

## Representación de un Sistema Fotovoltaico utilizando el Modelo del Autómata Híbrido

CRUZ-Braulio†\*, CONTRERAS-Jannette, PEON-Ricardo y PEREZ-Luis

*Universidad Autónoma de Yucatán - Facultad de Ingeniería*

Recibido Julio 12, 2015; Aceptado Septiembre 10, 2015

### Resumen

En los últimos años se ha desarrollado un marcado interés por la aplicación de las fuentes renovables de energía, entre las cuales destaca la fotovoltaica, por lo tanto cuando se desea emprender un proyecto de instalación para la generación de energía solar, es recomendable contar con plataformas de simulación y modelos que describan y permitan cuantificar la cantidad de energía disponible de un panel fotovoltaico para diferentes condiciones de operación. En este artículo se presenta el modelo de un sistema fotovoltaico a través de un conjunto de ecuaciones obtenidas de una celda solar, a partir de su representación como un circuito eléctrico con un diodo. Posteriormente se utiliza el modelo del autómata híbrido, el cual permite interacciones entre dinámicas continuas y discretas, para representar el comportamiento de la celda solar cuando es sometida a diversos factores. Para el caso presentado el factor que varía con respecto al tiempo es la temperatura que afecta a la curva V-I de la celda solar.

**Energías renovables, sistema fotovoltaico, autómata híbrido, nodos, transiciones.**

### Abstract

In recent years there has been a marked interest in the application of renewable energy sources, among which photovoltaics is the most used, so when you want to execute a project of installation for solar power generation, it is advisable to have simulation platforms and models to describe and to quantify the amount of energy available from a photovoltaic panel for different operating conditions. In this article the model of a photovoltaic system is presented through a set of equations obtained from a solar cell, from its representation as an electrical circuit with a diode. A hybrid automata model, allows interactions between continuous and discrete dynamics, to represent the behavior of the solar cell when subjected to various factor. In the case presented the factor which varies with respect to time is the temperature which affects the VI curve of the solar cell.

**Renewable energy, photovoltaic system, hybrid automata, nodes, transitions**

**Citación:** CRUZ-Braulio, CONTRERAS-Jannette, PEON-Ricardo y PEREZ-Luis. Representación de un Sistema Fotovoltaico utilizando el Modelo del Autómata Híbrido. Revista de Aplicación Científica y Técnica 2015, 1-2: 142-147

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: braulio.cruz@uady.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

En los últimos años se ha desarrollado un marcado interés por la aplicación de las fuentes renovables de energía, entre las cuales destaca la fotovoltaica. Debido a la reducción de los costos de fabricación de paneles solares, inversores y componentes del sistema, dicho interés se incrementado sustancialmente, ya por sus aplicaciones en sistemas aislados, conectados a las redes o formando parte de sistemas híbridos en diferentes procesos y localizaciones geográficas [1].

Actualmente, los procesos de modelado y simulación se han convertido en pilares fundamentales en las técnicas de diseño en las diversas áreas de estudio, incluyendo los sistemas eléctricos y la electrónica industrial. Por tal motivo, cuando se desea emprender un proyecto de instalación para la generación de energía solar, es recomendable contar con plataformas de simulación y modelos que describan y permitan cuantificar la cantidad de energía disponible de un panel fotovoltaico para diferentes condiciones de operación [2].

El término “sistema híbrido” es usado para definir una clase de sistemas con comportamientos definidos por entidades o procesos de distintas características. Estos sistemas contienen típicamente variables o señales que toman valores de manera continua y variables discretas que toman valores dentro de un conjunto finito de posibilidades.

Existen muchas razones para usar modelos híbridos para representar el comportamiento dinámico de tales sistemas.

Una razón importante es la reducción de complejidad del modelo en orden, por ejemplo, en lugar de tener que representar las relaciones dinámicas a partir de un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales de orden superior, se puede representar el mismo sistema por un conjunto de ecuaciones simples (por ejemplo ecuaciones lineales), obteniendo así modelos simples mediante una logística de conmutación entre dichos modelos, usualmente la teoría de grafos; esta es la teoría más común en el modelado físico de fenómenos. Los esfuerzos recientes en la investigación de sistemas híbridos típicamente se centran en el análisis del comportamiento dinámico de los mismos y tienen como meta el diseño de controladores con una estabilidad y funcionamiento garantizados [3].

La mayoría de los procesos se pueden considerar sistemas dinámicos ya que sus salidas dependen de entradas y salidas anteriores. En la mayoría de las industrias existen procesos que pueden ser del tipo continuo, tipo discreto y los que combinan ambos aspectos. Éstos últimos dan lugar a lo que se conoce como sistemas dinámicos híbridos. Durante su operación, siempre será importante el poder realizar un análisis y evaluación del desempeño de los procesos actuales para verificar si éstos cumplen las especificaciones de acuerdo a lo planeado [4].

El modelo el autómata finito es un modelo de base para representar las dinámicas discretas de los sistemas y su interacción con el medio. Como este modelo estaba muy limitado para algunas aplicaciones, se hizo una ampliación del mismo introduciendo la variable de tiempo en los estados discretos.

Aún más, debido a la creciente demanda de modelos más exactos y generales para los diferentes sistemas que tenían en su estructura fenómenos tanto discretos como continuos, se realizó una extensión del autómata finito agregando además del tiempo en los estados discretos, ecuaciones continuas lo que dio lugar al modelo del autómata híbrido [4].

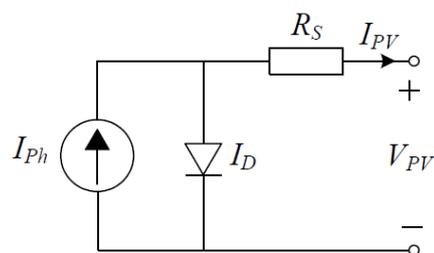
El modelo del autómata híbrido está basado en una representación explícita tanto de las dinámicas continuas del sistema como de las discretas. Las dinámicas continuas se representan por modelos de estados mediante ecuaciones diferenciales que las describen. Las dinámicas discretas se representan mediante el modelo del autómata finito, donde se observa explícitamente la lógica de conmutación del mismo [3].

### Modelo del panel fotovoltaico

Los sistemas fotovoltaicos, o sistemas PV, funcionan por medio del efecto fotoeléctrico, también conocido como efecto fotovoltaico, a través del cual la luz solar se convierte en electricidad sin usar ningún proceso intermedio. Los dispositivos donde se lleva a cabo la transformación de luz solar en electricidad se llaman Generadores Fotovoltaicos y a la unidad mínima en la que se realiza dicho efecto Celdas Solares, que al conectarse en serie y/o paralelo forman los paneles fotovoltaicos.

El comportamiento de la celda solar puede ser descrito en términos de un circuito equivalente como se muestra en la Figura 1, está constituido por un diodo de unión p-n y por una fuente de corriente,  $I_{Ph}$ . Sin embargo, en una celda solar real existen otros efectos, que afectan el comportamiento externo de la misma.

Estos efectos son tomados en cuenta al considerar la resistencia en serie  $R_s$  y, en cierto modelos se añade igual una resistencia en paralelo  $R_p$ , donde la primera resistencia proviene principalmente de la resistividad del emisor n y de la base p, de las resistencias de contacto entre el semiconductor y los contactos metálicos, y de la resistencia de los puntos metálicos que constituyen la grilla de la metalización frontal. La segunda resistencia es esencialmente debida a pérdidas en los bordes y a la presencia de defectos cristalinos y precipitado de impurezas en la zona de la juntura.



**Figura 1** Circuito equivalente de una celda fotovoltaica

Es importante mencionar que el valor de la fuente de corriente es proporcional a las condiciones climáticas en las que se encuentre la celda, es decir, depende de la temperatura de la celda y la irradiancia del sol.

Ahora definiremos las características eléctricas más importantes al momento de modelar una celda solar, las cuales servirán para obtener la curva característica de una celda PV:

**Corriente en circuito cerrado (ISC).**- Es el valor máximo de corriente que la celda puede generar. Es producida bajo condiciones de corto circuito ( $V_{PV} = 0V$ ). En niveles normales de irradiancia solar se puede considerar igual a la fotocorriente  $I_{Ph}$ .

**Voltaje en circuito abierto (VOC).**- Corresponde al valor de voltaje más alto, generado en condiciones de circuito abierto ( $I_{PV} = 0A$ ).

Punto de máxima potencia (PMPP).- Punto de operación (VMPP, IMPP) donde la celda fotovoltaica produce la máxima potencia (PMPP = VMPP\*IMPP).

Analizando el diagrama eléctrico de la celda solar, contemplando la relación de proporcionalidad de la corriente fotogenerada con la temperatura y la irradiancia del sol se obtuvieron las ecuaciones siguientes:

$$V_{oc}(T, G) = \left( \frac{V_{OC,G_0,T_0}}{1 + \beta \cdot \ln\left(\frac{G_0}{G}\right)} \right) \left( \frac{T_0}{T} \right)^{\gamma} \quad (1)$$

$$I_{SC}(G) = I_{SC,G_0,T_0} \left( \frac{G}{G_0} \right)^{\alpha} \quad (2)$$

$$R_s = \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} \cdot \frac{\frac{1}{V_t}(I_{SC,G_0,T_0} - I_{MPP}) \left[ V_{OC,G_0,T_0} + V_t \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{MPP}}{I_{SC,G_0,T_0}}\right) \right] - I_{MPP}}{\frac{1}{V_t}(I_{SC,G_0,T_0} - I_{MPP}) \left[ V_{OC,G_0,T_0} + V_t \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{MPP}}{I_{SC,G_0,T_0}}\right) \right] + I_{MPP}} \quad (3)$$

Para calcular la resistencia en serie (Rs) observamos que depende de los valores de voltaje y corriente VMPP e IMPP, al igual que del voltaje térmico generado en la celda, el cual es calculado con la ecuación 4.

$$V_t = \frac{mNKT}{q} \quad (4)$$

Dónde:

K = 1.8x10<sup>-23</sup> J/K (constante de Boltzmann)

q = 1.6x10<sup>-19</sup> C (carga del electrón)

T = temperatura de la celda en Kelvin

m = 2 (factor de idealización, adquiere este valor cuando la celda es de silicio)

N = número de celdas en serie

$$I_{PV}(T, G) = I_{SC} \left[ 1 - \exp\left( \frac{(V_{PV} - V_{OC} + R_s \cdot I_{PV})}{V_t} \right) \right]$$

Parámetros α, β, γ:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{I_{SC,G_0,T_0}}{I_{SC,G_1,T_0}}\right)}{\ln\left(\frac{G_0}{G_1}\right)}$$

$$\beta = \frac{\left(\frac{V_{OC,G_0,T_0}}{V_{OC,G_1,T_0}}\right) - 1}{\ln\left(\frac{G_0}{G_1}\right)}$$

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{V_{OC,G_0,T_0}}{V_{OC,G_0,T_1}}\right)}{\ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right)} \quad (5)$$

Cabe aclarar que los subíndices 0 y 1 en las variables de temperatura (T) e irradiancia (G) indican los valores medidos en condiciones de trabajo estándar (0) y nominal (1) de la celda, y son proporcionados en las hojas de datos de los fabricantes.

### Modelo del autómata híbrido

Un autómata híbrido es un modelo formal para un sistema dinámico con componentes discretos y continuos como se muestra en la Figura 2. Los nodos de la gráfica (llamados localidades) modelan los estados discretos del sistema y los arcos las transiciones discretas. El estado continuo del sistema es modelado por puntos en Rr y en cada localidad la dinámica continua es representada por condiciones de flujo generalmente bajo la forma de ecuaciones diferenciales. Es obligatorio para cada arco que tenga una localidad como final. Consecuentemente, las localidades están conectadas por arcos. El número de localidades es finito y diferente de cero. El número de arcos también es finito y diferente de cero [4].

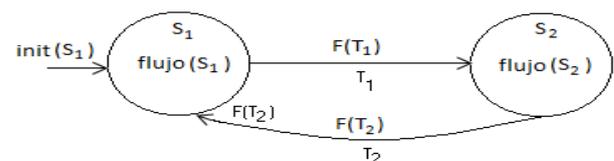


Figura 2 Modelo del autómata híbrido

Un autómata híbrido está definido completamente por  $H = \{X, S, \text{flujo}, E, F, \Sigma, \text{init}\}$  donde [4]:

$X$  (Variables): Representa un conjunto finito ordenado  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_r\}$  de variables reales.

$S$  (Nodos): Es un conjunto finito de  $n$  localidades  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  que representan los estados discretos del sistema.

Flujo (Condiciones de flujo): Una función de flujo etiquetada como  $\text{flujo}(s_i)$  que asigna una condición de flujo a cada localidad  $s_i \in S$ .

$E$  (Transiciones): Conjunto finito  $E$  de saltos discretos llamados transiciones  $T_i$  y representados por arcos.

$F$  (Condiciones de salto): Una función etiquetada como  $F(T_i)$ , que asigna una condición de salto a cada transición  $T_i \in E$ .

init (Condición inicial): Una función etiquetada  $\text{init}(s_i)$  asigna un estado inicial a cada localidad  $s_i \in S$ .

Se integran las ecuaciones del modelo de la celda fotovoltaico con el modelo del autómata híbrido, resultando el modelo presentado en la Figura 3. Donde cada nodo, contiene las ecuaciones antes mencionadas, definiendo la temperatura como una diferencial respecto al tiempo igual a una constante ( $\frac{dT}{dt} = 1$ ) y fijando la irradiancia ( $G$ ) a valores de  $1000 \text{ W/m}^2$  para los nodos 1 y 2, y de  $600 \text{ W/m}^2$  para el nodo 3. De igual manera  $T$  tiene sus valores iniciales en  $25^\circ\text{C}$ ,  $16^\circ\text{C}$  y  $38^\circ\text{C}$ , para cada nodo respectivamente.

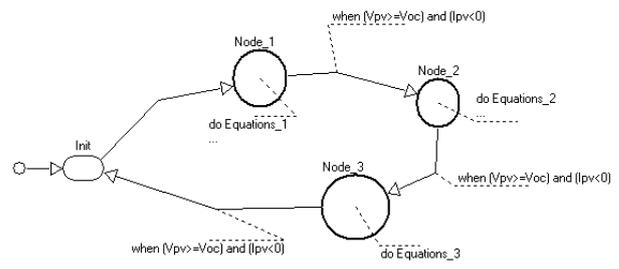


Figura 2 Autómata de una celda solar

Las condiciones de salto para cada nodo se determinan a partir de los requerimientos del comportamiento de la celda fotovoltaica. Los valores utilizados para  $T_0, T_1, G_0$  y  $G_1$  fueron obtenidos de la Tabla 1, cuyos datos hacen referencia al módulo Kyocera KC130GHT – 2.

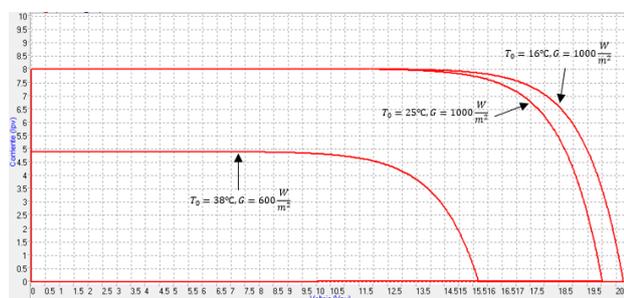
<b><math>G_0 = 1000 \text{ W/m}^2</math> and <math>T_0 = 25^\circ\text{C}</math></b>	
$I_{MPP}$	7.39A
$V_{MPP}$	17.6V
$V_{OC,G_0,T_0}$	21.9V
$I_{SC,G_0,T_0}$	8.02A
<b><math>G_1 = 800 \text{ W/m}^2</math> and <math>T_0 = 25^\circ\text{C}</math></b>	
$V_{OC,G_1,T_0}$	19.9V
$I_{SC,G_1,T_0}$	6.47A
<b><math>G_0 = 1000 \text{ W/m}^2</math> and <math>T_1 = 50^\circ\text{C}</math></b>	
$V_{OC,G_0,T_1}$	19.6V

Tabla 1 Datos del modulo Kyocera KC130GHT - 2

Resultados

En la Gráfica 1 observamos 3 curvas V-I diferentes correspondientes a los nodos o localidades del autómata. Si prestamos atención vemos que en las primeras 2 localidades la irradiancia se mantiene con un valor de  $1000 \text{ W/m}^2$  mientras que la temperatura inicial es la que cambia de  $25^\circ\text{C}$  a  $16^\circ\text{C}$ , donde en cada caso ésta va aumentando gradualmente, ya que como se mencionó anteriormente se definió a la variable temperatura como  $\frac{dT}{dt} = 1$ .

Para el nodo 3, la irradiancia se fijó en  $600 \text{ W/m}^2$  y la temperatura inicial en  $38^\circ\text{C}$ . En este punto se nota el cambio más apreciable de la curva, el cual se refiere a la corriente en corto circuito generada por la celda ( $I_{SC}$ ), pues ésta adquiere un valor mucho menor y efectivamente podemos observar que el nivel de  $I_{SC}$  depende únicamente de la irradiación solar. Ahora bien, los cambios en el punto  $V_{OC}$  resultan de las variaciones en la temperatura de la celda y en la irradiancia. Para las primeras 2 curvas el cambio es mínimo puesto que la irradiancia permanece constante y únicamente las temperaturas varían de  $25^\circ\text{C}$  a  $\sim 45^\circ\text{C}$  para la primera localidad y de  $16^\circ\text{C}$  a  $\sim 32^\circ\text{C}$  para la segunda. En el caso de la tercera localidad el cambio es más notorio debido a que el valor de la irradiancia cambia y la temperatura varía de  $38^\circ\text{C}$  a  $\sim 52^\circ\text{C}$ .



**Gráfica 1** Curva V-I celda solar.  $G= 1000 \text{ W/m}^2$  y  $600 \text{ W/m}^2$

Por último debemos notar que cuando el módulo fotovoltaico tiene una temperatura baja el voltaje en circuito abierto alcanza valores altos si los niveles de irradiancia en los que se compara un módulo con otro son los mismos (*relación nodo 1 y 2 del autómata*). Esto es de entenderse ya que como se sabe las celdas solares están fabricadas de semiconductores, cuya conductividad depende de la temperatura.

## Conclusiones

La utilización de fuentes de energía renovable ha ido en aumento en los últimos años, en especial la fotovoltaica. Utilizando el modelo del autómata híbrido e integrando la dinámica continua obtenida a partir del modelo de la celda solar, se puede simular el comportamiento de la celda ante diferentes factores de operación. Uno de los factores más importantes es la temperatura, ya que de ésta depende que la celda alcance su máxima eficiencia durante su operación; de los resultados obtenidos de la simulación podemos concluir entonces que un sistema fotovoltaico debe tener un sistema de dispersión de calor adecuado para que este se caliente lo menos posible y se genere un mayor voltaje y por ende una mayor potencia. Un caso ideal sería lograr que a una irradiación alta el sistema no se caliente demasiado para así tener una potencia alta.

## Referencias

- Kouta, J.; et al., "Improving the incremental conductance control method of a solar energy conversion system". In: International Conference on Renewable Energy and Power Quality. VI. Santander: [s.n.], 2008, p. 1-4.
- Sukhatme, Suhas P.; Nayak, J. K. (2008). "Solar Energy. Principles of Thermal collection and Storage" 3th Edition. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, Delhi, India.
3. Desphande, A., Gollu, A. y Semenzato, L. "The shift programming language and runtime system for dynamic networks of hybrid automata", PATH Report, 1996.
4. Favela, A. "Hybrid Automata Models in Continuous-Linear Hybrid Systems Analysis". Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Intelligent Control/Intelligent Systems and Semiotics, 1999, pp. 11-16.