

# Caracterización de Celdas Solares Transparentes

H-S. Valle-Díaz\*, M-G. López-López\*,  
V-M. Alvarado-Martínez\*

\* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado  
Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.  
e-mail:m21ce088@cenidet.tecnm.mx*

Resumen. Este artículo presenta los resultados de la caracterización de una celda fotovoltaica transparente que es una de las tecnologías más recientes entre los desarrollos de sistemas fotovoltaicos. El estudio hace énfasis en los parámetros que mejor determinan el desempeño de la Celda Solar Transparente (CST), y se realiza con el fin de apoyar futuras investigaciones en las que se desee conocer su desempeño. También se propone un modelo matemático que representa la dinámica eléctrica del sistema. El modelo se obtiene por identificación, una técnica basada en el tratamiento de datos experimentales. Su formulación se hace usando una estructura matemática Hammerstein-Wiener para un sistemas no lineal MISO.

*Keywords:* Celda Solar Transparente, Caracterización, Modelo Hammerstein-Wiener.

## 1. INTRODUCCIÓN

La radiación solar es un recurso accesible para todas las personas, lo que ha permitido impulsar diferentes tecnologías que aprovechan esta fuente de energía renovable. Entre estas tecnologías, los paneles y concentradores fotovoltaicos han tenido un éxito importante. Su funcionamiento permite convertir la luz del sol en energía eléctrica. Este tipo de sistemas pueden aplicarse a gran escala en granjas solares o en menor escala usarse en la parte superior de algunos edificios.

En los últimos años, el desarrollo de nuevos tipos de celdas solares ha captado la atención de los científicos. Entre los nuevos dispositivos que aprovechan la energía solar de diferente manera destacan las Celdas Solares Transparentes (CST), las cuales pueden ser usadas en áreas poco explotadas, y así satisfacer varias necesidades energéticas de la vida diaria. De acuerdo con Husain et al. [2018], son 9 las tecnologías de celdas fotovoltaicas transparentes que han sido desarrolladas para solventar la demanda de diferentes mercados. Los países que al día de hoy han registrado éxito en el uso de esta nueva tecnología son Japón, Alemania, Estados Unidos, China y la India.

El objetivo del presente trabajo es caracterizar el comportamiento de una CST. Esta tarea implica evaluar los parámetros que miden el desempeño y la eficiencia del sistema, desde el punto de vista de sus propiedades eléctricas y ópticas. La CST estudiada ha sido fabricada con vidrio 50 % transparente, sin marco, tiene 6.55 % de eficiencia y fue construida con Teluro de Cadmio (CdTe). Otro objetivo es modelar el comportamiento eléctrico de la CST.

## 2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

La caracterización de la CST a través de mediciones experimentales comprende, por un lado, la obtención de parámetros que miden el desempeño eléctrico y las propiedades de transparencia. Por otro lado, la determinación de curvas V-I (Voltaje-Corriente) y P-V (Potencia-Voltaje). En primer lugar se definen los parámetros que miden el desempeño eléctrico:

**Potencia máxima de operación,  $P_{max}$ .**

Representa el punto de potencia máxima  $P_{max}$ , donde la potencia en la carga resistiva está en un valor máximo y está dado por la ecuación (1) (Khatib and Elmenreich [2016]).

$$P_{max} = V_{mp} * I_{mp} \quad (1)$$

donde  $P_{max}$  es la potencia máxima,  $V_{mp}$  es el voltaje en máxima potencia, y  $I_{mp}$  es la corriente en máxima potencia.

**Eficiencia máxima de la celda solar,  $\eta$ .**

Un aspecto de suma importancia es calcular la eficiencia máxima  $\eta$  de la CST. Para este efecto, la ecuación 2 permite calcular  $\eta$  como la relación entre la potencia máxima y la luz incidente en la celda (Khatib and Elmenreich [2016]).

$$\eta = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{A * G_a} \quad (2)$$

donde  $A$  representa en área de la celda y  $G_a$ , la radiación solar incidente.

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

Este parámetro comúnmente conocido como Factor de llenado se calcula como la relación entre el producto de la corriente en corto circuito y el voltaje en circuito abierto (valores máximos de corriente y voltaje) y el voltaje en un punto de máxima potencia. Para celdas solares eficientes este valor debe ser superior al 0.7. El  $FF$  disminuye a medida que la temperatura de la celda aumenta y conforme se acerca a 1, la potencia ideal y real de la celda se aproximan (Khatib and Elmenreich [2016]).

$$FF = \frac{I_{SC} * V_{OC}}{I_{mp} * V_{mp}} \quad (3)$$

donde  $I_{SC}$  es la corriente de corto circuito y  $V_{OC}$  es el voltaje de circuito abierto.

Para un sistema fotovoltaico transparente se miden propiedades ópticas, cuyos valores deben estar en los rangos adecuados, de acuerdo con diferentes normas.

### Neblina de transmisión $H$ (%).

Este parámetro indica qué porcentaje de la luz que llega a CST es reflejado, provocando que lo que está detrás de la CST pueda verse borroso u opaco. Por lo tanto, mientras menor sea el valor de  $H$  (%), se observará con mayor claridad a través de la CST (Lee et al. [2020]).

$$H(\%) = \frac{T_d}{T_t} * 100 \quad (4)$$

donde  $T_d$  se define como la transmitancia difusa y  $T_t$  como la transmitancia total.

### Luz utilizada eficientemente $T_{eff}$ .

Este parámetro fue introducido en 2014 por Zhang Zhang et al. [2014] como indicador de cuánta luz es utilizada eficientemente. Valores elevados de  $T_{eff}$ , significan que la CST capta y deja pasar mejor la luz (Saifullah et al. [2016]).

$$T_{eff} = 100v * 100\tau_v \quad (5)$$

donde  $v$  es el coeficiente de absorción y  $\tau_v$  es la transmitancia visible.

Las curvas V-I sirvieron para mapear el comportamiento estático de la CST bajo ciertas condiciones fijas. También fue posible modelar, a partir de estos datos, la dinámica ante variaciones en la carga. En este trabajo se propone un modelo dinámico de la CST obtenido por identificación del sistema. Se encontró que el sistema es no lineal, por lo tanto, se usó una estructura matemática compuesta por 2 bloques no lineales en la entrada (cada uno alimentado por una de las entradas), ambos fueron conectados a dos bloques lineales, y la suma de sus salidas alimenta a un tercer bloque no lineal dispuesto en la salida. Todos los bloques fueron resueltos simultáneamente y se implementan en conjunto para formar un modelo

Hammerstein-Wiener. En muchos análisis se supone que las no linealidades de entrada y de salida son funciones polinómicas o funciones formadas con  $n$  trozos definidos por líneas. Esto permite representar la dinámica mediante una función de transferencia lineal y capturar las no linealidades acoplando las funciones no lineales en la entrada y en la salida.

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.

## 3. PRUEBAS EXPERIMENTALES

### 3.1 Caracterización de una Celda Solar Transparente

Se caracterizó la CST fabricada por la empresa SolarFirst. En la Figura 1 se muestra el sistema con el que se experimentó:



Figura 1. Celda Solar Transparente de la empresa SolarFirst

Los parámetros del fabricante se muestran a continuación:

Tabla 1. Parámetros en condiciones de prueba estándar  $1000 W \cdot m^{-2}$ ,  $25^{\circ}C$ , AM 1.5

Potencia máxima ( $P_{max}$ )	5.90 W
Voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ )	27.9 V
Corriente en corto circuito ( $I_{sc}$ )	0.32 A
Voltaje en máxima potencia ( $V_{mp}$ )	20.9 V
Corriente en máxima potencia ( $I_{mp}$ )	0.28 A
Eficiencia ( $\eta$ )	6.55%

Con estos parámetros se configuró un bloque de Simulink<sup>®</sup> PV array, con el cual se generaron las curvas de desem-

peño  $V - I$  y  $P - V$  en condiciones estándar ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e irradiancia de  $1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . En la Figura 2 se grafican las curvas de desempeño del fabricante para las condiciones descritas.

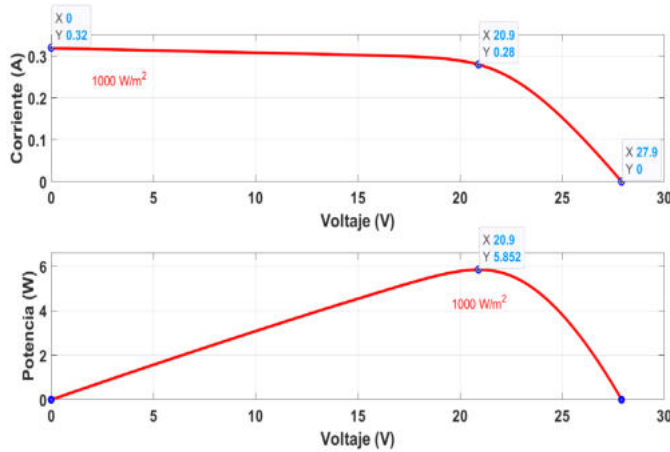


Figura 2. Curva característica V-I y P-V, generado a partir de los parámetros del fabricante.

### 3.2 Pruebas eléctricas

Para realizar las pruebas eléctricas fue necesario exponer el panel a radiación solar. Se consideró que la irradiancia solar fuera la misma que se alcanzaría en condiciones controladas con luz artificial, por lo tanto la radiación en las pruebas experimentales, tanto en condiciones controladas como en las pruebas bajo la luz solar, se limitó a  $89\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , y a temperaturas de aproximadamente  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La coordenadas de la ubicación donde se realizaron las pruebas corresponden a la localidad de Jiutepec, Morelos, y estas son  $18.8819\text{ N}$ ,  $-99.1908\text{ E}$ .

Para medir la irradiancia se utilizó un sensor de radiación solar PYR20, el cual opera en un rango de  $300\text{-}1100\text{ nm}$ . También se usaron un sensor de voltaje, así como un sensor de temperatura para monitorear las variables que afectan al sistema. Todos los sensores fueron conectados a una tarjeta genérica de prototipado rápido Arduino. Los datos obtenidos por la tarjeta Arduino fueron almacenados en una tarjeta Raspberry Pi 3. En este pequeño computador fue almacenada toda la información de las simulaciones realizadas, para posteriormente generar las curvas de desempeño.

### 3.3 Pruebas de transparencia.

Después de abordar la caracterización eléctrica de la CST se determinaron los parámetros que miden la transparencia, que es una propiedad fundamental de este tipo de celdas fotovoltaicas. Para llevar a cabo la experimentación se armó un banco de pruebas, el cual consistió de una caja oscura con iluminación UV-VIS-IR y ventiladores que permitieron el flujo de aire para mantener una temperatura más estable.

La evaluación del desempeño de la CST se hizo en diferentes rangos de iluminación. Las mediciones de luz incidente y luz difusa (la luz que pasa por el panel) se realizaron con dos sensores de intensidad luminosa BH1750; un sensor fue colocado en la parte superior de la CST para monitorear la cantidad de luz incidente, el otro sensor fue colocado en la parte posterior de la CST para medir la cantidad de luz que pasa por la celda fotovoltaica. Del mismo modo que en las pruebas eléctricas, los sensores fueron conectados a una tarjeta Arduino y los datos fueron almacenados en la tarjeta Raspberry Pi 3. Finalmente se aplicaron las ecuaciones de la sección anterior para calcular los parámetros característicos.

Existe un índice que permite caracterizar el rendimiento de la CST según sus propiedades ópticas. Este parámetro es  $T_{eff}$ , el cual es adimensional y mientras mayor es su valor, el aprovechamiento de la luz incidente en la CST también es mayor. Zhang et al. [2014] estudiaron una CST que alcanzó valores de  $T_{eff}$  de hasta 220. En este trabajo,  $T_{eff}$  se evaluó para diferentes longitudes de onda.

La neblina de transmisión es una medida del porcentaje de luz que pasa a través de la CST y que se dispersa o se refleja. Se estima que en los próximos años este valor de neblina de transmisión en las nuevas generaciones de CST se reduzca hasta ser igual al de una ventana convencional, el cual tiene un valor de  $\leq 1\%$  (según Lee et al. [2020]). Para las pruebas realizadas en este trabajo se calculó la neblina de transmisión de manera independiente para cada longitud de onda, en pruebas efectuadas en condiciones controladas.

### 3.4 Pruebas para registrar las curvas V-I y P-V

Para obtener las curvas  $V - I$  y  $P - V$ , la experimentación se hizo en las mismas condiciones de irradiancia y temperatura que para otras pruebas (irradiancia fija en  $89\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  y temperatura alrededor de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Para determinar la irradiancia fue necesario consultar el mapa de radiación solar de la ubicación donde se realizaron las pruebas. Específicamente se consultó la plataforma de [www.radiacionsolar.es/morelos](http://www.radiacionsolar.es/morelos). Una vez recuperada la información sobre la irradiancia, las curvas de desempeño fueron capturadas bajo las siguientes condiciones: Se conectó una carga resistiva a la celda solar comenzando con valores de resistencia de alrededor de  $10\Omega$ , hasta llegar a los  $1200\Omega$ . La resistencia fue aumentando de manera progresiva, mientras los datos se registraban en la Raspberry Pi 3. La resistencia variable 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 comparadas con las curvas que se simularon usando los datos del proveedor, con los cuales se configuró y simuló un generador fotovoltaico de una librería de energías renovables en 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.

### 3.5 Identificación del modelo dinámico

Se estimó un modelo de múltiples entradas y una salida (MISO en inglés) para el sistema. Las entradas del modelo son la irradiancia y la demanda de corriente, mientras que la salida es el voltaje de la CST. La influencia de la variación de corriente en la entrada produce una respuesta no lineal que también depende del valor de la irradiancia; por tal motivo un modelo lineal SISO no es suficiente para representar el comportamiento de la celda fotovoltaica.

Para aproximar la respuesta no lineal del sistema MISO se seleccionó la estructura de la Figura 3. El modelo tiene 2 entradas que se alimentan, cada una, a un bloque conteniendo una función no lineal estática. Las salidas de estos bloques entran a bloques lineales que cuantifican la dinámica de la planta. En la salida de los bloques lineales, las señales se suman y entran a otro bloque estático que proporciona un ajuste final a la respuesta del sistema mediante funciones no lineales.

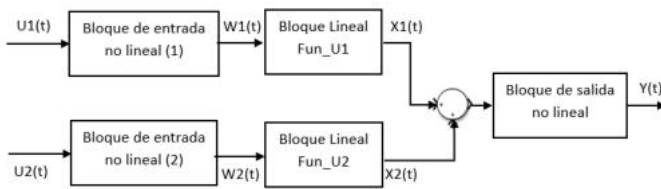


Figura 3. Estructura del modelo Hammerstein-Wiener para un sistema MISO.

Con base en la metodología descrita por Ljung [2016] se llevó a cabo la estimación del modelo no lineal, considerando específicamente la estructura Hammerstein-Wiener. Los parámetros del modelo se estimaron mediante el Toolbox de Matlab<sup>®</sup>, y con apoyo de Excel para completar algunos cálculos. Para obtener un mejor ajuste de los datos experimentales se fue variando el orden de las aproximaciones. Finalmente se obtuvo un modelo con una similitud de 95.63 %, cuyo desempeño se muestra en la Figura 8.

Las funciones de transferencia de los bloques lineales se presentan a continuación.

$$Fun\_U1 = \frac{1}{z - 0,9754} \quad (6)$$

$$Fun\_U2 = \frac{-0,3986z^3 + z^2 - 0,9562z + 0,3551}{z^3 - 2,481z^2 + 2,315z - 0,8339} \quad (7)$$

Las salidas de estas funciones de transferencia se suman y se conectan al bloque de salida no lineal. El bloque de salida, al igual que los bloques de entrada, contiene una función no lineal estática. En todos los casos se encontró que un estimador no lineal con 10 trozos logra una buena precisión. En la entrada y salida no lineales se genera un vector con los datos de las funciones no lineales.

Los datos que contiene los bloques de entrada y salida no lineal se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos de bloques de entrada y salida no lineal.

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

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la Tabla 3 se compilan los resultados de las pruebas experimentales para obtener las propiedades eléctricas y de transparencia.

Tabla 3. Compilado de los resultados experimentales

Parámetros	Datos del modelo del fabricante	Datos en radiación solar
Potencia máxima ( $P_{max}$ )	0.515 W	0.4344 W
Voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ )	25.15 V	24.04 V
Corriente en corto circuito ( $I_{sc}$ )	0.027 A	0.027 A
Voltaje en máxima potencia ( $V_{mp}$ )	21.48 V	18.89 V
Corriente en máxima potencia ( $I_{mp}$ )	0.024 A	0.023 A
Fill Factor (FF)	0.78	0.67
Eficiencia ( $\eta$ )	6.43%	5.42%

Como se observa, la eficiencia de la CST es menor a lo reportado por el fabricante, esto es normal debido a que intervienen factores como la nubosidad o en los mismos equipos de medición se pueden generar pequeños errores. En congruencia con las curvas V-I, características de la CST, el desempeño es menos efectivo para demandas altas de corriente. El comportamiento eléctrico de la CST debe tomarse en cuenta a la hora de evaluar la aplicación en la que se utilizará.

Con relación a las características de transparencia, es importante destacar que para la irradiancia UV, la  $T_{eff}$  alcanzó un valor máximo de 222.2, mientras que para la irradiancia IR llego a un valor de 85.6. Como esperado, el espectro visible presentó el valor más bajo. La Figura 4 presenta los resultados de las pruebas de transmitancia para la CST.

Como resultado de la evaluación de la neblina de transmisión se encontró que la radiación UV tiene un valor muy cercano a 1 %, demostrando así que tiene un aprovechamiento cercano al de una ventana tradicional. La luz que más se dispersa es la radiación visible, para la que se determinó un valor de 12.01 %

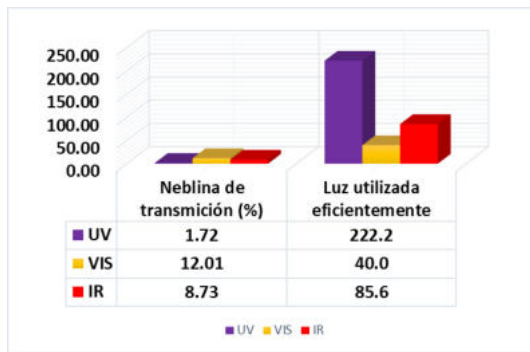


Figura 4. Gráficas de las pruebas de transmitancia en la CST.

En lo referente al desempeño de la CST, se comparan las curvas características medidas a un valor fijo de irradiancia solar y las curvas obtenidas con los datos del fabricante. Las gráficas comparativas se muestran en la Figura 5

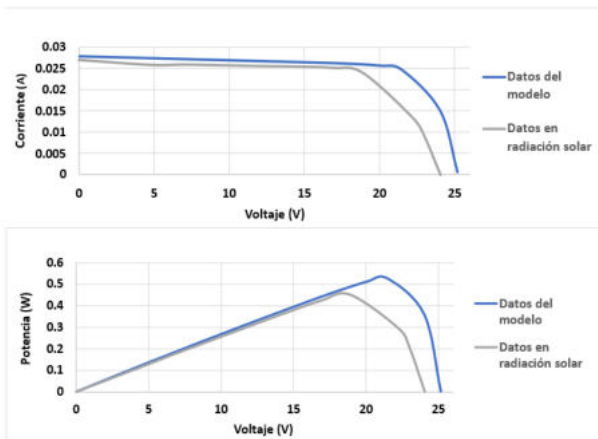


Figura 5. CST en irradiancia solar y datos del modelo del fabricante.

Con relación al mapeo del desempeño eléctrico, las curvas  $V - I$  y  $P - V$  para una irradiancia fija se aproximan a las obtenidas a partir de los parámetros del fabricante. Sin embargo existe una diferencia importante entre el voltaje medido en la CST y el voltaje de las curvas del fabricante en la zona de voltajes elevados. 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.

También se comparó el desempeño de la CST con el desempeño de un panel opaco con medidas similares a la CST estudiada. Se consideraron pruebas bajo las mismas condiciones de irradiancia solar y temperatura, i.e.,  $89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  a  $25^\circ\text{C}$ . La gráfica comparativa para este caso aparece en la Figura 6

El desempeño en irradiancia solar muestra que el espectro visible pasa por la CST, por ese motivo los valores de voltaje con respecto al panel opaco tienen una reducción del 48%. En el caso del de la celda solar transparente alcanza un mayor nivel de voltaje que el panel opaco, pero

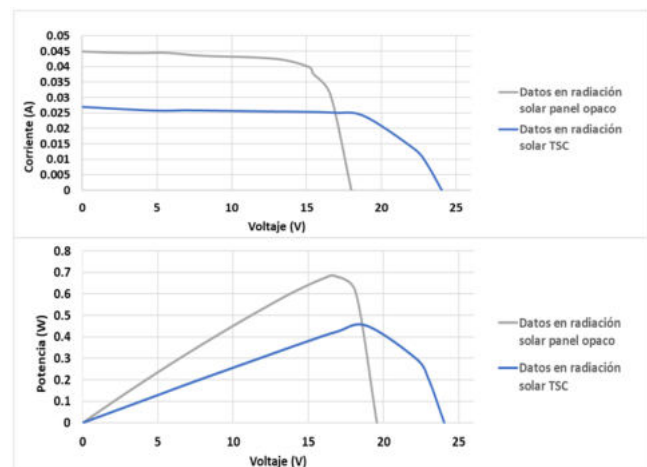


Figura 6. Comparativa de una CST y un panel opaco en condiciones de irradiancia solar.

en su contra parte el panel opaco prácticamente duplica el nivel de corriente de la TSC, mientras que en términos de la potencia la ventaja es para el panel opaco.

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.

La prueba para verificar el desempeño del modelo permite concluir que la respuesta de la CST medida y la salida modelada se aproximan bien en un amplio rango de voltaje. El ajuste que se obtuvo fue de 95.63%. La entrada considerada se muestra en la Figura 7.

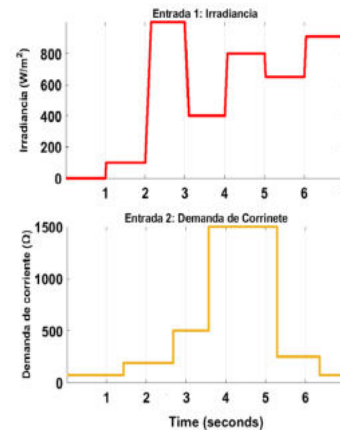


Figura 7. Datos de entrada del modelo MISO.

El desempeño del modelo se presenta en la Figura 8, en la gráfica se puede observar la similitud que existe entre los datos experimentales y el modelo estimado.

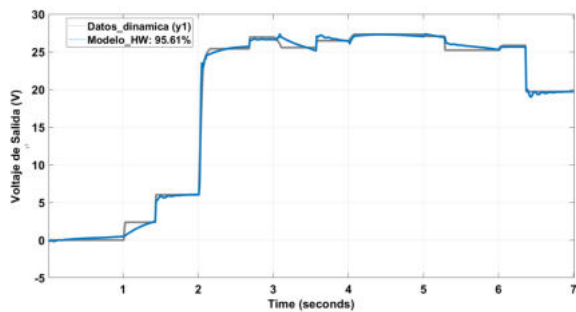


Figura 8. Comparación de la respuesta del sistema con el modelo Hammerstein-Wiener obtenido.

Como se observa en la Figura anterior el modelo de Hammerstein-Wiener se ajusta de buena manera al sistema, aunque este método provee una solución válida, sería interesante buscar un modelo alternativo a partir de métodos de identificación como el aprendizaje de redes neuronales o los modelos de Volterra y ver como es su ajuste y comportamiento. El modelo 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.

## 5. CONCLUSIONES

El conocimiento de las propiedades y comportamiento de una CST, adquirido por las pruebas realizadas, ha permitido demostrar que los sistemas fotovoltaicos transparentes forman parte de una tecnología que puede tener un impacto positivo para el crecimiento de las energías renovables en áreas poco explotadas. Es evidente su efectividad en edificios, vehículos de transporte, invernaderos y en otros tipos de prestaciones en donde resulta útil la transparencia de este tipo de celdas, al mismo tiempo que se obtiene un beneficio de la energía eléctrica que generan. Como está descrito en la literatura, un panel transparente aprovecha la radiación UV-IR para la generación de electricidad, mientras que la luz visible proporciona la transparencia requerida para los usos antes mencionados, y por lo visto en las pruebas de transmitancia y desempeño eléctrico esto se comprueba.

Las pruebas eléctricas y de transparencia puede ser una referencia y servir para futuras investigaciones con CSTs. Además, con el modelo propuesto se estimó la respuesta de un sistema MISO (Irradiancia/Demanda de corriente - Voltaje) de comportamiento no lineal, con una similitud del 95.63 %.

Este trabajo describe las pruebas realizadas para caracterizar las propiedades eléctricas y ópticas de una CST, reconociendo en el proceso efectivamente los parámetros

que miden el desempeño y eficiencia de las celdas fotovoltaicas transparentes. En las pruebas experimentales consideramos en todo momento una irradiancia de  $89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  a  $25^\circ\text{C}$ , todos los resultados experimentales son a partir de estos parámetros. La única parte donde se consideraron  $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  a  $25^\circ\text{C}$ , fue para obtener las curvas de la Figura 2.

Así mismo, se obtuvo el mapa estático del sistema en diferentes condiciones de operación, el cual resulta útil en tareas de diseño para una aplicación de CSTs, mientras que el modelo dinámico propuesto en esta investigación resulta suficiente para su aplicación en el área de control.

## REFERENCIAS

- Husain, A.A., Hasan, W.Z.W., Shafie, S., Hamidon, M.N., and Pandey, S.S. (2018). A review of transparent solar photovoltaic technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 94, 779–791.
- Khatib, T. and Elmenreich, W. (2016). *Modeling of photovoltaic systems using Matlab: Simplified green codes*. John Wiley and Sons.
- Lee, K., Um, H.D., Choi, D., Park, J., Kim, N., Kim, H., and Seo, K. (2020). The development of transparent photovoltaics. *Cell Reports Physical Science*, (100143), 1–24.
- Ljung, L. (2016). *System Identification Toolbox™ Getting Started Guide*. The MathWorks, Inc.
- Saifullah, M., Gwak, J., and o. M. C. A. Yun, J.H.J.J. (2016). Comprehensive review on material requirements, present status, and future prospects for building-integrated semitransparent photovoltaics (bistpv). *Journal of Materials Chemistry A*, 4, 8512–8540.
- Zhang, K., Qin, C., Yang, X., Islam, A., Zhang, S., Chen, H., and Han, L. (2014). High-performance, transparent, dye-sensitized solar cells for see-through photovoltaic windows. *Advanced Energy Materials*, (4). doi:10.1002/aenm.201301966.