

# MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DEL VOLTAJE TÉRMICO DE PANELES FOTOVOLTAICOS BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR

**Roberto Federico Farfán** – fede\_farfan@hotmail.com

Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ingeniería. INENCO-CONICET

**Luis Tadeo Villa** – villal@unsa.edu.ar

Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ingeniería. INIQUI-CONICET

**Carlos Alberto Cadena** – cadenacinenco@gmail.com

Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas. INENCO-CONICET

**Resumen.** El presente trabajo describe un método que permite determinar el voltaje térmico de paneles fotovoltaicos y el error cometido en la estimación del mismo. El voltaje térmico de un panel fotovoltaico se encuentra relacionado con el factor de idealidad del diodo, debido a esto se observa la importancia de la determinación del mismo. El método planteado en el trabajo consiste en realizar el trazado de la curva de un panel fotovoltaico iluminado y en función de la información obtenida, ensayar el mismo en oscuridad. En el ensayo en oscuridad se deben imponer al panel los mismos voltajes que se obtuvieron en el ensayo con iluminación, ambos bajo una misma temperatura de celda. Esta condición permite vincular magnitudes medidas en ambos ensayos por medio de una relación lineal, cuya pendiente se encuentra en función del voltaje térmico. La aplicación del método de regresión lineal permite estimar el valor del voltaje térmico y el error cometido en cada medida.

**Palabras clave:** Paneles Fotovoltaico, Voltaje térmico, Regresión lineal.

## 1. INTRODUCCIÓN

El panel fotovoltaico constituye la principal fuente de energía de una instalación autónoma fotovoltaica y es el resultado de asociar un conjunto de celdas fotovoltaicas en serie y paralelo. La energía que un panel fotovoltaico puede entregar se encuentra en función de variables externas al panel como la Irradiancia, Temperatura, y parámetros internos como su resistencia serie ( $R_s$ ), resistencia paralelo ( $R_p$ ) y factor de idealidad del diodo ( $n$ ), entre otros. La eficiencia de un sistema de paneles se encuentra relacionada de forma directa con estos parámetros, generalmente desconocidos (Tina y Scrofani, 2008; De Soto et al., 2006).

En la bibliografía se encuentran diferentes métodos que permiten la determinación de los parámetros desconocidos de un panel fotovoltaico. Entre ellos se pueden mencionar ciertos algoritmos que resuelven un conjunto de ecuaciones que se expresan en función de la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), la corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ) y la tensión y corriente del punto de máxima potencia ( $I_{mp}$ )( $V_{mp}$ ) (Remus Teodorescu and Rodriguez, 2007; Villalva et al., 2009; Chan and Phang, 1987). Algunos trabajos individualizan el cálculo de cada parámetro, por medio de expresiones obtenidas al realizar distintas idealizaciones (Araujo and Sanchez, 1982) o por medio de la medida de distintas curvas iluminadas (El-Adawi and Al-Nuaim, 2002). De los diferentes métodos que permiten la determinación de los parámetros de un panel fotovoltaico, solo algunos discuten la precisión con que se realizó la medida (Bashahu and Habyarimana, 1995).

El método implementado en este trabajo permite determinar el voltaje térmico combinando información de la curva iluminada y en oscuridad de un panel fotovoltaico, ambas a una misma temperatura de celda. La última condición es impuesta por la dependencia que tienen los parámetros de un panel fotovoltaico, entre ellos el factor de idealidad del diodo, con la temperatura (Gow y Manning, 1999; Elshatter et al. 2000; Salam et al., 2010). Trabajar con los puntos obtenidos de la combinación de los ensayos por medio de una regresión lineal, permite determinar el voltaje térmico a 25°C y 1000W/m<sup>2</sup>. La implementación de este método permite el cálculo del error cometido en la determinación del mismo, por medio de una propagación.

## 2. MODELO DE CELDA Y PANEL

En la Fig. 1 se observa el modelo que se utiliza en el trabajo para representar un panel fotovoltaico en condiciones de iluminación. El mismo modelo también se utiliza para representar una celda fotovoltaica o un conjunto de paneles (Duffie and Beckman, 1991; Villalva et al., 2009). En el circuito se identifica la diferencia de potencial entre los bornes del panel con la variable  $V$  y la corriente que entrega el mismo con la variable  $I$ . Las magnitudes involucradas en la Fig. 1 se relacionan por medio de la Ec. (1) (Remus Teodorescu and Rodriguez, 2007; Villalva et al., 2009), pudiéndose resolver la misma por medio de métodos numéricos. Con la resolución de la Ec. (1) se obtiene las características I-V del panel fotovoltaico.

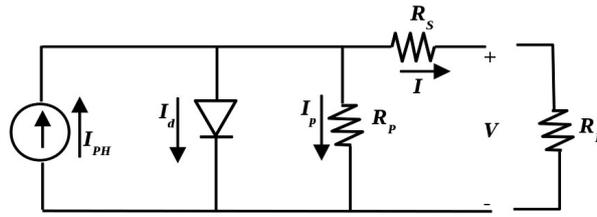


Figura 1- Modelo de un panel fotovoltaico con iluminación.

$$I = I_{PH} - I_0 \left( e^{\left( \frac{V+I R_S}{n_s V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{(V+I R_S)}{R_p} \quad (1)$$

Donde  $I_{PH}$  es la corriente fotogenerada producida por la energía radiante,  $I_0$  es la corriente de saturación inversa,  $V_t$  es el voltaje térmico dado por la Ec. (2),  $n_s$  es el número de celdas en serie conectados en el panel,  $R_s$  es una resistencia denominada serie que engloba la región emisora y base, metalización de la celda y la terminación de la caja de junta y  $R_p$  la resistencia paralelo, que representa cualquier camino de alta impedancia a través de las juntas p-n o en el borde.

$$V_t = \frac{nKT}{e} \quad (2)$$

En la Ec. (2),  $T$  representa la temperatura de celda en grados kelvin,  $K$  es la constante de Boltzmann,  $e$  es la carga del electrón y  $n$  es el factor de idealidad del diodo.

### 3. MÉTODO IMPLEMENTADO

En la Fig. 2 se observa el modelo de panel en condiciones de oscuridad, donde una fuente externa le impone una tensión  $V'$ .

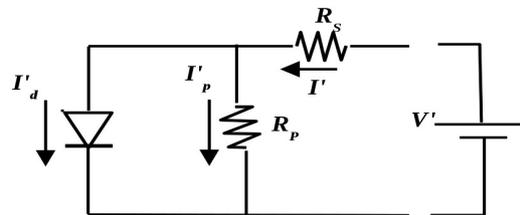


Figura 2- Modelo de un panel fotovoltaico sin iluminación.

En el ensayo en oscuridad se utiliza como condición que los voltajes impuestos al panel sean los mismos que los que se midieron en iluminación, medidos o extrapolados a la mismas temperatura. La diferencia de potencial entre los extremos del diodo en los circuitos que muestran las Figs. 1 y 2, se expresan en las Ecs. (3) y (4).

$$V_d = V + V_{R_s} \quad (3)$$

$$V_d' = V' - V_{R_s}' \quad (4)$$

La condición impuesta en el ensayo en oscuridad permite relacionar magnitudes medidas en ambos ensayos, como se observa en la Ec. (5).

$$V_d - V_d' = R_s (I + I') \quad (5)$$

La tensión en el diodo en cada ensayo se determinan de las Ecs. (6) y (7).

$$I_d = I_0 \left( e^{\left( \frac{V_d}{n_S V_t} \right)} - 1 \right) \quad (6)$$

$$I_d' = I_0 \left( e^{\left( \frac{V_d'}{n_S V_t} \right)} - 1 \right) \quad (7)$$

Combinando la Ecs. (5), (6) y (7) obtenemos la Ec. (8).

$$V_d - V_d' = n_S V_t \ln \left( \frac{I_d + I_0}{I_d' + I_0} \right) \quad (8)$$

Las ecuaciones de nodo para los circuitos de las Figs. 1 y 2 permiten determinar expresiones que vinculan las corrientes de diodo que circulan en cada ensayo, como muestran las Ecs. (9) y (10).

$$I_d = I_{PH} - I_p - I \quad (9)$$

$$I_d' = I' - I_p \quad (10)$$

La magnitud de las corrientes involucradas en la Ecs. (9) y (10) son mayores que  $I_0$ , de manera que esta última puede despreciarse en la Ec. (8). Al relacionar las Ecs. (5), (8), (9) y (10), despreciando la corriente por la resistencia paralelo y aproximando la corriente de corto circuito a la fotogenerada, se obtiene la Ec. (11).

$$\ln \left( \frac{I_{cc} - I}{I I_{cc}} \right) = \frac{R_S}{V_t n_S} (I + I') + \ln \left( \frac{1}{I_{cc}} \right) \quad (11)$$

La Ec. (11) relaciona las magnitudes medidas en ambos ensayos y el voltaje térmico que se desea calcular.

#### 4. SIMULACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO

A partir de la información de medidas provenientes de paneles fotovoltaicos, se plantearon simulaciones para verificar la eficiencia del método. Las siguientes simulaciones se realizaron para las curvas I-V de paneles fotovoltaicos de 50 WP, cuyos parámetros se observan en la Tab. 1.

Tabla 1. Parámetros del panel fotovoltaico simulado bajo una temperatura de celda de 25°C.

Panel 50WP			
Rp(Ω)	Rs(Ω)	Iph(A)	I0(A)
1451	0,65	2,81	7*10 <sup>-8</sup>

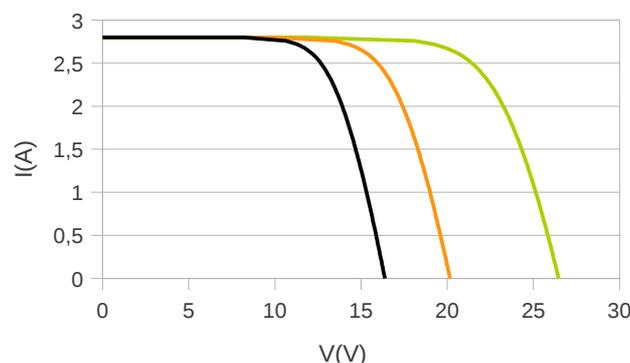


Figura 3- Curva I-V simulada.

En las simulaciones los parámetros de la Tab. 1 se mantuvieron constante, modificándose los valor del voltaje térmico como se observa en las curvas I-V de la Fig. 3. A priori se conoce información sobre la curva I-V iluminada. La condición impuesta,  $V$  igual a  $V'$ , permite relacionar la información de cada curva I-V iluminada con los valores  $I'$  desconocidos que deben determinarse para simular los ensayos. El circuito de la Fig. (2) permite plantear la Ec. (12).

$$V' = I'R_s + n_s V_t \ln \left( \frac{I' - I'_p}{I_0} \right) \quad (12)$$

Escribiendo  $I'_p$  en función de  $V'$  e  $I'$  se obtienen la Ec. (13).

$$V' = I'R_s + n_s V_t \ln \left( \frac{I'(R_s + R_p) - V'}{R_p I_0} \right) \quad (13)$$

En la Eq. (13) se observa que  $I'$  no puede determinarse en forma directa. La obtención de  $I'$  correspondiente a cada valor de  $V'$  se realiza resolviendo la Ec. (13) por medio de un algoritmo basado en aproximaciones sucesivas.

En la Fig. 4 se observan los puntos obtenidos al trabajar con la Ec. (11) luego de simular los ensayos en iluminación y oscuridad, con las curvas a 25 °C. El gráfico muestra una linealidad muy marcada entre  $(I+I')$  y el  $\ln((I_{cc}-I)/(I'_{cc}))$ , especialmente para los puntos vinculados a los valores de  $I$  bajos. El calculo del coeficiente  $R^2$ , aplicado a los puntos generados en las simulaciones, validan la afirmación del comportamiento lineal entre las variables involucradas para valores de  $I$  bajos.

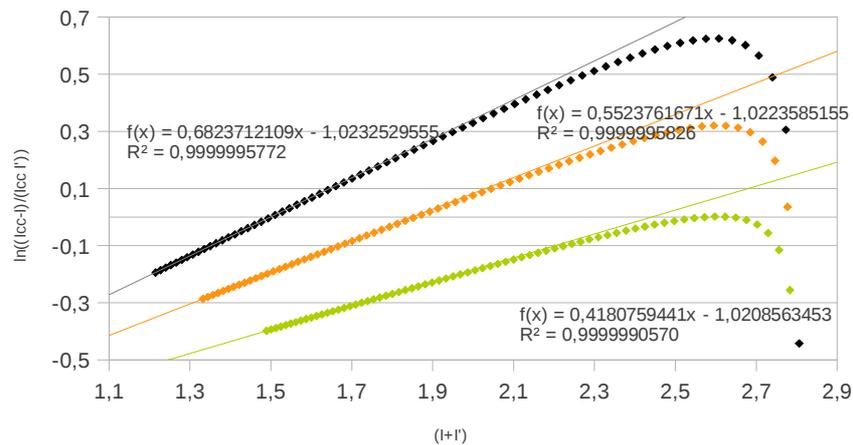


Figura 4- Curva obtenida al relacionar información de los ensayos simulados en iluminación y oscuridad.

El comportamiento lineal en esta región se debe a que en ambos ensayos los diodos que modelan parte del funcionamiento del panel fotovoltaico, trabajan en la zona de conducción. Los puntos obtenidos de las simulaciones permiten plantear regresiones lineales, cuya pendiente  $a$  se encuentra en función del  $V_t$ ,  $R_s$  y  $n_s$  como muestra la Ec. (14).

$$a = \frac{R_s}{V_t n_s} \quad (14)$$

Para las regresiones lineales realizadas con los puntos obtenidos de las simulaciones, relacionados con los valores de  $I$  bajos, se obtienen pendientes que conociendo el valor de  $R_s$  permiten obtener valores de  $V_t$  cercanos al esperado.

En la Ec. (9) se observa que la ordenada al origen tiene información del panel fotovoltaico ensayado, sin embargo esta última no es relevante. Para afirmar esta última se realizó un análisis de las magnitudes eléctricas del modelo de panel propuesto en el trabajo y sus inconvenientes cuando en la expresión (9)  $(I+I')$  tiende a cero. Los siguientes puntos describen los análisis realizados.

1) En la curva I-V iluminada encontramos un punto donde  $I$  es cero y el voltaje del panel es  $V_{oc}$ . Esto implica que la tensión que debe imponerse en el ensayo en oscuridad es  $V_{oc}$ , imponiendo la fuente una corriente  $I'$  distinta de cero. Este análisis muestra que  $I$  e  $I'$  no pueden ser cero bajo esta condición.

2) Trabajar en el cuarto cuadrante de la curva I-V iluminada. En esta situación las corrientes  $I'$  impuestas por la fuente en el ensayo en oscuridad tienen un único sentido, tomada como positiva en las ecuaciones planteadas. Las corrientes  $I$  en el ensayo con iluminación, utilizando el panel como fuente, también tienen un único sentido tomado como positivo en la Ec. (1). Esto permite afirmar que en el cuarto cuadrante de la curva I-V iluminada  $I+I'$  no puede alcanzar el cero.

3) Trabajar en el primer cuadrante de la curva I-V iluminada. En esta situación la corriente  $I$  cambia de sentido y necesita de una fuente externa para conseguir tal propósito. Sin embargo la condición impuesta  $V=V'$ , impide que ambas corrientes lleguen a tener el mismo valor.

## 5. ENSAYOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS

En el trabajo se ensayaron paneles fotovoltaicos de 80WP (SOLARTEC). Las curvas I-V surgidas de los ensayos con iluminación se obtuvieron utilizando una carga electrónica capacitiva conectada a una PC, mientras que los ensayos en oscuridad se realizaron utilizando una fuente de tensión continua. En la Fig. 5 se observan las curvas I-V pertenecientes al cuarto cuadrante de dos paneles fotovoltaicos ensayados en condición de iluminación. Las curvas de los paneles de 80WP se midieron con una irradiancia y temperatura ambiente de  $885\text{W/m}^2$  a  $36^\circ\text{C}$  y  $968\text{W/m}^2$  a  $34^\circ\text{C}$ .

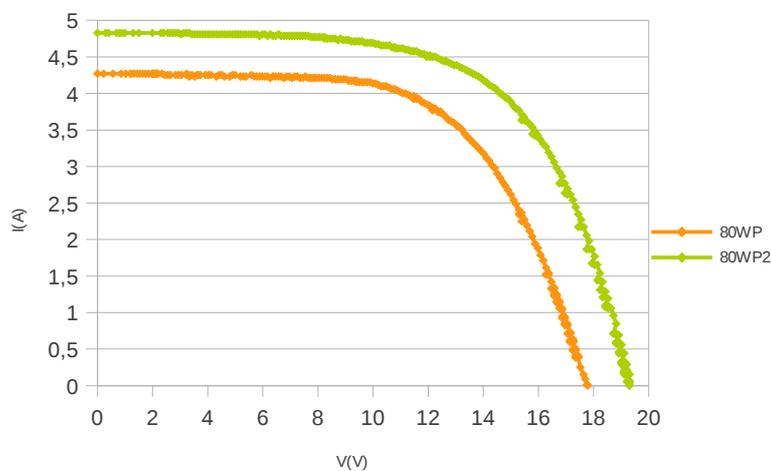


Figura 5- Curvas I-V de paneles fotovoltaicos.

La información proveniente de las curvas I-V de los paneles fotovoltaicos se extrapoló a una Irradiancia de  $1000\text{W/m}^2$  y a una Temperatura de celda de  $25^\circ\text{C}$ . La información entregada por las curvas extrapoladas permite determinar los parámetros aproximados de cada panel en condiciones estándares, utilizando el algoritmo descrito en la trabajo de Remus Teodorescu y Rodriguez (2007), cuyos resultados se observan las Tab. 2 y 3.

Tabla 2. Parámetros del panel fotovoltaico 1 de 80WP a  $1000\text{W/m}^2$  y  $T_c=25^\circ\text{C}$

Medidas extrapoladas				Parámetros aproximados				
Voc(V)	Isc(A)	Vmp(V)	Imp(A)	Rs( $\Omega$ )	Rp( $\Omega$ )	Vt(V)	Iph(A)	I <sub>0</sub> (A)
20,2	4,82	15,1	4,21	0,49	222	$39 \cdot 10^{-3}$	4,83	$26 \cdot 10^{-7}$

Tabla 3. Parámetros del panel fotovoltaico 2 de 80WP a  $1000\text{W/m}^2$  y  $T_c=25^\circ\text{C}$

Medidas extrapoladas				Parámetros aproximados				
Voc(V)	Isc(A)	Vmp(V)	Imp(A)	Rs( $\Omega$ )	Rp( $\Omega$ )	Vt(V)	Iph(A)	I <sub>0</sub> (A)
21,7	5	16,3	4,32	0,45	159	$45 \cdot 10^{-3}$	5,02	$72 \cdot 10^{-7}$

El algoritmo utiliza cinco ecuaciones en función de la tensión de circuito abierto, la corriente de corto circuito y la tensión y corriente del punto de máxima potencia. La resolución de parte de este sistema de ecuaciones se realiza por medio de métodos iterativos, como el de Newton-Raphson. Entre los parámetros descritos en la Tabs. 2 y 3 se encuentra el  $V_t$ . Este último se toma como referencia para ser comparado con los valores de  $V_t$  determinados por el método descrito en este trabajo.

## 6. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO

Los resultados obtenidos de las regresiones lineales para el panel 1 y 2, utilizando los puntos cercanos a la tensión de circuito abierto de cada ensayo, se observan en la Fig. 7 y Fig. 8.

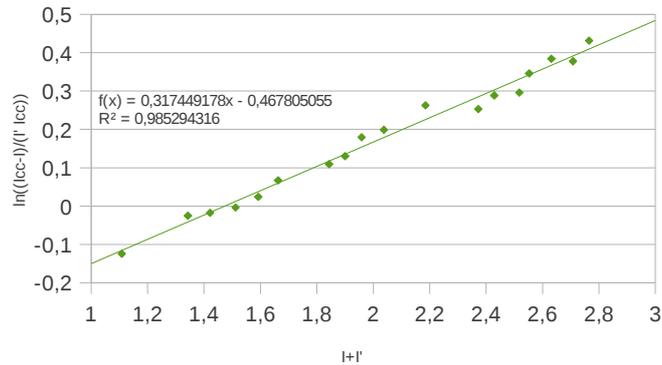


Figura 7. Regresión lineal aplicada a los puntos obtenidos de los ensayos para el panel 1.

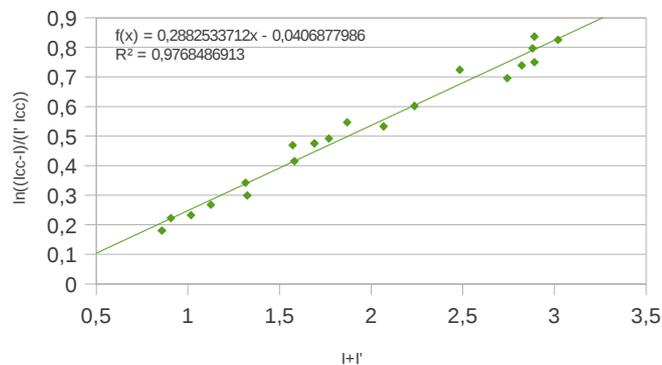


Figura 8. Regresión lineal aplicada a los puntos obtenidos de los ensayos para el panel 2.

Las regresiones lineales aplicadas a los puntos obtenidos en los distintos ensayos, permite el cálculo de las pendientes de cada curva. Esta información de acuerdo a la Ec. (14), permite la magnitud del  $V_t$  en función del conocimiento de la resistencia serie de cada panel bajo esta condición. Existen más de veinte métodos para la determinación de la resistencia serie (Bashahu and Habyarimana, 1995; Araujo y Sanchez, 1982; El-Adawi y Al-Nuaim, 2002). Para los paneles fotovoltaicos ensayados se conocían estos valores, similares a los que se obtuvieron aplicando el algoritmo descrito en la trabajo de Remus Teodorescu y Rodriguez (2007), calculados con un error aproximado del 5%. Los resultados obtenidos del cálculo del voltaje térmico se observan en la Tab. 4.

Tabla 4. Voltaje térmico calculado para cada panel fotovoltaico.

	Pendiente	ordenada	$R_s(\Omega)$	$V_t(V)$
Panel 1	0,317449	-0,467805	$0,39 \pm 0,02$	0,042877
Panel 2	0,288253	-0,040688	$0,49 \pm 0,03$	0,047219

La cantidad de cifras significativa en el cálculo de cada  $V_t$  se encuentra determinada por el error cometido en el calculo indirecto de cada voltaje térmico. El mismo se calcula por medio de la Ec. (15).

$$\frac{\Delta V_t}{V_t} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta R_s}{R_s} \quad (15)$$

Para el cálculo de  $\Delta a$  se utilizo la Ec. (16) (Taylor, 1997).

$$\Delta a = \sqrt{\frac{N}{\Delta}} \sigma \tag{16}$$

$$\Delta = N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \tag{17}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-2}} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - a x_i - b)^2} \tag{18}$$

En las Ecs. (16)-(18), N indica la cantidad de puntos utilizados en cada regresión lineal. El cálculo de cada Vt con su respectivo error permite expresar el valor medido. En la Tab. 5 se observan los valores de Vt estimados por el algoritmo planteado por Remus Teodorescu y Rodriguez (2007) descriptos en las Tabs. 2 y 3, y el método propuesto en este trabajo.

Tabla 5. Comparación del Voltaje térmico a 1000W/m² y 25°C determinado por los distintos métodos.

	Método Remus Teodorescu	Método propuesto en este trabajo
Panel 1	0,039V	(0,034 ± 0,003)V
Panel 2	0,045V	(0,047 ± 0,003)V

Una vez determinado la magnitud del voltaje térmico, puede calcularse el factor de idealidad del diodo aplicando la Ec. (2). La medida del voltaje térmico se realizó para una temperatura de celda de 25°C, de manera que el factor de idealidad del diodo para el panel1 y el panel2 bajo estas condiciones son 1,323 y 1,829 respectivamente.

## 7. CONCLUSIÓN

En el trabajo se implementó un método que permite el cálculo del voltaje térmico con su error. En las curvas que describen los ensayos se observa una gran concordancia entre la teoría planteada y las simulaciones realizadas. Esto se observa en el comportamiento lineal entre las variables involucradas como indica el cálculo del coeficiente R². Por otro lado, el método permite determinar el Vt en función de magnitudes que pueden medirse de forma sencilla en los ensayos con iluminación y oscuridad, necesiéndose algunos puntos pertenecientes a la curva I-V iluminada en un entorno cercano a la tensión de circuito abierto y la medida de su resistencia serie con su error. El método permite la determinación del Vt de paneles fotovoltaicos con errores cercanos al 7%.

## REFERENCIAS

- Araujo, G.L., SANCHEZ, E., 1982. A New Method for Experimental Determination of the Series Resistance of a Solar Cell . Electron Devices, IEEE Transactions on, 29, 1511-1513.
- Azab M., 2009. Improved Circuit Model of Photovoltaic Array. International Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering 2:3, 185-188.
- Bashahu M., Habyarimana A., 1995. Review and test of methods for determination of the solar cell serie resistance. Renewable Energy 6, 129-138.
- Chan, D.S.H., Phang, J.C.H., 1987. Analytical Methods for the Extraction of Solar-Cell Single- and Double-Diode Model Parameters from I- V Characteristics . Electron Devices, IEEE Transactions on. 34, 286 – 293.
- De Soto, W., Klein S.A., Beckman , W.A., 2006. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance . Solar Energy 80, 78–88.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991. Solar Engineering of Thermal Processes, second ed. John Wiley & Sons Inc., New York.
- El-Adawi, M.K., Al-Nuaim , I.A., 2002. A method to determine the solar cell series resistance from a single I–V. Characteristic curve considering its shunt resistance-ew approach, Vacuum 64, 33–36
- Elshatter, Th.F., Elhagry, M.T., Abou-Elzahab, E.M., Elkousy, A.A.T., 2000. Fuzzy modeling of photovoltaic panel equivalent circuit. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE, 1656 – 1659.
- Gow, J.A., Manning, C.D., 1999. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. Electric Power Applications, IEEE Proceedings, 193– 200.

- Remus Teodorescu, D.S., Rodriguez, P., 2007. PV panel model based on datasheet values. IEEE International Symposium on, 2392-2396.
- Salam, Z., Ishaque, K., Taheri, H., 2010. An improved two-diode photovoltaic (PV) model for PV system. Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, 2010 Joint International Conference on, 1-5.
- Taylor, J.R., 1997. An introduction to error analysis, second de. University Science Books, California.
- Tina, G.M., Scrofani, S., 2008. Electrical and Thermal Model for PV Module Temperature Evaluation . The 14th IEEE Mediterranean, 585-590.
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., Ruppert F., E., 2009. MODELING AND CIRCUIT-BASED SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC ARRAYS . Brazilian Journal of Power Electronics, 14, 35-45.

## **METHOD FOR THE DETERMINATION OF THERMAL VOLTAGE OF PHTOVOLTAIC PANELS UNDER STANDARD CONDITIONS**

**Abstract.** This paper describes a method for determining the thermal voltage of photovoltaic panels and its error. The thermal voltage of a photovoltaic panel is related to the diode ideality factor, as a result, it is important to develop a method which allows its estimation. The method consists in plotting the curve of a photovoltaic panel under lighting condition, and taking into account he information obtained, test the same panel later in the dark. In the darkness test is should impose the same voltages obtained in the experiment with lighting, both under the same temperature. This condition allows to link the measured variables in both tests using a linear relationship, being the slope a function of the thermal voltage. The application of the linear regression method allows the measurement of thermal voltage and its error. Values around 7% were obtained from the taken measures.