

PRUEBA DE CAMPO EN EL ESTADO DE MORELOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE CdTe

Robert Foster¹, Martín Gómez¹
A. Sánchez-Juárez², J. Ortega Cruz², J.C. Rosas²
Vipin Gupta³

¹Southwest Technology Development Institute, New Mexico State University
Las Cruces, New Mexico, U.S.A.

²Depto. de Materiales Solares, Centro de Investigación en Energía, UNAM
Apto. Postal 34, Temixco, Morelos 62580 México.

³Sandia National Laboratories, Albuquerque, New, Mexico, U.S.A.

RESUMEN

Se realizó una evaluación y valoración energética en campo de módulos fotovoltaicos de CdTe de la marca First Solar aplicados al bombeo de agua en cuatro proyectos productivos agropecuarios en el Estado de Morelos, México. Debido a que dicho Estado cuenta con un clima tropical, el cual es caliente en la mayor parte del año, sobre todo en las zonas bajas, donde se encuentra localizados dichos proyectos, se ha considerado que las altas temperaturas pudieran ocasionar la degradación y falla de los mismos. Por esta razón, se realizaron medidas eléctricas del comportamiento I-V de los módulos instalados en cada proyecto para analizar su desempeño energético bajo condiciones de clima tropical, y además, su operación como sistema de bombeo fotovoltaico y apego al código eléctrico mexicano (Norma Oficial Mexicana-NOM). De los cuatro proyectos analizados, *El laurel*, fue instalado en Marzo del 2003, mientras que los otros tres fueron instalados en Enero del 2005. A partir de las medidas realizadas se determinó que los módulos evaluados no presentaron problemas significativos de degradación. Debido a que la mayoría de los sistemas son nuevos, la potencia máxima medida en los módulos fue esencialmente la misma que la reportada en los datos de placa incluyendo al sistema con una antigüedad de dos años. Además, se observó violaciones al código eléctrico mexicano en el sistema más antiguo, que en su mayoría consistieron en métodos inapropiados en el cableado.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la tecnología fotovoltaica (FV) para aplicaciones terrestres está dominada por el silicio cristalino, ya que es una tecnología madura disponible comercialmente aunque el producto es relativamente caro. Sin embargo, eso no ha evitado la labor de investigación y desarrollo en otros materiales semiconductores para su aplicación en la conversión fotovoltaica en donde se pretende encontrar la combinación óptima de eficiencia y costo. Es así como se han encontrado materiales semiconductores alternativos al silicio que son prometedores como una tecnología FV confiable y duradera. Uno de ellos es el telurio de cadmio (CdTe) que al formar una unión íntima con el sulfuro de

cadmio (CdS), forman una celda solar [1]. Actualmente, hay varias compañías que elaboran módulos FV's de CdTe y que se han comercializado como un producto alternativo a los módulos de silicio cristalino; sin embargo, no se han realizado estudios de estabilidad del producto a largo plazo bajo condiciones reales de operación, lo que trae cierta desconfianza para su aplicación tanto por usuarios como por personas tomadoras de decisión en proyectos gubernamentales y no gubernamentales. Sin embargo, el bajo coeficiente de temperatura en la potencia que tiene estos módulos, que disminuye la pérdida de potencia generada por el calor, hace de esta tecnología un buen candidato a ser usada en climas calientes.

Una de las compañías que fabrican módulos de CdTe es First Solar que ha desarrollado un módulo FV que es considerado mundialmente como el de mayor potencia en su categoría, es decir, del tipo policristalino en película delgada [2]. Con un voltaje óptimo de 61 V CD [3], este módulo es ideal para sistemas interactuando con la red, o bien para cargas eléctricas con voltajes de operación alrededor de 120 V CD. Por esto, la mayor parte de la producción de esta compañía es para proyectos acoplados a la red que se están desarrollando en Alemania. Sin embargo, también se están usando para bombeo FV en bombas con voltajes de operación óptimos alrededor de 120 V CD, como es el caso de las bombas SQFlex de Grundfos [4].

Gracias al programa de Energías Renovables para la Agricultura, impulsado por el FIRCO-SAGARPA, en el Estado de Morelos se han implementado 33 proyectos productivos agropecuarios con sistemas de bombeo FV, de los cuales, 4 están energizados con módulos de CdTe, siendo estos, de los pocos sistemas instalados en el mundo en un clima tropical. Dado el clima de Morelos, estos proyectos brindan una oportunidad para realizar estudios de estabilidad de dicha tecnología bajo condiciones reales de operación. Este trabajo presenta los resultados de una evaluación de campo de módulos fotovoltaicos de CdTe. El estudio experimental fue realizado por el Southwest Technology Development Institute de New Mexico State University (SWTDI-NMSU) y el Centro de Investigación en Energía de la UNAM en Marzo del 2005.

distribución de la temperatura de los módulos durante su operación.

Equipo de prueba:

1.- Trazador de curvas I-V DAYSTAR modelo DS100

Especificaciones:

Voltaje: Rango 0-600 V dc. Con una precisión $\pm 0.5\%$ de la lectura y una resolución de 146 mV.

Corriente: Rango 0-100 A dc. Con una precisión $\pm 0.5\%$ de la lectura y una resolución de 24.4 mA.

Temperatura: Rango de -30°C - 120°C . Con una precisión $\pm 1^{\circ}\text{C}$ y una resolución de 0.1 $^{\circ}\text{C}$.

Irradiancia: Rango $\pm 10\text{V}$, $\pm 100\text{ mV}$, $\pm 10\text{ mV}$. Con una precisión $\pm 0.1\%$ del rango y una resolución de 1/66536 del rango.

2.- Piranómetro espectral de precisión Eppley

Especificaciones:

Sensibilidad: Aproximadamente $9\ \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$.

Linealidad: $\pm 0.5\%$ de 0 a $2800\ \text{W}/\text{m}^2$.

Respuesta: 1 segundo.

Dependencia de Temperatura: $\pm 1\%$ sobre la temperatura ambiente en el rango de -20 a 40°C .

Corrección del Coseno: $\pm 1\%$ de $0-70^{\circ}$ del ángulo Zenital.

Inclinación: Error no inducido por orientación.

3.- Sensor Fotométrico LI-COR LI-200SA

Especificaciones:

Sensibilidad: Aproximadamente $80\ \mu\text{A}$ a $1000\ \text{W}/\text{m}^2$.

Linealidad: Máxima desviación de 1% arriba de $3000\ \text{W}/\text{m}^2$.

Respuesta: $10\ \mu\text{s}$.

Dependencia de Temperatura: $\pm 0.15\%$ por $^{\circ}\text{C}$.

Corrección del Coseno: Arriba de los 80° del ángulo de Incidencia.

Inclinación: Error no inducido por orientación.

4.- Equipo de prueba Adicional

El equipo adicional incluye dos multímetros de gancho para medir el voltaje y la corriente, estos equipos con una precisión de 0.1 V y 0.1 A respectivamente. Los multímetros fueron un Fluke 36 y un Craftsman AC TRUE RMS. Un Megger, con un rango de operación de 10 k Ω hasta 2000 M Ω , el cual fue diseñado para medir fugas de corriente a través y/o sobre la estructura de módulos, cables y aislamiento del sistema FV.

La curva obtenida por el trazador I-V involucra los errores de todos los sensores utilizados, que pueden ser calculados multiplicando la precisión de cada uno de ellos. Cuando normalizamos las curvas I-V a condiciones estándar de prueba (STC), estos errores son amplificadas proporcionalmente. En otras palabras si un módulo FV es probado a $500\ \text{W}/\text{m}^2$ y es normalizado a $1000\ \text{W}/\text{m}^2$ y 25°C , el error propagado es efectivamente el doble del valor del error medido.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Los módulos FV instalados en los proyectos y sujetos al estudio fueron fabricados por la compañía FIRST SOLAR bajo el modelo FS55. Su potencia pico es de de 55 watts y están integrados por 116 celdas de películas delgadas de CdTe/CdS conectadas en serie para proporcionar, bajo condiciones estándares de prueba (STC: AM1.5&1,000 W/m², T_c=25°C), las características eléctricas que se muestran en la Tabla No. 1.

Tabla No. 1: Parámetros eléctricos del módulo GTF 55

Parámetro	Símb.	Valor
Potencia máxima	P _M	55 W
Voltaje circuito abierto	V _{OC}	88 V
Voltaje para máxima. potencia	V _M	61 V
Corriente de corto circuito	I _{CC}	1.13 A
Corriente para máxima potencia	I _M	0.90 A
Coefficiente de Temperatura en la Potencia	T _k (P _M)	-0.25%/°C

Estos módulos cumplen con la certificación UL 1703 y IEC 61646 [3] y se comercializan con una garantía de 20 años.

El Estado de Morelos cuenta con temperaturas ambiente promedio en las épocas de calor (Marzo-Septiembre) de $30-37^{\circ}\text{C}$ y precipitaciones en verano de 780-976 mm/año [5], brindando así un laboratorio natural para el estudio de estabilidad a largo plazo de dicha tecnología. Por esa razón, las pruebas fueron realizadas en el mes de marzo del 2005 en los sistemas de bombeo FV instalados en las siguientes localidades: *Las margaritas* y *el Amate* en la región de *Huichila*, municipio de *Tepalcingo*; y *El Laurel* y *el Corralito* en el municipio de *Temoac*.

Empleando procedimientos de prueba de campo estandarizados [6] y el equipo que se describe a continuación, los parámetros medidos, cerca del medio día solar, fueron los siguientes:

T_m = Temperatura en la parte posterior del módulo [$^{\circ}\text{C}$].

POA = Irradiancia solar en el plano del arreglo FV [W/m^2].

V_{oc} = Voltaje a circuito abierto del arreglo y módulo FV [V].

V_m = Voltaje máximo en el punto de máxima potencia del arreglo y módulo FV [V].

I_{sc} = Corriente de corto circuito en el arreglo y módulo FV [A].

I_m = Corriente máxima en el punto de máxima potencia del arreglo y módulo FV [A].

Q = Flujo bombeado [lpm].

Se tomaron curvas instantáneas de corriente-voltaje (I-V) de módulos y arreglos FV, tanto sucios como recién limpiados, y con los datos medidos, se normalizaron a condiciones estándar de prueba (STC) [7]. También se realizaron pruebas de fugas de corriente en los módulos con un Megger. Se tomaron imágenes térmicas de infrarrojo (IR) en el arreglo FV para ilustrar la

Para la normalización del Módulo FS-55 fue necesario conocer los coeficientes de temperatura tanto en el voltaje como de corriente. Se hizo una comparación con datos obtenidos de la ficha técnica del fabricante como de mediciones realizadas por Sandia National Laboratories [8], la diferencia observada entre las dos fuentes fue de 0.12 % y cuyos valores se presentan a continuación:

α_{Isc} : 0.65 mA/°C.
 α_{Im} : 2.2 mA/°C.
 β_{Voc} : 1.89 mV/°C. Por Celda.
 β_{Vm} : 0.84 mV/°C. Por Celda.

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

Sistemas de Bombeo de Agua FV en Tepalcingo

Los Sistemas de bombeo de agua FV *Las margaritas* y *el Ámate* se encuentran ubicados en *Huichila*, municipio de *Tepalcingo*, cuya ubicación geográfica es de 18° 38' Latitud Norte, 98° 54' Longitud Oeste y 1150 m de altitud sobre el nivel del mar. La carga dinámica del primer sistema fue de 13.76 m y 12.2 m respectivamente. Los sistemas FV's se encuentran separados 1 km uno del otro. Ambos sistemas son similares en cuanto al diseño, funcionamiento teniendo aceptable calidad en su instalación eléctrica. Las partes que integran a los sistemas son:

- 6 Módulos First Solar de 55 W_p cada uno.
- Controlador de Bomba Grundfos CU200 SQ FLEX.
- Bomba Grundfos 11SQF-2.
- Interruptor Moeller FAZ C6 DC 220/250 V.
- Supresor de Voltaje Delta Lighthing LA302 DC.

Inspección del Sistema FV

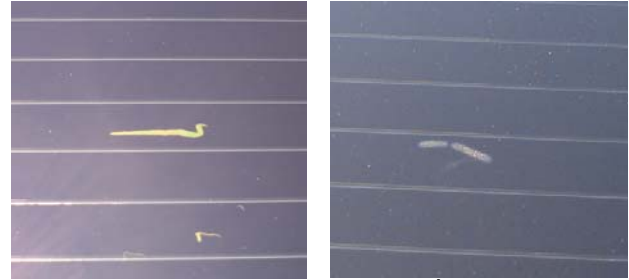
Los dos sistemas bajo inspección fueron montados en estructuras metálicas fijas, con una inclinación de 20° para *Las Margaritas* y 22° para *El Ámate*. Estas inclinaciones son aceptables ya que Morelos se encuentra a una latitud ≈ 18°. En *Las Margaritas* el arreglo fue instalado con una orientación de 178° del Sur magnético mientras que *El Ámate* a 180° del sur magnético (la declinación magnética local es de alrededor de 6° Este). En ambos sistemas, la configuración fue de 2S x 3P, a un voltaje nominal de operación de 120 V CD. Una fotografía del sistema se muestra en la Fig. 1.



Las Margaritas El Ámate

Fig. 1 Arreglos FV en Huichila, Tepalcingo, Morelos.

La inspección visual realizada no detectó delaminación en los módulos u otro problema evidente. Solamente se detectaron pequeñas rasgaduras en la película de los módulos ocasionadas por el manejo o transporte de ellos en el proceso de manufactura (ver Fig. 2). Las curvas I-V medidas indicaron que estas rasgaduras no ocasionan disminución en la potencia generada por los módulos.



Las Margaritas El Ámate

Fig. 2 En la inspección realizada a los módulos FV se observaron rasgaduras en la película en ambos sistemas de Tepalcingo.

Curvas típicas de los módulos “rayados” se presentan en las Figs. 3 y 4.

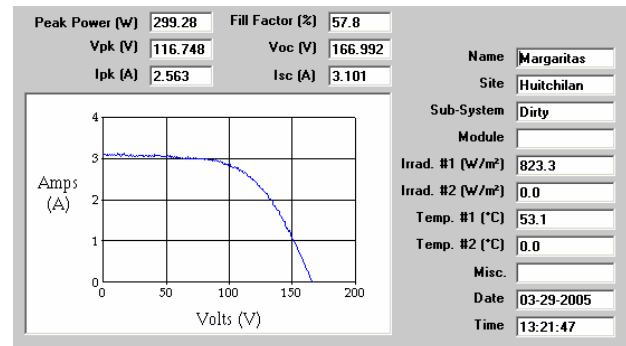


Fig. 3 Curva I-V del arreglo FV de Las Margaritas.

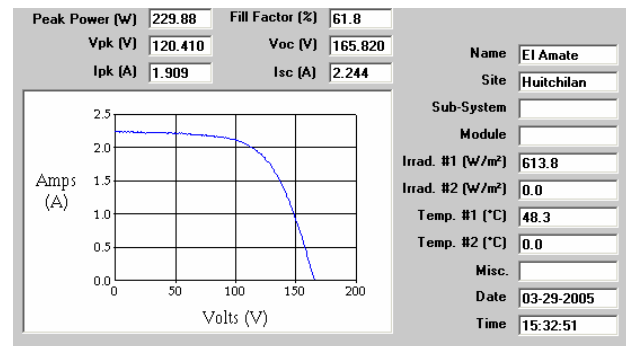


Fig. 4 Curva I-V del arreglo FV de Los Ámates.

Adicionalmente a la medición de la curva I-V, se midió con el Megger la posible fuga de corriente en los arreglos FV, resultando negativa la prueba en ambos arreglos.

Se tomaron imágenes termográficas de infrarrojo con una cámara ThermaCAM E65, la cual es capaz de ver el calor a través el vidrio del módulo FV, y poder visualizar

puntos calientes en las celdas. Las fotos revelan la ausencia de éste fenómeno en los módulos analizados. La Fig. 5 muestra las imágenes térmicas de infrarrojo de los arreglos FV's de Tepalcingo.

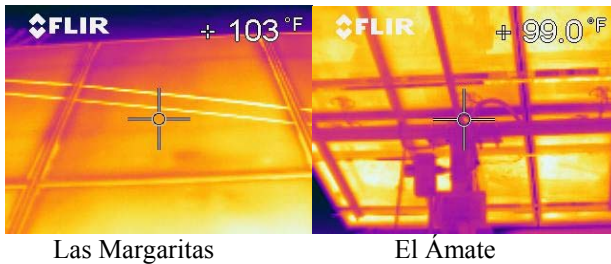


Fig. 5 Imágenes térmicas de los módulos FV First Solar, en Las Margaritas y El Ámate, no observándose punto calientes

Como prueba final del sistema de bombeo de agua FV se corroboro su desempeño con las especificaciones técnicas de diseño. Las mediciones realizadas fueron irradiancia y flujo instantáneo. En el caso de *Las Margaritas*, la carga dinámica de diseño fue de 15.49 m³, obteniéndose un flujo instantáneo de 40 lpm a 840 W/m², que al compararse con los de diseño, que fueron 43.3 lpm a 1000 W/m². Para el caso del *El Ámate*, su flujo acumulado fue de 211.92 m³, con un flujo instantáneo de 41.5 lpm a 660 W/m² mientras que sus requerimiento de diseño fueron de 48.2 lpm a 1000 W/m². Ambos sistemas proporcionan la cantidad de agua que cae dentro de la exigida en el diseño, y por lo tanto se concluye que ambos están correctamente dimensionados

Sistemas FV de Bombeo de Agua en Temoac

El Laurel localizado en el municipio de Temoac, a 18° 46' de latitud norte, 98° 47' longitud Oeste y a una altitud sobre el nivel del mar de 1545 m, es uno de los sistemas FV's con módulos de CdTe de más edad en México (fue instalado en Marzo 2003). Debido a su antigüedad fue el que presento mayor interés para identificar posibles fallas en dicha tecnología. El sistema FV tiene las mismas características que los anteriores. El arreglo FV fue montado en un poste metálico como lo muestra la Fig. 6, a una inclinación de 21°, la cual es una inclinación aceptable para Morelos (≈18°). Su orientación magnética es 179° y los 6 módulos están configurados 2S x 3P, a un voltaje nominal de 120 V CD. Ninguno de los 6 módulos presentaron delaminación o puntos calientes en las celdas, observándose únicamente rasgaduras no mayores 1 cm en la película del módulo (ver Fig. 6). En general la instalación eléctrica fue de buena calidad, el interruptor dentro de una caja para intemperie, buen sistema de tierra y sin fugas de corriente.



Fig. 6 Arreglo FV en El Laurel y rasgaduras en la película de la celda del módulo FV.

El ingeniero responsable por parte de FIRCO mencionó que el único problema que se presentó fue la falta de continuidad en una de las cajas de conexión en un módulo, el cual fue reemplazado por el vendedor. La Fig. 7 muestra fotos del módulo original que presento la falla.



Fig.7 Fotografía original del módulo FV que presento falla en el sistema FV de *El Laurel*, durante la prueba de aceptación y el cual fue reemplazo haciendo válida la garantía.

La Fig. 8 muestra las curvas I-V de dicho módulo. Los parámetros eléctricos obtenidos después de la normalización no son semejantes a los de placa, en consecuencia el producto presenta anomalías.

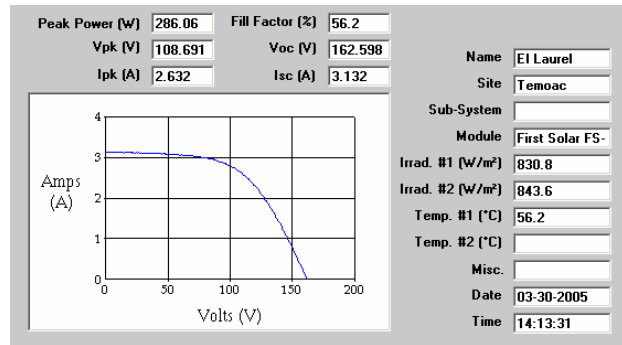


Fig. 8. Curva I-V del arreglo FV de El Laurel.

CONCLUSIONES

Módulos FV First Solar fueron instalados para sistemas de bombeo de agua en el estado de Morelos. Siendo Morelos un Estado con clima tropical, las condiciones de operación son ideales para investigar problemas de degradación en nuevas tecnologías FV's. Los resultados del estudio indican que la tecnología evaluada no presenta problemas significativos de degradación, aun el sistema más antiguo que fue instalado en *El Laurel* en el año 2003. Tres de los arreglos FV's recientemente instalados, presentaron pequeños rasguños en la película de sus celdas, los que se supone que fueron ocasionados por el manejo en la línea de producción; sin embargo, esto no modificó la potencia generada la cual fue equivalente de la marcada en la placa del módulo. Estos módulos FV fueron etiquetados para dar seguimiento a su desempeño en el futuro.

Imágenes de termográficas de infrarrojo del arreglo FV en operación (ver Fig. 9) fueron tomadas para corroborar que no presentaran puntos calientes.

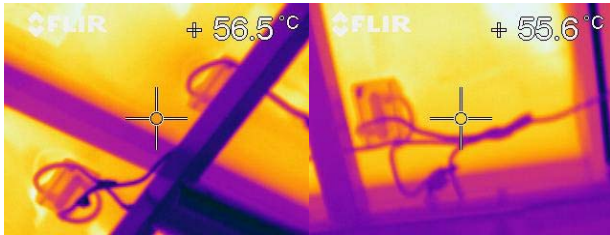


Fig. 9. Imágenes infrarrojas del sistema FV El Laurel, el cual no presento puntos calientes.

El sistema de bombeo de agua FV del *el Laurel* fue diseñado para operar con una carga dinámica de 15.49m³, el cual fue capaz de bombear 41 lpm a 800 W/m², siendo 40 lpm, el bombeo de diseño. A la fecha de la evaluación el sistema tenía un flujo acumulado, en dos años, de 334.35 m³.

El sistema FV *El Corralito*, también en el municipio de Temoac, tiene una ubicación geográfica de 18° 46' de latitud norte, 98° 47' de longitud oeste, y una altitud de 1530 m sobre nivel del mar. Con las mismas características de los otros, tiene una potencia instalada de 440 W_p (8 módulos FV), con una configuración 2S x 4P. La instalación del sistema es de buena calidad, cumpliendo los requerimientos de diseño y no presentando falla alguno o puntos calientes (ver Fig. 10 y 11).

REFERENCIAS

- [1] A. D. Cusano; "CdTe solar cells and photovoltaic heterojunctions in II-VI compounds"; *Solid State Electron* **6**, (1963) 217-232.
- [2] D. W. Sandwisch, "Progress in high throughput manufacturing of thin-film CdTe modules", NREL/SNL Program review; API Conf. Proc. 394, (1996) 171-188.
- [3] www.firstsolar.com/de/pdf/ER-5-307E.pdf
- [4] <http://www.grundfos.com/web/homemx.nsf>
- [5] <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/mor/clim.cfm>.
- [6] Test method for photovoltaic module ratings. Florida Solar Energy Center. May 21, 2001.
- [7] Measurement and characterization of solar cells and modules. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA.
- [8] <http://www.sandia.gov/pv/docs/Database.htm>.

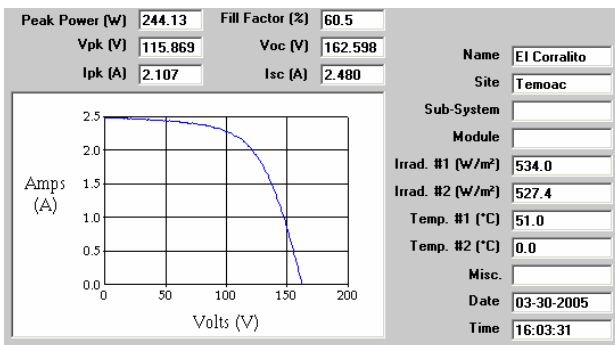


Fig. 10. Curva I-V del arreglo FV del El Corralito.

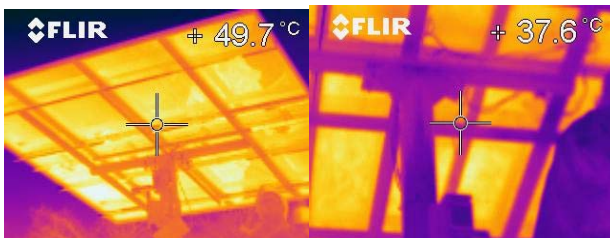


Fig. 11. Imágenes de infrarrojo de El corralito.