

DESARROLLO DE LIBRERÍA PARA LA SIMULACIÓN DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

Andres Danilo Firman (UNNE) - andresfirman@gmail.com

Alexis Raúl González Mayans (UNNE) - raulgonzalezmayans@gmail.com

Manuel Cáceres (GER-UNNE) - ingmanuelcaceres@hotmail.com

Olivio Augusto Bertotto (FACENA UNNE) - bertotto.olivio@gmail.com

LUIS HORACIO VERA (UNNE) - luis.horacio.vera@comunidad.unne.edu.ar

Resumo:

Este trabajo trata sobre el desarrollo de una librería de dispositivos fotovoltaicos (FV) para ser utilizada en la simulación de sistemas de generación. El objetivo es disponer de una herramienta de libre distribución y gratuita, cuya rigurosidad científica y matemática, permitan el estudio detallado de generadores FV y sistemas complejos, que de otro modo resulta complicado de llevar a cabo. Se describen las ecuaciones utilizadas para el desarrollo de la librería, que parten del modelo equivalente eléctrico de un diodo de cinco parámetros, y la manera de implementarla junto con dispositivos electrónicos lineales y no lineales que ya dispone el entorno de simulación elegido. Se comprueba su funcionamiento mediante la simulación y el ajuste de una curva I-V experimental, se evalúan casos de desadaptación eléctrica para un módulo y para un sistema FV autónomo. Como conclusión se establece que la librería es capaz de representar correctamente a un dispositivo FV, en una amplia variedad de casos complejos donde se destaca la practicidad de uso. La misma es puesta online para que pueda ser enriquecida con el aporte de otros investigadores o profesionales en el área.

Palavras-chave: *Energía Solar, Dispositivos fotovoltaicos, Simulación*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados*

DESARROLLO DE LIBRERÍA PARA LA SIMULACIÓN DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

Firman, Andrés D. – afirman@ger-unne.com.ar

González Mayans, Alexis Raúl – rmayans@ger-unne.com.ar

Cáceres, Manuel – mcaceres@ger-unne.com.ar

Bertotto, Olivio A. – obertotto@ger-unne.com.ar

Vera, Luis H. – lvera@ger-unne.com.ar

Universidad Nacional del Nordeste, FaCENA. Grupo en Energías Renovables. Argentina.

Resumen. Este trabajo trata sobre el desarrollo de una librería de dispositivos fotovoltaicos (FV) para ser utilizada en la simulación de sistemas de generación. El objetivo es disponer de una herramienta de libre distribución y gratuita, cuya rigurosidad científica y matemática permitan el estudio detallado de generadores FV y sistemas complejos, que de otro modo resulta complicado de llevar a cabo. Se describen las ecuaciones utilizadas para el desarrollo de la librería, que parten del modelo equivalente eléctrico de un diodo de cinco parámetros, y la manera de implementarla junto con dispositivos electrónicos lineales y no lineales que ya dispone el entorno de simulación elegido. Se comprueba su funcionamiento mediante la simulación y el ajuste de una curva I-V experimental, se evalúan casos de desadaptación eléctrica para un módulo y para un sistema FV autónomo. Como conclusión se establece que la librería es capaz de representar correctamente a un dispositivo FV, en una amplia variedad de casos complejos donde se destaca la practicidad de uso. La misma es puesta online para que pueda ser enriquecida con el aporte de otros investigadores o profesionales en el área.

Palabras-clave: Energía Solar, Dispositivos fotovoltaicos, Simulación.

1. INTRODUCCIÓN

Los dispositivos fotovoltaicos (FV), ya sean celdas, módulos, arreglos o generadores FV, continúan incorporándose en nuestro entorno, de manera de que cada vez resulta más familiar para las personas. No obstante, conocer su funcionamiento preciso, o inferir su punto de polarización, aún más cuando trabaja en conjunto con otros dispositivos eléctricos, como inversores, reguladores de carga o simplemente baterías, se torna complejo y este conocimiento tiende a estar reservado para profesionales e investigadores en el área.

Por otra parte, la generación fotovoltaica puede encontrarse disminuida debido a pérdidas producidas por efecto inadecuado de acoplamiento eléctrico entre módulos o entre celdas que componen el módulo FV. Incluso, presencia de sombras parciales proyectadas sobre la superficie del dispositivo FV disminuyen sustancialmente la potencia entregada.

Otro factor que ocasionan pérdidas de la capacidad de generación son producidas por inadecuado conexionado entre módulos, o por celdas FV con características eléctricas diferentes al resto que componen el módulo FV, o bien, por asociar módulos con distinta potencia nominal. Estas pérdidas se denominan “mismatch losses” o “pérdidas por desadaptación eléctrica” (Chaudhari et al, 2018).

Todo esto, dificulta su análisis o lo torna complejo de resolver. Por lo tanto, el estudio computarizado de sistemas FV ya ha sido abarcado anteriormente en la bibliografía, y en la mayoría de los casos es asistido por herramientas de simulación como ser PSpice, Qucs, Matlab, etc., de manera de correlacionar los efectos cuando interactúan distintos dispositivos eléctricos. Para ello es común la utilización del modelo equivalente eléctrico de la celda FV o del arreglo FV (Bingöl et al, 2018) (Duong et al, 2017) (Zegaoui et al, 2011) (Di Dio et al, 2009).

Por lo tanto, y teniendo en cuenta lo enunciado anteriormente, el objetivo de este trabajo es desarrollar una librería básica de componentes fotovoltaicos (celda y módulo), donde un estudiante, profesional o investigador, pueda simular el comportamiento de un sistema FV completo. Con estas consideraciones, esta librería debe poseer la mayor flexibilidad posible para abarcar al mayor número de personas. Se proyecta que debe funcionar en un entorno multiplataforma y de software libre, que no requiera gran cantidad de recursos informáticos, y a su vez, produzca resultados de calidad para satisfacer las necesidades de cada usuario en particular.

Entre todos los entornos mencionados el “Quite Universal Circuit Simulator (Qucs)” (Qucs, 2019) es un software libre que posee como motor SPICE “Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis”, cuya programación se encuentra orientada a circuitos electrónicos (Brinson y Jahn, 2009), que ha crecido considerablemente en los últimos años impulsado por varios investigadores de distintas universidades (Brinson y Kuznetsov, 2016) (Wang y Roychowdhury, 2016). Además, es gratuito, multiplataforma y de libre distribución, lo que lo torna en una alternativa muy interesante a tener en cuenta.

2. METODOLOGÍA

Para representar el funcionamiento eléctrico de una celda FV o módulo FV, puede utilizarse el modelo equivalente eléctrico de un diodo de cinco parámetros, Ec. (1) (Luque y Hegedus, 2003).

Los componentes eléctricos que intervienen en esta ecuación pueden ser determinados por ajuste paramétrico sobre la curva corriente vs tensión (curva I-V) obtenida experimentalmente, de manera de satisfacer dicha ecuación hasta que la diferencia con el caso experimental se encuentre por debajo de cierto límite preestablecido (Firman et al, 2011).

Para aplicar la ecuación en el caso de una sola celda FV el número de celdas conectadas en serie $ns = 1$, y para el caso de un módulo donde se interconectan diversas cantidades de celdas, que por lo general ellas están todas conectadas eléctricamente en serie, se adecua el valor de ns , por lo que este modelo se puede utilizar tanto para uno como para el otro caso, con las debidas consideraciones.

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{V + I R_s}{m ns V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (1)$$

$$V_t = \frac{k T_c}{q} \quad (2)$$

Donde:

I_L = corriente fotogenerada [A].

I_0 = corriente de saturación inversa del diodo [A].

R_s = resistencia serie [Ω].

m = índice de idealidad del diodo [].

ns = número de celdas conectadas eléctricamente en serie [].

R_p = resistencia paralelo [Ω].

V_t = potencial térmico [V].

k = constante de Boltzmann [J/K].

T_c = temperatura absoluta de celda [K].

q = carga del electrón [C].

El inconveniente de trabajar con la Ec. (1), es que la misma es una ecuación del tipo implícita, en lo que se refiere a la corriente I , además, tanto la I_L como la I_0 no se conocen de antemano o son difíciles de determinar si se parte de datos experimentales como una curva I-V real de un dispositivo FV, por lo cual se deberá trabajar sobre la misma para poder encontrar los valores de estos parámetros.

El modelo equivalente eléctrico definido por la Ec. (1) se indica en la Fig. 1, caracterizado por la corriente fotogenerada I_L , el diodo D (definido por la I_0 y el índice de idealidad del diodo m), la resistencia en paralelo R_p , y la resistencia serie R_s .

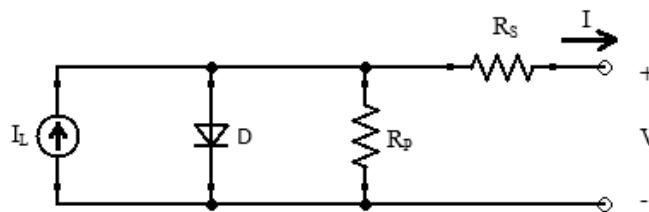


Figura 1 - Modelo eléctrico equivalente de un diodo de cinco parámetros de una celda fotovoltaica.

En el modelo equivalente de la Fig. 1, I_L es la corriente que genera el dispositivo FV cuando recibe radiación solar, el diodo indicado representa la juntura PN del dispositivo, necesaria para producir el campo eléctrico que promueve el efecto fotovoltaico. Para el caso de un diodo ideal o de alta calidad se considera $m = 1$. Este último, va en aumento dependiendo de las diferencias que pueden presentarse en el mismo, en relación a las diferencias constructivas, de dopado o de polarización, asociadas a su vez a la I_0 . R_s es la resistencia que tiene en cuenta las resistencias de paso en la juntura y todas aquellas asociadas a la interconexión eléctrica serie entre celdas. Por último, R_p tiene en cuenta caminos conductivos alternativos dentro de la misma celda, donde se deriva una parte de la corriente fotogenerada.

El circuito equivalente eléctrico de un diodo de cinco parámetros de una celda puede escalarse, como se indicó, de manera de obtener el equivalente eléctrico de un módulo o de un arreglo FV completo, y a partir de él puede utilizarse programas de simulación de circuitos que responden al comportamiento del dispositivo modelado, incluso se puede tener en cuenta a los diodos de bypass o diodos de derivación de cada módulo.

2.1 Desarrollo

Se llevará a cabo el desarrollo de una librería que represente el comportamiento de una celda o arreglo fotovoltaico, utilizando Qucs, el cual es un software de simulación de circuitos electrónicos multiplataforma de uso libre y gratuito, como ha sido descrito en el apartado anterior.

Para ello, se debe trabajar sobre la Ec. (1), de manera de obtener todos los parámetros que la componen, a través de otros valores fácilmente determinables por medio de pruebas experimentales como la tensión de circuito abierto V_{ca} y la corriente de corto circuito I_{cc} , esta última se obtiene interconectando entre si los bornes de salida del dispositivo FV.

Por lo tanto, se comienza por hallar los parámetros necesarios para definir el modelo eléctrico equivalente de un diodo de cinco parámetros, el cual será introducido en un bloque que representa a una celda o un módulo fotovoltaico, cuyos parámetros característicos pueden ser modificados para ajustarse al comportamiento según el dispositivo a ensayar.

A partir del modelo equivalente definido por la Ec. (1), se pueden obtener los parámetros desconocidos de corriente de saturación inversa del diodo I_0 y corriente fotogenerada I_L , con el siguiente procedimiento;

Considerando el estado de circuito abierto en la Ec. (1) ($I = 0$, $V = V_{ca}$), la misma se reduce, por lo que obtenemos la Ec. (3).

$$0 = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{ca}}{m n s V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{ca}}{R_p} \quad (3)$$

Despejando I_0 , y considerando que el valor de la exponencial del segundo término de la Ec. (3) es mucho mayor que 1 (típicamente del orden de $e^{(20)}$ en estas condiciones), obtenemos la Ec. (4), que corresponde a la corriente de saturación inversa del diodo.

$$I_0 = \left(I_L - \frac{V_{ca}}{R_p} \right) e^{\left(\frac{-V_{ca}}{m n s V_t} \right)} \quad (4)$$

La corriente fotogenerada I_L , se puede hallar partiendo de la Ec. (1), en condiciones de cortocircuito. En tales condiciones $I = I_{cc}$ y $V = 0$, la corriente que circula a través del diodo se anula debido a los pequeños valores de R_s , que en condiciones de cortocircuito la caída de tensión a través de ella no supera la tensión necesaria para que el diodo conduzca corriente (Fig. 1). En tales condiciones $I_L = I_{cc} + I R_p$. Con estas consideraciones la corriente fotogenerada I_L se obtiene como indica la Ec. (5).

$$I_L = I_{cc} + \frac{I_{cc} R_s}{R_p} \quad (5)$$

Finalmente, reemplazando la Ec. (5) en la Ec. (4) se obtiene la expresión final correspondiente a la corriente de saturación inversa del diodo, independiente de la corriente fotogenerada (Ec. (6)). Esta expresión es la utilizada para definir el modelo equivalente eléctrico en Qucs, estableciendo uno de los parámetros necesarios y más importantes en la caracterización del diodo.

$$I_0 = \left[\frac{I_{cc}(R_s + R_p) - V_{ca}}{R_p} \right] e^{\left(\frac{-V_{ca}}{m n s V_t} \right)} \quad (6)$$

2.2 Implementación

Aplicando el modelo equivalente eléctrico de una celda fotovoltaica de la Ec. (1), con las ecuaciones Ec. (5) y Ec. (6), deducidas en párrafos anteriores, se procede a crear una librería de dispositivos fotovoltaicos en Qucs, utilizando los componentes lineales y no lineales disponibles en el software mencionado. El modelo equivalente eléctrico (Fig. 2.a) es representado como un único bloque denominado MOD1, cuyos parámetros son configurables (Fig. 2.b), definiendo de esta manera un bloque funcional que permite así estudiar su comportamiento dentro del entorno. Con la misma metodología se definió el bloque de celda FV, con valores característicos. Los valores presentes en MOD1 (Fig. 2.b), corresponden a valores típicos de un módulo de 36 células.

En la Fig. 2.b se muestra el componente creado, que representa a un módulo fotovoltaico cuyos parámetros de entrada son el índice de idealidad del diodo m , la tensión de circuito abierto V_{oc} , la corriente de cortocircuito I_{cc} , las resistencias en serie y paralelo del modelo R_s y R_p respectivamente, el número de celdas conectadas en serie ns y el potencial térmico del diodo V_t , todas ellas se introducen en unidades del SI.

El modelo de módulo fotovoltaico creado a través de las librerías, posee como ventaja que sus parámetros son configurables, además de la simulación, permitiendo emular condiciones de trabajo de una celda, un módulo o arreglo

fotovoltaico, ya sea en condiciones normales de generación o en condiciones de sombreado, desadaptación, falla, etc. Esto permite al investigador simular casos particulares de funcionamiento, como así también, pronosticar que sucede en situaciones de malfuncionamiento.

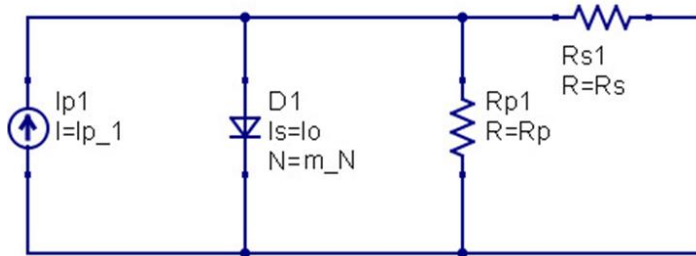
Equation

Eqn1

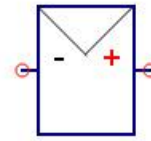
$$I_{p_1} = I_{cc} * (R_s / R_p + 1)$$

$$I_o = ((I_{cc} * (R_s + R_p) - V_{oc}) / R_p) * \exp((V_{oc} - 1) / (m * n_s * V_t))$$

$$m_N = m * n_s$$



(a)



MOD1

m=1.2

Voc=21 V

Icc=3 A

Rs=0.3 Ohm

Rp=250 Ohm

ns=36

Vt=0.0257 V

(b)

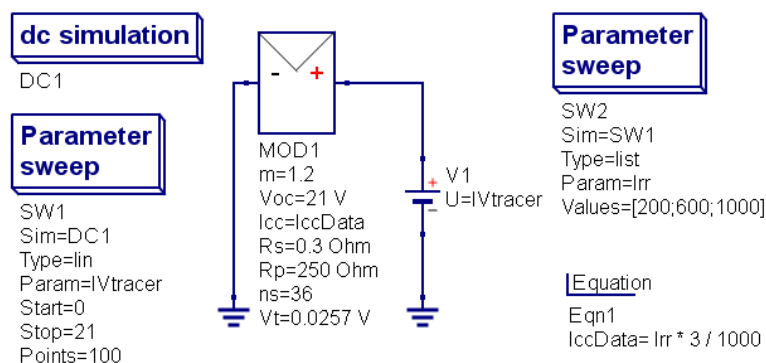
Figura 2 - (a) Modelo equivalente eléctrico de un diodo de cinco parámetros creado a través de las librerías de componentes disponibles. (b) Componente módulo fotovoltaico creado, con parámetros configurables.

3. RESULTADOS

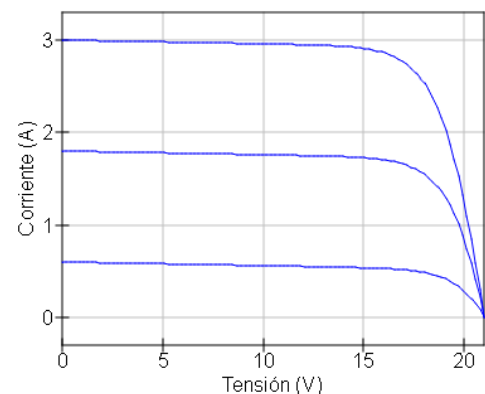
Con el objetivo de verificar el funcionamiento de la librería, se procede en primera instancia a trazar la curva I-V del modelo. Para ello se realiza una simulación paramétrica en distintos valores de una fuente de corriente continua denominada *IVtracer*, actuando la misma como un trazador de curvas I-V.

3.1 Trazado de la curva I-V

En la Fig. 3 se presenta el funcionamiento de un módulo fotovoltaico de 36 celdas, donde se define por defecto, una corriente de cortocircuito en condiciones estándar de 3.0 A. En particular, en la Fig. 3.a, se muestra el bloque de la librería insertado en el entorno del software, junto con las configuraciones de simulación visibles en “*Parameter sweep SW1* y *SW2*”, realizadas en simulación de corriente continua (*dc simulation*), donde *parameter sweep SW1* permite la variación de la fuente *IVtracer* desde 0 a 21 V, es decir hasta el voltaje de circuito abierto. A su vez, mediante la “*Equation*” Eqn1, se calcula como varía la I_{cc} según los cambios de irradiancia planteados en los parámetros de barrido SW2, para una irradiancia (I_{rr}), $I_{rr} = 200, 600$ y 1000 W/m^2 , por lo tanto, se calcula I_{ccData} igual a I_{rr} por la *corriente estándar* = 3.0 A sobre la *Irradiancia estándar* = 1000 W/m^2 , que es la entrada efectiva de corriente de corto circuito del componente MOD1.



(a)



(b)

Figura 3 - (a) Modelo de simulación de un módulo FV, donde se aprecian los parámetros de simulación y la fuente destinada a producir el barrido de tensión para obtener las curvas I-V. (b) Curvas I-V obtenidas del dispositivo modelado a distintas irradiancias (200, 600 y 1000 W/m^2).

De esta manera, por medio de la simulación paramétrica de la fuente de tensión variable conectada a la salida del modelo (*IVtracer*), se logra la excursión completa de esta, desde el estado de corto circuito (tensión igual a 0 V) hasta el

estado de circuito abierto (tensión igual a V_{ca}) actuando como un trazador de curvas. Y haciendo uso de las herramientas gráficas del entorno se obtienen las curvas I-V correspondientes, permitiendo visualizar los resultados. En la Fig. 3.b, se aprecian los perfiles típicos de las curvas I-V de un dispositivo FV para cada irradiancia propuesta, logrando por consiguiente, verificar el funcionamiento del componente de la librería creada.

3.2 Representación de un caso real

En la Fig. 4 se realiza una simulación de manera de comprobar como esta ajusta con respecto a una curva I-V real experimental obtenida de un módulo FV.

Se puede verificar el correcto ajuste del componente creado con una curva I-V experimental realizada con instrumentos Agilent 34410A trabajando de manera sincronizada y en simultaneo. El módulo ensayado es de 60 celdas de 270 Wp y de tecnología policristalina. En la Fig. 4.a, se aprecian los parámetros necesarios para especificar dicho módulo en el componente creado, los cuales I_{cc} y V_{ca} se obtienen directamente de la curva I-V experimental.

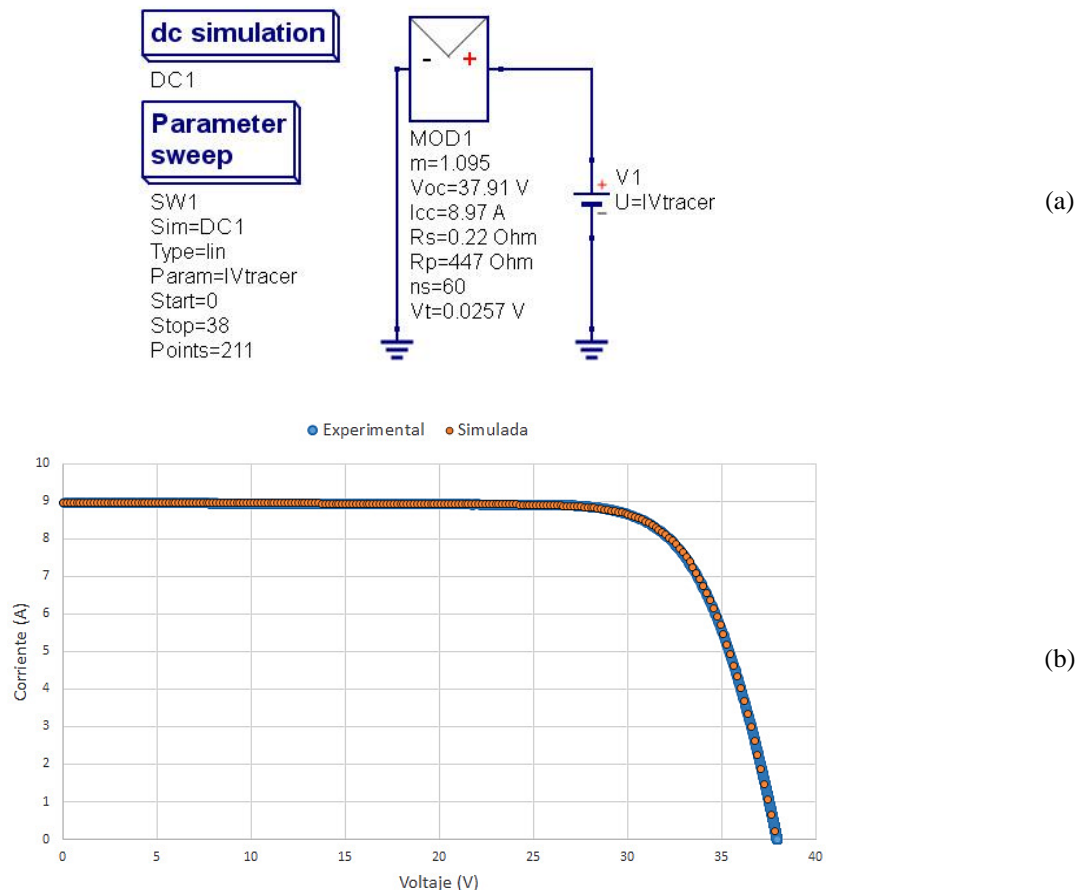


Figura 4 - (a) Módulo de 270 Wp simulado. (b) Contraste de curvas I-V obtenidas experimentalmente y simulada utilizando el modelo creado.

Se puede observar en la Fig. 4.b, que la curva I-V del módulo simulado y la curva experimental se ajustan adecuadamente. Demostrando de esta forma la correcta funcionalidad de la librería desarrollada para simular dispositivos reales.

3.3 Simulación de módulo FV bajo efecto de sombras

Un caso muy importante de cubrir es el de un módulo (o arreglo) que presenta sombras parciales proyectadas en su superficie. La Fig. 5.a, muestra cómo se lleva a cabo el modelado de un módulo de 36 celdas. En este se modela, además, dos diodos de bypass y se considera que una de sus celdas se encuentra parcialmente sombreada, entregando el 50% menos de su corriente de cortocircuito.

Para modelar este módulo se lo dividió en dos bloques de 18 celdas, lo que permite agregar fácilmente los diodos de *bypass*. Uno de ellos (MOD1) junto con su diodo de *bypass* por un lado y por el otro se dividió a su vez en uno de 17 celdas idénticas a las anteriores (MOD2), más una celda individual que es la que se considera que se encuentra sombreada;

(CELL1) más el diodo correspondiente a esta mitad. De esta manera se muestra en detalle cómo se procede a realizar una simulación de un dispositivo FV.

En el modelo se toma en cuenta los valores adecuados de V_{ca} , R_p , R_s y n_s que le corresponden a cada parte. En la celda sombreada se tuvo en cuenta el aumento que experimenta R_p cuando se encuentra parcialmente sombreada según lo reportado por Firman et al, 2013, trabajo predecesor del presente.

Una ventaja importante de simular dispositivos FV en un entorno desarrollado para circuitos, es aprovechar las librerías de componentes de que dispone, como por ejemplo en este caso los diodos de bypass, que, de otra manera, haciendo un estudio teórico a partir de la Ec. (1), resultaría complicado y demandaría mucho tiempo. En la Fig. 5.b, se aprecia la curva I-V y la curva P-V (potencia vs tensión) de dicho módulo, donde puede observarse la doble meseta que ocurre en este tipo de casos, dando lugar a pérdidas por acoplamiento eléctrico (*mismatch*). Además, se aprecia el funcionamiento de los diodos agregados, y por lo tanto la caída en la potencia máxima que experimentan este tipo de dispositivos, donde solo se encuentra sombreado alrededor del 2% de su superficie total, mientras que su potencia se ve drásticamente afectada.

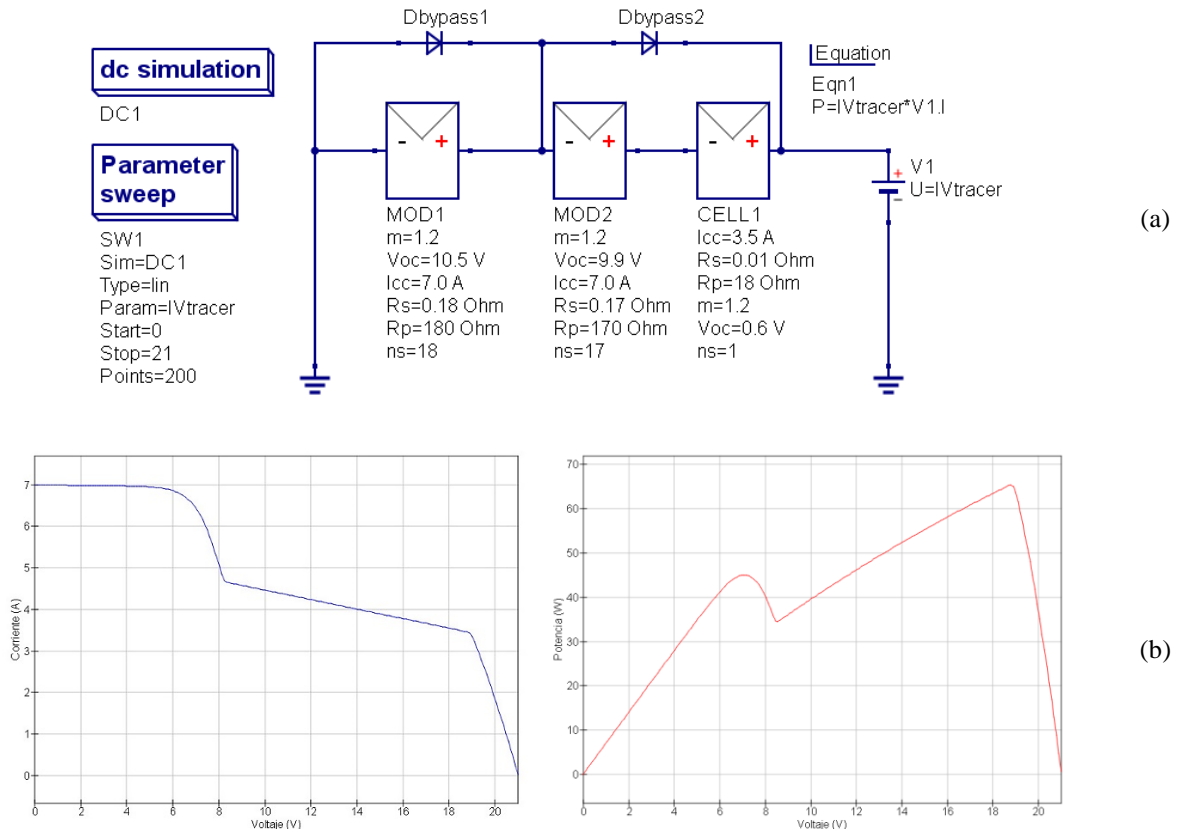


Figura 5 - (a) Representación de un módulo de 36 celdas con sus diodos de bypass y una celda sombreada (b) Curva I-V y curva P-V obtenida del dispositivo modelado.

3.4 Simulación de sistema FV autónomo

Otro caso importante de estudiar es el mostrado en la Fig. 6, donde se tiene un sistema fotovoltaico del tipo autónomo conectado a una carga. Este caso, si bien es simple, es difícil de calcular y de proyectar. Dicho sistema está constituido por cuatro módulos, con dos series agrupadas en paralelo. El banco de baterías de 24 V está compuesto por dos baterías en serie, cada una con sus respectivas resistencias internas.

Para tal sistema se han simulado dos situaciones, en la primera se tiene el arreglo fotovoltaico en condiciones normales de generación (Fig. 6.a), mientras que la segunda se simula el hecho de que uno de los módulos del arreglo entrega una corriente menor, en este caso el módulo MOD2 (Fig. 6.b). Esta situación podría suceder porque dicho módulo se encuentra sombreado parcialmente o porque presenta alguna falla eléctrica. Este efecto es inducido proporcionando una corriente de cortocircuito I_{cc} menor que las demás. Nótese como esta desadaptación produce pérdidas de potencia, como se aprecia en las tablas mostradas en la Fig. 6, donde dichas tablas son propias del entorno de simulación. En este caso de desadaptación, la potencia P entregada por el generador FV disminuye en un 46%, para una arreglo FV donde uno de los módulos que componen una rama entrega una I_{cc} de solo 0.5 A. Obsérvese como se modifica el punto de polarización al cambiar la corriente, debido a las resistencias internas consideradas. Estas pérdidas resultan aún más notorias cuando observamos las curvas I-V presentadas en la Fig. 7, donde se comparan las curvas I-V obtenidas en condiciones normales y en condiciones de desadaptación eléctrica para los arreglos, donde se visualiza que la potencia

que es capaz de entregar se ve afectada. Un estudio más complejo puede llevarse a cabo si se realiza una simulación paramétrica, considerando el cambio la I_{cc} con la irradiancia a lo largo de un día o incluso incorporar algún tipo de seguimiento del punto de máxima potencia. También en las tablas se aprecian las lecturas de los instrumentos disponibles en el entorno, conectados, indicando la I_{genFV} , la I_{carga} y la V_{carga} , definiendo la potencia P en la carga (Lámpara) como $P = I_{genFV} \cdot V_{carga}$, realizada en el bloque *Equation*.

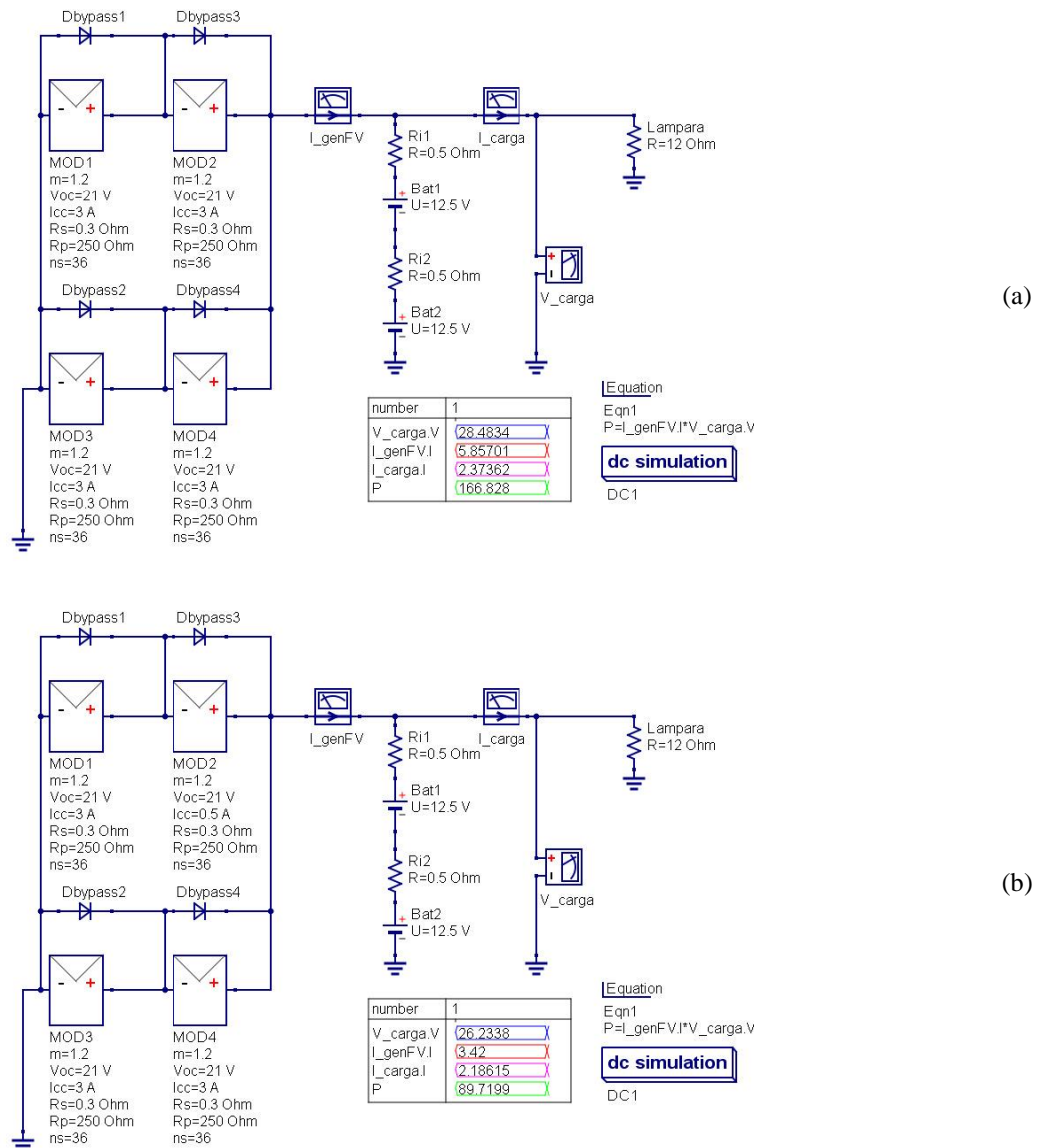


Figura 6 - (a) Generador FV en condiciones normales de operación. (b) Generador FV en condiciones de desadaptación eléctrica.

En los resultados mostrados se destaca entonces, la importante ventaja que subyace a la definición y creación de la librería de dispositivos FV. La cuál permite de manera sencilla y práctica simular y estudiar diversos tipos de casos con excelente grado de detalle, potenciado por los componentes, herramientas gráficas y para definir ecuaciones (*equation*) que ya dispone el programa. La misma es desarrollada en un entorno libre de uso y multiplataforma. Siendo esto la innovación que presenta el artículo, ya que no se encuentran las funcionalidades detalladas fácilmente disponibles y al alcance de estudiantes investigadores y profesionales en el área. Lo que favorece que el intercambio de conocimientos y la posibilidad de interactuar y seguir mejorando las capacidades de la librería en base de manera cooperativa.

La librería descrita puede ser descargada de manera libre desde <http://bit.do/libpvdevices>.

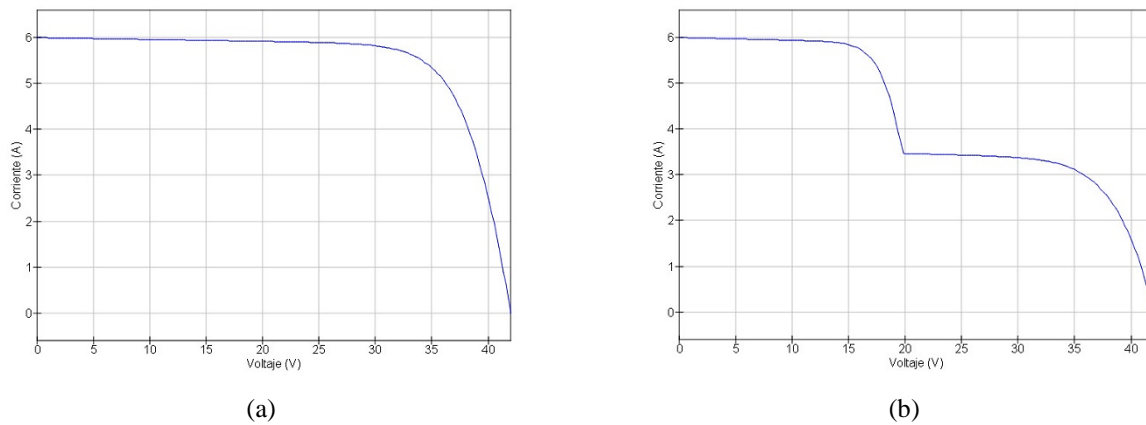


Figura 7 - (a) Curva I-V simulada del arreglo fotovoltaico de la Figura 6.a en funcionamiento correcto. (b) Curva I-V simulada del arreglo fotovoltaico de la Figura 6.b, que presenta el caso de desadaptación eléctrica.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolla una metodología útil para simular y analizar el comportamiento de módulos o arreglos fotovoltaicos tanto en condiciones normales de generación como en condiciones de desadaptación eléctrica y se demuestran paso a paso la metodología de desarrollo y ecuaciones utilizadas para la creación de la misma.

Se utiliza un software libre de código abierto, sin restricciones, multiplataforma, lo que facilita compartir datos, siendo esta una alternativa eficaz para la simulación de celdas, módulos o sistemas FV con respecto a otros programas cerrados o de elevado costo o que requieran elevada carga computacional.

Esta metodología se comprobó en base a la reproducción obtenida con curvas I-V simuladas sobre curvas I-V experimentales obtenidas para un módulo FV en condiciones normales de funcionamiento, partiendo del modelo equivalente eléctrico, para luego analizar lo que sucede en el caso de sombreado de una celda FV y en el caso de desadaptación cuando interactúan módulos de distinta capacidad de generación en un sistema FV autónomo completo. Se indican las maneras de llevar a cabo las simulaciones y los trazados de curvas I-V, las cuales pueden servir como guía o punto de partida para la correcta configuración de una simulación en particular.

La librería se desarrolló satisfactoriamente, siendo esta la innovación que presenta el artículo, ya que se pone al alcance de estudiantes investigadores y profesionales en el área, una herramienta capaz de realizar simulaciones, rigurosas y apoyadas científicamente, que produce resultados coherentes y satisfactorios.

La librería desarrollada se pone a disposición para el uso y la contribución cooperativa en el siguiente link; <http://bit.do/libpvdevices>.

REFERENCIAS

- Bingöl, O., y Özkaya, B. (2018). Analysis and comparison of different PV array configurations under partial shading conditions. *Solar Energy*, 160, 336-343.
- IRAM 210013-2: (1998). Módulos fotovoltaicos. Características eléctricas en condiciones normalizadas.
- Brinson, M. E., y Jahn, S. (2009). Qucs: A GPL software package for circuit simulation, compact device modelling and circuit macromodelling from DC to RF and beyond. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 22(4), 297-319.
- Brinson, M., y Kuznetsov, V. (2016). Qucs-0.0. 19S: A new open-source circuit simulator and its application for hardware design. In *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)* (pp. 1-5). IEEE.
- Celik A., Acikgoz N., (2007). Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models, *Applied Energy* 84 pag. 1–15.
- Chaudhari, C., Kimball, G. M., Hickey, R., y Bourne, B. (2018, June). Quantification of System-Level Mismatch Losses using PVMismatch. In *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC y 34th EU PVSEC)* (pp. 3626-3629). IEEE.
- Di Dio V., La Cascia, D., Miceli R., Rando C. (2009). A Mathematical Model to Determine the Electrical Energy Production in Photovoltaic Fields Under Mismatch Effect. IEEE.
- Duong, M. Q., Sava, G. N., Ionescu, G., Necula, H., Leva, S., y Mussetta, M. (2017, June). Optimal bypass diode configuration for PV arrays under shading influence. In *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/IyCPS Europe)* (pp. 1-5). IEEE.
- Firman A., Toranzos V., Busso A., Cadena C., Vera L. (2011). Determinación del punto de trabajo de sistemas fotovoltaicos conectados a red: Método simplificado de traslación punto a punto a condiciones estándar de medida. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 15. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.

- Firman A., Toranzos V, Busso A, Vera L, de la Casa J. (2013). Qualitative analysis of electrical mismatch losses in photovoltaic devices. EUPVSEC, Congreso Europeo de fotovoltaica, París Francia 2013. ISBN: 3-936338-33-7. pp 3212 – 3215.
- Luque A. y Hegedus S. (2003). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley y Sons, ISBN 0-471-49196-9, pag: 949-953.
- Qucs (2019). <http://qucs.sourceforge.net/> disponible on-line 01/12/2019.
- Wang, T., y Roychowdhury, J. (2016). Multiphysics modelling and simulation in Berkeley MAPP. In 2016 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO) (pp. 1-3). IEEE.
- Zegaoui A., Petit P., Aillerie M., Sawicki J., Belarbi A., Krachai M., Charles J., (2011). Photovoltaic Cell/Panel/Array Characterizations and Modeling Considering Both Reverse and Direct Modes. Energy Procedia 6 pag. 695–703.

DEVELOPMENT OF A LIBRARY FOR PHOTOVOLTAIC DEVICES SIMULATION

Abstract. *The goal of this paper is to develop a photovoltaic devices library to be used in simulation of generation systems. The main objective is to have a free distribution tool, with acceptable scientific and mathematical rigor. Allowing detailed study of PV generators and complex systems that otherwise can be difficult to carry out. The equations used in the developed library are described. These starts from the equivalent electric five-parameter diode model and with linear and non-linear electronic devices available in the simulation environment the library is created. Its operation is checked by simulation and fitting of an experimental I-V curve. Further in cases of electrical mismatch between cells of a module and different simulations of complex PV system are evaluated. As conclusion we established, that the library is able to correctly represent a PV device, in cases of partial shadows and electrical mismatches in complex systems where the simplicity of use is highlighted. This library is put in online so that it can be improved with the contribution of other researchers or professionals in the area.*

Key words: *Solar energy, photovoltaic devices, simulation.*