajos de investigación que tienen relación con las CSTs se cita el elaborado por Yang y col., en 2019 [3], quienes presentaron un informe completo de cómo se comportan las celdas fotovoltaicas transparentes, destacando la definición de transmitancia y la identificación de posibles aplicaciones a las que se puede orientar la nueva tecnología. A medida que se avanzó en la revisión sobre el desarrollo de celdas solares transparentes, ha sido evidente

que el interés en el tema ha ido en aumento. Autores como Burgués-Ceballos [4] investigaron posibles usos de estos sistemas en el comercio y sobre los beneficios que pueden ofrecer en diferentes áreas. La gran mayoría de artículos científicos tratan el tema de celdas fotovoltaicas desde una perspectiva muy general, describen cuáles son sus componentes y proporcionan datos de transmitancia y absorptancia, pero no muestran su desempeño eléctrico o alguna prueba de campo. Adicionalmente, se revisó el repositorio de tesis del *cenidet* y de momento no existe algún antecedente relacionado con paneles solares transparentes, por ese motivo todos los trabajos de base se han tomado de otras fuentes y de revistas científicas.

1.2. Estado del arte.

Como se ha mencionado, para el desarrollo de celdas fotovoltaicas transparentes, un punto central es encontrar materiales que capturen la radiación infrarroja y ultravioleta para la producción de energía eléctrica, y que al mismo tiempo dejen pasar la luz visible. Se destaca que el aprovechamiento máximo las longitudes de onda infrarroja y ultravioleta minimiza los costos de generación de electricidad. Hay autores que afirman que la iniciativa de implementar paneles fotovoltaicos transparentes surgió de la idea de nuevas aplicaciones donde no es tan viable la instalación de un panel solar tradicional. Entre los temas de investigación en esta área, sobresale lo relacionado con los elementos que componen las CST, tal es el caso de la implementación de una película fotovoltaica delgada que reduce el costo de fabricación; esta propuesta fue reportada en [5].

Además, esta solución ofrece resultados de desempeño muy interesantes: se midió un 60 % de transmitancia con un 10 % de eficiencia de conversión. Por otro lado, en algunos estudios se comprobó que la adición de nano cristales de TiO_2 permite obtener una eficiencia de hasta 18 % [6]. En algunos artículos como es el caso de [1, 7] se han presentado revisiones completas de una gran variedad de posibles materiales que se pueden ocupar para fabricar sistemas CST, se describen de manera general las ventajas y desventajas que presenta cada uno de ellos, y en algunos casos se muestran los resultados relacionados con el nivel de transmitancia,

absortancia y nivel de conversión. En la Tabla 1.1 se presenta un breve resumen de esta información.

Tabla 1.1: Ventajas y desventajas de las CST.

Tipo de Celda Solar	Ventajas	Desventaja	Referencia
CST de CdTe	Absorbe gran parte de las ondas de la región infrarroja. Bajo costo de fabricación. Buen desempeño al disipar calor.	El manejo de estos materiales puede ser toxico. Baja eficiencia de conversión.	[8, 9]
Punto cuántico	Baja complejidad de fabricación. Absorbe parte la región ultravioleta y tiene un pico de absorción en la región del infrarrojo.	Los puntos cuánticos son inorgánicos. Baja transmisión de luz.	[10, 11]
OPV(Celda fotovoltaica orgánica) de infrarrojo cercano	Se produce a partir de materiales orgánicos. Alto nivel transmitancia la mayoría superior al 40 %	Escasos recursos para su fabricación industrial. La arquitectura de fabricación es más compleja	[12]
Polímero	Bajo costo de producción. Flexible y ligero. No daña al medio ambiente durante su fabricación.	Estabilidad deficiente. Vida útil de muy corta duración.	[13]
Perovskita	Pueden fabricarse dispositivos de manera flexible. Alta eficiencia de conversión. No requiere altas temperaturas durante la fabricación.	Baja transmitancia. Implementa un electrolito liquido que puede generar problemas. Compuestos costosos. Muy volátil.	[14]

Hoy en día los paneles solares transparentes que se han desarrollado deben satisfacer 3 características principales: la primera, es que la eficiencia de conversión debe ser alta y acompañada de un buen nivel de transmitancia para mejorar la visibilidad promedio. Segundo, deben considerarse factores estéticos para poder funcionar como aplicaciones de impacto. Y tercero, debe facilitarse la modularización de estos dispositivos, así como su estabilidad. Partiendo de estas características, varios autores analizan cuáles han sido los avances más

recientes para el desarrollo de las CSTs, además de las estrategias que han permitido la implementación de película delgada o la tecnología de transmisión selectiva de luz.

Además de lo antes mencionado, existen registros de valores de transmitancia y eficiencia de conversión energética de CSTs. Para un registro concreto, se encontraron los siguientes datos a destacar: En una investigación se determinó el nivel de conversión energética de un CST elaborado a base de CdTe, el cual se resultó ser de alrededor del 0.41 %, mientras que su transmitancia fue del 30 % [15]. Es importante destacar que esta celda es del mismo material que la celda que fue adquirida para efectuar la experimentación en el presente trabajo. Otro análisis experimental se realizó para observar el desempeño de una CST fabricada a base de un polímero orgánico, para el cual se midió un nivel de transmitancia del 54 % y una eficiencia de conversión del 6.06 % [16]. Este último desempeño se enfatiza debido al alto porcentaje de transmitancia y elevado nivel de conversión. También existen datos relacionados con pruebas que han sido realizadas cumpliendo normas internacionales. Como ejemplo se mencionan algunas pruebas en las que hubo exposición a rayos UV y cambios repentinos de temperatura, entre -40 °C y 85 °C [17]. Estas pruebas permitieron analizar algunas fallas relacionadas con la inestabilidad del sistema, provocadas en su mayoría por la humedad, lo cual es algo que sin duda se debe considerar al realizar pruebas físicas. [7]

Desde una perspectiva más comercial, algunos autores señalan cuáles son las características que deben tener los paneles fotovoltaicos transparentes para cumplir con las demandas del mercado, particularmente se ha observado que los semiconductores orgánicos son la mejor alternativa de conversión. De hecho, en pruebas de laboratorio efectuadas con este tipo de celdas se ha alcanzado eficiencias del 18 % y algunas veces se supera el 20 % [18], por citar algunos ejemplos. En un último artículo al que se hace referencia, también se presenta un parámetro muy interesante denominado LUE (Eficiencia de utilización de la luz, por sus siglas en inglés), el cual evalúa la utilización eficiente de la luz. Si este parámetro llega a un valor de 5 %, entonces se marca un récord en sistemas transparentes inorgánicos [19, 20]. Así mismo, ya que los avances están orientados a responder a las necesidades del mercado, un aspecto fundamental que se consideró fue el tiempo de vida de las CSTs. El periodo de

vida varía mucho, según las temperaturas a las que se exponga. Lo que se espera es que el dispositivo tenga una estabilidad tal que garantice un tiempo de vida útil considerable, superando lo que actualmente se ha demostrado, que es aproximadamente una vida útil de más de 20 años en condiciones ideales [21].

Con respecto a pruebas realizadas para evaluar CSTs, en el año 2020 un experimento fue desarrollado por investigadores italianos [22] con el propósito de observar el beneficio de una CST en un edificio de oficinas. Como resultado, se determinó que el dispositivo utilizado en este ensayo tenía una transmitancia del 60% y un porcentaje de conversión del 8.7%. La instalación consistía en 10 celdas conectadas en serie, que, de acuerdo con los resultados presentados para un área de $6m^2$, tuvieron una producción eléctrica en un año de 293.4 kWh. Esta es una demostración de que este tipo de fuente puede ser de gran utilidad, tendrá un buen impacto en un futuro próximo y su instalación es viable para diferentes aplicaciones.

Al ser un sistema nuevo y en desarrollo, es poca la información relacionada con el modelado y caracterización de sistemas fotovoltaico transparentes. Por tal motivo, se tomará de referencia la información del libro de Modelado de Sistemas Fotovoltaicos [23]. Este libro presenta un modelo de diodo único para celdas fotovoltaicas que deriva en ecuaciones en términos de la radiación solar de entrada y la potencia de salida. Esta referencia [23] permitió identificar ecuaciones relacionadas con la potencia máxima de salida y el cálculo de dos tipos de eficiencias, una de ellas calculada en términos del área y la radiación incidente y la otra definida como la relación entre la potencia máxima de entrada y salida. Del mismo modo, en [24] se describieron algunas ecuaciones más bien relacionadas con el desempeño eléctrico representado mediante el modelo de diodo único. El modelo se presenta en una sección posterior.

Para realizar pruebas experimentales en la presente investigación se eligió una celda solar transparente. La elección se justificó por lo explicado en [25]. Existen 2 tipos de materiales que más comúnmente son utilizados para fabricar películas fotovoltaicas delgadas usadas en aplicaciones como celdas solares transparentes. Estos materiales son:

- c-Si (Silicio Monocristalino)
- CdTe (Telururo de Cadmio)
- a-Si (Silicio Amorfo)
- CIGS (Seleniuro de Cobre-Indio-Galio)

Las películas fotovoltaicas elaboradas a base de estos compuestos químicos ya han alcanzado un nivel de comercialización, por este motivo se han usado en varios proyectos con CSTs. En la misma referencia [25] se hace énfasis en las películas fotovoltaicas elaboradas a base de **CdTe y CIGS**. El interés por este tipo de material resulta del hecho que las CST fabricadas con este material han alcanzado eficiencias de conversión energética superiores al 20 %, lo cual ha sido un récord para esta tecnología. Del mismo modo las películas fotovoltaicas de CdTe cubren un 90 % del mercado de películas fotovoltaicas.

Además de eso, la revista MIT Technology Review [26] describe que la implementación de CdTe en celdas fotovoltaicas presentan un límite teórico de eficiencia superior al 30 %, lo cual es significativamente mayor al del silicio, además que el tiempo de vida útil es mayor para una celda de CdTe.

Una vez seleccionada la CST, se comenzó con la revisión de libros y artículos que presentan información relacionada con la caracterización mediante algunas ecuaciones y modelos equivalentes, como fue el caso del libro de Modelado de Sistemas Fotovoltaicos [23]. Este libro presenta un modelo de diodo único para celdas fotovoltaicas que deriva en ecuaciones en términos de la radiación solar de entrada y la potencia de salida. Este modelo es apropiado, lo único que hay que considerar para que se adapte a las características de la CST es el hecho de que este sistema trabaja únicamente con radiación infrarroja y ultravioleta. Esta referencia [23] permitió identificar ecuaciones relacionadas con la potencia máxima de salida y el cálculo de dos tipos de eficiencias, una de ellas en términos del área y la radiación incidente y otra en términos de la relación entre la potencia máxima de entrada y salida. Del mismo modo en [24] se describe el modelo de diodo único.

La idea con esta revisión del estado del arte es mostrar cuáles son los aspectos más importantes que se deben tomar en cuenta para medir adecuadamente el desempeño de una CST y determinar las propiedades del material, entre otras su transmitancia. Así mismo, se analizan los requerimientos y condiciones de instalación.

1.3. Justificación.

Aprovechar la radiación solar es una alternativa para reducir el uso de combustibles fósiles. Una de las más recientes innovaciones en el campo de energía solar son las celdas fotovoltaicas transparentes. En lo que respecta a esta tecnología, la información que existe en la literatura se orienta especialmente a su diseño y desarrollo o selección de materiales de construcción. Algunos otros estudios se centran en determinar las características de transparencia y eficiencia de este tipo de sistema, pero prácticamente ninguno presenta pruebas de su desempeño eléctrico. Tomando en cuenta que hay poca información reportada al respecto, se consideró oportuno caracterizar el desempeño eléctrico de una celda fotovoltaica transparente mediante pruebas físicas.

El propósito es conocer cuánta energía se puede disponer de este tipo de dispositivos en situaciones reales. La caracterización del sistema permitirá que aquellos que deseen realizar una instalación de paneles fotovoltaicos transparentes para una aplicación particular, cuenten con datos del desempeño de un módulo y tomen en cuenta, por las experiencias reportadas, algunas consideraciones prácticas para su diseño, puesta en marcha y operación. Así que esta tesis proveerá información teórica y práctica del desempeño de una celda solar transparente, de utilidad para futuros estudios o investigaciones sobre el tema.

1.4. Metas.

- Completar la revisión e identificación de los parámetros para evaluar el desempeño de estos sistemas, a partir de esto elaborar una lista con los parámetros más importantes.
- Adquirir una celda fotovoltaica transparente para medir su desempeño eléctrico básico.
- Presentar un documento en el cual se concentren los parámetros y medidas de eficiencia y propiedades eléctricas y de transparencia, además de un informe con los datos obtenidos a partir de las pruebas realizadas a este sistema.
- Con la información recabada en los puntos anteriores, realizar un dimensionamiento global para alguna aplicación particular.

1.5. Objetivos.

1.5.1. Generales.

Caracterizar el desempeño eléctrico y óptico, así como determinar la eficiencia de un módulo de celdas fotovoltaicas transparentes.

1.5.2. Particulares.

1. Revisar el estado del arte de la tecnología de sistemas fotovoltaicos transparentes.
2. Identificar y medir parámetros que determinen el desempeño y la eficiencia del sistema.
3. Registrar del desempeño eléctrico básico y modelar el módulo experimental.
4. Dimensionar una aplicación. A considerar su uso en un vehículo, en una habitación o en un vivero.

1.6. Organización del documento.

En el Capítulo 2 se presenta el marco teórico, aquí se describen de manera detallada algunos conceptos técnicos que son fundamentales para abordar este tema de tesis. En el Capítulo 3 encontraremos la metodología necesaria para poder lograr los objetivos planteados, destacando el protocolo de pruebas y el planteamiento de las ecuaciones. Los resultados de la pruebas realizadas se presentan en el Capítulo 4, donde se ha segmentado la descripción en las siguientes partes: pruebas eléctricas, pruebas de transparencia, modelo y dimensionamiento. Finalmente se presentan las conclusiones y se describe la aportación de este estudio.

Capítulo 2

Marco teórico.

Hoy en día la radiación solar se aprovecha en sistemas entre los cuales están: los paneles fotovoltaicos, los concentradores solares, los concentradores fotovoltaicos, las celdas solares transparentes, entre otros. Normalmente los parámetros para evaluar el desempeño en este tipo de sistemas varían de un sistema a otro, sin embargo, hablando específicamente de los paneles fotovoltaicos tradicionales y los más recientes paneles fotovoltaicos transparentes existen similitudes en algunos aspectos técnicos, los cuales se describirán a continuación.

2.1. Radiación solar.

La radiación solar llega de tres maneras diferentes: la radiación directa, es aquella que llega desde el sol sin haber tenido contacto con ningún otro cuerpo. La radiación difusa es la que llega después de haber incidido en algún elemento de la atmósfera. Finalmente la radiación reflejada, como su nombre lo indica, es la radiación que refleja la superficie de la tierra [27]. Normalmente los paneles solares se ubican en zonas en donde se puede aprovechar la radiación solar directa para alcanzar una mayor eficiencia.

De acuerdo con lo reportado en [28, 29], la composición y los componentes predominantes

de la radiación solar que llegan a la superficie de la tierra se encuentran en un rango de onda de 0.29 a 2.5 μm [30], como se puede observar en la Figura 2.1 y que se en listan a continuación.

- Infrarrojo (52 - 55 % $\lambda > 780 \text{ nm}$)
- Visible (42-43 % $380 < \lambda < 780 \text{ nm}$)
- Ultravioleta (3-5 % $30 < \lambda < 380 \text{ nm}$)

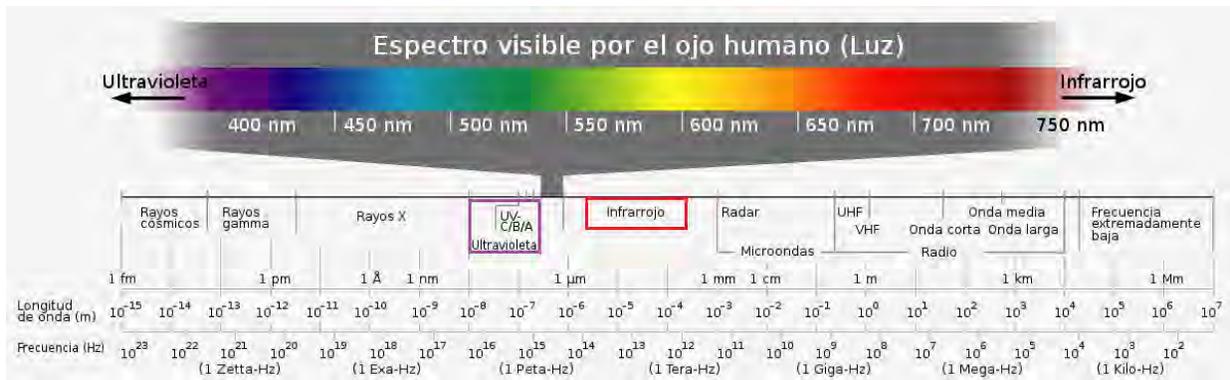


Figura 2.1: Espectro Electromagnético ©2006 por Horst Frank utilizado bajo licencia CCBY-SA 3.0.

Cada uno de los componentes tienen características fundamentales a considerar. La Radiación UV es invisible y cubre un rango de onda desde los 100 hasta los 400 nm, y usualmente se clasifica en 3 categorías ascendentes que van desde el UV-C, UV-B y UV-A, según sus longitudes de onda [31].

Cada una de estas categorías tiene una longitud de onda definida.

- UV-A entre 320 y 400 nm
- UV-B entre 280 y 320 nm
- UV-C entre 100 y 280 nm

La radiación que alcanza la tierra es 95 % radiación UV-A y un 5 % de UV-B. La radiación ultravioleta ha alcanzado niveles de hasta $42W/m^2$ en meses de verano.

Posteriormente está la luz visible, para la cual existe una relación entre la irradiancia y la temperatura del cuerpo que la emite. En el caso del sol, la temperatura es de unos 6000 K y, por tanto, su espectro alcanza los $1000 W/m^2$. Lo anterior se marca en la Figura 2.2 con la línea más elevada.

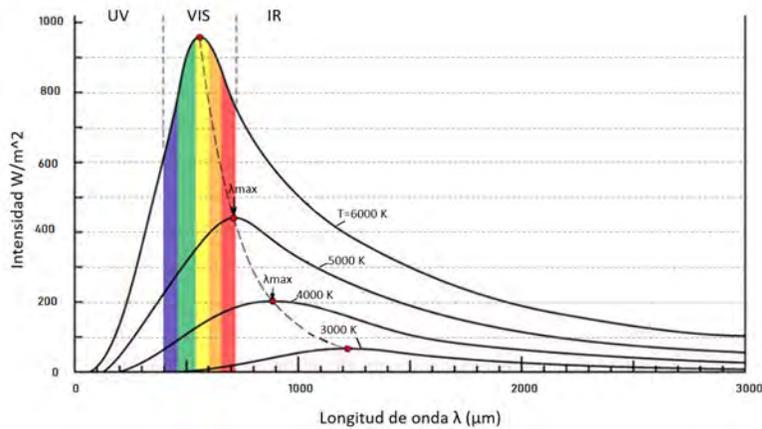


Figura 2.2: Composición de la luz y calidad de la luz a partir del cuerpo que emite ©2011 por Livinus utilizado bajo licencia CCBY-SA 3.0.

Aunque la mayoría de la radiación sigue siendo infrarroja, a esta temperatura una parte de ella contiene toda la luz visible, mientras que la radiación térmica de mayor intensidad se encuentra justamente a mitad del espectro visible. Por eso, para nuestros ojos la luz solar es blanca y tiene su máxima intensidad en el color amarillo. Para pruebas controladas se puede utilizar una fuente de radiación artificial, sin embargo, la calidad y composición de la radiación es diferente de acuerdo con el color de la luz emitida por un foco de filamento y guarda relación con la temperatura que va adquiriendo al circular los electrones por el filamento.

En el caso de una lámpara incandescente, esta empieza emitiendo luz roja, según va subiendo la temperatura, esa luz emitida empieza a tomar tonos amarillos y finalmente, cuando se alcanzan unos 2800 K (unos 2527 °C) se convierte en luz blanca.

2.2. Efecto Fotovoltaico.

Las celdas fotovoltaicas transparentes, al igual que todos los paneles solares tradicionales sustentan su funcionamiento en el efecto fotovoltaico. Para que este efecto fotoeléctrico ocurra se usan materiales semiconductores como el silicio, telurio, germanio. Los paneles fotovoltaicos se componen de pequeñas láminas de algunos de los materiales antes mencionados, dichas láminas están dopadas con impurezas [32], este tratamiento químico permite la creación de una zona con carga positiva y otra zona más con carga negativa. La configuración descrita provoca que cuando la radiación solar entra en contacto con las láminas dopadas, los electrones se muevan hacia la zona negativa, mientras que las cargas positivas ocupan los huecos que dejan los electrones previamente desplazados [33]. Para entender de mejor manera lo antes explicado veamos la Figura 2.3 que muestra el efecto fotovoltaico.

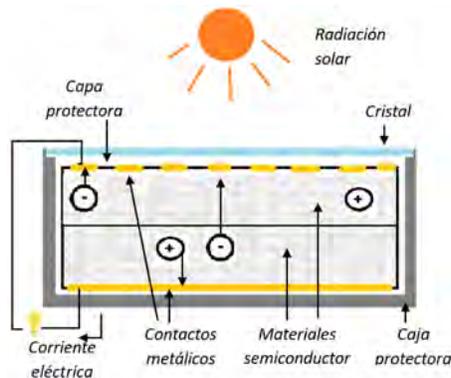


Figura 2.3: Efecto Fotovoltaico [34].

Una vez realizado este movimiento, las cargas se encontrarán en las zonas ideales, así que al cerrar el circuito se obtendrá una corriente eléctrica de salida. Entender este concepto de manera clara es fundamental para abordar cualquier tema relacionado con las celdas fotovoltaicas y la producción de energía eléctrica.

2.3. Transmitancia.

Uno de los principales parámetros de las CST es la transmitancia, este concepto se define como la cantidad de radiación solar que atraviesa un cuerpo. Autores como Burgués-Ceballos [4] se refieren a este parámetro con las siglas AVT (Transmitancia visible promedio, por sus siglas en ingles) y es medido en términos porcentuales. Conocer cuánta radiación pasa a través de los paneles permite identificar si realmente pueden funcionar en algunas aplicaciones [35]. A continuación, en la Figura 2.4 se presenta una gráfica que evalúa la relación entre la transmitancia de un panel solar transparente y la eficiencia de la conversión en energía eléctrica.

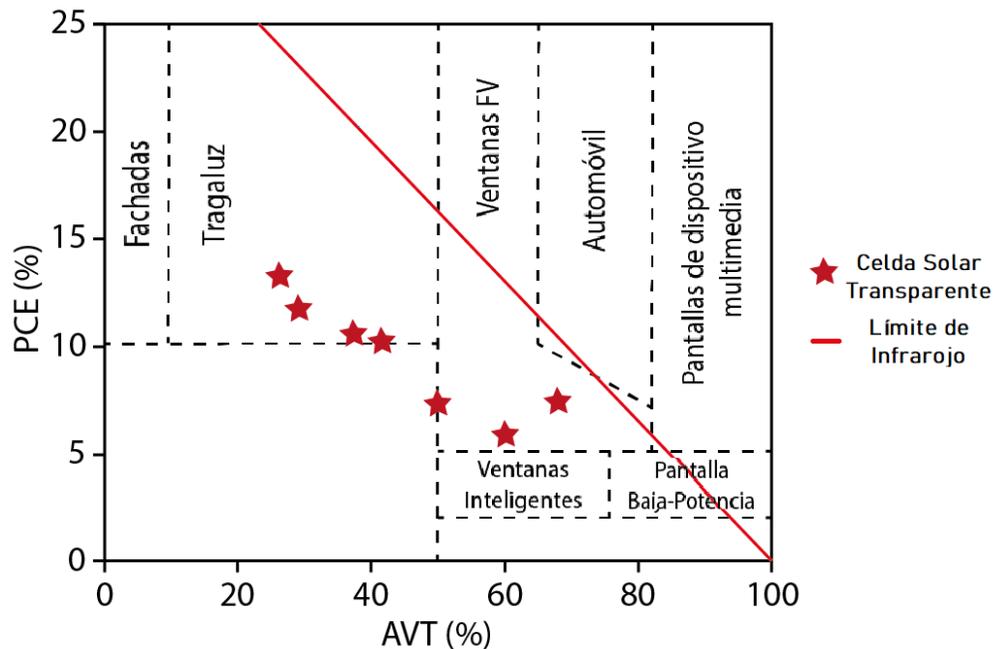


Figura 2.4: Relación entre la transmitancia y la eficiencia de conversión en celdas solares transparentes inorgánicas[36, 37, 38, 39, 40, 41], a partir de estos datos se puede considerar a que aplicación se orienta [4].

De esta gráfica podemos destacar que si tomamos como referencia el porcentaje de transmitancia es posible orientar a diferentes aplicaciones una CST. Así mismo, conocer el porcentaje de transmitancia permite conocer la eficiencia de conversión de los módulos fotovoltaicos

transparentes. En la gráfica se muestran específicamente datos de paneles inorgánicos. Los datos de eficiencia se obtienen conociendo únicamente el aprovechamiento en la longitud de onda infrarroja. Resumiendo, la transmitancia es de gran importancia al momento de evaluar un módulo solar transparente, este parámetro nos permite evaluar el desempeño eléctrico, la eficiencia y las aplicaciones en que se pueden implementar.

2.4. Película fotovoltaica transparente.

Las películas fotovoltaicas transparentes representan una prometedora innovación en el campo de la energía solar como la que se muestra en la Figura 2.5 la cual es desarrollada por ASCA® empresa dedicada a la fabricación de paneles solares, ya que permiten la integración de tecnología fotovoltaica en superficies transparentes como ventanas y fachadas de edificios. Esta capacidad de generar energía eléctrica sin afectar significativamente la transparencia de las superficies abre nuevas posibilidades para la generación de energía limpia y sostenible en aplicaciones urbanas y arquitectónicas.

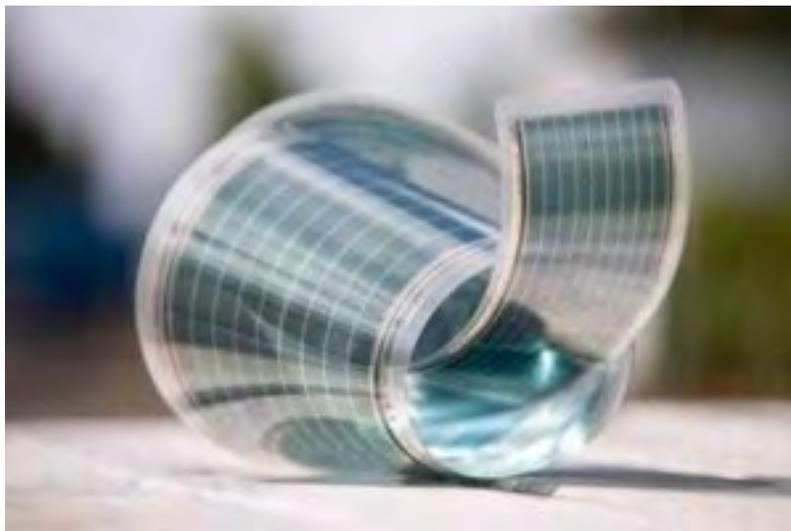


Figura 2.5: Película fotovoltaica transparente, elaborada por ASCA®[42].

En la búsqueda de materiales adecuados para películas fotovoltaicas transparentes se han

realizado avances significativos en la aplicación de perovskitas, que son cristales híbridos de haluros metálicos y amonio que exhiben propiedades fotovoltaicas altamente prometedoras [43]. Estudios recientes han demostrado que las perovskitas pueden lograr eficiencias de conversión superiores al 20% en celdas solares de capa delgada [44]. La incorporación de tratamientos de Teluro de Cadmio (CdTe) también ha demostrado mejorar la eficiencia y la estabilidad de estas celdas [45].

Otro enfoque prometedor en películas fotovoltaicas transparentes es el uso de nanomateriales, como nanocristales semiconductores. Los nanocristales de silicio, por ejemplo, han sido investigados como una alternativa para mejorar la eficiencia de celdas solares transparentes [46]. Estos materiales, debido a su tamaño nanométrico, pueden proporcionar un mayor control sobre la absorción y emisión de luz, lo que se traduce en una mayor eficiencia en la conversión fotovoltaica. Además, los nanocristales permiten la fabricación de celdas solares flexibles y transparentes mediante métodos de deposición de capas delgadas [46].

La utilización de materiales orgánicos también ha sido objeto de investigación en películas fotovoltaicas transparentes. Los polímeros conjugados con banda prohibida pequeña (que tienen propiedades ópticas no lineales y una alta conductividad intrínseca) se han estudiado como alternativas para mejorar la transparencia y flexibilidad de las celdas solares [47]. Se ha demostrado que estos materiales pueden formar películas fotovoltaicas de capa delgada mediante métodos de deposición de solución, lo que abre la posibilidad de fabricar celdas solares de bajo costo y alta eficiencia en sustratos flexibles.

En conclusión, las películas fotovoltaicas transparentes representan una importante área de investigación en el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas avanzadas. El uso de perovskitas, nanomateriales y materiales orgánicos ha demostrado ser prometedor para mejorar la eficiencia y la transparencia de estas celdas solares. Sin embargo, aún se requiere más investigación y desarrollo para lograr películas fotovoltaicas transparentes altamente eficientes y económicamente viables para su implementación a gran escala.

2.5. Telururo de cadmio

La tecnología fotovoltaica de CdTe continúa siendo una opción altamente prometedora en la industria solar debido a sus ventajas únicas. Como se mencionó anteriormente, el CdTe ofrece una serie de beneficios significativos en términos de costos, eficiencia y huella ambiental. Además de estas ventajas, el cadmio, como elemento químico, presenta características favorables para su uso en celdas solares.

El cadmio es un metal que no se corroe fácilmente, lo que asegura una mayor durabilidad de las celdas solares que lo utilizan en comparación con las de silicio. Esta resistencia a la corrosión es especialmente valiosa en condiciones ambientales desafiantes, como en áreas con alta humedad o salinidad existente. Además, las celdas de CdTe se benefician de la abundancia de cadmio como subproducto de la producción de otros materiales como el zinc, el plomo y el cobre [48], lo que contribuye a una fuente de suministro estable y económica.

Por otro lado, el telurio, como material que pertenece al grupo de los metaloides, ha encontrado un papel fundamental en la fabricación de películas fotovoltaicas delgadas. Esta característica permite la reducción del tamaño de los paneles solares y, por ende, la disminución del material utilizado, lo que resulta en una reducción significativa de los costos de producción. De hecho, su alta conductividad ha hecho que el telurio sea ampliamente utilizado en otras aplicaciones tecnológicas, como la fabricación de discos compactos [49], por ejemplo.

Al revisar el estado del arte, se ha confirmado que las películas fotovoltaicas de CdTe ofrecen una mayor estabilidad y eficiencia en comparación con otras tecnologías [45]. Su proceso de fabricación policristalino también lo hace ideal para aplicaciones industriales y a gran escala, lo que lo convierte en una opción atractiva para instalaciones de energía solar de gran tamaño.

En cuanto a las aplicaciones orientadas a Tecnologías Solares Concentradas, el CdTe ha demostrado valores de transmitancia que oscilan entre el 30 % y el 43 % [50, 7]. Esta carac-

terística es relevante en el diseño de sistemas de concentración solar que buscan maximizar la eficiencia en la captación y conversión de la luz solar en electricidad.

En resumen, el análisis del cadmio y el telurio o teluro como elementos fundamentales en la tecnología fotovoltaica de CdTe refuerza la posición de esta tecnología como una opción líder en la generación de energía solar. Sus ventajas en términos de costos, estabilidad, eficiencia y disponibilidad lo hacen especialmente adecuado para aplicaciones a gran escala y en condiciones ambientales diversas. La constante investigación y optimización de los procesos de fabricación y reciclaje también prometen un futuro aún más alentador para la tecnología fotovoltaica de Telururo de cadmio.

Capítulo 3

Metodología.

3.1. Identificación de parámetros.

En lo relacionado con la identificación de parámetros para medir eficiencia y caracterizar comportamiento, se formaron dos grupos de pruebas que incluyen mediciones eléctricas y propiedades de transparencia.

3.1.1. Identificación de parámetros Eléctricos.

Hasta el momento en los artículos revisados no presentan un modelo específico para sistemas fotovoltaicos transparentes. Lo que hacen diferentes autores es considerar un modelo de una celda fotovoltaica tradicional, esto ha resultado conveniente debido a que ambos sistemas basan su funcionamiento en el efecto fotoeléctrico. El circuito equivalente del cual se obtienen algunas ecuaciones relacionadas con el desempeño eléctrico del sistema se presentan a continuación en la Figura 3.1 [23].

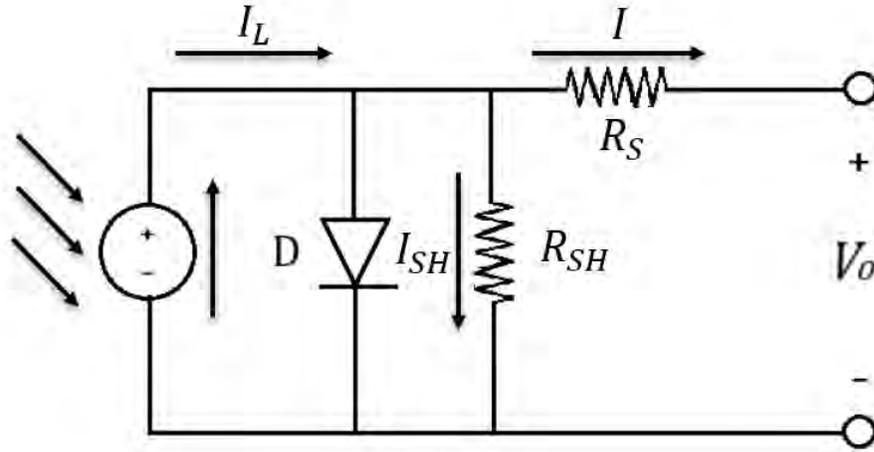


Figura 3.1: Circuito equivalente para modelar una CST [23].

La salida de voltaje de este circuito es directamente proporcional a la radiación incidente sobre la celda (G_a). Cuando la radiación solar entra en contacto con la CST se genera una corriente que fluye a través del diodo (D), siendo este elemento el que determina las características de voltaje y corriente de la CST. La resistencia R_s , representa la resistencia interna de la celda, mientras que R_{sh} representa la resistencia de derivación y D representa el diodo de este circuito.

Este modelo matemático se componen de cinco parámetros que se muestran en el circuito equivalente de la Figura 4.13 se puede representar mediante las ecuaciones 3.1 y 3.8:

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (3.1)$$

En primer lugar I_L es la corriente generada por la celda solar y se calcula con la ecuación 3.2:

$$I_L = [\mu_{sc}(T_c - T_{ref}) + I_{sc}] * \frac{G_{tc}}{G_{ref}} \quad (3.2)$$

Donde, μ_{sc} es el coeficiente de corto circuito, T_c es la temperatura en condiciones de prueba, T_{ref} es la temperatura de referencia, G_{tc} es la irradiancia en condiciones de prueba y G_{ref} es la referencia de irradiancia, dada por 1000 W/m^2

Posteriormente I_D es la corriente del diodo, que puede aproximarse utilizando la ecuación 3.3:

$$I_D = \left[\exp \frac{q(V_o + IR_s)}{\delta * V_t * N_s} - 1 \right] \quad (3.3)$$

Donde, δ es la constante de idealidad del diodo, N_s es igual al numero de celdas solares en serie, V_t es el voltaje térmico dado por la ecuación 3.4

$$V_t = \frac{k * T}{q} \quad (3.4)$$

En este caso k es la constante de Boltzmann que tiene un valor de $1,38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$, T es la temperatura ambiente y q es la carga de un electrón que es igual a $1,6 \times 10^{-19} C$

Como ultimo parámetro de la ecuación 3.1 tenemos la corriente en corto circuito (I_{SH}) que esta dada por la ecuación 3.5

$$I_{SH} = \frac{V_o + IR_s}{R_{sh}} \quad (3.5)$$

Para la ecuación 3.5 se considera que los valores de R_s y R_{sh} se obtienen de las ecuaciones 3.6 y 3.7

$$R_s \approx - \frac{dV}{dI} |_{V_o = V_{oc}} \quad (3.6)$$

$$R_{sh} \approx -\left. \frac{dV}{dI} \right|_{I = I_{sc}} \quad (3.7)$$

Finalmente el voltaje en circuito abierto se puede expresar matemáticamente como

$$V_{oc} = V_t \ln \left(\frac{I_L}{I_D} \right) \quad (3.8)$$

Este modelo es útil para analizar el comportamiento eléctrico de una celda solar en condiciones de operación estándar. Sin embargo, en aplicaciones más precisas y detalladas, se pueden utilizar modelos más complejos que tienen en cuenta otros factores como la temperatura y la iluminación no uniforme.

Potencia máxima de operación, P_{max} .

Representa el punto de potencia máxima, donde la carga resistiva está en un valor máximo y está dado por la ecuación 3.9 [23].

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} \quad (3.9)$$

donde:

- P_{max} =Potencia Máxima
- V_{max} =Voltaje Máximo
- I_{max} =Corriente Máxima

Eficiencia máxima de la celda solar, η .

Un aspecto de suma importancia en esta investigación es identificar la eficiencia máxima que

tendrán las CST. Para este efecto, la ecuación 3.10 permite calcular la eficiencia máxima de la CST, considerando la relación entre la potencia máxima y la luz incidente en la celda [23].

$$\eta = \frac{I_{max} * V_{max}}{A_c * G_a} \quad (3.10)$$

- V_{max} =Voltaje Máximo de Salida.
- I_{max} =Corriente Máxima de Salida.
- A_c =Área de la celda.
- G_a =Radiación solar incidente.

Factor de llenado, FF (por sus siglas en inglés).

Este parámetro comúnmente conocido como Fill Factor representa la relación entre el producto de la corriente y el voltaje en un punto de máxima potencia. Par celdas solares eficientes este valor debe ser superior al 0.7. Este valor disminuirá a medida que la temperatura de la celda aumente [23].

$$FF = \frac{I_{SC} * V_{OC}}{I_{max} * V_{max}} \quad (3.11)$$

- I_{SC} =Corriente de corto circuito.
- V_{OC} =Voltaje de Circuito Abierto.
- V_{max} =Voltaje Máximo de Salida.
- I_{max} =Corriente Máxima de Salida.

También es importante definir que la I_{SC} (Corriente de corto circuito) es la corriente máxima que puede generar una CST cuando existe un corto circuito entre las terminales de

salida. Mientras que el V_{OC} (Voltaje de Circuito Abierto) es la diferencia de potencial que existe entre los dos conductores de salida de una CST cuando no existe una demanda de corriente de una carga externa.

3.1.2. Identificación de parámetros de Transparencia.

Al ser un sistema transparente es importante realizar el cálculo de ciertos parámetros que garanticen propiedades de transparencia adecuadas, de acuerdo con diferentes normas.

Neblina de transmisión, $H(\%)$.

Este parámetro indica cuánto porcentaje de la luz que pasa a través de la CST es reflejado o dispersado, provocando que lo que está detrás de la CST pueda verse borroso u opaco. A medida que el valor de la neblina de transmisión disminuya, será más claro observar qué hay detrás de la CST [7].

$$H(\%) = \frac{T_d}{T_t} * 100 \quad (3.12)$$

- T_d =Transmitancia difusa.
- T_t =Transmitancia total.

La transmitancia difusa (T_d) se refiere a la cantidad de luz que se dispersa al pasar a través de un material, en cambio, la transmitancia total (T_t) se refiere a toda cantidad de luz que se proyecta sobre el material, en esta se considera la transmitancia difusa y visible.

Luz utilizada eficientemente, T_{eff} .

Este parámetro fue introducido en 2014 por Zhang [51] y es un indicador de cuánta luz es utilizada eficientemente, entre mayor sea el valor de este parámetro, este indica un mejor aprovechamiento de la luz de la CST [52].

$$T_{eff} = 100v * 100\tau_v \quad (3.13)$$

- v =Coeficiente de absorción.
- τ_v =Transmitancia visible.

En este caso se define como transmitancia visible (τ_v) a la cantidad de luz que pasa a través de la CST sin dispersarse.

3.2. Adquisición de la CST.

La adquisición de la CST se logró completar a inicios de Septiembre de 2022, se compró una CST elaborada de CdTe (Telururo de Cadmio) con las siguientes características: 50 % transparente, sin marco, además, es compacto y de bajo costo, en la Figura 3.2 se presentan las CST.



Figura 3.2: Celda Solar Transparente, elaborada por SolarFirst.

Este producto apareció en venta en la plataforma Alibaba. Un primer inconveniente fue que la compra era de mínimo 10 piezas para realizar el envío, además de eso el tamaño estándar era de 1200*600*10 mm. El mantener un tamaño estándar hacía que el costo alcanzara hasta los \$45,000 pesos más gastos de importación. Un proveedor ofrecía un producto de menor tamaño, nos pusimos en comunicación constante y logramos que la empresa fabricante Solar-First nos pudiera fabricar y vender la celda solar transparente de CdTe de 300*300*8 mm. La Tabla 3.1 resume los parámetros proporcionados por el fabricante.

Tabla 3.1: Datos del fabricante de la CST.

Parámetros	Panel Transparentes
Eficiencia	6.56 %
Potencia nominal	5.9 W
Voltaje de circuito abierto	27.9V
Corriente de corto circuito	0.32 A
Voltaje en potencia max.	20.9 V
Corriente en potencia max.	0.28 A
Temperatura de operación	-40°C a 85°C
Largo del Panel Solar	300mm
Ancho del Panel Solar	300mm
Área	0.09m ²
Transparencia	50 %
Espesor de la Película	0.7mm
Coefficiente de absorción	0.7
Coefficiente I_{sc}	0.060 %
Coefficiente V_{oc}	-0.321 %
Coefficiente P_{max}	-0.214 %
Irradiancia	1000 W/m ²
Temperatura	25°C
Distribución Espectral	AM 1.5G

3.3. Norma IEC 61215

Para caracterizar de manera adecuada una celda fotovoltaica se deben considerar normas pertinentes. En el caso de CSTs las normas específicas pueden variar según el país o la región, algunas normas generales y estándares de la industria que podrían aplicarse incluyen: la norma internacional IEC 61215, la cual establece los requisitos y condiciones para evaluar el rendimiento de módulos fotovoltaicos. Se consideraron como referencia estos requisitos para diseñar y efectuar las pruebas de la CST.

Para iniciar se lista el equipo de medición que se utiliza en conformidad con la norma IEC 61215. Los sensores de temperatura, voltaje y corriente deben tener características de precisión particulares, las cuales se describen a continuación:

- Para supervisar la temperatura ambiente y del dispositivo (CST) deben tener una precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ y una repetibilidad de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.
- En el caso del voltaje y la corriente de la muestra de prueba y el dispositivo de referencia, se requiere una precisión de $\pm 0,2\%$ en la lectura.

Tomando como referencia las características descritas anteriormente se realizó la selección de los sensores. Para medir temperatura se usó un sensor DHT22, mientras que para medir voltaje se utilizó un sensor FZ0430. Una vez se seleccionaron los dispositivos de medición, fue necesario listar y definir las condiciones en las cuales se deben hacer las mediciones, de acuerdo con la norma internacional antes mencionada. De la norma se destacan las condiciones de medición que se describen a continuación:

1. La humedad relativa debe ser menor de 75 %.
2. La temperatura de la celda durante las pruebas debe estar entre 25°C y 50°C .
3. La prueba debe realizarse con los módulos a temperatura ambiente.

3.4. Protocolo de Pruebas

El rendimiento de CST depende de las condiciones de prueba, la radiación solar, la temperatura ambiente, y la velocidad del viento. Su rendimiento varía también en función de la tecnología de los módulos solares. En particular, la temperatura superficial en el panel fotovoltaico afecta de manera importante la eficiencia de los paneles fotovoltaicos, a mayor temperatura, menor es la eficiencia.

Sin embargo, en general todas las condiciones ambientales pueden ser muy cambiantes y afectar simultáneamente la eficiencia de la CST. Por tal motivo es importante realizar pruebas en un entorno donde las variables que afectan una CST se mantengan estables el mayor tiempo

posible, lo que permite determinar los parámetros de un modelo de comportamiento de la CST de manera fiable. Finalmente se decidió que se realizarían experimentos en el banco de pruebas manteniendo condiciones controladas y también pruebas en exteriores. De acuerdo con la norma IEC 61215, para pruebas realizadas con paneles fotovoltaico en exteriores e interiores, es importante considerar algunas condiciones.

El objetivo es realizar diferentes pruebas que permitan evaluar el desempeño y eficiencia de la CST. Esta parte experimental comprende dos secciones principales, en primer lugar las pruebas eléctricas y en una segunda parte se realizaron pruebas de transparencia. Con respecto al primer punto se realizaron cuatro pruebas que sirvieron para reconocer aspectos relevantes de la CST enfocadas en su comportamiento eléctrico.

Se inició con la obtención de curvas de desempeño que caracterizan a los paneles fotovoltaicos (Voltaje - Corriente y Potencia - Voltaje). Posteriormente se realizaron pruebas experimentales en condiciones controladas de irradiancia solar y también de radiación solar. El objetivo fue comparar el desempeño eléctrico medido y el comportamiento simulado considerando los datos generales del fabricante. De igual forma, los datos de estas pruebas fueron usados para identificar un modelo de comportamiento para la CST.

También se consideró oportuno realizar pruebas con demandas de corriente fija y variable. El análisis del sistema ante demandas de corriente fija da información sobre los puntos en los cuales se obtiene un mejor desempeño del dispositivo. Las pruebas ante demandas de corriente variable permiten modelar la dinámica de la CST. El último objetivo de las pruebas eléctricas fue comparar el desempeño de una CST y un panel opaco de dimensiones similares. De esta prueba lo que se buscó fue evaluar cómo se comportan ambos paneles en irradiancia solar, conocer las diferencias en el desempeño eléctrico y también observar en términos porcentuales cuál es la diferencia de voltaje, corriente y potencia de los paneles.

En el caso específico del estudio de la transparencia, únicamente se hicieron dos pruebas que permiten evaluar este aspecto tan importante de una CST. El objetivo de la prueba para evaluar la luz utilizada eficientemente es conocer que parte del espectro solar se aprovecha de

mejor manera. Se busca evaluar numéricamente el dato específico. Mientras que la prueba de neblina de transmisión tiene como objetivo ver que porcentaje de luz pasa a través de la CST, con estas mediciones es posible evaluar la eficiencia del dispositivo para su funcionamiento en alguna aplicación.

3.4.1. Pruebas Eléctricas

Para evaluar el comportamiento y rendimiento eléctrico de la CST se efectuaron pruebas bajo dos condiciones diferentes: con radiación solar en el exterior y con radiación artificial. El objetivo fue obtener mediciones y posteriormente graficar los datos, evaluando por el tratamiento de esta información la eficiencia de la CST para cada caso. Los experimentos con radiación artificial fueron realizados en un banco de pruebas que de manera general se construyó de la siguiente forma: En una caja cerrada y oscura se colocó el panel transparente, el equipo de medición y las iluminaciones. En la Figura 3.3 se presenta el banco de pruebas.



Figura 3.3: Banco de pruebas.

Fue necesario instalar 2 ventiladores debido a que la temperatura aumentaba durante las pruebas y se programó un control de temperatura para que el cajón se mantuviera estable en 25°C.

Para realizar las pruebas en irradiancia solar se buscó la ubicación exacta de Jiutepec, Morelos, es decir se consideraron las coordenadas 18.882058, -99.190725. Con esta referencia se consultó el mapa de radiación solar, el cual se obtuvo de [53] y se muestra en la Figura 3.4. En este mapa se consultó el nivel de radiación solar según la hora que en la que se hizo el monitoreo, que en este caso fue a las 4:30 p.m.

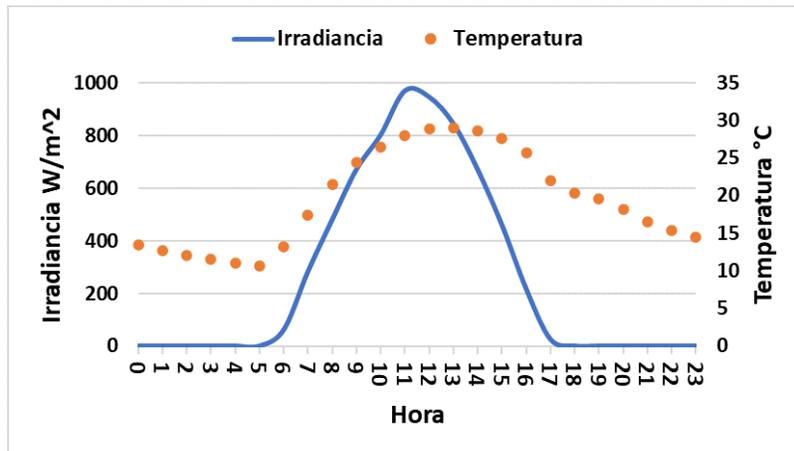


Figura 3.4: Mapa de irradiancia y temperatura del 3 de Marzo del 2023.

Así mismo se colocó la CST de tal manera que recibiera la mayor cantidad de irradiancia solar considerando información de [54], junto con la celda se colocó el equipo de medición correspondiente, ver Figura 3.5.



Figura 3.5: Pruebas eléctricas de una CST en irradiancia solar.

1. **Curvas características de I-V & P-V.** Se representaron gráficamente las relaciones corriente-voltaje y potencia-voltaje, las cuales fueron obtenidas a partir de las mediciones realizadas en la CST. Los datos obtenidos fueron útiles para registrar su funcionamiento, calcular la eficiencia y estimar los parámetros del modelo en circuito eléctrico equivalente seleccionado para reproducir el desempeño observado del módulo de CST que se estudia. Para simular el comportamiento de la CST se usó el bloque PV Array de Simulink. Este módulo necesita los parámetros que se muestran en la Figura 3.6. El bloque modela módulos fotovoltaicos seleccionados a partir de una lista de dispositivos comerciales, así como módulos definidos por el usuario. En este estudio se usó el modo especificado por el usuario. El bloque realiza la simulación a partir del modelo "System Advisor" (2018) del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL en inglés) que se muestra en [55].

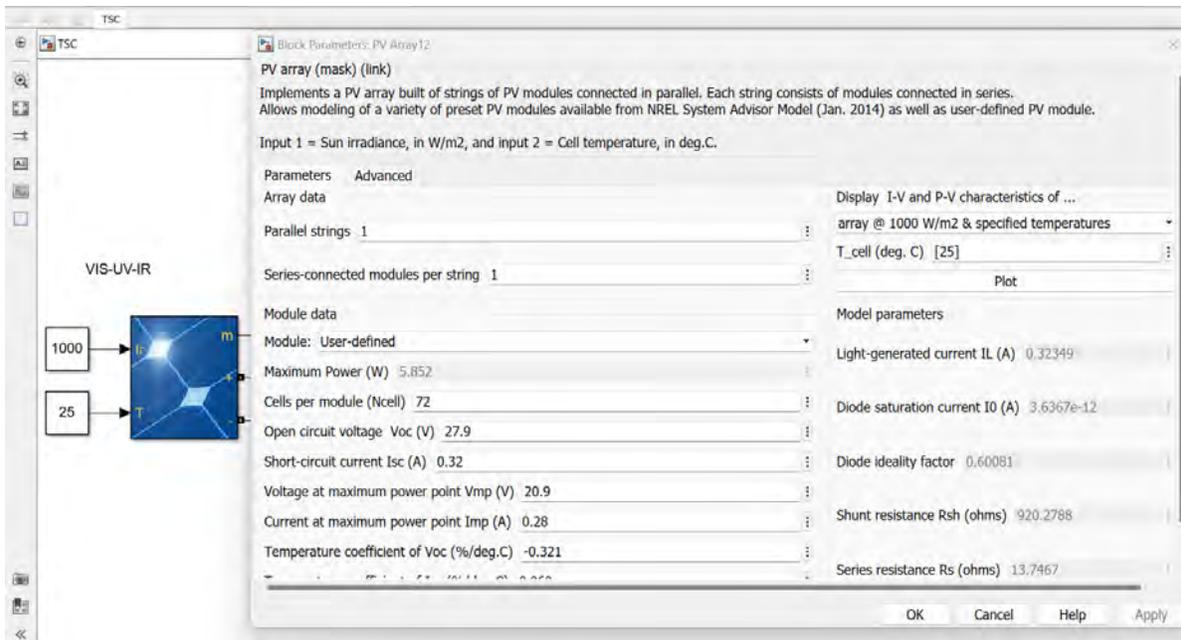


Figura 3.6: Datos de entrada del bloque PV Array de simulink.

El bloque contiene un modelo de cinco parámetros. El circuito eléctrico está formado por una fuente de corriente que representa la luz (I_L), un diodo, una resistencia en serie (R_s) y una resistencia en derivación (R_{sh}). La combinación de estos elementos en un

circuito da una respuesta equivalente al comportamiento voltaje-corriente de un panel fotovoltaico en función de la irradiancia y la temperatura. Las curvas resultantes de los experimentos con la CST en estudio son características del panel, y se verificó que respetan los datos de la hoja de configuración que contiene los datos del fabricante. De esta manera se obtuvieron lo que en este trabajo se denomina "curvas del fabricante".

2. Curvas características en radiación solar y radiación artificial.

Se realizaron mediciones de voltaje en condiciones de irradiancia solar en el exterior, así como pruebas en condiciones controladas. Las mediciones se llevaron a cabo teniendo cuidado de que las condiciones ambientales no estuvieran variando significativamente. El diagrama esquemático de la Figura 3.7 muestra de manera general como se hicieron las pruebas.

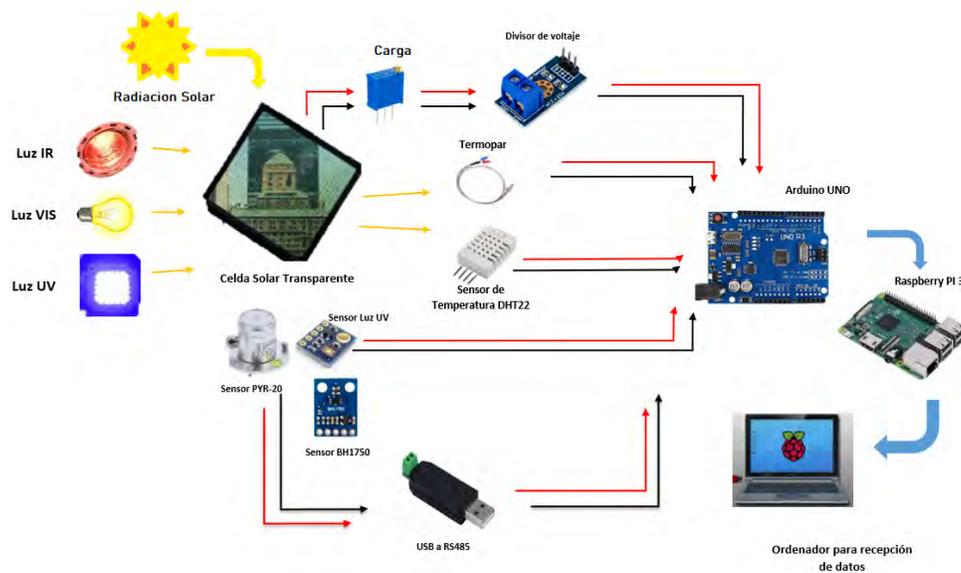


Figura 3.7: Diagrama esquemático del banco de pruebas experimentales.

En el caso de las pruebas controladas se utilizaron 3 lámparas para emular el espectro que produce la radiación solar, estas se dispusieron perpendicularmente a la CST. Junto a la CST se colocó el piranómetro PYR-20 (RS485) y el sensor de luminosidad BH1750, estos dispositivos permitieron medir la radiación incidente en la CST y ayudaron a que los datos se pudieran manipular con mayor facilidad en la tarjeta de adquisición.

También se usó un divisor de voltaje para modificar la señal de salida de la CST. De esta forma, la tarjeta de adquisición (Arduino UNO) monitoreó los datos sin dañarla. La adquisición de datos se realizó con la tarjeta Arduino UNO porque es fácil instalar librerías y es compatible con la mayoría de sensores y módulos de medición. Por otro lado, para el procesamiento y almacenamiento de datos se utilizó la Raspberry Pi 3. Los datos se guardaron en un archivo .txt, lo cual permitió manipularlos fácilmente. Para establecer la conexión Arduino - Raspberry se utilizó la comunicación serial por el puerto USB.

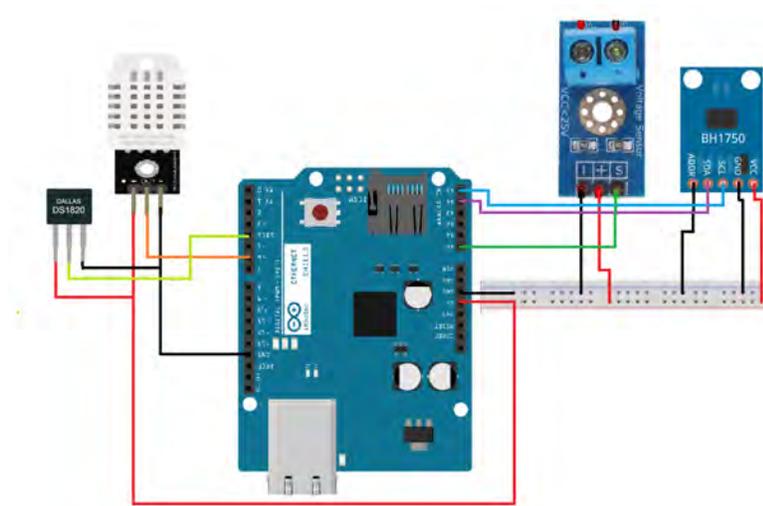


Figura 3.8: Conexiones de Arduino para pruebas en irradiancia experimentales.

En la Figura 3.8 se presenta la conexión del Arduino UNO con todos sus sensores.

Se conectaron diferentes cargas resistivas a la celda solar comenzando con valores de resistencia de alrededor de 10Ω hasta llegar a los 1200Ω . El valor de la resistencia conectada fue aumentando de manera progresiva mientras los datos se registraban en la Raspberry Pi 3. El perfil de carga demandada fue emulado por la resistencia variable que funcionó como una carga que demanda corriente eléctrica. La variación de la resistencia permitió obtener el comportamiento en un barrido de puntos, los cuales se tabularon y graficaron para ser comparados con las curvas resultantes de una simulación en la que se usaron los datos del proveedor como valores de entrada, con los cuales se configuró

y simuló un generador fotovoltaico en la librería de energías renovables de Simulink. Las curvas de desempeño obtenidas de la respuesta simulada del panel fotovoltaico configurado con los datos del proveedor se distinguen como curvas de desempeño de proveedor.

3. Pruebas con carga dinámica y carga fija.

La configuración y conexión son iguales que para la prueba anterior, como se muestra en la Figura 3.9. Se realizaron pruebas con una carga dinámica que varió hasta un punto de estabilidad. En una segunda prueba se usaron 3 cargas fijas funcionaron alternadamente, pero en algún punto funcionaron en paralelo, influyendo de manera diferente en el comportamiento de la CST.

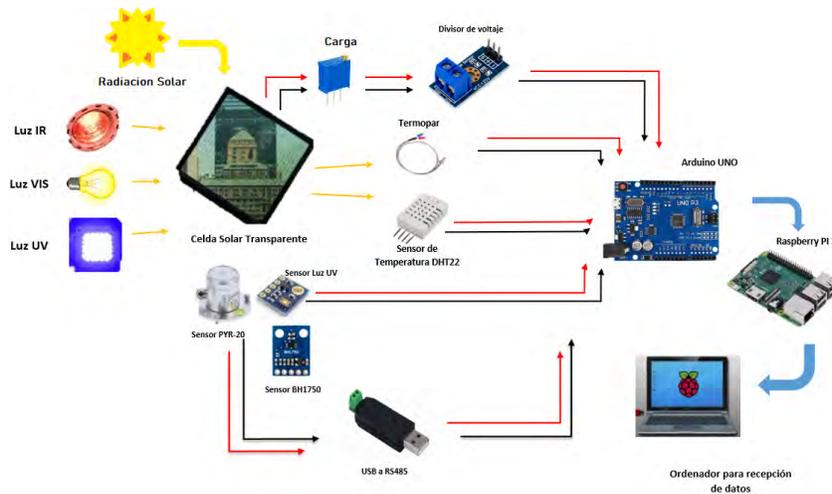


Figura 3.9: Conexiones de Arduino y CST para pruebas con carga en irradiancia solar.

4. Comparativa con un panel opaco.

El procedimiento para realizar las pruebas con el panel oscuro es el mismo descrito para las pruebas con panel transparentes (**Curvas características en radiación solar y radiación artificial.**), en el diagrama solo se cambia la CST por el panel opaco, ver Figura 3.10

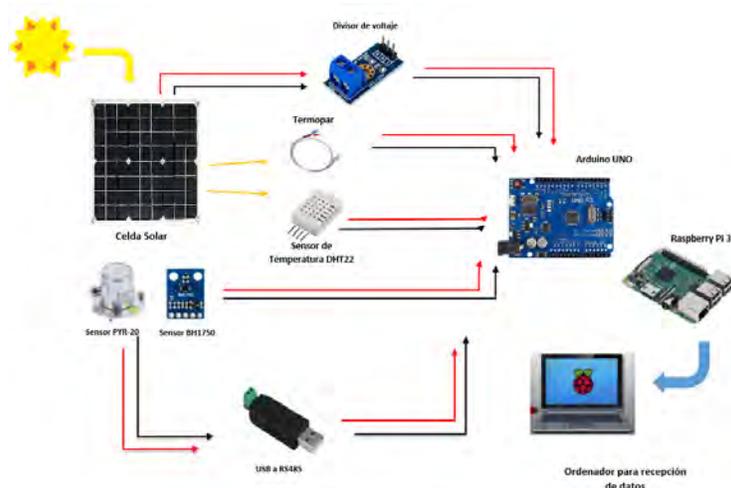


Figura 3.10: Conexiones de Arduino para pruebas en irradiancia solar para un panel oscuro.

Los parámetros del panel opaco se presentan en la Tabla 3.2

Tabla 3.2: Parámetros del Panel Opaco.

Parámetros	Panel Opaco
Eficiencia	27 %
Potencia nominal	10 W
Voltaje de circuito abierto	21.5V
Corriente de corto circuito	0.65 A
Voltaje en potencia max.	18 V
Corriente en potencia max.	0.55 A
Temperatura de operación	-35°C a 60°C
Largo del Panel Solar	410mm
Ancho del Panel Solar	210mm
Área	0.086m ²
Irradiancia	1000 w/m ²
Temperatura	25°C
Distribución Espectral	AM 1.5G

Finalmente todo material utilizado para estas pruebas se describe en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Material usado en las pruebas experimentales para medir el desempeño del panel opaco.

Panel Solar Transparente SolarFirst
Panel Solar Opaco
Sensor de radiación solar PYR20 (400nm – 1100nm)
Sensor intensidad luminosa BH1750
Sensor de radiación UV ML8511
Sensor de temperatura DHT22
Termopar DS1820
Divisor de voltaje
Luz incandescente OSRAM de 75W a 127V
Luz infrarroja Exo-Terra de 75W a 127V
Luz ultravioleta ONETO de 9W a 127V
Arduino UNO
Raspberry Pi 3

3.4.2. Pruebas de Transparencia

Para evaluar las propiedades de transparencia del panel fotovoltaico se realizaron pruebas con diferentes niveles de radiación solar, siguiendo el diagrama de la Figura 3.11. El objetivo fue calcular los parámetros definidos en la sección 3.1.2 y comparar los resultados obtenidos a partir de las mediciones directamente en el panel y los valores obtenidos a partir de la información del proveedor del panel. Los objetivos particulares de estas pruebas fueron:

1. **Validar la propiedad de luz utilizada eficientemente.** Es decir, validar el porcentaje de luz que el panel estudiado puede utilizar más eficientemente. Lo anterior se hizo comparando valor de los parámetros eléctricos y de transparencia que fueron calculados partir de mediciones, y los valores calculados a partir de datos del proveedor.
2. **Determinar la neblina de transmisión y Transmitancia.** Es decir, estimar la transmitancia a diferentes longitudes de onda midiendo con un sensor BHT1750. El sensor mide específicamente la cantidad de luz que pasa a través de la CST haciendo un barrido en diferentes longitudes de onda. Es importante considerar que este sensor proporciona mediciones en Lx, lo que implica hacer la conversión a W.

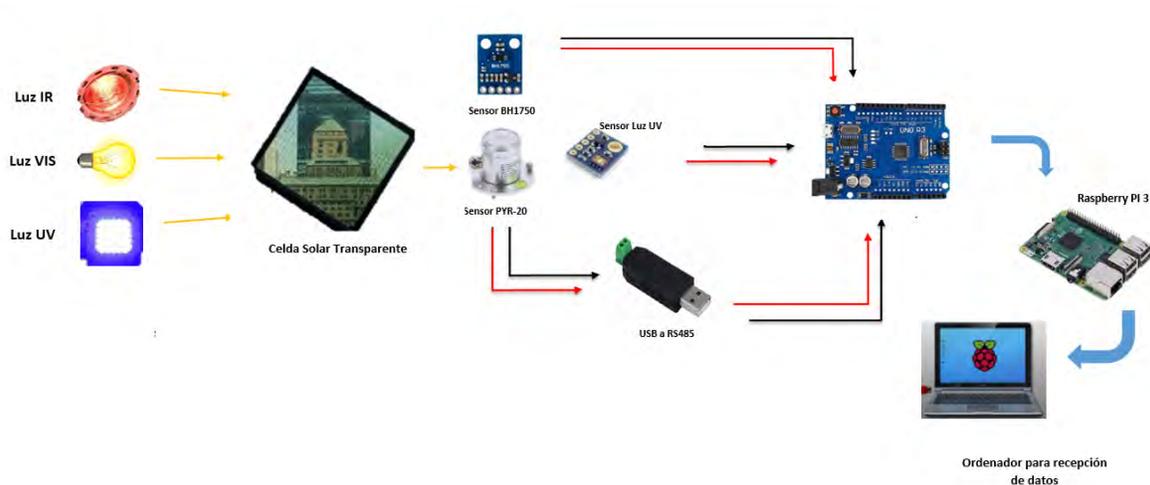


Figura 3.11: Diagrama esquemático de las pruebas de transparencia.

En estas pruebas es importante hacer la medición de la transmitancia directa y la transmitancia difusa, a partir de las cuales se obtiene la transmitancia total. Con estas mediciones se pueden, a su vez, obtener los parámetros de neblina de transmisión y utilización de luz incidente. En primer lugar, es importante definir que la transmitancia se refiere a la fracción de luz que pasa a través de una muestra. La medición de la transmitancia **directa** se hace como se indica en el diagrama que se muestra en la Figura 3.12. Un sensor BHT1750 se usa para medir la cantidad de luz que atraviesa la CST a diferentes longitudes de onda.

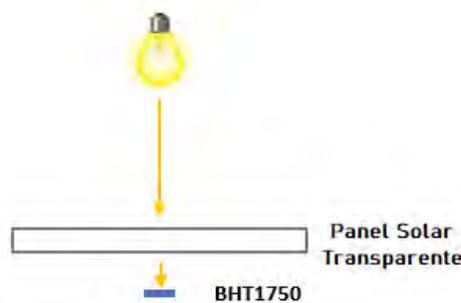


Figura 3.12: Medición luz incidente directa.

Por otro lado, la transmitancia difusa es aquella que se disipa por diferentes espacios de la CST. Para medir este parámetro, el sensor se coloca como se muestra en el diagrama de la Figura 3.13.

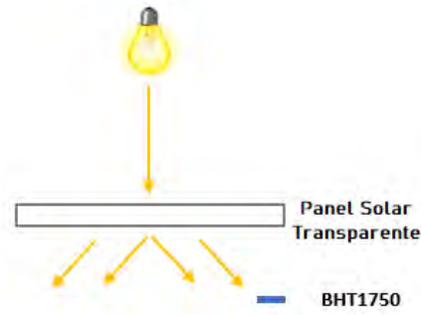


Figura 3.13: Medición luz difusa.

Las lecturas de este sensor se realizan en lúmenes y luego se convierten a valores en W. El cálculo se puede extrapolar para la potencia que resulte del dimensionamiento de un sistema o módulo de paneles fotovoltaicos solares. En el caso de las pruebas eléctricas se usó una tarjeta Arduino UNO para la adquisición de datos y la tarjeta Raspberry PI 3 como una tarjeta de procesamiento de información.

El diagrama de conexión del Arduino se presenta en la Figura 3.14.

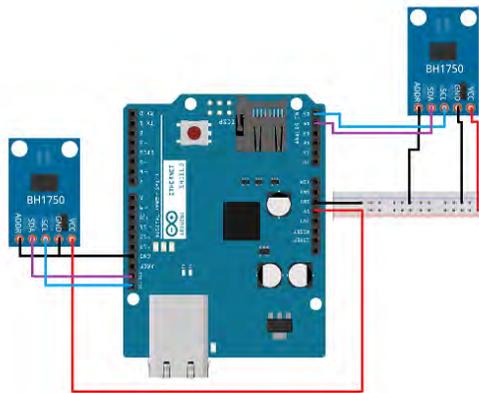


Figura 3.14: Conexión de sensor BHT1750.

Finalmente, el material utilizado para estas pruebas se lista en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Material para pruebas experimentales de transparencia.

Panel Solar Transparente SolarFirst
Sensor de radiación solar PYR20 (400 nm – 1100nm)
Sensor intensidad luminosa BH1750
Sensor de radiación UV ML8511
Luz incandescente de 75W
Luz infrarroja de 75W
Luz ultravioleta de 9W
Arduino UNO
Raspberry Pi 3

Capítulo 4

Pruebas y resultados.

Una vez realizada la compra, recibimos la ficha técnica de la CST, en la cual se presentan los principales parámetros como la temperatura de operación (NOCT), voltaje y corriente de circuito abierto y corto circuito. Estos parámetros eran fundamentales para la caracterización de CST, por lo tanto al contar con la celda y habiendo calculado los parámetros, se iniciaron las pruebas para la caracterización.

4.1. Resultados de las pruebas eléctricas.

4.1.1. Curvas características I-V & P-V.

En primer lugar se obtuvieron las gráficas V-I y P-V de la CST considerando los parámetros proporcionados por el fabricante. Para la prueba, las condiciones son temperatura de 25°C e irradiancia de 1000 W/m^2 . El comportamiento de la CST en estas condiciones se simuló con el software de Matlab/Simulink. En el bloque “*PV Array*” se introdujeron los datos del fabricante, entre ellos los coeficientes de temperatura en V_o y I_{sc} . Una vez definidos los datos, el comportamiento del sistema fue simulado y como resultado se obtuvieron las gráficas características V-I y P-V de la celda solar, las cuales se muestran en la Figura 4.1.

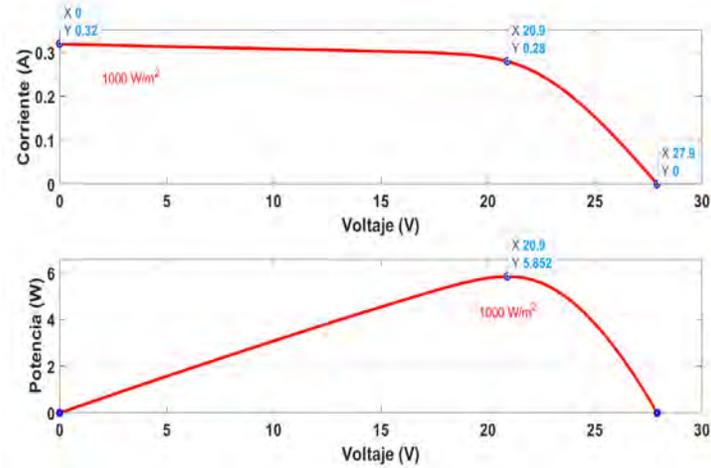


Figura 4.1: Curva característica V-I y P-V, generado a partir de los parámetros del fabricante.

Según la “curva del fabricante” (Figura 4.1), la potencia máxima de la celda en condiciones ideales es de 5.90 W y está asociada a una corriente de 0.28 A y un voltaje de 20.9 V. A medida que la irradiancia disminuye, el voltaje aumenta de manera mínima, sin embargo, la corriente es cada vez menor como lo muestra la Figura 4.2.

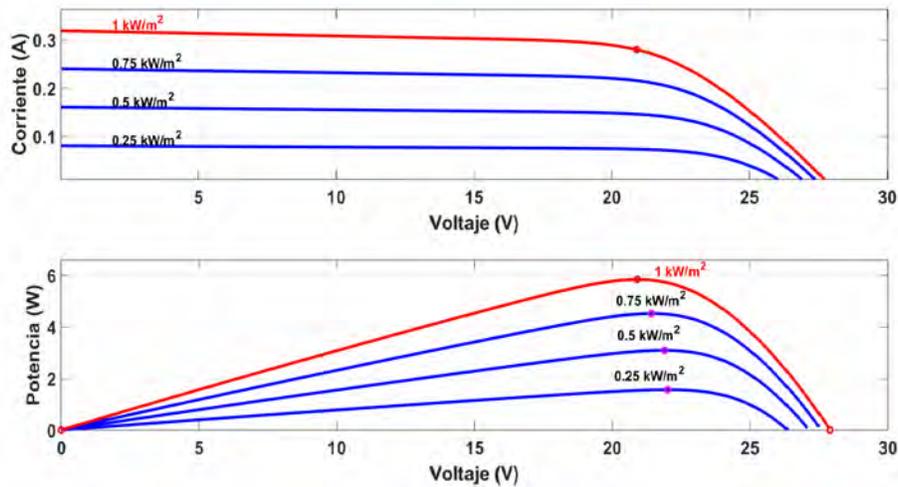


Figura 4.2: Curvas características V-I y P-V, con irradiancia de 250 W/m^2 , 500 W/m^2 , 750 W/m^2 y 1000 W/m^2 a una temperatura de 25°C .

Así mismo, se observó que medida que la temperatura aumenta, la potencia máxima disminuye, es decir, la exposición de la CST a mayores temperaturas reduce la eficiencia. Ver Figura 4.3

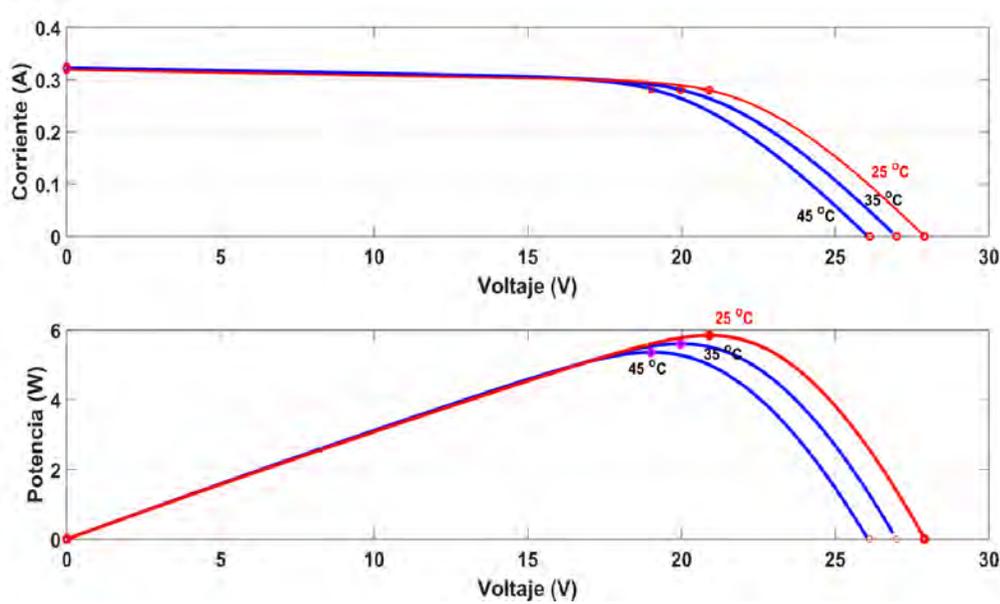


Figura 4.3: Curvas características V-I y P-V, con temperatura de 25°C, 35°C, 45°C a una irradiancia de 1000 W/m^2 .

4.1.2. Curvas características en función de la radiación solar, obtenidas en condiciones controladas.

Como segunda prueba se registró el funcionamiento de la CST cuando es expuesta a radiación solar y también bajo irradiancia artificial. En ambos casos se consideró una irradiancia de 89 W/m^2 , de tal forma que el sistema real y simulado fuera evaluado en entornos sometidos a condiciones iguales. Se tomó en cuenta la norma IEC 61215, que entre muchos otros aspectos regulariza los métodos de prueba de estos sistemas así como los estándares para la seguridad de los módulos fotovoltaicos solares.

Es importante resaltar que no se obtienen los mismos valores de voltaje y corriente que

en pruebas exteriores, esto se debe a que la irradiancia que emite la fuente de luz artificial usada no tiene la misma intensidad y calidad. La fuente de radiación artificial que se usó alcanza una temperatura de 2800 K, mientras que la luz de sol alcanza los 6000 K.

En primera instancia se llevó a cabo la experimentación en condiciones controladas con el banco de pruebas presentado en la sección anterior. Resistencias de diferentes valores emulan una demanda de corriente a la CST. En la Tabla 4.1 se presentan las resistencias de carga utilizadas en estas pruebas, la relación observada voltaje-corriente, y la potencia resultante.

Tabla 4.1: Datos de la prueba experimental en condiciones controladas.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Carga (Ω)
0.004	0.0128	5.13E-05	0.312
1.139	0.0124	1.42E-02	91.578
2.255	0.0124	2.79E-02	182.333
3.370	0.0122	4.10E-02	276.740
4.550	0.0121	5.52E-02	374.953
5.630	0.0120	6.74E-02	470.554
6.700	0.0118	7.87E-02	570.123
7.780	0.0116	9.00E-02	672.267
9.040	0.0116	1.04E-01	782.275
10.050	0.0115	1.15E-01	874.580
13.18	0.0109	1.44E-01	1205
15.750	0.0098	1.55E-01	1602.520
18.770	0.0072	1.36E-01	2600.000
22.050	0.0005	1.17E-02	41600.000

En color azul se resaltan los valores de máxima potencia, voltaje y corriente. Los datos experimentales se graficaron y se obtuvieron las curvas características que aparecen en la Figura 4.4

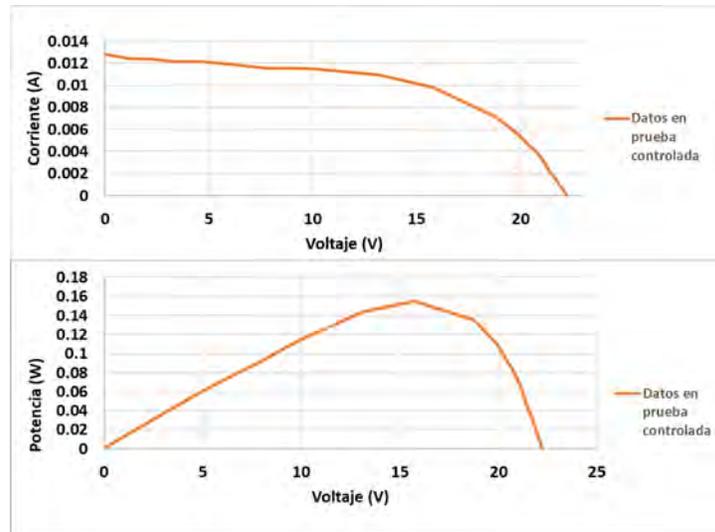


Figura 4.4: Gráficas de I-V y P-V en condiciones controladas.

Posteriormente se siguió el mismo procedimiento para obtener curvas voltaje-corriente y potencia con radiación solar. En este caso fue necesario consultar un mapa de radiación solar de la ubicación en la que se realizaron las pruebas experimentales. Se trata específicamente de Jiutepec, las coordenadas son 18.882058, -99.190725 y el mapa se obtuvo de [53], el objetivo de revisar estos datos fue conocer en qué horario se podría tener la misma irradiancia que se midió en las pruebas con condiciones controladas, tomando como referencia la Figura 3.4, la cual fue aproximadamente a las 4:30 p.m.

Conociendo esta información se realizó la prueba experimental en irradiancia solar promedio de $89 \text{ W}/\text{m}^2$ en un horario entre las 4:15 p.m y 4:30 p.m. De la misma forma, se fijaron las mismas demandas de corrientes para llevar a cabo ambos experimentos. En primer lugar se presenta la Tabla con los resultados de la prueba experimental con radiación solar.

Tabla 4.2: Datos de la prueba experimental con radiación solar.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Carga (Ω)
0.006	0.027	0.0002	0
4.78	0.026	0.124	185
7.25	0.026	0.188	280
12.04	0.026	0.308	471
14.5	0.025	0.369	570
16.89	0.025	0.425	672
18.89	0.024	0.452	789
19.7	0.023	0.443	875
22.22	0.013	0.296	1670
23	0.009	0.203	2600
24.04	0.000	0.000	41600.000

Con los valores de la Tabla 4.2 se grafican las curvas características de la Celda Solar Transparente en condiciones de radiación solar. Se presentan estas curvas en la Figura 4.5.

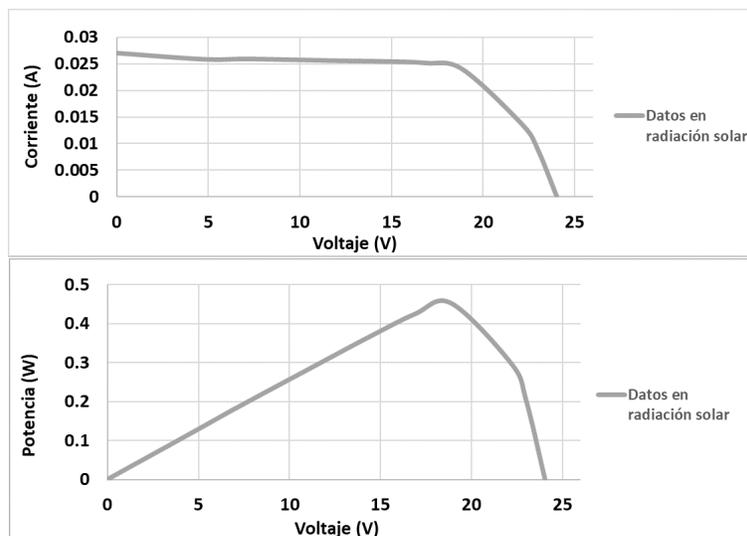


Figura 4.5: Gráficas de I-V y P-V en irradiancia solar.

Finalmente se comparan los resultados en la Figura 4.6 , en ella se presentan las curvas características de las pruebas controladas, las curvas características de las pruebas en radiación solar y la simulación del modelo, en todos los casos, para la misma irradiancia de 89 W/m^2 .

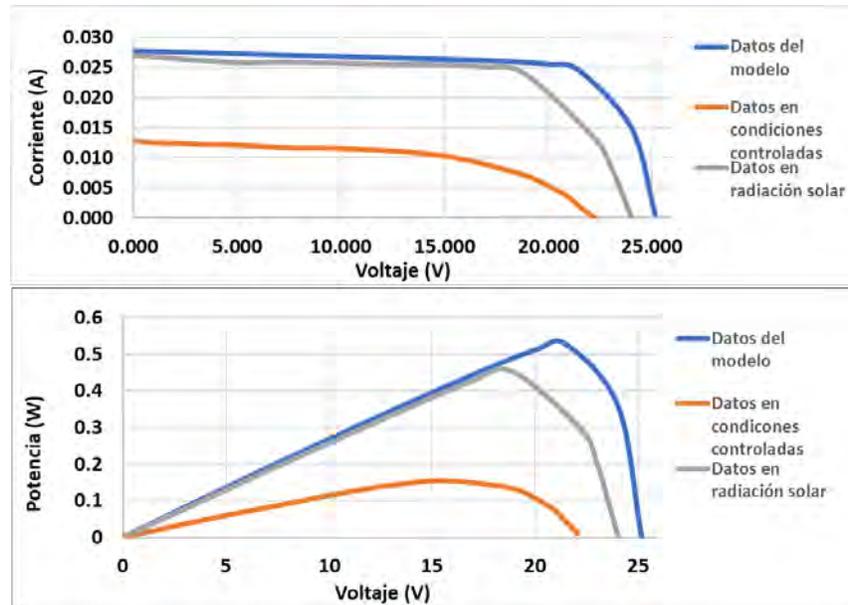


Figura 4.6: Gráficas de I-V y P-V en condiciones controladas e irradiancia solar.

Se observa que para las pruebas con radiación solar los resultados son similares a los obtenidos a partir de los parámetros del fabricante. Para las pruebas en condiciones controladas el rendimiento del panel es menor; sin embargo, estas mediciones no son incorrectas o inapropiadas, la implementación de un método de radiación artificial permite tener condiciones estables debido a que se garantiza una irradiancia constante sobre la CST por un mayor tiempo. En cambio las pruebas en radiación solar pueden ser influenciadas por factores climáticos externos. En el caso de las pruebas en radiación solar y las curvas del fabricante en la zona de voltajes elevados existe una diferencia importante. Como consecuencia, la eficiencia del panel calculada a partir de los datos medidos es 1.4 % menor que la calculada con los parámetros proporcionados por el fabricante.

Así mismo, se realizó una prueba a mayor irradiancia solar. Es importante considerar que se utilizó el mismo sitio web para ver el mapa de radiación solar, pero en este caso se consideró una irradiancia promedio de 560 W/m^2 la cual es un valor promedio entre las 2:15 p.m y las 2:45 p.m. En primer lugar se muestran los resultados de la prueba experimental en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Datos de la prueba experimental en irradiancia solar.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Carga (Ω)
0.0400	0.1690	0.0068	4.225
2.3672	0.1675	0.3965	14.13
4.6925	0.1660	0.7790	28.27
7.0693	0.1645	1.1629	42.97
9.3895	0.1630	1.5305	57.60
11.8713	0.1630	1.9350	72.83
14.2107	0.1615	2.2950	87.99
16.6027	0.1598	2.6531	103.90
18.9473	0.1566	2.9672	120.99
20.6535	0.1503	3.1042	137.41
22.9319	0.1010	2.3161	227.05
24.6254	0.0630	1.5514	390.88
25.9560	0.0011	0.0283	23812.87

Con los valores de la Tabla 4.3 se grafican las curvas características de la Celda Solar Transparente en condiciones de radiación solar. Podemos observar estas curvas en la Figura 4.7.

La diferencia en el desempeño medido de la CST y el desempeño calculado con datos del fabricante es más evidente después del punto de máxima potencia. En todo el rango de corriente, la diferencia de voltaje es más marcada. En consecuencia, la eficiencia del panel que se calcula considerando los datos medidos es 1.4% menor que la calculada con los parámetros proporcionados por el fabricante.

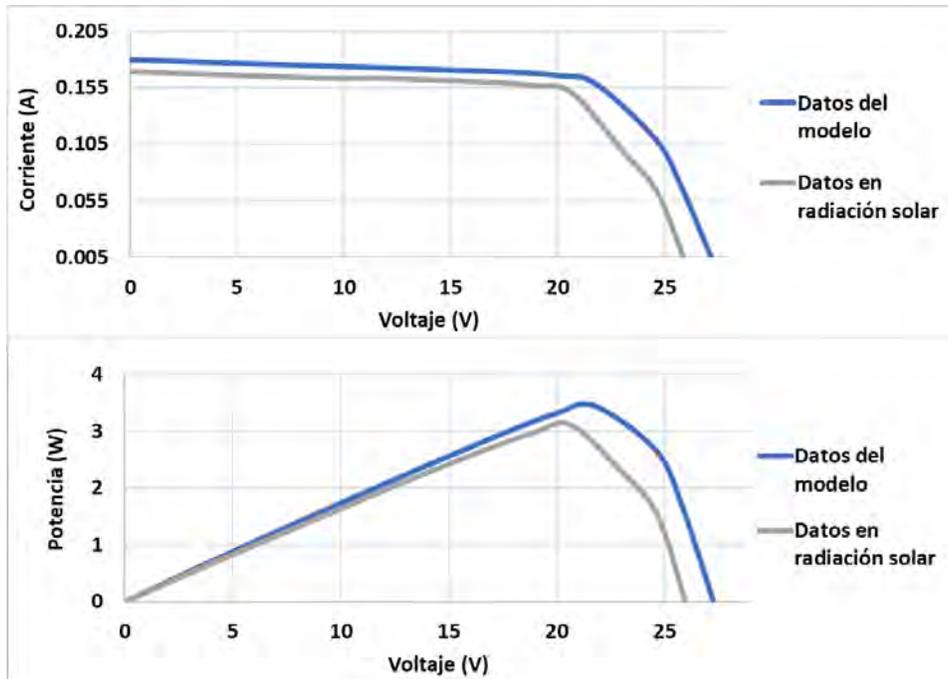


Figura 4.7: Gráficas de I-V y P-V en irradiancia solar y modelo del fabricante.

4.1.3. Prueba con carga dinámica y fija.

Para conocer mejor el desempeño del panel transparente se hicieron pruebas con diferentes cargas, manteniendo una irradiancia de 89 W/m^2 . Se hicieron las conexiones necesarias según el diagrama de la Figura 3.9 para llevar a cabo las siguientes dos pruebas.

La primera de estas pruebas consistió en exponer al panel a un valor de irradiancia fijo durante las pruebas en condiciones controladas y durante las pruebas con radiación solar. Se usó una carga variable con resistencia de menor a mayor valor, y se midió hasta una condición de estabilidad, las muestras fueron capturadas cada dos segundos.

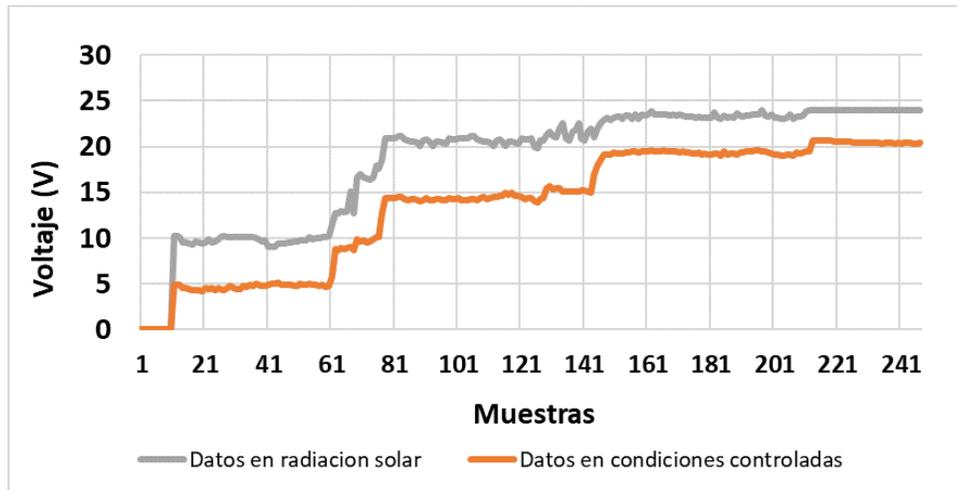


Figura 4.8: Prueba dinámica de la CST.

La Figura 4.8 muestra que el desempeño y comportamiento eléctrico es similar en ambos casos. La diferencia a voltajes más altos, como se había mencionado antes se debe a que la luz artificial no tiene la misma intensidad ni calidad que la luz natural que proviene del sol. Por otro lado, se observa que las curvas en irradiancia solar presentan mayor variabilidad, provocada por cambios en las condiciones de viento, nubosidad y por otros factores que no se pueden controlar.

Posterior a la prueba con carga variable, se realizó una prueba con 3 cargas fijas funcionando de manera separada y en algunos momentos en paralelo, en este caso las muestras fueron cada 10 segundos debido a que los cambios de un punto a otro eran más radicales. En la Figura 4.9 hay una gráfica con título 'Carga', ahí se muestran los valores de las resistencias que se utilizaron para las pruebas en cada uno de los puntos de la curva.

Como se puede observar, la mayor demanda de corriente y por lo tanto los picos de potencia corresponden a cargas pequeñas de entre 1000 y 769 Ω . En las mismas condiciones, el voltaje se reduce notoriamente. En altas demandas de corriente, la diferencia de voltaje es de 2 V aproximadamente.

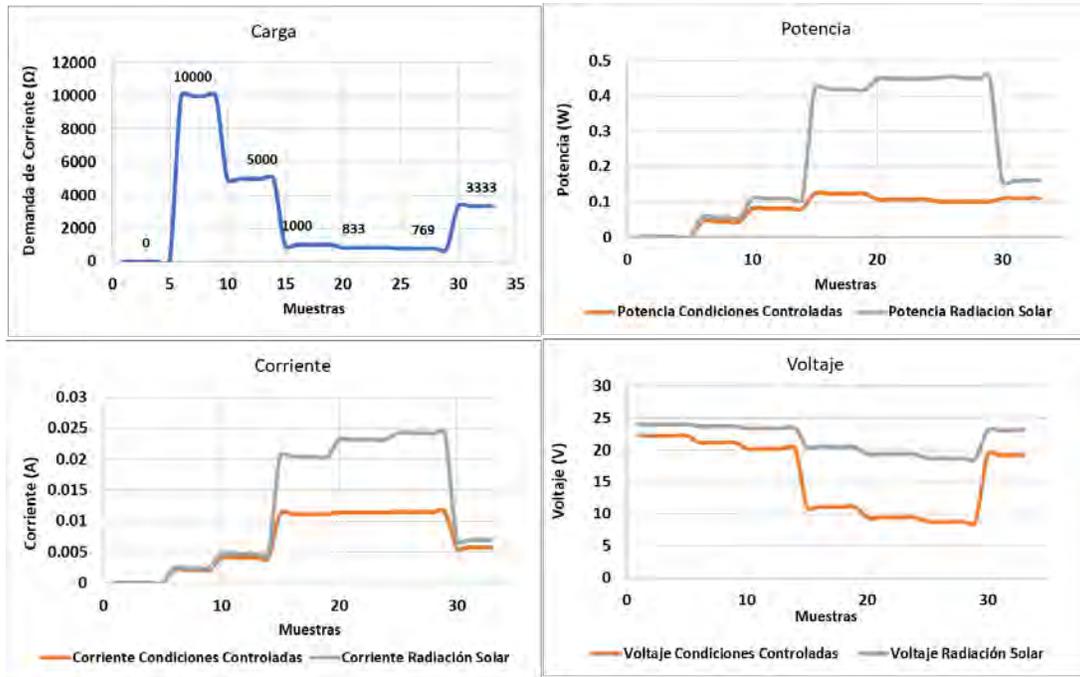


Figura 4.9: Prueba con cargas fijas en la CST.

4.1.4. Comparativa con un panel opaco.

Finalmente se comparó el desempeño de la CST con el de un panel opaco tradicional. Esta prueba se condujo en irradiancia solar y en condiciones controladas. Se consideraron pruebas bajo las mismas condiciones de irradiancia solar y temperatura, i.e., 89 W/m^2 a 25°C , y un panel de tamaño similar al de la CST.

Se utilizó un panel solar de $0,86 \text{ m}^2$ con un voltaje en circuito abierto de 21.5 V , corriente en corto circuito de 0.65 A , voltaje en máxima potencia de 18 V y corriente en máxima potencia de 0.55 A . La gráfica comparativa de esta prueba se presenta en la Figura 4.10.

El desempeño en irradiancia solar muestra que la CST genera valores de voltaje con respecto al panel opaco con una reducción del 48%. La celda solar transparente alcanza un mayor nivel de voltaje que el panel opaco, pero el panel opaco prácticamente duplica el nivel de corriente de la CST, al final la potencia es evidentemente mayor en el panel opaco.

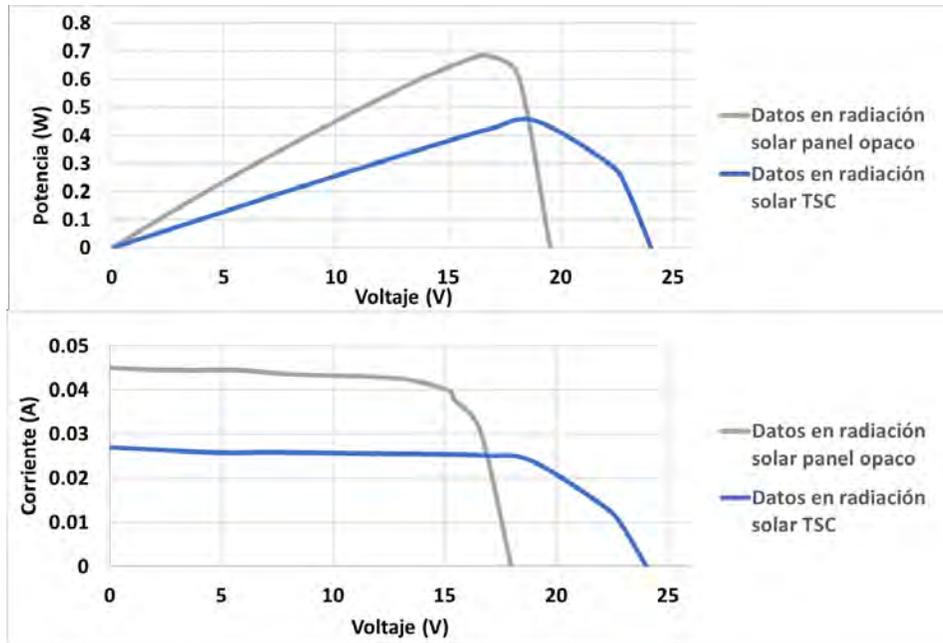


Figura 4.10: Comparativa del desempeño de una CST y un panel opaco en condiciones de irradiancia solar.

La comparación resulta relevante para evaluar cómo los paneles transparentes ofrecen un desempeño adecuado, considerando que únicamente aprovechan el espectro UV-IR, presentado una diferencia en términos de potencia del 33% respecto al panel opaco. La CST tiene la ventaja evidente de la transparencia. Los resultados demuestran que las CSTs son opciones efectivas para aplicaciones específicas y que ofrecen un desempeño sobresaliente frente a los paneles tradicionales. Los resultados finales de las pruebas eléctricas se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Resultados de las pruebas experimentales en irradiancia solar.

Parámetros	Unidades	Modelo del Fabricante	Prueba en condiciones controladas	Prueba en radiación solar	Prueba del panel opaco	Prueba en radiación solar en irradiancia de 560 W/m ²	Modelo del Fabricante en irradiancia de 560 W/m ²
Área	m ²	0.09	0.09	0.09	0.086	0.09	0.09
G_a (Radiación incidente)	W/m ²	89	89	89	89	560	560
I_{max} (Corriente máxima de salida)	A	0.025	0.0098	0.0239	0.0408	0.1503	0.1584
V_{max} (Voltaje máximo de salida)	V	21.48	15.75	18.89	16.76	20.65	21.76
I_{sc} (Corriente en Corto Circuito)	A	0.028	0.012	0.027	0.049	0.169	0.179
V_{oc} (Voltaje en circuito abierto)	V	25.15	22.22	24.04	19.54	26.19	27.24
P_{max} (Potencia máxima)	W	0.537	0.154	0.4514	0.6838	3.103	3.44
Coefficiente de corto circuito	%	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Irradiancia de referencia	w/m ²	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Temp. de referencia	°C	25	25	25	25	25	25
T_c (Temp. en condiciones de prueba)	°C	25	25	25	25	25	25
Eficiencia de la CST	%	6.70	1.93	5.64	8.93	6.16	6.84
Fill Factor	%	0.76	0.58	0.70	0.71	0.70	0.71

4.2. Pruebas de transparencia

Para evaluar las propiedades de transparencia se hicieron pruebas a diferentes niveles de radiación solar. El objetivo de estas pruebas fue calcular las propiedades de transparencia.

4.2.1. Validar luz utilizada eficientemente.

Uno de los índices que permiten caracterizar el rendimiento de la CST, desde el punto de vista óptico, es el parámetro T_{eff} , el cual se obtiene con la ecuación 3.13, presentada anteriormente. Este parámetro es adimensional, y a medida que su valor aumente, el aprovechamiento de la luz incidente en la CST es mayor. En [51] se estudió una CST que ha alcanzado valores de hasta 220 en T_{eff} . Lo que demostró que las celdas UV/NIR (infrarrojo cercano, por sus siglas en ingles) son útiles para obtener una buena transparencia, es decir, un buen aprovechamiento de la luz solar.

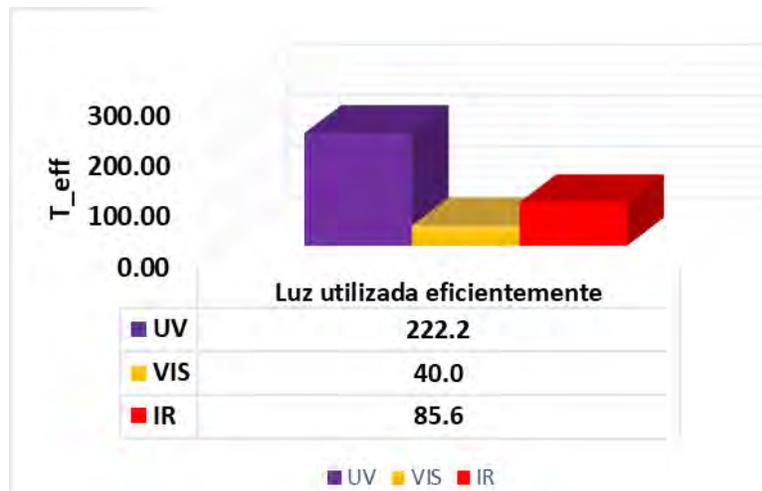


Figura 4.11: Luz utilizada eficientemente en las regiones UV-VIS-IR.

Para estimar la cantidad de **luz utilizada eficientemente** se realizó la prueba a diferentes longitudes de onda, de tal forma que se pudiera identificar en cuál de ellas se aprovecha

mejor la luz. Los resultados particulares de esta prueba se presentan en la Figura 4.11; es importante destacar que la irradiancia UV alcanzó un valor máximo de 222.2, mientras que la irradiancia IR llegó a un valor de 85.6, y evidentemente, el espectro visible presentó el valor más bajo. Se concluye que la irradiancia UV es la que mejor se aprovecha en el panel para la conversión en energía eléctrica.

4.2.2. Neblina de transmisión.

Este parámetro mide cuál es el porcentaje de la luz que pasa a través de una CST que se dispersa o se refleja. Su valor determina que los objetos en la parte posterior del panel se vean más o menos borrosos. Cuanto menor sea su valor, mejor visibilidad hay a través de la celda transparente. Se espera que en los próximos años el valor de neblina de transmisión de CSTs se reduzca hasta ser igual al de una ventana, el cual es $\leq 1\%$ [7]. Las pruebas consistieron en medir la neblina de transmisión para diferentes longitudes de onda, como se muestra en la Figura 4.12. La **neblina de transmisión** correspondiente a la radiación UV tiene un valor muy cercano a 1%, demostrando así que el CST tiene un aprovechamiento similar a una ventana tradicional en esa longitud de onda.

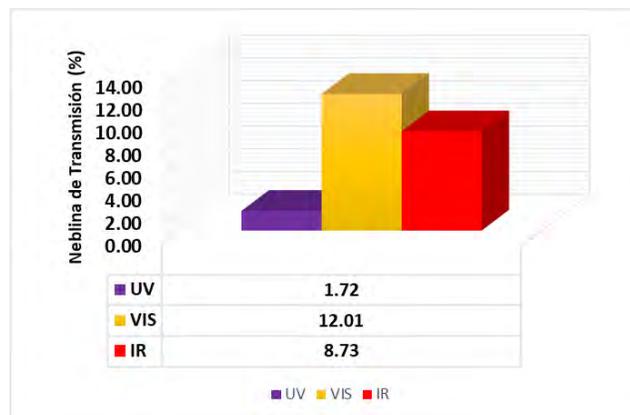


Figura 4.12: Neblina de transmisión de la CST en las regiones UV-VIS-IR.

4.3. Modelado matemático de la CST.

Para obtener un modelo matemático que describe la relación voltaje-corriente en la CST se usaron datos provenientes de las pruebas realizadas en condiciones de irradiancia solar. Se estimaron algunos modelos mediante técnicas de identificación de sistemas. Primero se presenta un modelo en circuito eléctrico equivalente, el cual representa un mapa de desempeño estático de la CST. Este modelo se desarrolló procesando los datos de pruebas experimentales realizadas con irradiancia solar a 89 W/m^2 . Se procesaron estos datos con apoyo del Toolbox de identificación de Matlab y después, la simulación del sistema se desarrolló en Simulink. Se obtuvieron los parámetros adecuados para un primer modelo. Los resultados del modelo se presentan en la Figura 4.13 , en donde también se muestra el circuito equivalente que se considera.

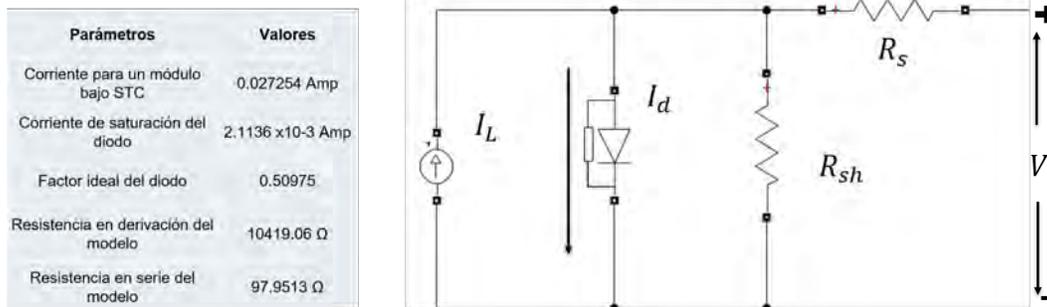


Figura 4.13: Circuito eléctrico equivalente con un diodo y elementos resistivos. Parámetros estimados a partir de datos que se obtienen de las pruebas de campo con la CST.

Con el modelo identificado se realizó una simulación completa para poder verificar si efectivamente el modelo seguía bien a las variables medidas experimentalmente. La simulación se realizó en Simulink con el diagrama de la Figura 4.14. En el diagrama se muestran las mediciones hechas, se aplicaron las mismas cargas que se usaron para las pruebas. En el programa Simulink se colocaron indicadores para dar seguimiento a la corriente, el voltaje y le potencia.

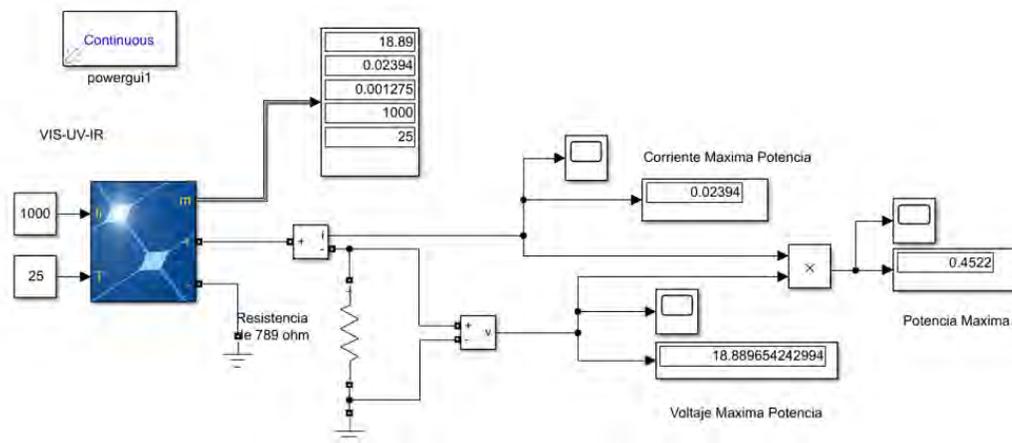


Figura 4.14: Simulación del sistema en Simulink con modelo parametrizado.

Los resultados de la simulación se presentan en la Figura 4.15 y se comparan con los datos experimentales.

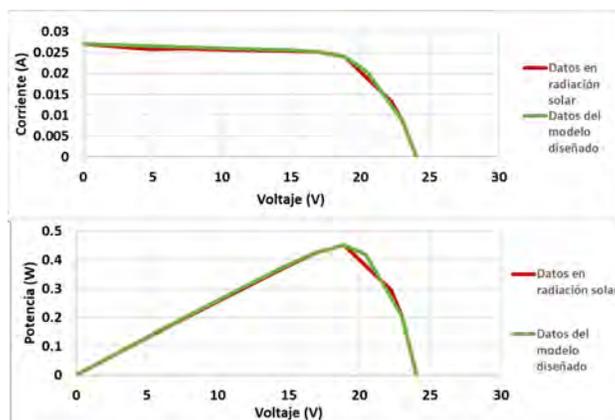


Figura 4.15: Comparación de las curvas Corriente-Voltaje y Potencia-Voltaje obtenidas con el bloque Simulink y las curvas obtenidas en las pruebas de campo con irradiancia solar.

Este primer modelo de circuito eléctrico equivalente con parámetros estimados puede ser usado para simular el comportamiento de la CST en condiciones de irradiancia fija. En este caso se consideró un valor de irradiancia de 89 W/m^2 . Después se buscó estimar un modelo más completo que permitiera variación en la entrada, por lo tanto, se formuló un modelo SISO (Single Input - Single Output).

Al estimar el modelo SISO se buscó obtener una ecuación matemática que se ajustara a la respuesta de la CST ante variaciones en la entrada, es decir, se estima un modelo con irradiancia variable de 0 a 1000, teniendo como salida el voltaje correspondiente. En la Figura 4.16 se presentan los datos de entrada y salida.

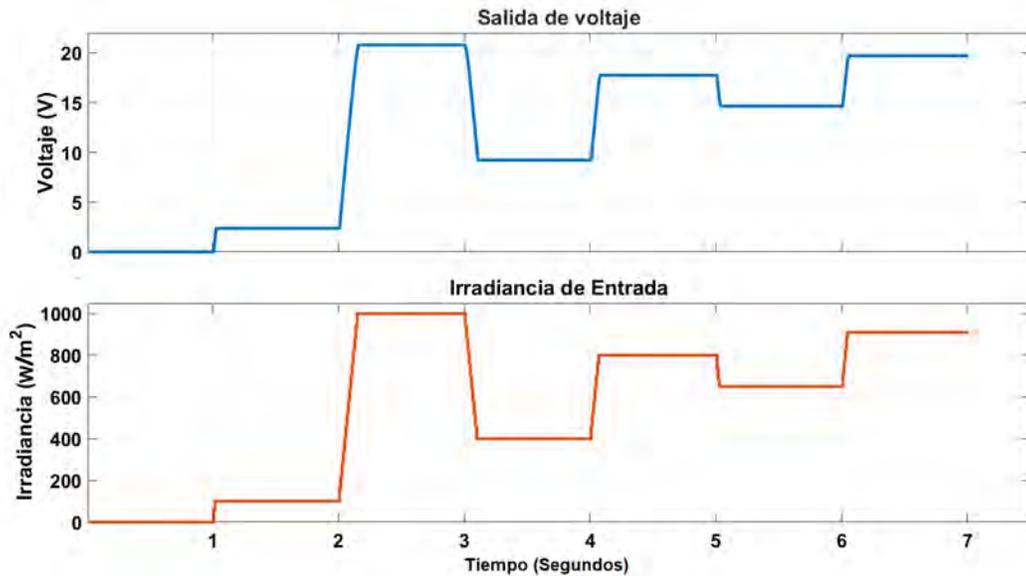


Figura 4.16: Datos de entrada y salida utilizados para la estimación del modelo con irradiancia variable.

La serie de datos entrada-salida fueron procesados para estimar un modelo adecuado. Se consideraron estructuras matemáticas ARX (modelo auto-regresivo (AR) con variables exógenas (X)), ARMAX (modelos auto-regresivos (AR) y la media móvil (MA) con variables exógenas (X)), OE(modelo polinómico de error-salida) y BJ (Modelo polinómico de Box-Jenkins). En el caso del modelo ARX se realizó una simulación para estimar cada uno de los parámetros que los componen (NK, NA, NB). En cada simulación se hizo un barrido con valores de 1 a 10 hasta determinar el valor que mejor ajustaba la salida. Este procedimiento se repitió para cada uno de los modelos que se estimaron y al final se compararon los resultados para evaluar cuál de ellos tenía un mejor desempeño y un mejor ajuste al sistema original. En el **ANEXO A** aparece el código para estimar los modelos.

Todos los modelos estimados tuvieron una similitud superior al 90 % con respecto a los datos de entrada-salida experimentales, ver Figura 4.17 , siendo el modelo BJ el de mayor similitud. Sin embargo, no es conveniente determinar el modelo únicamente con este único criterio, por lo tanto, se evaluó el comportamiento en un diagrama de BODE y se revisó el mapa de polos y ceros.

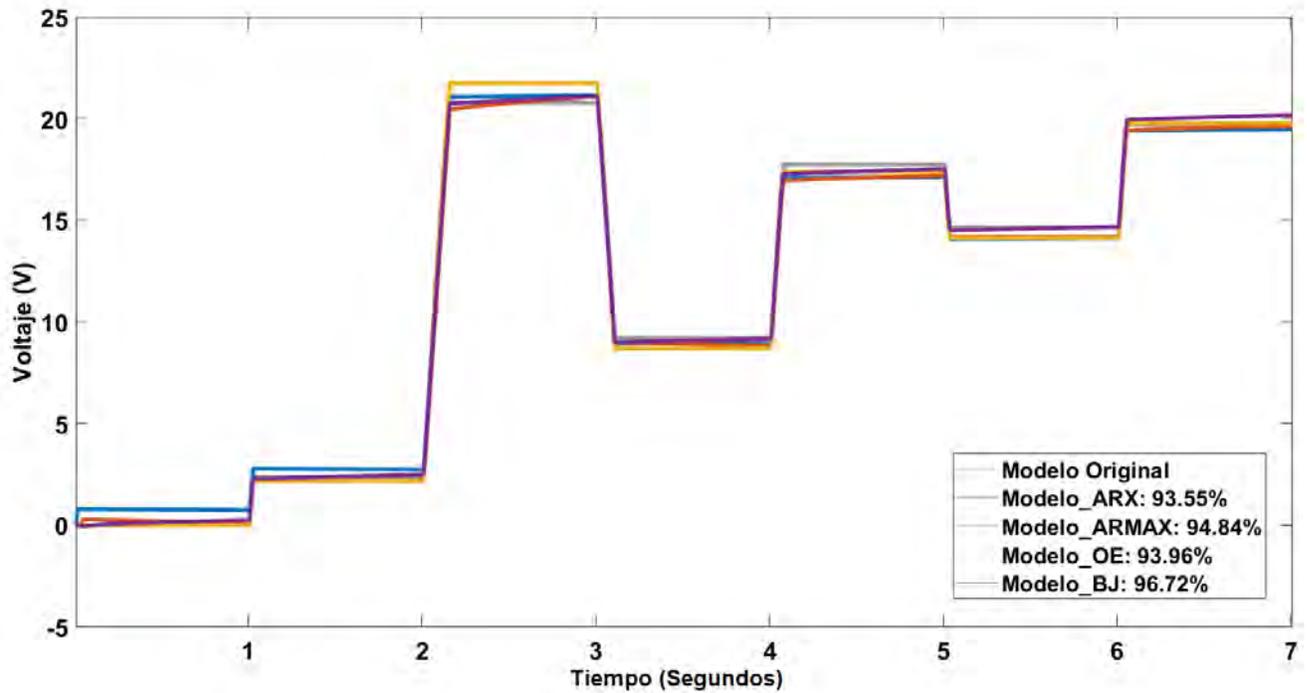


Figura 4.17: Comparación de los resultados del bloque PV-Array y los modelos calculados.

En el diagrama de BODE de la Figura 4.18 se observa que el modelo OE tiene más dificultad para seguir la dinámica del sistema. Este modelo fue el primero en ser descartado. El modelo que mejor se ajusta a los datos del sistema es el modelo BJ, sin embargo, aun hay que revisar el mapa de polos y ceros que se presenta en la Figura 4.19.

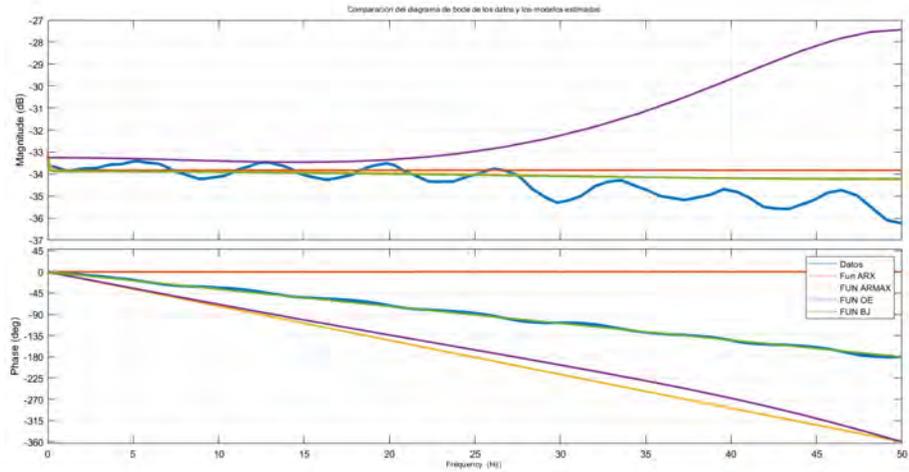


Figura 4.18: Comparación del diagrama de BODE de los datos y los modelos estimados.

Para todos los modelos estimados no se encontraron valores fuera del círculo unitario, lo cual muestra que todos son estables.

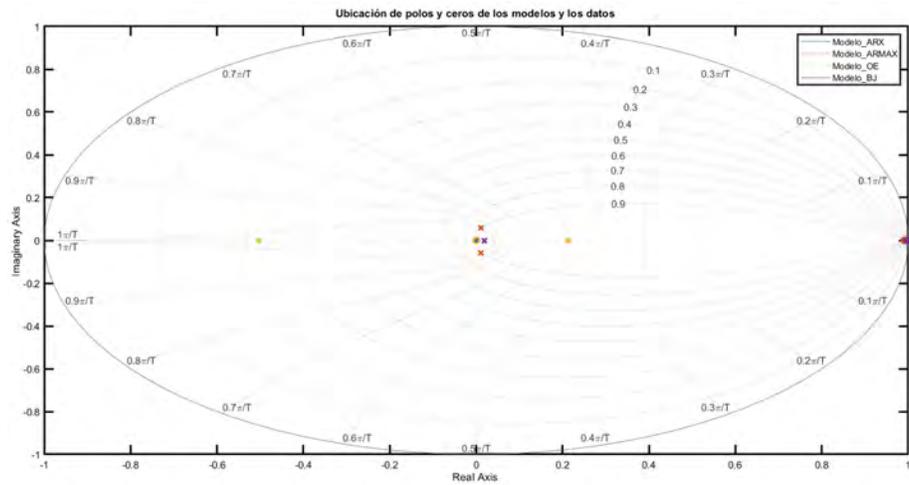


Figura 4.19: Ubicación de polos y ceros de los modelos identificados.

Finalmente, en la Figura 4.20 se presenta la prueba de residuos que ayudó a determinar cuál es el modelo con mejor ajuste. El modelo BJ resultó ser el mejor debido a que solo uno de sus valores se encuentra fuera de la zona de confianza.

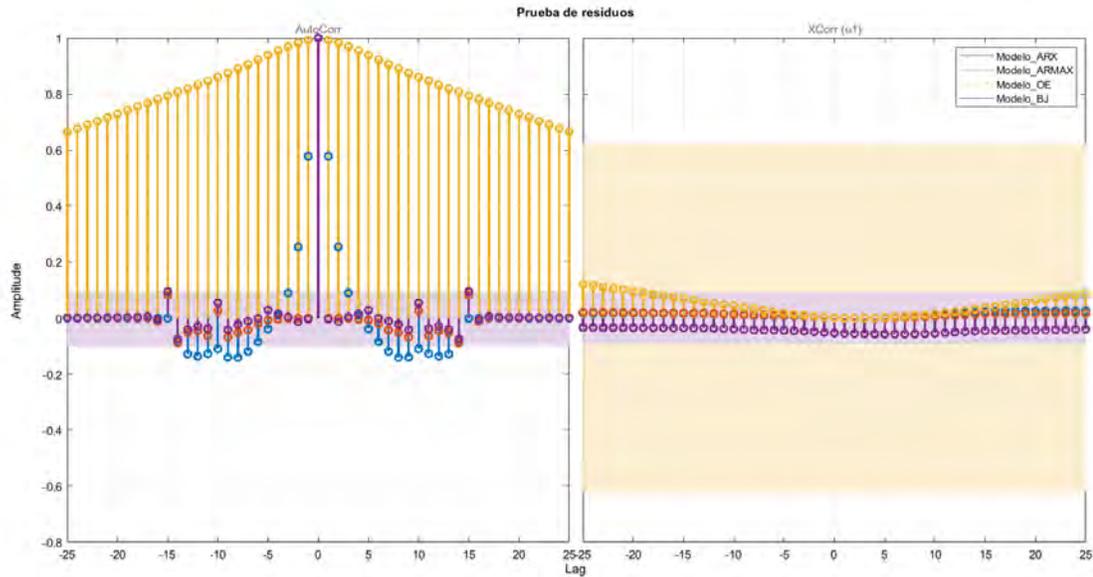


Figura 4.20: Prueba de residuos de los modelos identificados.

Después de revisar y analizar el comportamiento de los modelos generados, el modelo Box-Jenkins (BJ) fue elegido, este es un modelo que tiene una función de transferencia de tercer orden. Se estimó cada uno de los parámetros que componen esta estructura para obtener el modelo que mejor se ajusta a los datos de entrada [56]. En este caso en particular, el modelo seleccionado obtuvo una similitud de 96.72 % como se muestra en la Figura 4.21, sin embargo, no sólo se elige por la mayor similitud que se observa, sino que se consideraron pruebas adicionales para seleccionar el modelo.

Finalmente la función de transferencia se presenta a continuación:

$$Fun_BJ = \frac{Voltaje}{Irradiancia} = \frac{0,01984z - 0,01979}{z^2 - 1,017z + 0,01901} \quad (4.1)$$

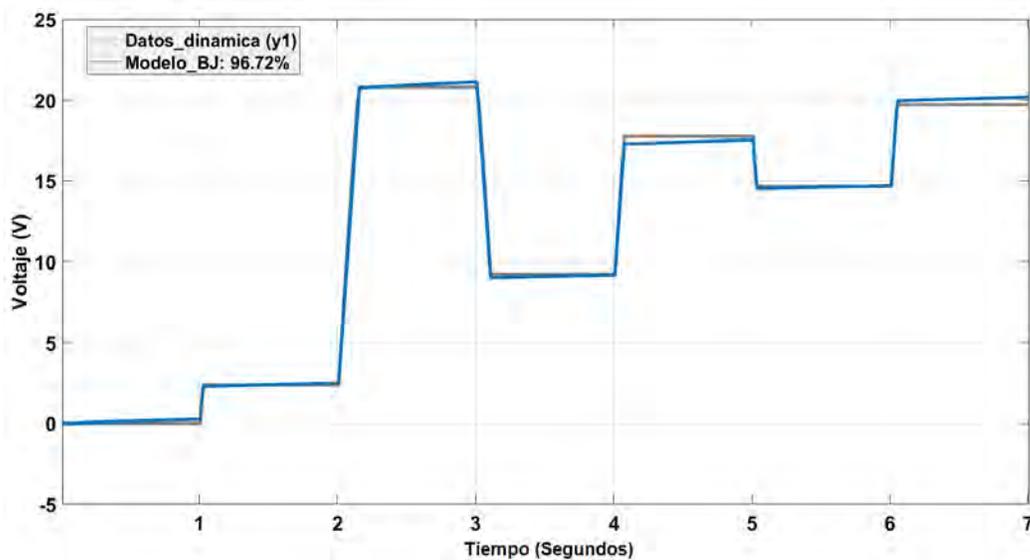


Figura 4.21: Comparación de la respuesta del sistema experimental con el modelo Box-Jenkins (BJ) obtenido.

Aunque el modelo BJ SISO es útil y funciona de manera adecuada se estimó un modelo más. Se propuso un nuevo modelo MISO para representar mejor el sistema. El nuevo modelo permite la identificación de una función matemática para cada una de las entradas que se consideran, en este caso además de la irradiancia, otra entrada que determina el desempeño de la CST es la demanda de corriente. Por tal motivo se estimó un modelo con estas dos entradas (irradiancia y corriente demandada) y también se considera como salida de nueva cuenta el voltaje de la CST. En este caso particular, el efecto de las 2 entradas en la salida de voltaje no es lineal, por lo tanto no es conveniente utilizar las mismas estructuras probadas para la estimación del modelo SISO de la CST. Después de una revisión bibliográfica [57] se decidió estimar un modelo no lineal considerando específicamente una estructura de modelado Hammerstein-Wiener.

Para estimar el modelo se usó la relación de dos entradas - una salida. En la Figura 4.22 se presentan los datos de entrada y salida. Con un tiempo de simulación de siete minutos

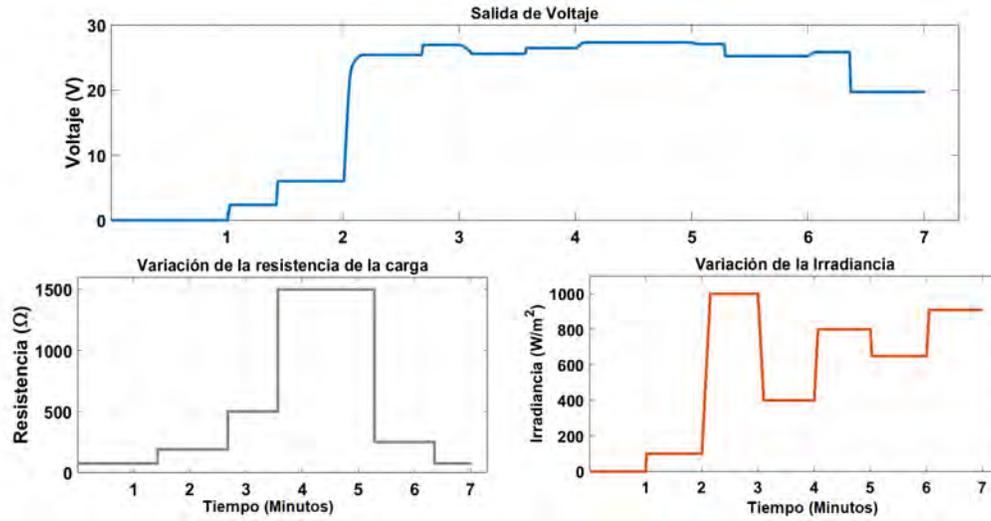


Figura 4.22: Datos de entrada y salida utilizados para la estimación del modelo MISO.

De igual manera se incluye en la Figura 4.23 la variación de corriente que existe en la CST para estimar el modelo.

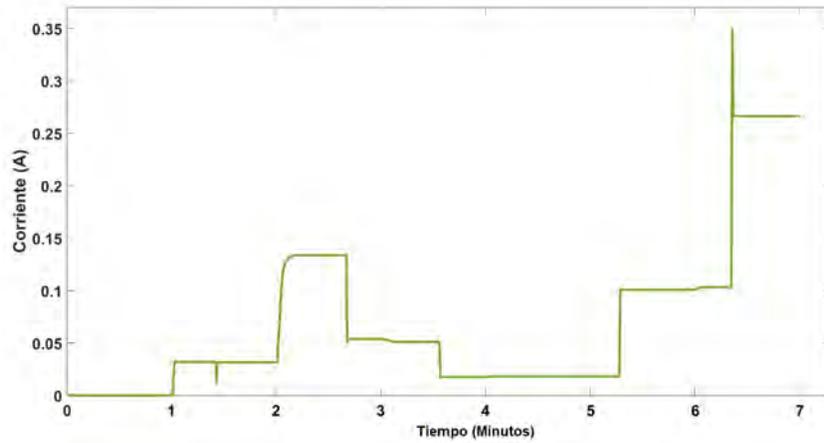


Figura 4.23: Variación de corriente para la estimación del modelo MISO.

Con esos datos se hizo la estimación del modelo Hammerstein-Wiener. Con el mismo procedimiento usado para obtener el sistema SISO se estimaron cada uno de los parámetros que componen esta estructura. En el **ANEXO B** se presenta el código utilizado para estimar cada parámetro y a su vez el modelo.

En resumen, el modelo propuesto tiene dos funciones no lineales que procesan las entradas hacia bloques lineales, produciendo una variable intermedia sin sentido físico, la cual es dependiente del tiempo y cuyo valor es modificado por el bloque no lineal de salida para generar la respuesta estimada de la planta. Con el fin de estimar los parámetros del modelo se buscó un estimador no lineal probando diferentes números de trozos lineales para formar las funciones no lineales, de tal forma que se lograra una mejor precisión en la predicción.

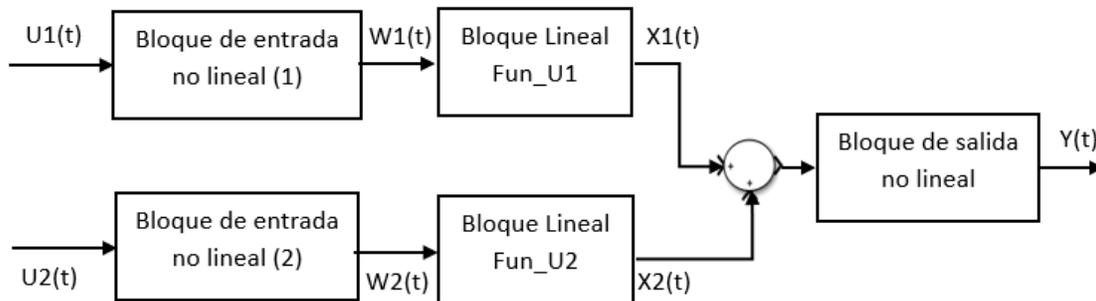


Figura 4.24: Estructura del modelo Hammerstein-Wiener para un sistema MISO.

La salida de los bloques de entrada no lineal (dos bloques que procesan la señal de irradiancia y la corriente demandada) se conecta a cada una de las funciones de transferencia 4.2 y 4.3 de los bloques intermedios:

$$\text{Fun U1} = \frac{\text{Voltaje}}{\text{Irradiancia}} = \frac{1}{z - 0,9754} \quad (4.2)$$

$$\text{Fun U2} = \frac{\text{Voltaje}}{\text{Demanda de Corriente}} = \frac{-0,3986z^3 + z^2 - 0,9562z + 0,3551}{z^3 - 2,481z^2 + 2,315z - 0,8339} \quad (4.3)$$

Como se observa en la Figura 4.24 estas funciones de transferencia se suman y se conectan a un bloque de salida no lineal. Esta función de salida también es no lineal y estática, como en los bloques de entrada. Para los bloques no lineales estáticos se utilizó un estimador no lineal de orden 10 para una mejor precisión. En la entrada y salida no lineales se generó un vector con los datos de las funciones no lineales.

Para llamar esos valores se utiliza el comando `OUT=Model_HW.OutputNonlinearity` en el caso de las salidas, y en el caso de las entradas el comando es `IN=Modelo_HW.InputNonlinearity(1)`. Se coloca entre paréntesis 1 para indicar que el bloque de la primera entrada es lineal. En caso de una segunda entrada se sustituye el número 1 por 2 o por la n-ésima entrada deseada. Los datos de entradas y salidas no lineales se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Datos de los bloques no lineales del modelo Hammerstein-Wiener.

Datos del bloque de entrada no lineal (1)		Datos del bloque de entrada no lineal (2)		Datos del bloque de salida no lineal	
U1	W1	U2	W2	X1+X2	Y
100.31	-46.05	202.32	2549.86	-17579.08	30.42
179.16	-776.70	333.16	11292.33	-14072.01	25.52
272.35	-5954.37	462.91	5418.44	-10565.21	17.93
361.04	-472.40	592.54	-515.05	-7058.27	14.41
454.55	-59.69	722.18	-2985.38	-3551.33	7.79
545.66	-687.15	851.82	-2848.59	-53.41	0.34
636.41	-291.03	981.45	-960.75	3462.53	-2.71
725.10	-542.50	1111.09	1822.06	6969.47	-1.89
819.94	-278.08	1240.73	4643.77	10476.40	2.91
897.10	-344.99	1370.36	6648.30	13983.34	0.86

Con la estimación de parámetros obtuvimos un modelo con un 95.61 % de similitud con los datos de salida que se consideran al inicio de esta sección. La comparativa de ambas gráficas aparece en la Figura 4.25

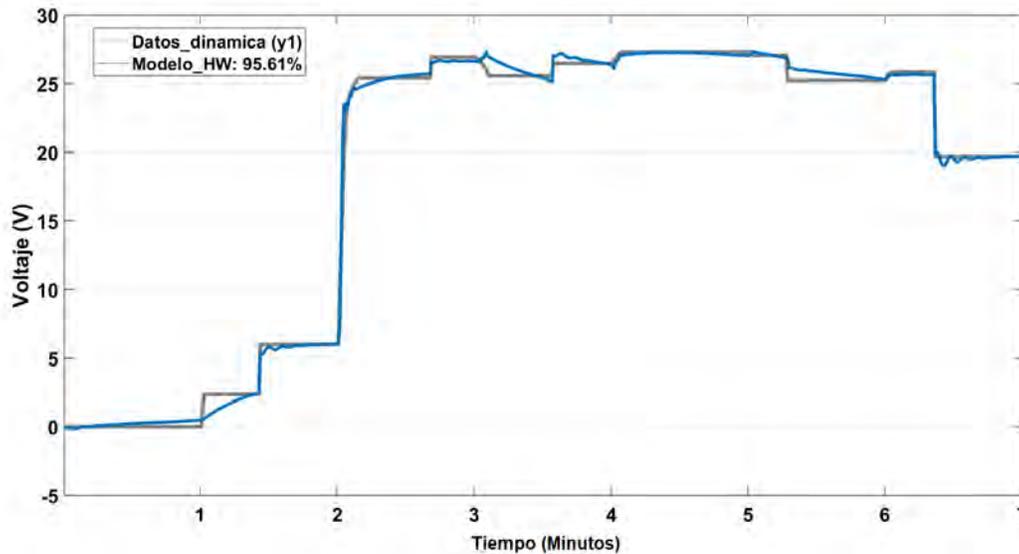


Figura 4.25: Comparación de los datos base del sistema y el modelo Hammerstein-Wiener.

Los modelos SISO y MISO presentados anteriormente son útiles y funcionan de manera apropiada; sin embargo se propone también un segundo modelo MISO identificado directamente a partir de datos experimentales, en lugar de usar datos obtenidos de simulación. El nuevo modelo permite la identificación de una función matemática dinámica que tiene las mismas dos entradas que se consideraron antes: la irradiancia y la demanda de corriente. De nueva cuenta la salida es el voltaje de la CST.

Para estimar el modelo se usó la relación de dos entradas - una salida. En la Figura 4.26 se presentan los datos medidos. Para obtener la relación experimental Voltaje en función de las entradas irradiancia/corriente, la prueba duró 27 minutos y se hicieron las mediciones con tiempo de muestreo de un segundo.

Los datos de irradiancia corresponden a la ubicación 18.882058, -99.190725, de Jiutepec, Morelos, y fueron capturados el 11 de Septiembre del 2023. En la fecha indicada, el día tuvo una irradiancia muy variable debido a la nubosidad que había en la zona. La condición de día nublado resultó conveniente porque se obtuvieron mediciones de irradiancia muy variables y el modelo se pudo estimar a partir de datos con una dinámica más rica.

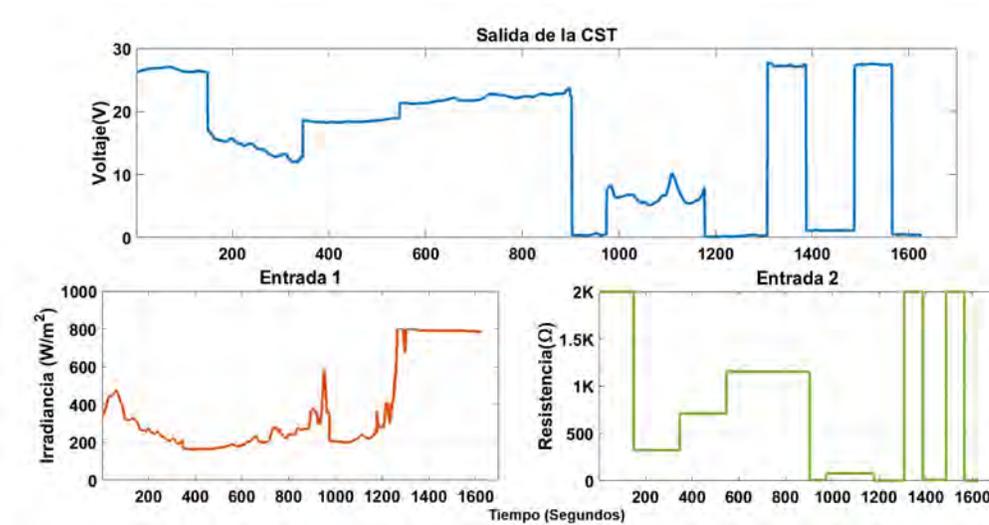


Figura 4.26: Datos de entrada y salida experimentales utilizados para la estimación del modelo MISO.

La Figura 4.27 muestra la variación de corriente en la CST usada como una de las entradas para estimar el modelo.

Con esos datos se estimó el modelo Hammerstein-Wiener siguiendo el mismo procedimiento usado para obtener el modelo SISO. Se estimaron cada uno de los parámetros que componen esta estructura, en el **ANEXO C** se presenta el código implementado para estimar los parámetros del modelo.

Como se describió anteriormente, el modelo propuesto tiene dos funciones no lineales que procesan las entradas hacia bloques lineales, cuyo valor es modificado por el bloque no lineal de salida para generar la respuesta estimada de la planta.

Las salidas de los bloques de entrada no lineal (dos bloques que procesan las señales de irradiancia y corriente demandada) son entradas de las funciones de transferencia 4.4 y 4.5 contenidas en los bloques intermedios:

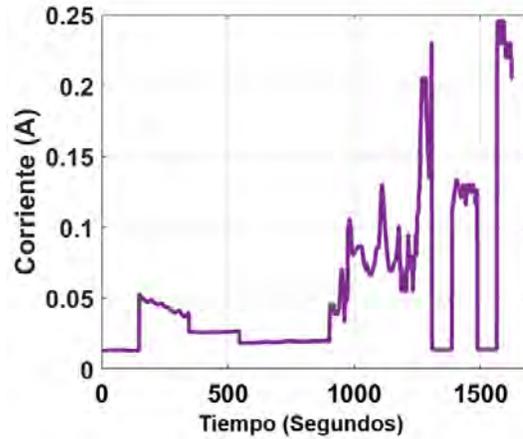


Figura 4.27: Variación de corriente (una de las variables de entrada) para la estimación del modelo MISO.

$$\text{Fun U1} = \frac{\text{Voltaje}}{\text{Irradiancia}} = \frac{-0,4224z^2 + z - 0,6602}{z^3 - 2,209z^2 + 1,737z - 0,4658} \quad (4.4)$$

$$\text{Fun U2} = \frac{\text{Voltaje}}{\text{Demanda de Corriente}} = \frac{z - 0,9986}{z^3 - 1,005z^2 + 0,01488z - 0,008877} \quad (4.5)$$

Como se observa en la Figura 4.24, las funciones de transferencia se suman y se conectan a un bloque de salida no lineal. en este caso, para los bloques no lineales estáticos se utilizó también un estimador no lineal de orden 10 para obtener una buena precisión.

Como antes, los bloques de entrada y salida no lineales se obtienen como un vector que contiene los datos de las funciones no lineales. Para llamar los valores de los vectores se utiliza el comando `OUT=Model_HW.OutputNonlinearity` en el caso de las salidas, y en el caso de las entradas el comando es `IN=Modelo_HW.InputNonlinearity(1)`. Se coloca entre paréntesis 1 para indicar que el bloque de la primera entrada es lineal. En caso de una segunda entrada se sustituye el número 1 por 2 o por la n-ésima entrada deseada. Los datos de entradas y

salidas no lineales se presentan en la Tabla 4.6 (ver Figura 4.24 para identificar las variables de entradas y salidas de los bloques que contiene el modelo del sistema).

Tabla 4.6: Datos de los bloques no lineales del modelo Hammerstein-Wiener a partir de datos experimentales.

Datos del bloque de entrada no lineal (1)		Datos del bloque de entrada no lineal (2)		Datos del bloque de salida no lineal	
U1	W1	U2	W2	X1+X2	Y
222.90	-7.90	134.14	-447.23	-5011.79	6.72
274.41	-392.71	364.94	-4526.20	-4859.78	8.50
338.74	196.84	546.92	1068.57	-4532.47	10.72
396.02	-431.55	728.43	8390.62	-4151.56	14.51
401.57	-245.40	910.13	11315.21	-4132.43	14.50
488.02	-444.54	1091.84	12226.28	-3932.90	14.98
589.32	73.75	1273.45	13515.19	-239.56	21.56
629.50	-177.56	1455.09	15596.70	458.82	33.92
670.88	-6420.86	1636.73	17856.35	728.95	12.49
741.74	455.95	1818.37	19678.51	3126.54	16.65

Con los parámetros estimados se obtuvo un modelo con un ajuste de 83.7% con respecto a las mediciones que se presentaron al inicio de esta sección. La comparación del voltaje medido y estimado se muestra en la Figura 4.28

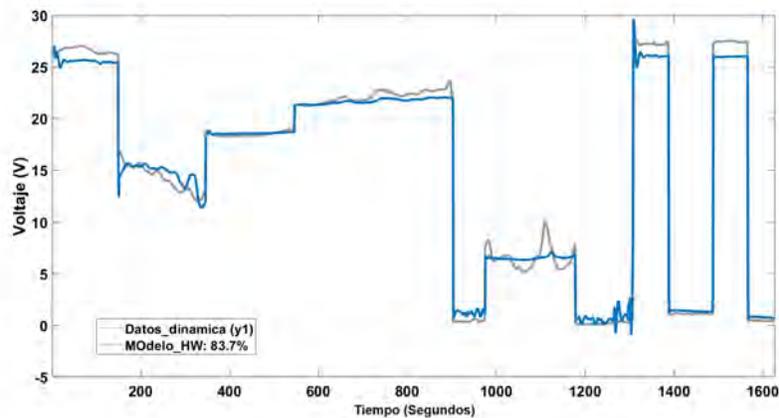


Figura 4.28: Comparación de los datos experimentales base y el modelo Hammerstein-Wiener.

Este último modelo fue validado con una prueba experimental adicional considerando como entrada la irradiancia solar medida del día 10 de Septiembre del 2023, en Jiutepec, Morelos. Los datos de la medición experimental se presentan en la Figura. 4.29. En este caso, el experimento duró 30 minutos y se tomaron muestras cada segundo. La irradiancia medida permaneció casi constante debido a que no existieron factores externos que afectaran este parámetro.

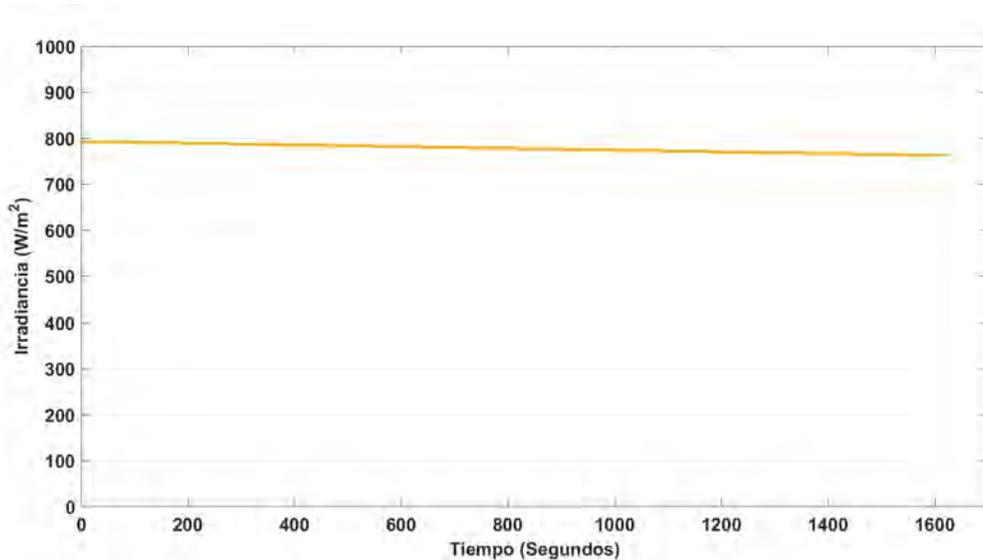


Figura 4.29: Irradiancia medida el día 10 de Septiembre del 2023.

Para realizar la prueba de validación del modelo estimado se forma una entrada compuesta por la señal de demanda de corriente que se encuentra contenida en la Figura 4.26 y la señal irradiancia de la Figura 4.29. Con estas entradas, como respuesta del modelo se obtiene la señal que se muestra en la Figura. 4.30, en donde la señal azul corresponde a los datos experimentales.

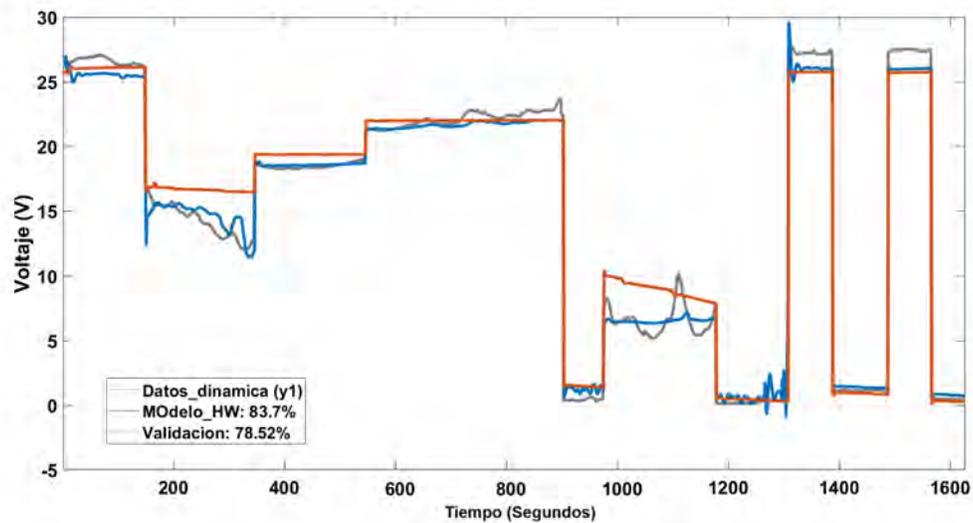


Figura 4.30: Comparación entre la señal de entrada, el modelo estimado y el modelo validado.

Con respecto a la etapa de modelado, se concluye que el modelo Hammerstein-Wiener identificado tiene una estructura simple que resulta de fácil implementación y manejo para ser considerado en investigaciones sobre CSTs. El modelo permitirá que estudios de la CST se realicen sin necesidad de contar con el dispositivo o sin realizar una gran cantidad de mediciones si se cuenta con él. Además, el modelo permite que una investigación pueda estar más enfocada en tareas como el control del dispositivo o a su dimensionamiento para alguna aplicación en particular. Por tal motivo si se tuviera que elegir un único modelo sería el Hammerstein-Wiener por que es el modelo que considera más variables que afectan al sistema.

4.4. Dimensionamiento.

La tarea de dimensionamiento de un módulo de CSTs consistió en estimar el número de paneles e inversores, así como el costo total de la instalación fotovoltaica y su recuperación [58]. Como primer paso se seleccionó una aplicación para dimensionar el módulo de CST, evaluar los costos de la instalación y de operación, así como determinar el periodo de recuperación de la inversión [59]. Inicialmente se consideraron alternativas como instalación en un invernadero o en un edificio. Para el caso del invernadero fue difícil encontrar un registro exacto del consumo energético que existe en estos establecimientos, lo que complicaría la tarea del dimensionamiento. Por consiguiente se consideró la instalación de un módulo de paneles fotovoltaicos transparentes en un restaurante ubicado en la ciudad de Cuautla, Morelos. Las coordenadas específicas para la instalación del módulo fotovoltaico son: 18.81 N, -98.95 E, en donde hay una irradiancia promedio de 607 W/m^2 en los últimos 22 años [60], como se muestra en la Figura 4.31

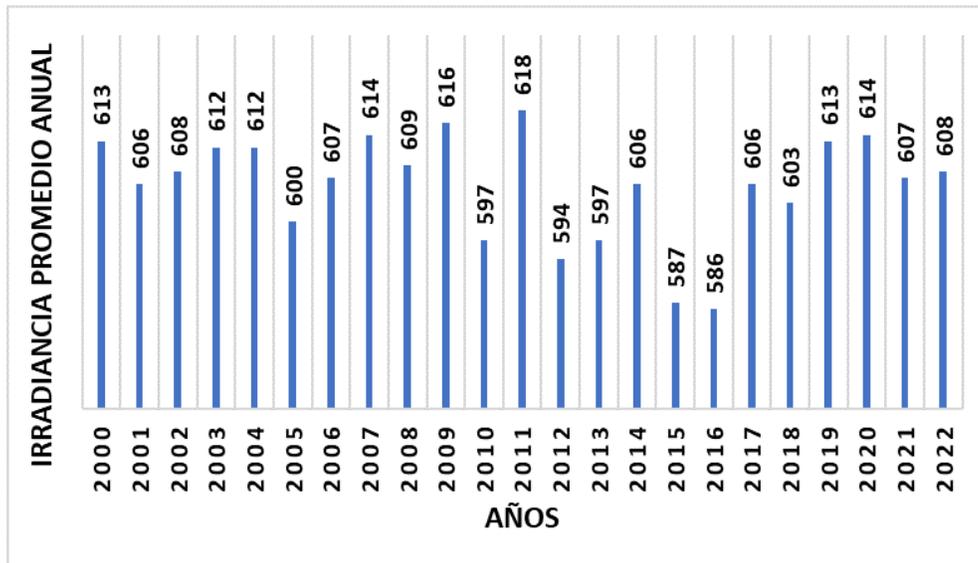


Figura 4.31: Irradiancia promedio anual en las coordenadas 18.81 N, -98.95 E, en los últimos 22 años.

Los responsables del restaurante proporcionaron el registro del consumo eléctrico del último año, y con estos datos se iniciaron los cálculos. Para estimar el consumo total que

debe satisfacer la instalación fotovoltaica se revisaron los recibos de luz de periodos anteriores para recopilar información. De acuerdo con lo investigado, los datos de consumo y facturación se reportan en la Tabla 4.7. Es preciso mencionar que el consumo bimestral no es siempre el mismo, sin embargo, para el caso de un dimensionamiento se considera un consumo promedio,

Tabla 4.7: Datos de consumo eléctrico y facturación anual en el último año.

Periodo	Consumo kWh	Facturación Actual
Enero	2,250.00	\$16,680.79
Marzo	2,250.00	\$18,018.58
Mayo	2,250.00	\$17,230.29
Julio	2,250.00	\$19,688.38
Septiembre	2,250.00	\$19,971.11
Noviembre	2,250.00	\$17,942.14
Total	13,500.00 KWh	\$109,531.28

Conociendo el consumo bimestral se calculó el consumo diario en kW. Para ello se dividió el consumo bimestral entre 61 días obteniendo un resultado de consumo diario de 36.90 kW aproximadamente. Tomando como referencia el consumo diario se calculó la energía por módulo y posteriormente se estimó el número de paneles que se requieren para la instalación completa, la fórmula aparece en la ecuación 4.6.

$$E_p = \frac{G_{dm} * P_{mfv} * P_R}{G_{cem}} \quad (4.6)$$

- G_{dm} =Irradiancia media del lugar.
- P_{mfv} =Potencia del módulo en kW.
- P_R = Factor de pérdidas.
- G_{cem} =Irradiación en condiciones Estándar de Prueba.

Una vez conocida la energía que produce cada panel ($E_p = 0,2198$) se divide el consumo

diario entre lo que produce cada uno de los módulos para obtener la cantidad de paneles que deben ser instalados.

$$\text{Número de paneles} = \frac{36,90\text{kWh/día}}{0,2198\text{kWh/día}} = 168 \text{ paneles aproximadamente.} \quad (4.7)$$

Se seleccionó un panel de 1.20 m * 0.60 m con un costo aproximado de \$1,600 MXN la ficha técnica aparece en el **ANEXO D**. Posteriormente se hizo la búsqueda de un inversor que pudiera conectar hasta 4 paneles para reducir la cantidad de inversores necesarios. La solución encontrada fue un micro-inversor APsystems Microinverter DS3D, la ficha técnica aparece en el **ANEXO E**. se estimó que se requerían 42 de estos dispositivos con un costo estimado de \$4,000 MXN. Hasta el momento se ha calculado un gasto de \$435,000 MXN.

Otro gasto que debe contemplarse es el de instalación, así como la compra de material eléctrico y mano de obra. Con ayuda de cotizaciones de paneles tradicionales y datos de internet se estimó un costo de \$100,000 MXN. Así mismo se deben cuantificar los costos operativos que incluyen el mantenimiento, limpieza y reparación de la instalación durante su vida útil. También se debe tomar en cuenta el cambio de micro-inversores cuando la vida útil de estos termine. En resumen, se calculó un costo anual de hasta \$20,000 MXN.

La línea de retorno económico de una instalación fotovoltaica de 36.90 kWp en Cuautla, Morelos, México se puede estimar utilizando los siguientes datos:

1. La energía producida se calculó utilizando una herramienta de estimación en línea [59]. Como resultado se estimó que una instalación de 36.90 kWp en Cuautla, Morelos puede generar alrededor de 13,479 kWh de energía al año [57].
2. El costo de la instalación descrito antes se valoró en \$535,000 pesos.
3. El costo operativo anual se estimó en \$20,000 pesos.
4. El ahorro por la energía producida cubrirá prácticamente el 100 % de la energía necesaria en el proyecto. Para hacer una estimación aproximada no existe una tarifa de venta

de energía eléctrica producida en México. En este caso lo que se hace en nuestro país es que si la instalación genera 13,479 kWh al año, entonces el ahorro anual se estima con base en la energía que producirá la instalación fotovoltaica, para ello utilizamos una regla de tres:

$$\text{Ahorro en pesos} = \frac{13,479kWh * \$109,531,28}{13500kWh} = \$109,360 \text{ pesos} \quad (4.8)$$

5. El periodo de recuperación de la inversión se calculó dividiendo la suma del costo total de la instalación y los costos operativos anuales, entre los ingresos anuales por la producción de energía [61]:

$$\text{Retorno} = \frac{\$535,000 + \$20,000}{\$109,360} = 5,07 \text{ años} \quad (4.9)$$

Es importante tener en cuenta que los costos y los ingresos pueden variar dependiendo de muchos factores, por lo que los cálculos presentados son aproximados y se requieren valoraciones adicionales para una evaluación más precisa. El retorno económico da como resultado recuperación económica en 5.03 años.

Enseguida se presenta un ejercicio de comparación de costos de una instalación de paneles transparentes y una de paneles opacos. Para realizar este análisis se pidió una cotización a la empresa Piensa Verde para conocer el costo de una instalación con paneles opacos. El resultado fue que el costo total es de \$163,000 MXN con un retorno económico en 1.12 años. La diferencia de precio se debe a factores como el tamaño de los paneles y la potencia que estos mismos brindan, además, se debe considerar que los paneles opacos ya tienen mayor eficiencia lo que reduce la cantidad de dispositivos a instalar y por ende los costos son menores.

Sin embargo, hay factores que equilibran la balanza, en este caso los paneles transparentes pueden ser implementados de manera más sencilla en zonas urbanas donde el espacio de instalación puede ser reducido. Así mismo al ser paneles translúcidos pueden ser utilizados como ventanas en algunos lugares, por ejemplo en [4] se describen instalaciones que han hecho

esto en Brasil, Italia y Francia logrando excelentes resultados, pues además de generar hasta 73.4 *MWh*/año han tenido un gran ahorro en el consumo eléctrico pues durante el día no se tiene que utilizar alguna lámpara para iluminar el recinto, la misma luz solar que pasa por la CST ayuda a este propósito.

Finalmente recordemos y tomemos en cuenta que esta es una tecnología en proceso de globalización. Hoy en día son pocos los proveedores, lo que provoca que los costos de compra y distribución aumenten en gran medida. Por lo tanto al pasar de los años, con una mayor demanda y oferta de este producto los costos de producción e instalación se irán reduciendo de manera notoria.

Capítulo 5

Conclusiones.

El conocimiento de los paneles solares transparentes obtenido a través de las pruebas realizadas y presentadas en este trabajo permite demostrar que se trata de una tecnología que puede tener un impacto positivo en el crecimiento de las energías renovables y que este tipo de dispositivos son adecuados para aplicaciones en áreas poco explotadas. Como se describe en la literatura, los paneles transparentes funcionan aprovechando la radiación UV-IR; las pruebas de transmitancia y desempeño eléctrico validaron este resultado e hicieron posible cuantificar la contribución en cada longitud de onda.

Con relación a la medición del desempeño eléctrico, los resultados de las pruebas permitieron registrar y evaluar el mapa Voltaje-corriente real, específico de una CST comercial. Se demostró que en condiciones de irradiancia solar se midieron valores muy cercanos a los obtenidos en simulación a partir de los datos básicos proporcionados por el fabricante. En las pruebas realizadas en la caja oscura, el desempeño eléctrico se observó reducido debido a que la fuente de luz usada no produce una irradiancia de calidad similar a la calidad de la luz solar, sin embargo, pruebas como estas posibilitan analizar cualitativamente el efecto de varios factores en el desempeño de la celda solar. Es relevante mencionar que las pruebas en caja oscura no dieron resultados erróneos, solo se debe considerar que la fuente de irradiancia que se esté utilizando pueda alcanzar mayores temperaturas. En próximas investigaciones

se recomienda medir el comportamiento de la CST sometida a fuentes de luz que alcancen una temperatura mayor a los 3000 K.

Para analizar el desempeño de CSTs se requieren pruebas eléctricas y de transparencia. Los resultados de este trabajo que evaluaron aspectos eléctricos y ópticos de una celda fotovoltaica transparente pueden ser de gran utilidad y servir para futuras investigaciones sobre el tema. Además de la caracterización eléctrica y de transparencia de una CST, un aspecto más que se aporta en el presente estudio es el modelado de la CST. Se estimó y validó un modelo SISO que relaciona Irradiancia-Voltaje con un 96.72 % de similitud con los datos resultantes de los experimentos realizados, y un modelo MISO que relaciona Irradiancia/Demanda de corriente - Voltaje, el cual tiene una estructura matemática no lineal de tipo Hammerstein-Wiener y alcanzó una similitud del 95.63 % comparado con datos experimentales. En ambos casos, como modelos dinámicos, pueden ser útiles para futuros trabajos sobre control de CSTs. Un aspecto que se recomienda retomar en el futuro es la estimación de un factor de corrección para ajustar las mediciones controladas en caja oscura con las mediciones en irradiancia solar. En el caso de no contar con otra fuente luminosa, esto sería de gran utilidad debido a que se podrían realizar mediciones a una irradiancia fija durante un mayor lapso de tiempo.

En lo que se refiere al análisis de costos, es importante destacar que el retorno de la inversión inicial aún esta dentro de lo ideal que son máximo 5 años. La implementación de las CST puede ofrecer beneficios adicionales a los energéticos, en caso de utilizarse como ventanas en algún comercio, el consumo de energía eléctrica reduciría ofreciendo un beneficio adicional de la transparencia o semi-transparencia. Es importante mencionar que la globalización de este producto permitirá que el costo de inversión disminuya a medida que esta tecnología se expanda a más lugares y vaya tomando más relevancia. Todo esto producirá un efecto que hará que los costos de fabricación, producción y distribución bajen de modo que esta tecnología pueda ser aplicada en una mayor cantidad de áreas.

En conclusión, en este trabajo se registraron protocolos de pruebas para evaluar CSTs, se

concentraron mediciones y parámetros que resultan útiles para caracterizar el desempeño y eficiencia de las celdas fotovoltaicas transparentes. Las pruebas se llevaron a cabo en irradiación solar y artificial. Así mismo, los modelos obtenidos en esta investigación tienen un buen ajuste a datos experimentales; se destaca el modelo identificado tipo Hammerstein-Wiener, el cual aproxima un comportamiento dinámico, no lineal y considera el efecto de la irradiación solar y de la corriente demandada. Contrariamente, en la literatura es común encontrar el uso de un modelo de circuito eléctrico equivalente con un diodo, el cual reproduce solo el comportamiento estático de una celda fotovoltaica. Algunas mejoras reportadas consisten en integrar dos diodos, y muy pocos trabajos consideran elementos dinámicos. El problema de modelado de sistemas fotovoltaicos en la literatura se concentra principalmente en los diferentes procedimientos de estimación de parámetros y en ocasiones en analizar e integrar el efecto de irradiación solar y/o de temperatura. En el trabajo actual se usaron técnicas de identificación de sistemas para modelar el dispositivo, con lo que se propone un modelo útil para diseño de control.

Bibliografía

- [1] A. A. Husain et al. “A review of transparent solar photovoltaic technologies.” En: *Renewable and sustainable energy reviews* 94 (2018), págs. 779-791.
- [2] Y. Zhao et al. “Near-infrared harvesting transparent luminescent solar concentrators.” En: *Advanced Optical Materials* 2 (2014), págs. 606-611.
- [3] C. Yang et al. “How to accurately report transparent solar cells.” En: *Joule* 3 (2019), págs. 1803-1809.
- [4] I. Burgués-Ceballos et al. “Transparent organic photovoltaics: A strategic niche to advance commercialization.” En: *Joule*. 2 (2014), págs. 606-611.
- [5] Zweibel K. “Thin film PV manufacturing: materials costs and their optimization.” En: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 63.4 (2000), págs. 375-386.
- [6] Park NG y Kim K. “Transparent solar cells based on dye-sensitized nanocrystalline semiconductors”. En: *Physica Status Solidi Applicationa Materrials and Science* 205.8 (2008), págs. 1895-1904.
- [7] K. Lee et al. “The development of transparent photovoltaics.” En: *Cell Reports Physical Science* 100143 (2020), págs. 1-24.
- [8] H. Alrashidi et al. “Thermal performance of semitransparent CdTe BIPV window at temperate climate.” En: *Solar Energy* 195 (2020), págs. 536-543.
- [9] A. Mutalikdesai y S. K. Ramasesha. “Solution process for fabrication of thin film Cd-S/CdTe photovoltaic cell for building integration.” En: *Thin Solid Films* 632 (2017), págs. 73-78.

- [10] Zhang Xiaoliang et al. “Semitransparent quantum dot solar cell.” En: *Nano Energy* 22 (2016), págs. 70-78.
- [11] Zhang Xiaoliang et al. “Fine Tuned Nanolayered Metal/Metal Oxide Electrode for Semitransparent Colloidal Quantum Dot Solar Cells.” En: *Advanced Functional Materials* 26.12 (2016), págs. 1921-1929.
- [12] Lunt Richard y Bulovic Vladimir. “Transparent, near-infrared organic photovoltaic solar cells for window and energy-scavenging applications”. En: *Applied Physics Letters* 98.11 (2011).
- [13] K. S. Chen et al. “Semi-transparent polymer solar cells with 6 percent PCE, 25 percent average visible transmittance and a color rendering index close to 100 for power generating window applications.” En: *Energy Environmental Science* 5.11 (2012), págs. 9551-9557.
- [14] C. Roldan-Carmona et al. “High efficiency single-junction semitransparent perovskite solar cells.” En: *Energy Environmental Science* 7.9 (2014), págs. 2968-2973.
- [15] A. Mutalikdesai y SK Ramasesha. “Solution process for fabrication of thin film Cd-S/CdTe photovoltaic cell for building integration.” En: *Thin Solid Films* 693 (2017), págs. 73-78.
- [16] Y. Song, S. Chang y J. Gradecak S.and Kong. “Visibly-transparent organic solar cells on flexible substrates with all-graphene electrodes.” En: *Advanced Energy Mater.* 6 (2016).
- [17] R. Arndt y R. Puto. “Basic Understanding of IEC Standard Testing for Photovoltaic Panels”. En: *Compliance Magazine* (2010).
- [18] M. Zhang et al. “Single-layered organic photovoltaics with double cascading charge transport pathways: 18 % efficiencies.” En: *Joule* 2 (2018), págs. 1827-1837.
- [19] Y. Li et al. “Colorneutral, semitransparent organic photovoltaics for power window applications.” En: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 35.35 (2020), págs. 21147-21154.

- [20] N. Chaturvedi et al. “All slot-die coated nonfullerene organic solar cells with PCE 11 %.” En: *Advanced Functional Materials* 31.14 (2021).
- [21] X. Xu et al. “Interface-enhanced organic solar cells with extrapolated T80 lifetimes of over 20 years.” En: *Science Bulletin* 65 (2020), págs. 208-216.
- [22] E. Pulli, E. Rozzi y F. Bella. “Transparent photovoltaic technologies: Current trends towards upscaling.” En: *Energy Conversion and Management* 219 (2020), págs. 1-18.
- [23] T. Khatib y W. Elmenreich. *Modeling of photovoltaic systems using Matlab: Simplified green codes*. John Wiley y Sons, 2016.
- [24] B. K. Dey et al. “Mathematical modelling and characteristic analysis of Solar PV Cell.” En: *EEE 7th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference* (2016), págs. 1-5.
- [25] Z. Li et al. “Transparent and colored solar photovoltaics for building integration.” En: *Renewable Energy Research Group, Department of Building Service Engineering* 5 (2021), pág. 2000614.
- [26] Richard Martin. *Células solares de telurio de cadmio logran un nuevo récord de eficiencia*. URL: <https://www.technologyreview.es/>.
- [27] Julieta C. Schallenberg Rodríguez. *Energías renovables y eficiencia energética*. Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., 2008.
- [28] J. L. Ordóñez. “Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico.” En: *Autores Científicos-Técnicos y Académicos* (), págs. 17-31.
- [29] Jeffrey R.S. Brownson. *Solar Energy Conversion Systems*. Academic Press is an imprint of Elsevier., 2014.
- [30] A. B. John A. Duffie. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley y Sons, Inc., 2013.
- [31] Centro Nacional de Salud Ambiental. *Radiación UV*. URL: <https://www.cdc.gov/spanish/nceh/especiales/radiacionuv/index.html>.

- [32] C. M. Rasero. “Energía Solar Fotovoltaica.” En: *Escuela de Organización Industrial* (2011).
- [33] Soteris A. Kalogirou. *Solar Energy Engineering Processes and Systems*. Elsevier., 2014.
- [34] Canaltic. *Energía solar fotovoltaica*. URL: https://canaltic.com/blog/html/exe/energias/energa_solar_fotovoltaica.html.
- [35] C.J. Traverse et al. “Emergence of highly transparent photovoltaics for distributed applications.” En: *Nat. Energy* 2 (2017), págs. 849-860.
- [36] L. Zuo, W. Shi X. and Fu y A.K.Y. Jen. “Highly efficient semitransparent solar cells with selective absorption and tandem architecture.” En: *Advanced material* 31.36 (2019).
- [37] W. Chen et al. “A semitransparent inorganic perovskite film for overcoming ultraviolet light instability of organic solar cells and achieving 14.03 % efficiency.” En: *Advanced material* 30.21 (2018).
- [38] J. Zhao et al. “Self-encapsulating thermostable and airresilient semitransparent perovskite solar cells.” En: *Advanced Energy Materials* 7.14 (2017).
- [39] H.C. Kwon et al. “Parallelized nanopillar perovskites for semitransparent solar cells using an anodized aluminum oxide scaffold.” En: *Advanced Energy Materials* 6.20 (2016).
- [40] J.W. Jung, C.-C. Chueh y A.K.-Y. Jen. “High-performance semitransparent perovskite solar cells with 10 % power conversion efficiency and 25 % average visible transmittance based on transparent CuSCN as the hole-transporting material.” En: *Advanced Energy Materials* 5.17 (2015).
- [41] K. Lee et al. “Neutral-colored transparent crystalline silicon photovoltaics.” En: *Joule* 4.1 (2020), págs. 235-246.
- [42] ASCA. *ASCA — The photovoltaic solution that unlocks your imagination*. URL: <https://www.asca.com/>.

- [43] H. S. Kim et al. “Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9 percent.” En: *Scientific reports* 2.591 (2012).
- [44] W. Zhang et al. “High-efficiency perovskite solar cells with suppressed hysteresis via the introduction of lithium-treated TiO₂ electrode.” En: *Energy Environmental Science* 7.10 (2014), págs. 3061-3068.
- [45] M. D. Mia. “Electrical and optical characterization of CdTe solar cells with CdS and CdSe buffers—A comparative study.” En: *American Vacuum Society* 36 (2018), pág. 052904.
- [46] L. Wang et al. “Shape control of colloidal semiconductor nanocrystals.” En: *Accounts of chemical research* 48.2 (2015), págs. 181-189.
- [47] X. Gong et al. “High-efficiency polymer solar cells with vertically modulated nanoscale morphology.” En: *Nano letters* 9.6 (2009), págs. 2212-2217.
- [48] Instituto Nacional de Cáncer. *Cadmio*. URL: <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/sustancias/cadmio>.
- [49] Fabiola Nava Alonsa. “Teluro”. En: *Ciencia y Cultura* (2019), págs. 1-4. DOI: <https://www.revistac2.com/teluro/>.
- [50] A. Mutalikdesai y S. K. J. T. S. F. Ramasesha. “Solution process for fabrication of thin film CdS/CdTe photovoltaic cell for building integration.” En: *Thin Solid Films* 632 (2017), págs. 73-78.
- [51] K. Zhang et al. “High-Performance, Transparent, Dye-Sensitized Solar Cells for See-Through Photovoltaic Windows”. En: *Advanced Energy Materials* 4 (2014). DOI: 10.1002/aenm.201301966..
- [52] M. Saifullah, J. Gwak y J. H. J. J. o. M. C. A. Yun. “Comprehensive review on material requirements, present status, and future prospects for building-integrated semi-transparent photovoltaics (BISTPV).” En: *Journal of Materials Chemistry A* 4 (2016), págs. 8512-8540.

- [53] TuTiempo. *Radiacion Solar*. URL: <https://www.tutiempo.net/radiacion-solar/jiutepec.html>.
- [54] Univerisdad de Oregon. *Laboratorio de Monitoreo de Radiacion Solar*. URL: <http://solardata.uoregon.edu/SunChartProgram.php>.
- [55] MathWorks. *PV Array*. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pvarray.html>.
- [56] L. Ljung. *System Identification: Theory for the User*. Prentice Hall PTR., 1999.
- [57] L. Ljung. *System Identification Toolbox™ Getting Started Guide*. The MathWorks, Inc., 2016.
- [58] J. C. Perez Álvarez. “GUÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS Y APLICACIÓN DE LA RESOLUCIÓN CREG 030 DE 2018 PARA INYECTAR EXCEDENTES DE ENERGÍA A LA RED”. En: *Universidad de Antioquia*. (2019).
- [59] SunEarthTools. *Retorno de la inversión fotovoltaica*. URL: <https://www.sunearthtools.com/es/solar/payback-photovoltaic.php>.
- [60] NASA. *POWER — Data Access Viewer*. URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- [61] Facultad de Economía. *Capitulo IV: Evaluación Financiera*. URL: <http://www.economia.unam.mx>.
- [62] C. El Fouas et al. “Numerical model and experimental validation of the electrical and thermal performances of photovoltaic-thermal plant.” En: *Energy Conversion and Management* 220 (2020), págs. 1-12.
- [63] D. Liu, C. Yang y R.R. Lunt. “Halide perovskites for selective ultraviolet harvesting transparent photovoltaics.” En: *Nat. Commun.* 12.309 (2021).
- [64] Adrián Raya. “Consiguen crear ventanas que también son paneles solares transparentes”. En: *El español* (2020).

- [65] E. Della Gaspera et al. “Ultra-thin high efficiency semitransparent perovskite solar cells.” En: *Nano Energy* 13 (2015), págs. 249-257.
- [66] M. Patel et al. “Active energy-controlling windows incorporating transparent photovoltaics and an integrated transparent heater.” En: *A Cell Reports Physical Science* 2 (2021), págs. 1-15.
- [67] L. Peña Asensio. “Células solares transparentes: desarrollo actual y aplicaciones.” En: *Universidad Politécnica de Cartagena* (2011), págs. 33-64.
- [68] S. S. Babkair, N. M. Al-Twarqi y A. A. J. K. U. J. o. S. Ansari. “Optical characterization of CdTe films for solar cell applications.” En: *Karachi University Journal of Science*. 39 (2011), págs. 1-5.
- [69] D. Colonna et al. “ISO 9050 ISO 9050, 2003.” En: *ISO* ().
- [70] T. Wang et al. “Incorporation of metal selenide thin films as the secondary absorber in the CdTe solar cells.” En: *Journal of Alloys and Compounds* 828 (2020).
- [71] I. Hwang et al. “Enhancement of light absorption in photovoltaic devices using texture PDMS stickers.” En: *ACS Applied Material and Interfaces* 828 (2017), pág. 15.
- [72] H. Alrashidi et al. “Thermal performance of semitransparent CdTe BIPV window at temperate climate.” En: *Solar Energy* 195 (2020), págs. 536-543.
- [73] Y. Suna et al. “Integrated semi-transparent cadmium telluride photovoltaic glazing into windows: Energy and daylight performance for different architecture designs.” En: *Applied Energy* 231 (2018), págs. 972-984.
- [74] K. Agroui. “Indoor and outdoor characterizations of photovoltaic module based on multicrystalline solar cells.” En: *Energy Procedia* 18 (2012), págs. 857-866.
- [75] IEC. “International Standar. Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules”. En: *Applied Energy* (2005).
- [76] Q. Tai y F. J. A. M. Yan. “Emerging semitransparent solar cells: materials and device design”. En: *Advanced Materials*. 29.34 (2017), pág. 1700192.

Anexo A. Código del programa para la estimación de modelo SISO para el panel solar.

```
%% Estimacion del modelo ARX / PARAMETRO NK
na = 10;
nb = 10;
nk = 1:10; %Valores de NK=1,2&3
NN = struc(na,nb,nk);
for ct = 1:size(NN,1)
    models2{ct} = arx(Datos_dinamica , NN(ct ,:));
end
P5 = fpe(models2{:});
plot (P5);
title ('Estimacion del parametro NK en ARX')

%%
na = 1:10; %Valores de NA=3 4
nb = 10;
nk = 1;
NN = struc(na,nb,nk);
for ct = 1:size(NN,1)
    models2{ct} = arx(Datos_dinamica , NN(ct ,:));
end
P6 = fpe(models2{:});
plot (P6);
title ('Estimacion del parametro NA en ARX')

%%
na = 1;
nb = 1:10; %Valores de NB=3 4
nk = 1;
NN = struc(na,nb,nk);
for ct = 1:size(NN,1)
    models2{ct} = arx(Datos_dinamica , NN(ct ,:));
```

```

end
P7 = fpe(models2{:});
plot (P7);
title ('Estimacion del parametro NB en ARX')

%% Modelo ARX
f3 = figure;
f4 = figure;
f14 = figure;
f21 = figure;

Modelo_ARX=arx(Datos_dinamica, [1 2 1])
Num_ARX=Modelo_ARX.B
Den_ARX=Modelo_ARX.A
Fun_ARX=tf(Num_ARX, Den_ARX, 0.2);

Dat_Step=step(Dat_Imp);
Datos_Step= [Dat_Step(1:35)];
Dat_ARX=step(Modelo_ARX);
Datos_ARX= [Dat_ARX(1:35)];
FIT_ARX = 100*(1-(norm(Datos_Step-Datos_ARX)/norm(Datos_Step-mean(Datos_Step)))
))

figure (f3);
step (Dat_Imp, Fun_ARX)
xlim ([0 13]);
title ('Comparacion del step de los datos y la funcion ARX. ')

lgd=legend({'Datos', 'Fun_ARX'})
title (lgd, 'FIT 89.96%')
figure (f4);
Bode_ARX = bodeplot(Dat_Imp, Fun_ARX, opts);
title ('Diagrama BODE de los datos y la TF obtenida del modelo ARX. ')

```

```

legend({'Datos', 'Fun_ARX'})
figure (f14);
compare(Datos_dinamica, Modelo_ARX);
title('Comparacion_de_los_datos_iniciales_con_el_modelo_ARX_estimado')

```

Anexo B. Código del programa para la estimación de modelo MISO para el panel solar.

```

%%Extraemos los datos del archivo .txt
Datos_HSVD=readmatrix("2IN1OUTv2t2.txt");
u = [Datos_HSVD(:,2), Datos_HSVD(:,3)];
y = [Datos_HSVD(:,1)];
Datos_dinamica=iddata(y,u,0.01);
plot(Datos_dinamica)

%% ESTIMACION HW NK1 & NK2
nb = [10 10];
nf = [10 10];
nk = [10 10]; %Valores de NK=1 2
for ct = 1:10
    nk = [ct 10];
    models4{ct} = nlhw(Datos_dinamica, [nb,nf,nk]);
end
P10 = fpe(models4{:});
plot (P10);
title('Estimacion_del_parametro_NK1_en_HW')

nb = [10 10];
nf = [10 10];
nk = [1 10]; %Valores de NK=1 2

for ct = 1:10

```

```

    nk = [1 ct];
    models4{ct} = nlhw(Datos_dinamica , [nb,nf,nk]);
end
P10 = fpe(models4{:});
plot (P10);
title ('Estimacion_del_parametro_NK2_en_HW')

%% ESTIMACION HW NB1 & NB2
nb = [10 10];
nf = [10 10];
nk = [1 1]; %Valores de NK=1 2

for ct = 1:10
    nf = [ct 10];
    models4{ct} = nlhw(Datos_dinamica , [nb,nf,nk]);
end
P14 = fpe(models4{:});
plot (P14);
title ('Estimacion_del_parametro_NB1_en_HW')

nb = [1 10];
nf = [10 10];
nk = [1 1]; %Valores de NK=1 2

for ct = 1:10
    nf = [1 ct];
    models4{ct} = nlhw(Datos_dinamica , [nb,nf,nk]);
end
P14 = fpe(models4{:});
plot (P14);
title ('Estimacion_del_parametro_NB2_en_HW')

%% ESTIMACION HW NF1 & NF2
nb = [1 4];

```

```

nf = [10 10];
nk = [1 1]; %Valores de NK=1 2

for ct = 1:10
    nf = [ct 10];
    models4{ct} = nlhw(Datos_dinamica , [nb,nf,nk]);
end
P15 = fpe(models4{:});
plot (P15);
title ('Estimacion del parametro NF1 en HW')

nb = [1 4];
nf = [1 10];
nk = [1 1]; %Valores de NK=1 2

for ct = 1:10
    nf = [1 ct];
    models4{ct} = nlhw(Datos_dinamica , [nb,nf,nk]);
end
P15 = fpe(models4{:});
plot (P15);
title ('Estimacion del parametro NF2 en HW')

%% Modelo HW

f11= figure;
nb = [1 4];
nf = [1 3];
nk = [1 1];
Modelo_HW=nlhw(Datos_dinamica , [nb,nf,nk])
Num_HW = Modelo_HW.B;
Den_HW = Modelo_HW.F;
Fun_HW =tf(Num_HW, Den_HW, 0.01);
figure (f11);

```

```
compare(Datos_dinamica , Modelo_HW);  
title('Comparacion_de_los_datos_iniciales_con_el_modelo_OE_estimado')
```

Anexo C. Código del programa para la estimación de modelo MISO para el panel solar con señales de entrada experimentales.

```
%%Extraemos los datos del archivo .txt
Datos_HSVD=readmatrix("30MINHW792.txt");
u = [Datos_HSVD(:,2), Datos_HSVD(:,3)];
y = [Datos_HSVD(:,1)];
corriente = [Datos_HSVD(:,4)];
Datos_dinamica=iddata(y,u,1);
plot(Datos_dinamica)
plot(corriente)

%% ESTIMACION HW NK1 & NK2

nb = [10 10];
nf = [10 10];
nk = [10 10]; %Valores de NK=1 2

for ct = 1:10
    nk = [ct 10];
    models4{ct} = nlhw(Datos_dinamica, [nb,nf,nk]);
end
P10 = fpe(models4{:});
plot(P10);
title('Estimacion del parametro NK1 en HW')

nb = [10 10];
nf = [10 10];
nk = [4 10]; %Valores de NK=1 2
```

```

for ct = 1:10
    nk = [4 ct];
    models4{ct} = nlhw(Datos_dinamica , [nb,nf,nk]);
end
P10 = fpe(models4{:});
plot (P10);
title ('Estimacion_del_parametro_NK2_en_HW')
%%

%% ESTIMACION HW NB1 & NB2

nb = [10 10];
nf = [10 10];
nk = [4 1]; %Valores de NK=1 2

for ct = 1:10
    nb = [ct 10];
    models4{ct} = nlhw(Datos_dinamica , [nb,nf,nk]);
end
P14 = fpe(models4{:});
plot (P14);
title ('Estimacion_del_parametro_NB1_en_HW')

nb = [3 10]; %5
nf = [10 10];
nk = [4 1]; %Valores de NK=1 2

for ct = 1:10
    nb = [3 ct];
    models4{ct} = nlhw(Datos_dinamica , [nb,nf,nk]);
end
P14 = fpe(models4{:});

```

```

plot (P14);
title ('Estimacion del parametro NB2 en HW')

%% ESTIMACION HW NF1 & NF2

nb = [3 2];
nf = [10 10];
nk = [4 1]; %Valores de NK=1 2

for ct = 1:10
    nf = [ct 10];
    models4{ct} = nlhw(Datos_dinamica , [nb,nf,nk]);
end
P15 = fpe(models4{:});
plot (P15);
title ('Estimacion del parametro NF1 en HW')

nb = [3 2];
nf = [3 10];
nk = [4 1]; %Valores de NK=1 2

for ct = 1:10
    nf = [3 ct];
    models4{ct} = nlhw(Datos_dinamica , [nb,nf,nk]);
end
P15 = fpe(models4{:});
plot (P15);
title ('Estimacion del parametro NF2 en HW')

%% Modelo HW

```

```

f11= figure;
nb = [3 2];
nf = [3 3];
nk = [4 1];

MOdelo_HW=nlhw (Datos_dinamica , [nb , nf , nk])

Num_HW = MOdelo_HW.B;
Den_HW = MOdelo_HW.F;
Fun_HW =tf(Num_HW, Den_HW, 1);

figure (f11);
compare(Datos_dinamica , MOdelo_HW);
title('Comparacion_de_los_datos_iniciales_con_el_modelo_HW_estimado')
plot (MOdelo_HW)

%% Validacion del modelo
%% \text{Extraer los datos de la nueva entrada desde el archivo .txt}

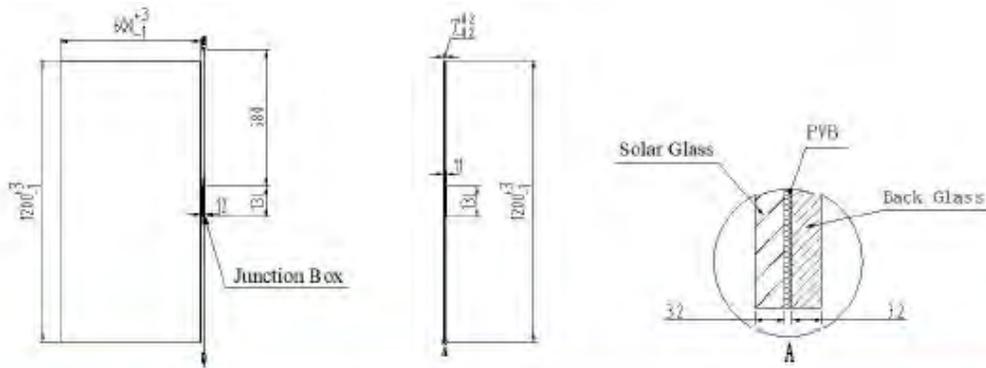
u1 = [Datos_HSVD(:,5) , Datos_HSVD(:,3) ];
y1 = [Datos_HSVD(:,1) ];
EN=Datos_HSVD(:,5)
Datos_dinamica792=iddata(y1,u1,1)
plot(EN)

%% Validar modelo con la nueva entrada

y_simulado = sim(sys , u1);
Modelo Validado= iddata(y_simulado ,u1 ,1)
compare(Datos_dinamica , MOdelo_HW, Modelo Validado);
title('Comparacion_de_los_datos_iniciales_con_el_modelo_HW_estimado')

```

Anexo D. Ficha técnica del panel solar considerado en el dimensionamiento.



Electrical Specifications (performance at STC: 1000W/m², 25°C, AM1.5)

Specification	SF-LAM2-T80-15	SF-LAM2-T70-23	SF-LAM2-T60-30	SF-LAM2-T55-34	SF-LAM2-T50-38	SF-LAM2-T45-42	SF-LAM2-T40-46	SF-LAM2-T30-52	SF-LAM2-T20-61	SF-LAM2-T10-69
Transparency	80%	70%	60%	55%	50%	45%	40%	30%	20%	10%
Nominal Power(P _m)/W	15	23	30	34	38	42	46	52	61	69
Open Circuit Voltage(V _{oc})/V	111.0	114.0	114.0	114.0	114.0	114.0	114.0	114.0	114.0	114.0
Short Circuit Current (I _{sc})/A	0.23	0.31	0.41	0.46	0.51	0.56	0.61	0.72	0.82	0.92
Voltage at max. Power(V _m)/V	85.5	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8
Current at max. Power(I _m)/A	0.18	0.26	0.34	0.39	0.43	0.48	0.52	0.59	0.70	0.79

System Properties (at STC)

Maximum Series Fuse Rating(I _{sc})/	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.5
Maximum System Voltage(V _{sys})/V	1000									

Mechanical Specifications

Length	1200mm (-1~+3mm)
Width	600mm (-1~+3mm)
Thickness	7mm (±0.2mm)
Area	0.72m ²
Weight	12kg
Frame	None
Lead Cable	2.5mm ² 580mm
Connectors	MC4
Bypass Diode	6A
Cell Type	Cadmium Telluride (CdTe)
Solar Glass	3.2 mm Annealed glass
Back Glass	3.2 mm Annealed glass
Encapsulation	PVB

Temperature Characteristics(at STC)

Temperature Coefficients of I _{sc}	α=0.060%/°C
Temperature Coefficients of V _{oc}	β=-0.321%/°C
Temperature Coefficients of P _m	γ=-0.214%/°C
Operating Temperature Range	-40°C To +85°C

Warranty:

- 10 years materials and workmanship.
- 25 years power output guarantee for 90% of nominal output during first 10 years and 80% over 25 years.
- Modules are life cycle managed with a collection and recycling program, providing module owners with no cost, end-of-life take back, and recycling of the modules.

Packaging Configuration

Modules Per Pallet	54PCS
Pallet Weight	600kg
Pallet Dimensions	1260x1080x790mm
Modules Per 40' Container	1944PCS

Anexo E. Ficha técnica del micro-inversor APsystems Microinverter DS3D.



Liderando la industria en
Tecnología de microinversores solares



DS3D

Duplica el rendimiento de la serie de microinversores duales más potentes

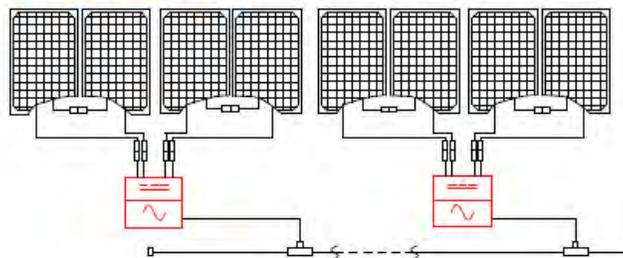
- 2 canales de entrada con MPPT independientes y función de monitorización.
- Una sola unidad se conecta a 4 módulos.
- Potencia de salida continua máxima hasta 2000VA.
- Diseñado para combinarse con los módulos de mayor potencia disponible (corriente de entrada máxima 20A).
- Comunicación cifrada ZigBee.
- Relevador de protección de seguridad integrado.

CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO

APsystems amplía su 3ª generación de la serie de microinversores duales con el DS3D. Con una potencia de salida sin precedentes de 2000VA, el DS3D se conecta a 4 módulos de alta potencia (2 por 2 en serie). Con 2 MPPT independientes, señal ZigBee cifrada, el DS3D se beneficia de una nueva arquitectura completa.

El diseño innovador hace que el producto sea único ya que maximiza la producción de energía. Los componentes están encapsulados con silicona para reducir el desgaste en la electrónica, facilitar la disipación térmica, mejorar las propiedades impermeables y garantizar la máxima fiabilidad del sistema a través de rigurosos métodos de prueba, incluidas las pruebas de vida útil acelerada. Se tiene acceso a los datos de energía 24/7 a través de aplicaciones y portales web que facilitan el diagnóstico y el mantenimiento remoto.

ESQUEMA DE CABLEADO



2022/07/15 Rev1.1

Ficha técnica | Microinversor DS3D

Modelo	DS3D
Región	LATAM
Datos de entrada (cc)	
Rango de potencia de módulo fotovoltaico (STC) recomendado	315 Wp-67 QWp+
Voltaje de seguimiento de máxima potencia	56V-90V
Rango de voltaje de operación	52V-120 V
Voltaje máximo de entrada	120V
Corriente de entrada máxima	20A x 2
Corriente de cortocircuito de entrada máxima	25A por entrada
Datos de salida (ca)	
Potencia de salida máxima	2000VA
Voltaje/rango de salida nominal ⁽¹⁾	240V/211V-264V
Rango de voltaje de salida ajustable	170V-278V
Corriente de salida nominal	8.3A
Frecuencia / rango de salida nominal ⁽¹⁾	60Hz/59,3 Hz-60,5 Hz
Rango de frecuencia de salida ajustable	55Hz-6 5Hz
Unidades máximas por ramal/string de 10AWG ⁽²⁾	4
Unidades máximas por ramal/string de 12AWG ⁽²⁾	3
Eficiencia	
Eficiencia máxima	97%
Eficiencia nominal MPPT	99.5%
Consumo de energía nocturno	20mW
Datos mecánicos	
Rango de temperatura ambiente de funcionamiento ⁽³⁾	-40 °F a +149 °F (-40 °C a +65 °C)
Rango de temperatura de almacenamiento	-40 °F a +185 °F (-40 °C a +85 °C)
Dimensiones (An x Al x P)	11" x 9" x 2" (284mm X 234mm X 50.2mm)
Peso	9,5 libras (4,3 kg)
Calibre de cable troncal	10GTE (35A) / 12AWG (28A)
Tipo de conector de corriente continua	Staubli MC4 PV-ADBP4-S2&ADSP4-S2
Enfriamiento	Convección natural - Sin ventiladores
Encapsulado	IP67
Funciones	
Comunicación (inversor a ECU) ⁽⁴⁾	ZigBee cifrado
Diseño de aislamiento	Transformadores de alta frecuencia, aislados galvánicamente
Gestión de la energía	Sistema de análisis de gestión energética (EMA)
Garantía ⁽⁵⁾	10 años de estándar
Certificados y cumplimientos	
Cumplimiento de normas	UL1741 (IEEE1547); CSA C22.2 No. 1071-16; NOM-001; UL1699B

(1) El rango nominal de voltaje / frecuencia se puede extender más allá del nominal si así lo requiere la empresa de servicios públicos.

(2) Los límites pueden variar. Consulte los requisitos locales para definir el número de microinversores por sucursal o su área.

(3) El inversor puede entrar en modo de desactivación de potencia en un entorno de instalación de ventilación y disipación de calor deficiente.

(4) Recomendar que no más de 80 inversores se registren en una ECU para una comunicación estable.

(5) Para ser elegibles a la garantía, los microinversores de APsystems deben ser monitoreados a través del portal de la EMA.

Consulte nuestros términos y condiciones de garantía disponibles en latam.APsystems.com.

APsystems en Guadalajara:

Calzada Lázaro Cárdenas #3422 int 604, Colonia Chapalita, C.P. 45040, Guadalajara, Jalisco

+52 (33) 3188 4604 | info.latam@apsystems.com

© Todos los derechos reservados.

Las especificaciones están sujetas a cambios sin previo aviso, asegúrese de que está utilizando la actualización más reciente que se encuentra en la web: latam.APsystems.com.