



## **Parámetros operacionales de mantas flexibles fotovoltaicas de silicio amorfo en condiciones de clima tropical\***

**Santiago Vidal Blázquez**

Carrera: Ingeniería mecánica

Universidad Carlos III de Madrid (España).

**Resumen:** Se realizaron pruebas experimentales a un módulo de mantas flexibles fotovoltaicas de la serie EPV144S para analizar sus parámetros operacionales. Se utilizaron equipos de altas prestaciones tales como: una estación meteorológica, un termómetro infrarrojo con óptica de precisión y corto tiempo de respuesta, una cámara termo-gráfica y un comprobador de la eficiencia para módulos fotovoltaicos. Se pudo comprobar el efecto de la variación de la temperatura ambiente en la superficie del módulo fotovoltaico, los niveles de producción de energía, en correspondencia con la radiación global medida y el comportamiento de la temperatura ambiente. Se evidenciaron los cambios bruscos de producción de energía ante las variaciones de nubosidad. Mediante una regresión lineal se obtuvo la expresión que relaciona los niveles de radiación global con la potencia que genera el módulo. Las mediciones que se recogen demuestran el comportamiento de las mantas flexibles ante las condiciones del clima tropical de Cuba.

**Palabras clave:** energía fotovoltaica; silicio amorfo; mantas flexibles.

---

\* Trabajo tutorado por Dr. C. Reineris Montero Laurencio.

Recibido: 1 agosto 2016 / Aceptado: 25 enero 2017.

## Operational parameters of amorphous silicon photovoltaic thin film in tropical climate conditions

**Abstract:** Experimental tests were performed on a module of flexible photovoltaic blankets of the series EPV144S to analyze its operational parameters. High performance equipment such as: a weather station, an infrared thermometer with precision optics and short response time, a thermo graphical camera and an efficiency tester for photovoltaic modules were used. It was possible to verify the effect of the variation of the ambient temperature on the surface of the photovoltaic module, the levels of energy production in correspondence with the measured global radiation and the behavior of the ambient temperature. The abrupt changes in energy production due to variations in cloud cover are evident. By linear regression we obtained the expression that relates the levels of global radiation with the power generated by the module. The measurements that are collected demonstrate the behavior of flexible blankets in response to the conditions of Cuba's tropical climate.

**Key words:** photovoltaic energy; amorphous silicon; flexible blankets.

## Introducción

Desde la revolución industrial, el consumo de energía mundial ha crecido de forma continuada. La principal fuente de energía ha sido la proveniente de los combustibles fósiles. En los últimos 20 años se ha comenzado a dar importancia a las energías renovables, al ser provechosas tanto para el consumo como para el medio ambiente.

Entre todas las energías renovables se destacan, en cuanto a niveles de producción: la energía hidráulica, la eólica, la fotovoltaica, la geotérmica y la biomasa. La tecnología fotovoltaica es la más reciente de las formas de producción de electricidad que se ha incorporado al mercado, ganando cuota al ritmo al que las tecnologías precedentes han ido manifestando limitaciones y dificultades. Aunque la tecnología fotovoltaica aún resulta cara, su costo va disminuyendo progresivamente y recibe subvenciones, ayudas o mejoras para hacer más accesible esta energía al ciudadano (Lorenzo, 2014).

En 2015 se dio un fuerte crecimiento en el mercado global de la fotovoltaica con un aumento de la capacidad instalada del 26,5 % con respecto al año anterior. Este crecimiento es liderado por China, Japón y EEUU, con una capacidad de 33 GW para estos tres estados, siguiéndoles ocho estados con más de 1 GW instalado (Nowak, 2016). Pero el crecimiento no es lineal en todos los países del mundo. Por un lado, el número de economías emergentes con políticas de apoyo a las renovables ha aumentado más de seis veces en solo ocho años. Por otro lado, las incertidumbres en las políticas públicas y el precio ha contribuido a disminuir su apoyo en algunos países (Fernández, 2014).

La tecnología solar fotovoltaica es una fuente de potencia eléctrica en la que las células solares transforman la energía solar en electricidad. Este movimiento es producido por la transmisión de energía que hacen los fotones de la luz a los electrones de valencia del material para romper sus enlaces. Por cada enlace roto queda un electrón libre para circular dentro del sólido y el hueco producido por la falta del electrón (Sarmiento, 2013). Los huecos se comportan como partículas con carga positiva igual a la del electrón y la corriente se crea por el movimiento en direcciones opuestas de los huecos y electrones.

Para separar los electrones y huecos e impedir que se restablezcan los enlaces se usa un campo eléctrico o diferencia de potencial, dando lugar a una corriente en el sentido del campo. Este campo se consigue con la unión de regiones del material

semiconductor con conductividades distintas. Una de ellas, de tipo N, en la que suele doparse al semiconductor base con un material con más electrones que este, creando una región con mayor concentración de cargas negativas. Mientras que para la otra capa, de tipo P, se dopa al material con un material con menos electrones de valencia, creando una región con una concentración mayor de huecos o cargas positivas. Estas dos grandes diferencias de carga crean el campo eléctrico dirigido de la región N a la región P (Sarmiento, 2013). En la Figura 1 se muestra la estructura de una celda fotovoltaica con sus diferentes capas.

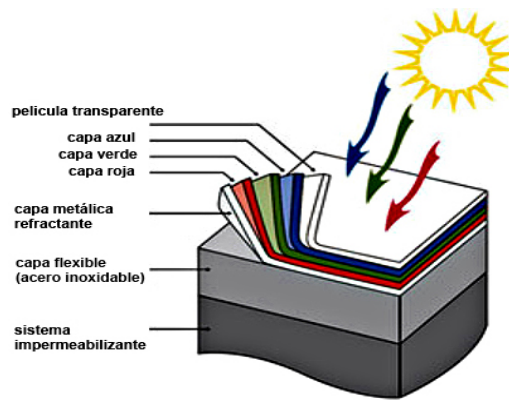


Figura 1. Visualización de la estructura de una celda fotovoltaica de silicio amorfo con sus diferentes capas.

En el mercado de la tecnología fotovoltaica, el principal material que se utiliza es el silicio, tanto por su forma amorfa como cristalina, aunque también se usan módulos de telururo de cadmio (CdTe) y seleniuro de cobre e indio (CIS o CIGS, si se le añade galio). Las mantas flexibles fotovoltaicas utilizadas en la presente investigación están fabricadas de silicio amorfo y pertenecen al grupo de módulos de lámina delgada.

Los módulos de láminas delgadas son muchos más ligeros, sustentables y resistentes que los de silicio cristalino, además de no necesitar estructura, ni agujeros para su fijación. Son también flexibles, de rápido montaje, fácil manipulación y son peatonales. (Blanco, 2016). Tienen una menor pérdida de potencial, al aumentar la temperatura, que otro tipo de panel fotovoltaico y, además, pueden absorber casi el 90 % de la energía aprovechable. El aprovechamiento del material que se hace del silicio, durante su fabricación, permite que el coste de fabricación sea más bajo. Se puede depositar a temperaturas más bajas sobre sustratos de muy diverso tipo, como plásticos y vidrios, adoptando formas muy variadas. Otra importante ventaja es que al potencial de la célula le afecta poco las sombras que se produzcan sobre el módulo (Wenhua, 2016).

Como desventajas de las mantas flexibles fotovoltaicas se encuentran: su baja eficiencia y una pronunciada degradación de la misma con el tiempo. La eficiencia puede llegar a ser la mitad, con respecto a los módulos de silicio cristalino. A causa de la degradación que induce la luz, según el efecto Staebler-Wronski, se produce una disminución importante de la eficiencia hasta que se logra un nivel estable (Sarmiento, 2013). En la Figura 2 se presenta la curva de dicha degradación de la eficiencia en el tiempo de los módulos de silicio amorfo.

Para aumentar el rendimiento y reducir el efecto de la variación inicial de la potencia se fabrican módulos de silicio amorfo de hasta tres capas o triple unión, en los que cada célula se compone de tres uniones semiconductoras montadas una sobre otra: la inferior sensible a la luz roja, la central a la verde y amarilla y la superior a la azul (Martín, 2011).

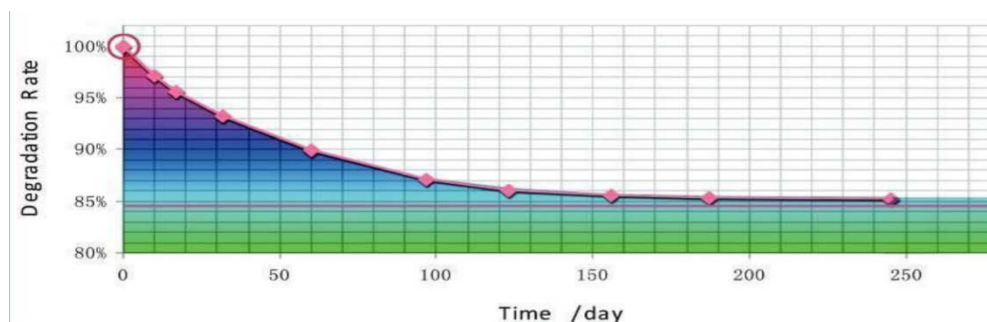


Figura 2. Curva de degradación del potencial de un módulo de silicio amorfo con respecto al tiempo (Wenhua, 2016).

La integración de la energía solar fotovoltaica en edificios o BIPV (*Building Integrated PhotoVoltaics*) presenta grandes ventajas frente a la instalación sobre el suelo, entendiéndose por ello la instalación de módulos en solares y no sobre edificios o cualquier lugar elevado.

Se ahorra terreno en la instalación, usándose el mismo tejado o fachada como soporte para los módulos, así como la posibilidad del uso de módulos especiales como materiales constructivos de tejados o fachadas. Por otra parte, se genera la electricidad en el mismo lugar que se consume, ahorrando en pérdidas adicionales de conducción y distribución de energía eléctrica. La experiencia muestra que este tipo de integración en edificios tiene muy buena aceptación social, ayudando a fomentar este tipo de energía, además de ayudar a preservar el paisaje natural, al no utilizar terrenos adicionales para su instalación, provocando un escaso impacto visual. Así, la

fotovoltaica dota al edificio de una forma limpia y elegante de producción de energía eficiente (Martín, 2011).

Pero también existen dificultades por resolver. Por un lado, la orientación e inclinación de los edificios provoca que la eficiencia de los módulos instalados no sea la idónea durante el tiempo solar al ser módulos fijos y no móviles para seguir una trayectoria. Por otro lado, hay una mayor probabilidad de sombras y la ventilación por la cara posterior no está bien resuelta, pudiendo incidir en su temperatura de trabajo, disminuyendo su rendimiento final. En lo económico, son sistemas de bajos costes de operación, reduciéndose al de mantenimiento y el seguro, pero necesitan elevadas inversiones. Otra dificultad del sector es la falta de confianza de los usuarios en esta energía por resultarles desconocida y los pasos burocráticos a seguir para conexiones a red o falta de facilidades para ser informado (Martín, 2011).

La mayoría de los módulos fabricados son de silicio cristalino, debido principalmente al buen conocimiento de la tecnología y los rendimientos alcanzados en los módulos comerciales. Con un porcentaje del 6,1 % los módulos de silicio amorfo ocupan el tercer lugar en cuanto a niveles de producción, después de los monocristalinos y policristalinos (Martín, 2011).

Los módulos cristalinos tienen una estructura bastante rígida, por lo que necesitan un lugar espacioso para su utilidad, mientras que las células de silicio amorfo dan la posibilidad de crear paneles de múltiples formas, como pueden ser curvos o con aplicaciones a rincones o lugares de difícil geometría, gracias a la versatilidad de este silicio que nos permite fabricar módulos flexibles y ligeros depositándose sobre multitud de sustratos.

Para las naves de tipo industrial resulta muy interesante el uso de módulos de silicio amorfo por su bajo peso y facilidad de montaje ya que pueden ir integrados sobre los materiales existentes sin necesidad de estructuras y, además, permiten el paso sobre ellos, al ser resistentes. Mientras que para edificios convencionales, la verdadera integración consiste en sustituir los elementos convencionales de los tejados por módulos fotovoltaicos, manteniendo su estética y su función constructiva, un ejemplo claro puede ser el de las tejas fotovoltaicas, cuyo aspecto y función es el mismo que la teja común, pero añadiendo la capacidad de producción de energía eléctrica.

Este tipo de tecnología puede instalarse de varias maneras entre las que destacan el sistema conectado a la red y el sistema aislado. Cualquiera de estas formas contribuye

a reducir la demanda de electricidad de ciertos equipos instalados en el lugar como pueden ser: ventiladores, refrigerados, luminarias, equipos radioelectrónicos, entre otros.

En este trabajo se analizan los parámetros operacionales de las mantas flexibles fotovoltaicas de silicio amorfo de la serie EPV144S en condiciones de clima tropical.

### **Materiales y métodos**

Existen diversas variables que afectan el rendimiento de los módulos. Entre las más estudiadas se encuentra el efecto de la temperatura, la cual afecta menos a los módulos de silicio amorfo que a los cristalinos, pero su influencia debe ser estudiada, sobre todo en condiciones de clima tropical. Los ensayos a realizar con las mantas flexibles están relacionados con: la verificación de la temperatura de trabajo que alcanza el material ante diferentes niveles de radiación global, la medición de las condiciones térmicas alrededor del módulo así como de las variables climatológicas del entorno. También se miden los parámetros de corriente de cortocircuito y tensión a circuito abierto para poder comparar las condiciones de operación con las informaciones técnicas que brinda el fabricante.

Los módulos fotovoltaicos de silicio amorfo que se usaron para el ensayo son las mantas flexibles de la empresa RESIGUM de la serie EPV144S de 144 Wp. A pesar de su bajo rendimiento, alrededor de 9 %, se integran con mayor facilidad a las edificaciones (Wenhua, 2016). Este tipo de módulo pertenecen a los módulos de lámina fina, por lo que son ligeros y resistentes, así como de fácil instalación. Tienen menor pérdida al aumentar la temperatura y mejor performance espectral.

En la Figura 3 se observa la manta flexible utilizada para los ensayos. Encima de la manta se identifican huellas comprobando su resistencia para ser peatonales.



Figura 3. Manta fotovoltaica EPV144S durante su ensayo.

En la Tabla 1 se exponen las condiciones de verificación estándar obtenidas por el fabricante.

Tabla 1. Características técnicas de la manta fotovoltaica EPV144S (RESIGUM, 2014)

| STC   |        | NOCT  |        |
|---|--------|---|--------|
| Condiciones de verificación estándar                    |        | Temperatura de celda nominal                      |        |
| 1 000 W/m <sup>2</sup> , AM 1.5, Temperatura celda 25°C |        | 800 W/m <sup>2</sup> , AM 1,5, viento 1 m/s       |        |
| Potencia nominal máxima (P <sub>máx</sub> )             | 144 Wp | Potencia nominal máxima (P <sub>máx</sub> )       | 111 Wp |
| Tensión con P <sub>máx</sub> (V <sub>mp</sub> )         | 33 V   | Tensión con P <sub>máx</sub> (V <sub>mp</sub> )   | 30,8 V |
| Corriente con P <sub>máx</sub> (I <sub>mp</sub> )       | 4,36 A | Corriente con P <sub>máx</sub> (I <sub>mp</sub> ) | 3,6 A  |
| Corriente de cortocircuito (I <sub>sc</sub> )           | 5,3 A  | Corriente de cortocircuito (I <sub>sc</sub> )     | 4,3 A  |
| Tensión con circuito abierto (V <sub>oc</sub> )         | 46,2 V | Tensión con circuito abierto (V <sub>oc</sub> )   | 42 V   |

Para la obtención de las variables meteorológicas se utilizó una pequeña estación meteorológica *WatchDog 2900ET* con capacidad de detectar, registrar y memorizar siete variables, entre las que se encuentran: la velocidad del viento (con un rango de medición de 0 a 281 km/h y una precisión del 5 %), la dirección del viento (con un rango de medición de 360 grados y una precisión de 7°), la temperatura del aire (con un rango de medición de -20°C hasta los 70°C con una precisión de 0,6°C), la humedad relativa del aire (con un rango de medición desde el 20 % hasta el 100 % y una precisión del 3 %), la pluviosidad (hasta 6,5 cm con una precisión del 2 %) y cuenta con la capacidad de cálculo de dos variables más: el punto de rocío y la sensación térmica. La estación permite seleccionar el intervalo de medición y se pueden enviar los datos memorizados desde la estación a un ordenador. Para ello, la comunicación puede ser de forma online o física, extrayendo los datos mediante el puerto RS-232 o el puerto estéreo. Este modelo de estación (*WatchDog 2900ET*) cuenta, además, con un sensor de radiación solar con un rango de medición entre los 0 y 1 250 W/m<sup>2</sup> y una precisión del 5 % (PCE-Iberica).



Debido a la importancia de la temperatura para los módulos fotovoltaicos al provocar pérdidas en la producción de energía, se usaron dos instrumentos de medida para el estudio de la temperatura en la superficie de la manta. El primero consta de un termómetro infrarrojo con óptica de precisión, puntero láser y corto tiempo de respuesta (modelo *PCE-IR 425*) para medir la temperatura en la superficie de la manta fotovoltaica. La particularidad en este termómetro infrarrojo está en su corto tiempo de respuesta, llegando a ser menor a un segundo, sin tener que tocar el objeto a medir. Este dispositivo dispone de un rango de temperaturas desde  $-60^{\circ}\text{C}$  hasta los  $1\ 000^{\circ}\text{C}$  y una precisión del 2 % para el infrarrojo y 1 % para la sonda tipo k. La resolución es de  $0,1^{\circ}\text{C}$  hasta los  $200^{\circ}\text{C}$  medidos y a partir de ahí aumenta a  $1^{\circ}\text{C}$  su resolución. La resolución óptica es de 50:1 lo que permite una medición de temperatura precisa y sin contacto entre superficies (PCE-Iberica).

Con la cámara termo-gráfica, modelo CA 1882, se obtuvieron las imágenes térmicas de la manta flexible y se analizaron mediante un software especializado (Figura 4). Aparte de la captura térmica del objeto, también realiza una captura mixta entre la imagen real del objeto y su imagen térmica. El detector termo-gráfico que utiliza es de tipo UFPA microbolometer, de  $8\ \mu\text{m}$  a  $14\ \mu\text{m}$ , una frecuencia de 50 Hz y una sensibilidad de  $0,08^{\circ}\text{C}$  a  $30^{\circ}\text{C}$ . La cámara tiene un rango de temperaturas entre los  $-20^{\circ}\text{C}$  y los  $250^{\circ}\text{C}$ , con una precisión de  $2^{\circ}\text{C}$  o 2 %.

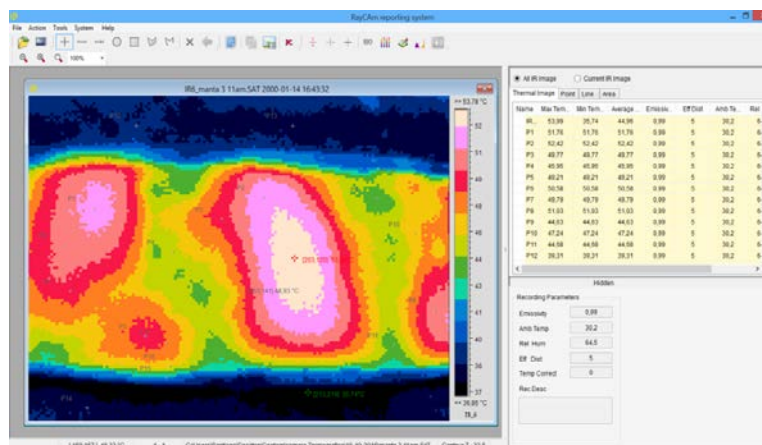


Figura 4. Software adjunto para el análisis de las imágenes.

Para la obtención de datos del comportamiento eléctrico de la manta flexible EPV144 se usó un comprobador de módulos solares *Evomex Solarmex 1000* que trabaja según la norma DIN VDE 0126-23 y permite medir la tensión de circuito abierto o sin carga y la corriente de cortocircuito. El rango de medición de la tensión de circuito abierto es de 0 a 1 000 V en corriente continua, con una precisión del 1 %. La corriente de

cortocircuito se puede obtener de dos maneras: la directa ofrece un rango de medición de 0 a 20 A en corriente continua mientras que la indirecta, vía pinza, permite un rango de medición desde los 0 a los 130 A (todo en corriente continua), la precisión de esta medida es del 1 %. Este instrumento dispone de un control de polaridad de módulos y puede comprobar si todos los módulos de una cadena han sido correctamente conectados, además de realizar un control de aislamiento de las cadenas solares (PCE-Iberica).

El software PVSyst se utiliza para obtener los puntos de máxima potencia a diferentes horas. Este software contiene subprogramas para el diseño, optimización y simulación de módulos fotovoltaicos, asimismo, posee la capacidad de calcular los valores diarios de radiación solar a partir de mediciones mensuales. También tiene información sobre las trayectorias solares de la localidad, permitiendo determinar las pérdidas por efecto de sombras. Además, tiene una amplia base de datos de módulos fotovoltaicos con sus respectivas curvas características.

Como se aprecia en la Figura 5 se pueden obtener los gráficos del comportamiento del módulo para una determinada temperatura superficial de la celda y diferentes radiaciones. También se observa que el propio software ofrece el valor del punto de máxima potencia para diferentes radiaciones; estos valores se usaron para obtener el gráfico de la potencia estimada frente a la radiación.

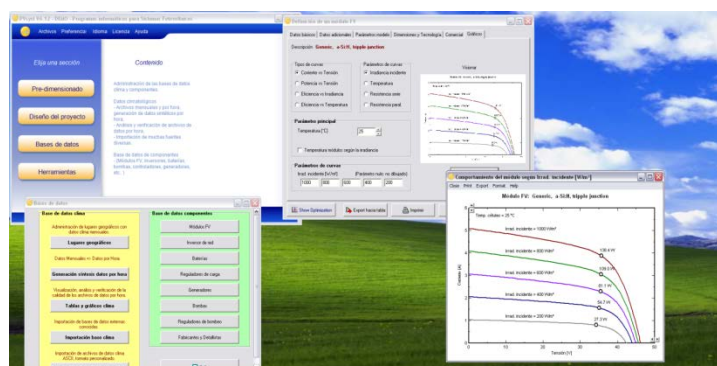


Figura 5. Imagen del software PVSyst.

## Análisis de los resultados

Para observar el comportamiento de la manta flexible en diversas situaciones se realizaron dos ensayos en diferentes días y con climatologías diferentes. Los dos ensayos se realizaron en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, en la provincia de Holguín, Cuba.

El primer ensayo se realizó el día 18 de octubre de 2016, con un cielo despejado con cierta cantidad de nubes que fueron aumentando en el transcurso del día. Por ello, durante el ensayo se notificó en una tabla las características climatológicas del momento de la medición, ya sea el cielo despejado, algo nublado o totalmente nublado.

Durante el ensayo se produjo una corta e intensa precipitación a las 17:00 horas, la cual se registró y se puede observar en la Figura 9 que con la precipitación desciende la temperatura superficial de la manta así como el nivel de la radiación global. Es importante la cantidad y densidad de las nubes durante el experimento, ya que en estos momentos aparecen variaciones apreciables de la radiación. En la mayoría de las mediciones, el cielo estaba despejado manifestándose en los altos niveles de radiación global registrados.

El lugar en que se estableció la manta flexible está rodeado de edificios, pero la única sombra que apareció durante el ensayo fue en el amanecer, retrasando la luz directa del sol desde las 7:00 hasta las 8:00 horas. El sol se puso casi a las 19:00 horas, acabando el ensayo a las 18:30 debido a la baja corriente de cortocircuito, así como el valor de la radiación próxima a cero.

En la Figura 6 se aprecia el comportamiento de la radiación global en el primer día de ensayo: la línea roja representa la radiación a cielo despejado, mientras que los azules representan las mediciones de radiación en instantes en los que se acentúa la nubosidad.

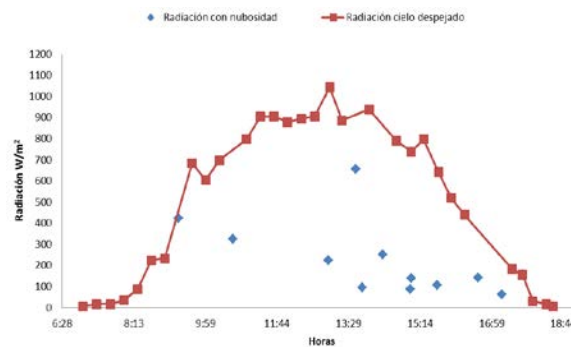


Figura 6. Gráfico de la radiación global en el día 18-10-2016.

La curva dibujada por la radiación con cielo despejado representa correctamente la posible radiación diaria para un módulo fotovoltaico en condiciones de clima tropical. Además, se puede ver cómo afecta a la radiación solar la presencia de nubes, disminuyendo a más de un 70 % su valor. Para que se tenga una idea para el día 18,

entre la 13:00 y las 13:05 horas, se manifestaron valores de radiación que superan los  $1\ 000\ \text{W/m}^2$  con el tiempo soleado y después disminuyó rápidamente hasta los  $220\ \text{W/m}^2$ . En este ejemplo la corriente de cortocircuito disminuyó de  $4,3\ \text{A}$  a  $1,4\ \text{A}$ . En el caso de la tensión los valores de tensión de circuito abierto cambiaron de  $42\ \text{V}$  a los  $38\ \text{V}$ , tal como se puede verificar en las Figuras 8 y 9.

En la Figura 7 se muestra el gráfico de las diferentes temperaturas medidas durante el ensayo: la temperatura en la superficie del módulo solar EPV144S, la temperatura del suelo cercano a la manta fotovoltaica, la temperatura debajo de la manta fotovoltaica (cuyos datos se obtuvieron con el termómetro infrarrojo *PCE-IR 425*) y la temperatura ambiente (dato obtenido mediante la estación meteorológica WatchDog 2900ET).

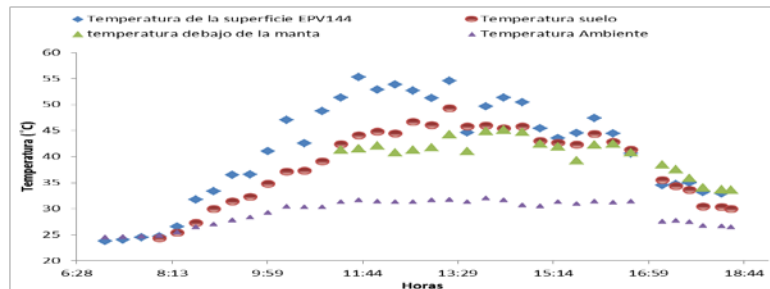


Figura 7. Gráfico de temperaturas obtenidas el día de ensayo 18-10-2016.

En la Figura 7 se muestra que el incremento de la radiación solar en las primeras horas de la mañana provoca un aumento en la temperatura superficial de la manta por la excitación del material, produciéndose el movimiento de los electrones y huecos internos. A las 17:00 horas, y en consecuencia de una fuerte e intensa lluvia, se muestra cómo disminuye la temperatura bruscamente de la superficie de la manta fotovoltaica y suelo; esto se debe principalmente por el enfriamiento que hace el agua sobre estas zonas. Pero debajo de la manta no ocurre lo mismo o no es tan brusco como se puede notar, siendo una disminución más suave y prolongada. Esto es debido a la capacidad de aislamiento térmico entre ambas superficies de la manta flexible.

El comportamiento eléctrico de la manta se observa en las Figuras 8 y 9, donde se muestran los gráficos de la intensidad de cortocircuito y la tensión de circuito abierto durante el tiempo de ensayo. Destaca que cuando más fuerte se encuentra la radiación (Figura 6), la intensidad de cortocircuito se encuentra entre los valores de  $4,5\ \text{A}$  y  $5\ \text{A}$ , para un valor de radiación cercano a los  $1\ 000\ \text{W/m}^2$  (Figura 8).

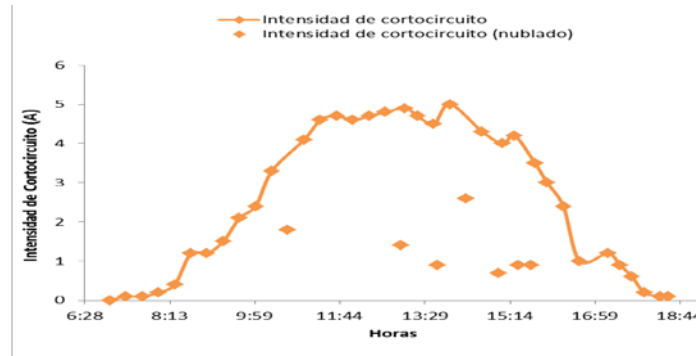


Figura 8. Gráfico de la intensidad de cortocircuito el día de ensayo 18-10-2016.

Si estos valores se relacionan con las condiciones estándar expuestas por el fabricante de la manta flexible se observa que la intensidad de cortocircuito se encuentra en 5,3 A, para una radiación de 1 000 W/m<sup>2</sup>. Se puede identificar que existen pérdidas en la manta ocasionadas por la temperatura de la superficie, ya que las condiciones estándar están tomadas a una temperatura superficial de 25°C y en el ensayo la manta flexible se encuentra con valores superiores a 50°C. Mientras que el voltaje de circuito abierto siempre se mantiene entre los valores por debajo 45 V, debiendo estar en condiciones estándar en 46,5 V (Figura 9).

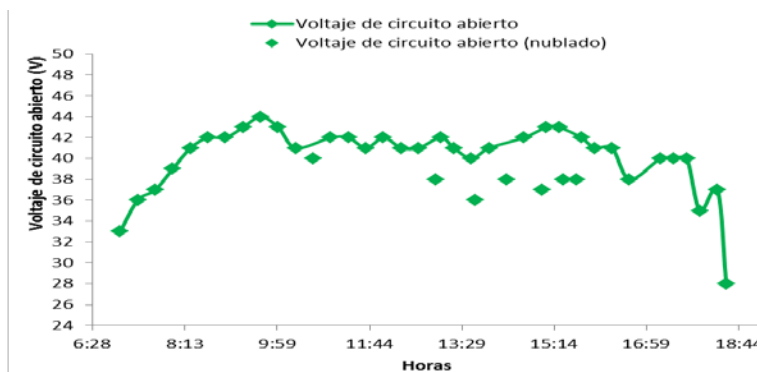


Figura 9. Gráfico del voltaje de circuito abierto el día de ensayo 18-10-2016.

Mediante el programa PVSyst se obtuvieron los datos del punto de máxima potencia para los diferentes valores de radiación y temperatura superficial del día 18-10-2016, como se indica en la Figura 10, y se relacionan con los obtenidos para una situación estándar de 25°C en la superficie, con los valores de radiación del ensayo. Así se pueden observar las diferencias de potencia que existen entre las condiciones estándares dadas por el fabricante y los datos obtenidos en el ensayo.

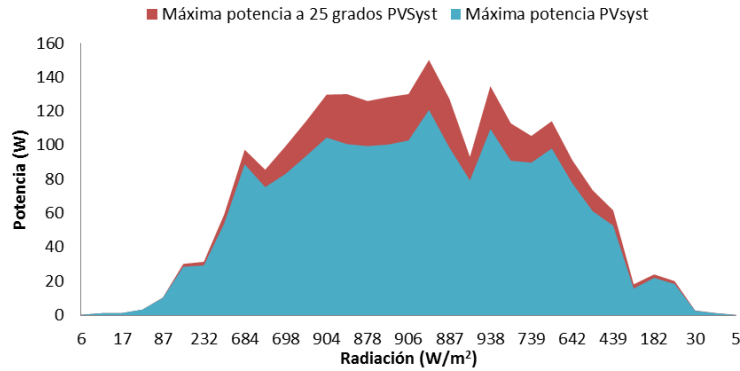


Figura 10. Gráfico de máxima potencia.

En la Figura 10 se observa que los valores de máxima potencia son diferentes para los dos casos. Esto es debido al aumento de la temperatura superficial que sufre la manta flexible durante el ensayo del día 18-10-2016. Se comprueba que las altas temperaturas en la superficie de la manta flexible provocan pérdidas en la producción de energía en, aproximadamente, un 17 %, al compararse con respecto a que sean constantes las condiciones estándar de 25°C.

Con los valores del punto de máxima potencia, correspondientes al ensayo con cielo despejado del día 18, se puede obtener un gráfico de dispersión que relaciona la potencia eléctrica que produce la manta flexible con respecto a la radiación, tal y como aparece en la Figura 11. En esta figura aparece el resultado de la regresión lineal con la correspondiente ecuación y el coeficiente de determinación R<sup>2</sup>.

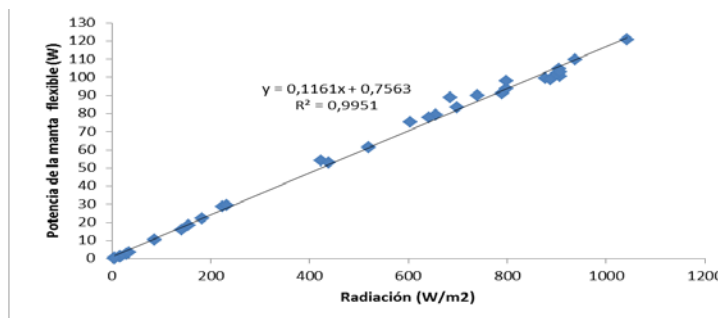


Figura 11. Puntos de máxima potencia del ensayo frente a la radiación.

Es interesante relacionar estos datos de máxima potencia obtenidos en diversos tiempos para relacionarlo con el consumo de ciertos equipos de la vida cotidiana y poder observar cómo, gracias a esta tecnología, en ciertos momentos se puede ahorrar energía. Entre los equipos de bajo consumo más comunes que se pueden encontrar en el sector residencial de Cuba son: una televisión de 90 W, un refrigerador (modo

estable) de 150 W, un ventilador de 70 W, un equipo de audio pequeño 30 W y una luminaria de 20 W (Argota, 2013).

### Algunas comparaciones entre ensayos

El segundo ensayo se realizó el día 27 de octubre en el mismo lugar que el primero, con una climatología de nubosidad alta. La radiación global durante el día es bastante baja debido a la filtración que hacen las nubes de la radiación directa del sol, provocando que la mayoría de la radiación global medida sea difusa. Cabe destacar que el ensayo se hizo durante un corto plazo de tiempo, usándose los mismos instrumentos que el primer ensayo.

En la Figura 12 se observan dos curvas diferentes: la primera (roja) correspondiente al ensayo realizado el día 18 de octubre de 2016, durante el periodo de cielo despejado; mientras que la segunda curva (gris) representa el ensayo del día 27 de octubre de ese mismo año, durante el periodo de ascenso de radiación desde las 9:00 horas hasta las 12:30 horas. Se puede ver cómo la alta densidad de nubes en el cielo ocasionadas en el segundo día de ensayo provoca unos niveles de radiación global más bajos que los obtenidos el primer día de ensayo en esas mismas horas.

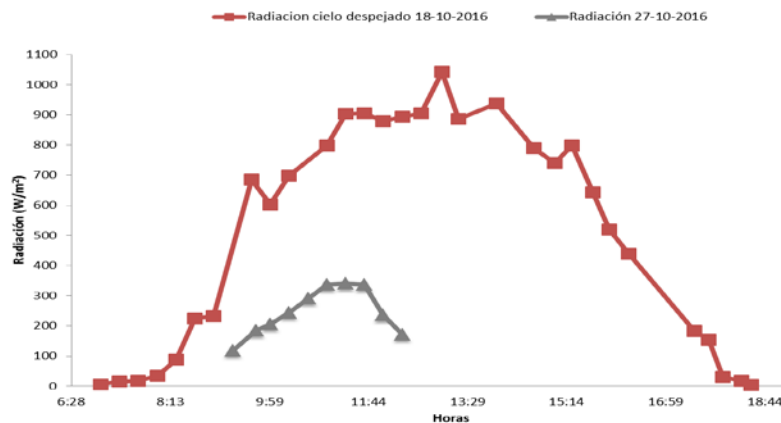


Figura 12. Gráfico de las diferencias de radiación entre los dos días de ensayo del módulo EPV144S.

En la Figura 13 se muestran dos imágenes termo-gráficas tomadas a la misma hora los diferentes días de ensayo, donde se ve la diferencia de temperatura en la superficie de la manta fotovoltaica. Estas figuras corresponden a los tiempos en los que la radiación tiene uno de los valores más altos (ensayo 1: 906 W/m<sup>2</sup>, ensayo 2: 337 W/m<sup>2</sup>) y, además, ese punto coincide con uno de los puntos más altos de la temperatura superficial de la manta fotovoltaica (ensayo 1: 55,3°C, ensayo 2: 36,7°C). Debido a la

alta radiación dispuesta en el primer ensayo se tiene una temperatura superficial más alta que en el segundo, donde los valores de radiación son más bajos.

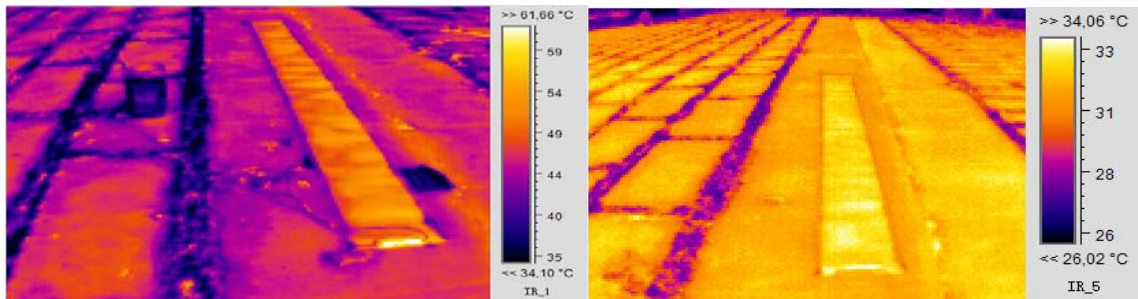


Figura 13. Imagen termo-gráfica de la manta flexible. Izquierda ensayo 18-10, derecha ensayo 27-10-2016.

Como consecuencia de grandes diferencias de temperatura entre los dos ensayos, la Figura 14 muestra un gráfico con las diversas temperaturas medidas para poder analizar las diferencias entre los días de ensayo.

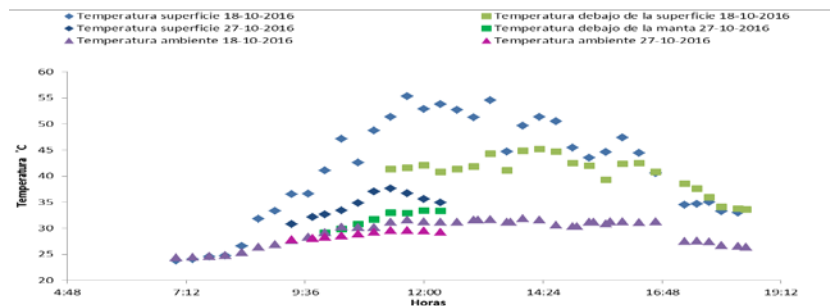


Figura 14. Gráfico de las diferentes temperaturas obtenidas los dos días de ensayo.

Mientras que la temperatura ambiente en ambos ensayos tiene valores muy parecidos, las temperaturas de la superficie y de debajo de la manta flexible son diferentes, esto es provocado por los diferentes niveles de radiación entre ensayos. En el gráfico de la Figura 14 se puede ver que con niveles altos de radiación la temperatura de la superficie de la manta es mucho más alta que con niveles más bajos de radiación global, lo que corrobora que hay una relación entre la radiación que es percibida y la temperatura de la superficie. Además, la temperatura superficial es alta con respecto la temperatura del suelo, ya que la radiación provoca en la manta flexible un movimiento de electrones y huecos que excita el material y calienta la manta.

Las Figuras 15 y 16 corresponden a los gráficos de las variables eléctricas obtenidas durante los ensayos, la intensidad de cortocircuito y el voltaje de circuito abierto. Estas dos variables representan los puntos de corte con los ejes (x e y) en los gráficos del



comportamiento de un módulo solar de la intensidad frente al voltaje. Si se le añade el punto de máxima potencia se puede dibujar, de manera relativa, el trabajo de la manta flexible para diversos puntos de voltaje o intensidad.

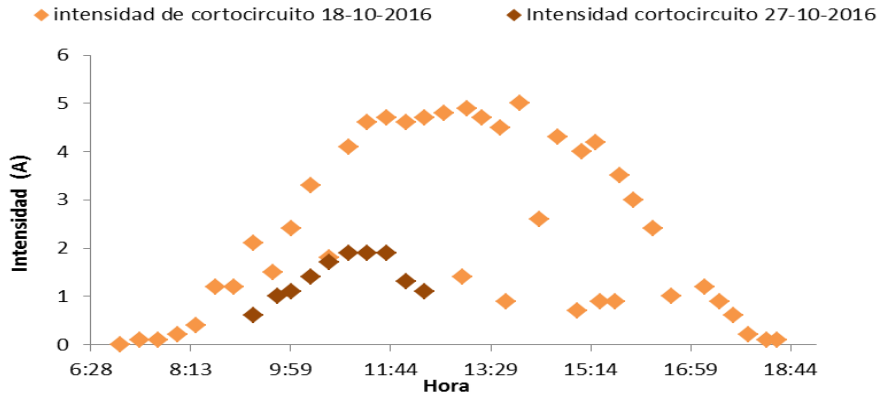


Figura 15. Gráfico de la intensidad de cortocircuito para los diferentes días de ensayo.

La Figura 15 muestra la intensidad de cortocircuito en el tiempo durante los dos ensayos. Se puede observar cómo está relacionada con la cantidad de radiación que llega al módulo, ya que cuanto menor es el valor la de radiación, como ocurre en el segundo día de ensayo, menor es el valor de la intensidad de cortocircuito. También el punto de máxima temperatura no coincide con el punto de máxima corriente por lo que se puede ver cómo también la intensidad es afectada por las temperaturas altas de la superficie, no dejando llegar a los valores descritos en las condiciones de verificación estándar del fabricante. El voltaje de circuito abierto de los dos ensayos (Figura 16) muestra un valor muy parecido, que provoca que esas diferentes temperaturas o radiaciones no afecten a esa variable.

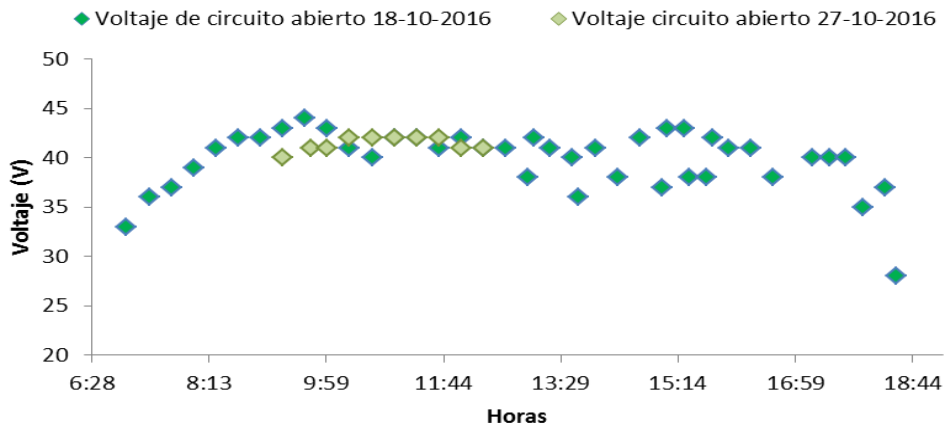


Figura 16. Gráfico del voltaje de circuito abierto para los diferentes días de ensayo.

## Conclusiones

Se pudo comprobar el comportamiento de los parámetros que caracterizan la operación de la manta flexible EPV144S en diferentes condiciones del clima tropical de Cuba. Los resultados que se reflejan en el trabajo corresponden a variaciones de la radiación global entre  $5 \text{ W/m}^2$  y  $1\,025 \text{ W/m}^2$ , temperatura ambiente  $24,4\text{-}31,9^\circ\text{C}$ , temperatura en la superficie de la manta  $24,1\text{-}54,6^\circ\text{C}$ , intensidad de cortocircuito entre 0 y 5 A y tensión a circuito abierto desde 33 V y hasta 44 V.

Cuando se comparan las variaciones entre las condiciones estándar de operación de las mantas flexibles a  $25^\circ\text{C}$  (valor fijo) y las condiciones de temperatura promedio de la superficie de la manta  $41,67^\circ\text{C}$ , la producción de electricidad disminuye en, aproximadamente, un 17 %. Para estas condiciones la temperatura ambiente promedio fue de  $29,32^\circ\text{C}$ .

Los efectos de la nubosidad representan la causa fundamental de la variación brusca de potencia de las mantas flexibles, lo cual, en la actualidad, se soluciona en los sistemas conectados a red haciendo uso de las potencialidades de los inversores. Para el caso de estudio se produjeron cambios de hasta un 79,8 % en la variación de la potencia por esta causa.

## Recomendaciones

1. A partir de las mediciones durante los ensayos de otros parámetros, como la humedad relativa y las diferencias de temperatura entre el suelo lejos de la manta y debajo de ella, se recomienda en próximos trabajos considerar estas variables en relación a los fenómenos de transferencia de calor presentes.
2. Realizar mediciones de las mantas con diferentes orientaciones e inclinaciones, para obtener resultados que permitan apoyar la toma de decisiones en la implementación de esta tecnología.

## Referencias bibliográficas

ARGOTA, D. 2013: Estudio del comportamiento de las cargas eléctricas del sector residencial en Cuba. *Ciencia & Futuro* 3(3): 11-25.

- BLANCO, M. E. 2016: *Integración de la energía solar fotovoltaica en edificios multifamiliares del municipio de Moa*. Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.
- FERNÁNDEZ, A. 2014: Los países con más energías renovables del mundo. Consultado: 10 nov 2016. Disponible en: [http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/energia\\_y\\_ciencia/2014/07/17/20280.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2014/07/17/20280.php)
- LORENZO, E. 2014: *Electricidad solar fotovoltaica*. Ed. Progensa, Sevilla.
- MARTÍN, N. 2011: *Integración de la energía fotovoltaica en edificios*. Ed. Progensa, Sevilla.
- NOWAK, S. 2016: *Trends 2016 in photovoltaic applications foreword*. IEA International Energy Agency, Sweden.
- PCE-IBÉRICA. Características técnicas Comprobador de módulos solares EVOMEX Solarmex 1000. Consultado: 21 nov 2016. Disponible en: <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-radiacion/comprobador-modulo-solarmex1000.htm>
- PCE-IBÉRICA. Características técnicas de la estación meteorológica WatchDog. Consultado: 21 nov 2016. Disponible en: <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/logger-de-datos/logger-datos-watchdog-500.htm>
- PCE-IBÉRICA. Características técnicas termómetro infrarrojo PCE-IR 425. Consultado: 21 nov 2016. Disponible en: [www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-temperatura/termometro-infrarrojo-pce-ir425.htm](http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-temperatura/termometro-infrarrojo-pce-ir425.htm)
- RESIGUM. 2014: Módulo fotovoltaico amorfo 144S (p. 4).
- SARMIENTO, A. 2013: *Energía Solar Fotovoltaica*. Ed. Académica.
- WENHUA, X. 2016: *International training course on solar energy*. M. d. C. d. I. R. d. China Ed. 1 ed.