

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN PANEL SOLAR

Daza Salas María Carolina¹, Sierra Aguilar Jorge Esteban².

Universidad Tecnológica de Bolívar, Facultad de Ingeniería
[1mariacarolina.daza@outlook.es](mailto:mariacarolina.daza@outlook.es) [2georgeeteban01@hotmail.com](mailto:georgeeteban01@hotmail.com)

Resumen:

El objetivo general de este primer avance es entender el principio de funcionamiento de los paneles solares y analizar la interacción de todos los componentes involucrados. También el método investigativo utilizado para el estado del arte de los paneles ayudó analizar la incidencia entre las variables de entrada y salida como es, la irradiación, temperatura, voltaje, corriente y la potencia. A partir de esto se pretende establecer un modelo matemático que adapte el desempeño de un panel para posteriormente desarrollarse en la aplicación Modélica.

Palabras claves: Panel solar, voltaje, corriente, temperatura, potencia, modelo.

Abstract

The general objective of this first advance is to understand the operating principle of solar panels and analyze the interaction of all the components involved. The investigative method used for the state of the art of the panels also helped analyze the incidence between the input and output variables such as irradiation, temperature, voltage, current and power. From this it is tried to establish a mathematical model that adapts the performance of a panel to later develop in the model application.

Keywords: Solar panel, voltage, current, temperature, power, model.

1. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables son fuentes de energía inagotable, y se le consideran limpias por que las emisiones de contaminantes y gases altamente tóxicos son insignificantes para las energías convencionales. El desarrollo de las nuevas tecnologías ha marcado un gran interés en la aplicación de este tipo de energías; más específicamente en la de paneles solares. Una de las maneras de aprovechar este recurso es mediante la conversión de radiación solar en energía.

En la actualidad los procesos de modelado y simulación se han convertido en pilares fundamentales en la técnica de diseños de las diversas áreas de estudio, incluyendo los sistemas eléctricos y la electrónica industrial¹.

La importancia de este trabajo investigativo radica en establecer un modelo matemático adaptado a un panel solar para desarrollarlo en la aplicación modélica, inicialmente en este primer

avance se dará un enfoque al estado del arte de estos sistemas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 La energía

El concepto de la energía suele referenciar a una propiedad asociada a los objetos y se manifiesta en las transformaciones que ocurren en la naturaleza. La energía puede ser convertida a otras formas diferentes, puede ser renovable y no renovable. En el caso de las no renovables estas cada vez que se consumen se transforman en otra, por ejemplo: un barril de gasolina que después de se vuelve energía mecánica. Las renovables son las que utilizamos y simplemente se renuevan como su nombre lo indica, un ejemplo sería: la fuerza del viento, el calor y el sol.

2.1.2 Energía eléctrica:

Una de las formas más simple en que se manifiesta la energía es por medio de la electricidad. Es causada por el movimiento de las cargas eléctricas en el interior de los materiales conductores.

Existen distintos tipos de energía como son: eólica, geotérmica, hidráulica, mareomotriz, biomasa, solar, entre otras. En esta última se enfocará esta investigación.

2.1.3 Energía solar

La energía solar constituye la principal fuente vida en la tierra, dirige ciclos biofísicos, geofísicos y químicos que mantienen la vida en el planeta. Se considera una fuente de energía renovable y podemos encontrar su uso en los sistemas solares fotovoltaico que consisten en un conjunto de elementos, denominado

células solares o células fotovoltaicas, dispuestos en paneles, que transforman directamente la energía solar en energía eléctrica².

2.2 Radiación solar

La radiación solar es la cantidad de energía que llega del sol, en forma de ondas electromagnéticas de diversas frecuencias. En función de cómo recibe la radiación solar los objetos situados en la superficie terrestre, se pueden identificar los siguientes tipos de radiación: directa (llega directamente del sol), difusa (parte de la radiación es reflejada por las nubes) y global (Es la suma de las tres radiaciones)³.

La gran parte de la energía que disponemos proviene del sol, su luz y el calor son el fundamento de numerosas reacciones químicas para el desarrollo de los organismos y la naturaleza. El sol una esfera de gas caliente que llega a mas de 20 millones de grados Kelvin debido a las reacciones de fusión nuclear en su núcleo, que convierten el hidrogeno en helio.⁴



Imagen 1. El sol.

Fuente: <https://www.lagranepoca.com/news/ciencia-y-tecnologia/noticias/152763-el-sol-presenta-ruidos-anomalous-desde-hace-una-decada.html>

El sol emite ondas electromagnéticas, desde los rayos gamma a las ondas de radio.

Por medio de nuestros ojos vemos sólo

las longitudes de onda en el rango visible entre 400 y 800 nm, pero cuando se trata de las longitudes de onda más cortas o más largas, tenemos que utilizar dispositivos especializados.

2.3 Efecto Fotovoltaico

El punto de partida del efecto fotovoltaico se le atribuye a Alexandre Edmon Becquerel, físico francés (París 1820 - París 1891) en el año de 1839, en un experimento observó el incremento de corriente que causa la exposición a la luz de uno de los electrodos, cuando se iluminaban en una solución electrolítica. En 1833 se construye la primera célula fotovoltaica Su autor fue Charles Fritts, quien recubrió una muestra de selenio semiconductor con un pan de oro para formar el empalme, presentaba una eficiencia de sólo un 1%. En 1905 Albert Einstein dio la explicación teórica del efecto fotoeléctrico. Russell Ohl patentó la célula solar moderna en el año 1946, aunque Sven Ason Berglund había patentado, con anterioridad, un método que trataba de incrementar la capacidad de las células fotosensibles. En los años 50 la investigación de los sistemas fotovoltaicos tomo un auge significativo con el suministro de electricidad a los satélites mediante células fotovoltaicas, en los que la energía provenía de la captación de la luz solar, siendo un desarrollo crucial que estimulo la investigación de esta forma bajaron los costos y en los 80 se utiliza como una fuente de energía popular para pequeños aparatos eléctricos con cargas de pequeñas baterías y la mejora de los paneles solares.

Las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica están basadas en el aprovechamiento del efecto fotovoltaico

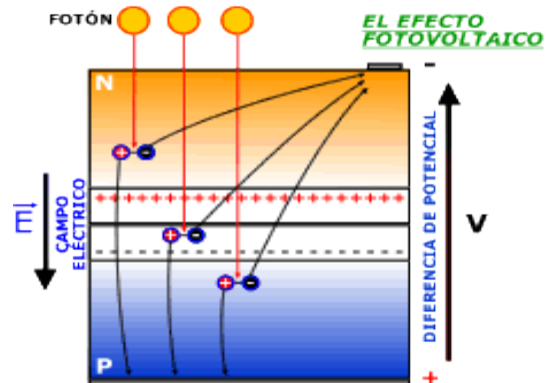


Imagen 2. Efecto fotovoltaico

Fuente:

https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_03.htm

su funcionamiento se basa en la capacidad de transmitir la energía de los fotones de la radiación solar a los electrones de valencia de los materiales semiconductores, de manera que estos electrones rompen su enlace que anteriormente los tenía ligado a un átomo. Por cada enlace que se rompe queda un electrón y un hueco (falta de electrón en un enlace roto) para circular dentro del semiconductor. El movimiento de los electrones y huecos en sentidos opuestos genera una corriente eléctrica en el semiconductor la cual puede circular por un circuito externo y liberar la energía cedida por los fotones para crear los pares electrón-hueco. El campo eléctrico necesario, se consigue con la unión de dos semiconductores de diferente dopaje, un semiconductor tipo P (exceso de huecos) y otro tipo N (exceso de electrones). Que al unirlos crea el campo eléctrico E .⁵

2.4 Principio de funcionamiento de la tecnología solar fotovoltaica.

La luz generada por el sol o por un foco incandescente o fluorescente, forma un conjunto de radiaciones electromagnéticas, se agrupan dentro de un rango llamado,

espectro luminoso. La intensidad de la radiación luminosa varía con la frecuencia. El factor principal de esta tecnología fotovoltaica es el sol, es necesario saber que sucede después de que la energía solar viaja en el espacio y de qué forma alcanza la órbita terrestre.

Los sistemas solares fotovoltaicos son conjuntos de componentes, que cumplen una función específica, usando como fuente la energía solar, entre los componentes se destacan:

- Módulos fotovoltaicos.
- Banco de batería.
- Controlador de carga.

El principal componente de este sistema es el módulo fotovoltaico, a su vez compuesto por células capaces de transformar la energía luminosa incidente en energía eléctrica de corriente continua. Una celda solar consta de varias capas de materiales semiconductores con diferentes propiedades electrónicas. En una celda típica, la mayor parte del material es silicio dopado con una pequeña cantidad de boro para darle un carácter positivo.

Una capa delgada en el frente de la celda es dopada con fósforo para darle un carácter negativo. La interfaz entre las dos capas contiene un campo eléctrico llamado unión.

Algunos de los fotones, que provienen de la radiación solar, impactan sobre la primera superficie del panel, penetrando en este y siendo absorbidos por materiales semiconductores.

Los electrones, subpartículas atómicas que forman parte del exterior de los átomos, y que se alojan en orbitales de energía cuantizada, son golpeados por los fotones liberándose de los átomos a los que estaban confinados originalmente. Esto les permite, posteriormente, circular a través del material y producir electricidad. Las cargas positivas complementarias que se

crean en los átomos que pierden los electrones, se denominan huecos y fluyen en el sentido opuesto al de los electrones, en el panel solar⁶. Las células fotovoltaicas que se ofrecen en el mercado actual utilizan dos tipos de materiales semiconductores. Uno tiene una estructura cristalina uniforme, el otro una estructura policristalina. El tipo cristalino requiere un elaborado proceso de manufactura, que insume enormes cantidades de energía eléctrica, incrementando substancialmente el costo del material semiconductor. La versión policristalina se obtiene fundiendo el material semiconductor, el que es vertido en moldes rectangulares. Su estructura cristalina no es uniforme, de ahí el nombre de poli (muchos) y cristalino (cristales). Los dos tipos pueden ser identificados a simple vista, ya que la estructura cristalina provee una superficie de brillo uniforme, mientras que la policristalina muestra zonas de brillo diferente⁷.

Aunque un sistema fotovoltaico podría estar formado sencillamente por un módulo y un consumo, la mayoría de los sistemas fotovoltaicos son diseñados para suministrar energía cada vez que se necesite y, por consiguiente, deben incluir baterías para almacenar la energía generada por los módulos fotovoltaicos. Los sistemas con baterías requieren dispositivos electrónicos para regular su carga o limitar su descarga.

Dado que los módulos fotovoltaicos y las baterías son inherentemente dispositivos de corriente continua, los sistemas de mayor tamaño suelen incluir inversores de CC/CA para suministrar corriente alterna con tensiones y frecuencias normales de uso domiciliario o industrial. Esto permite utilizar aparatos electrodomésticos ordinarios en el sistema. De lo contrario, deben usarse aparatos especiales de CC (generalmente de las industrias de

vehículos de recreo o marítima). Desde el punto de vista eléctrico, se requieren dispositivos protectores, tales como diodos, fusibles, interruptores de circuito, conmutadores de seguridad y puestas a tierra. En general, los sistemas fotovoltaicos también requieren estructuras de montaje para soportar y elevar los módulos fotovoltaicos y elementos de interconexión para conectar entre sí todos los componentes⁸.

El funcionamiento de un panel solar esta formado por un conjunto de elementos que se detallan en los siguientes encisos.

2.4.1 Célula solar estructura

Una célula solar es un dispositivo capaz de convertir la energía proveniente de la radiación solar en energía eléctrica. La gran mayoría de las células solares que actualmente están disponibles son de Silicio mono o policristalino. Típicamente, genera un voltaje de entre 0.5 y 0.8 V dependiendo del semiconductor utilizado y la tecnología con la que fue fabricado⁹. Un panel solar es el conjunto de un determinado número de celdas solares (entre 36 y 72) conectadas en serie-paralelo y montadas sobre una placa metálica encapsulada por un aislante térmico. Un arreglo fotovoltaico es el conjunto de un determinado número de paneles solares conectados en serie-paralelo para la generación de una cantidad determinada de energía^{9,10}.

Cuando se conecta una célula solar a una carga y esta se encuentra iluminada, se produce una tensión circulando corriente en los extremos de la carga.

Cuando se iluminan las células solares conectados a una carga externa, funcionan como generador de energía y genera unos valores de corriente y tensión que son variables en función de la temperatura

e irradiancia en ese momento y del punto de trabajo que impone la carga.

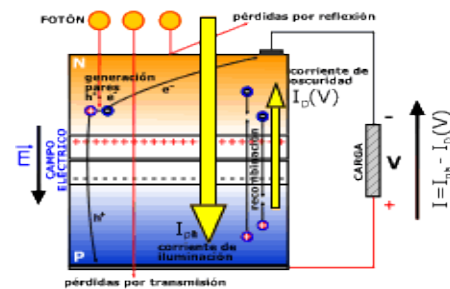


Imagen 3. Funcionamiento de la célula solar.

Fuente:

https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/ico_images/ico_func_cel.gif

La curva I-V de una célula fotovoltaica representa pares de valores de tensión e intensidad en los que puede encontrarse funcionando la célula.

los parámetros fundamentales de un módulo son:

La corriente de cortocircuito (ISC) es el valor de la corriente que circula por el panel cuando la tensión en sus terminales es nula, $V = 0$, y es la máxima corriente que se podría llegar a obtener (en un caso ideal) del panel cuando trabaja como generador.

La tensión de circuito abierto (VOC) es la mayor tensión que puede polarizar al dispositivo cuando trabaja como generador.

El punto de máxima potencia (PM) es un punto de trabajo en el que la potencia entregada por el panel solar a la carga externa es máxima.

El factor de forma (FF, del inglés, Fill Factor) es la relación entre la potencia máxima (o el producto de la corriente y la tensión en el punto de máxima potencia) y el producto de ISC y VOC. Su valor es más alto cuanto mejor es la célula. Por lo general, un valor bajo de FF está asociado con la existencia de pérdidas de

eficiencia en el dispositivo, mientras que una célula de buena calidad suele tener valores de FF superiores a 0.70.

La eficiencia, se da habitualmente como un porcentaje y es la relación entre la potencia eléctrica entregada por el panel y la potencia de la radiación que incide sobre él¹¹.

Todos los parámetros de un panel solar se miden según una serie de condiciones de medida estándar, que se definen por $1000\text{W}/\text{m}^2$ de irradiancia, a una temperatura de 25°C y una distribución espectral AM.1.5G.

2.5 Modelica

Es un lenguaje de programación orientado a objetos que describen de manera sencilla modelos de sistemas dinámicos eventualmente muy complejos. Además de las características básicas de todo lenguaje orientado a objetos, Modelica contiene herramientas específicas que permiten describir las relaciones constitutivas de los distintos componentes de cada modelo y las relaciones estructurales que definen la interacción entre dichos componentes¹².

Por la relación no lineal entre la corriente y el voltaje en un dispositivo fotovoltaico, se hace poco práctica la simulación de un circuito eléctrico equivalente de una celda solar con dispositivos pasivos como resistencias, capacitores e inductores, por lo que se requiere de un lenguaje de programación que soporte directamente la inclusión de parámetros eléctricos en forma de funciones matemáticas. En la actualidad, existen diversas plataformas computacionales en las que se puede realizar la simulación de un dispositivo fotovoltaico, basándose en su modelo matemático, es así como se usará modelica¹³.

3. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO

Un panel solar es básicamente un arreglo de celdas solares, se agrupan en serie y/o paralelo para formar el panel solar. Generalmente el circuito equivalente está formado por una fuente corriente foto generada por acción de la radiación solar.

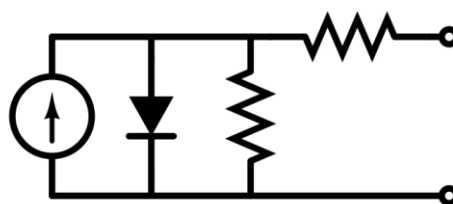


Imagen 4. Representación eléctrica de una celda solar.

Fuente: <https://electronics.stackexchange.com/questions/196789/current-through-a-diode-paralleled-with-a-resistor>

El modelo matemático de un panel solar se encuentra principalmente de la radiación solar y de la temperatura solar.

Las características de una celda se pueden representar por medio de graficas que presenten las variables tensión, corriente y potencia.

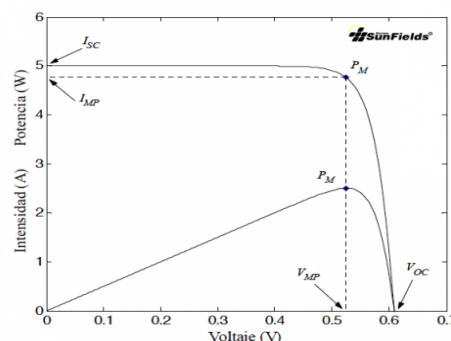


Imagen 5. Curva tensión, corriente y potencia.

Fuente:

<https://www.sfe-solar.com/wp-content/uploads/2016/03/curva-i-v-panel-fotovoltaico-517x405.png>

En la imagen 5 se observan la corriente de cortocircuito, el voltaje de circuito abierto, la corriente en el punto máximo de potencia, el punto de máxima potencia, el voltaje en punto máximo de potencia y la potencia en el punto máximo de potencia.

De acuerdo con la imagen 4 y 5 de la representación de una celda solar y la curva de tensión, corriente y potencia. El modelo matemático que los describe esta dado en la siguiente ecuación:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{a} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Donde:

I_L es la corriente foto generada.

I_0 es la corriente de saturación inversa.

R_s es la resistencia en serie.

R_{sh} es la resistencia en paralelo

V es el voltaje

q es la carga del electrón

a es un parámetro dado por la ecuación

$kT_c A$, donde k es la constante Boltzmann,

T_c es la temperatura y A el factor de

idealidad.

La corriente fotogenerada cambia por la radiación solar y la temperatura de trabajo de la celda, descrita por la siguiente ecuación:

$$I_L = \frac{S}{S_{RF}} [I_{L,REF} + \mu_{ISC}(T_c - T_{c,REF})] \quad (2)$$

donde, S es la irradiación solar, S_{RF} es la irradiación solar en condiciones de referencia (1000 W/m²), $I_{L,REF}$ es la

corriente foto generada en condiciones de referencia y se puede tomar como la corriente de cortocircuito y μ_{ISC} es el coeficiente de cortocircuito, el cual generalmente esta dado por el fabricante¹⁴.

La corriente de saturación inversa está dada por:

$$I_0 = I_{0,REF} \left(\frac{T_c}{T_{REF}} \right)^3 \left[\exp \left(\frac{qE_c \left(\frac{1}{T_{c,REF}} - \frac{1}{T_c} \right)}{K_a} \right) \right] \quad (3)$$

Donde E_c es la energía del semiconductor en su banda de gap y $I_{0,REF}$ es la corriente de saturación inversa en condiciones de referencia.

La eficiencia de una celda solar no es afectada por la variación de la resistencia en paralelo por lo que es considerada que tiende al infinito. De tal forma que la ecuación 1 puede reescribirse así

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{a} \right) - 1 \right]$$

La conexión de las celdas es en serio y/o paralelo para generar un nivel de energía mayor y formar un panel solar. La ecuación que muestra el modelo matemático de un panel solar es:

$$I = N P I_L - N P I_0 \left[\exp \left(\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right)}{a} \right) - 1 \right].$$

Se puede hacer el análisis de una sola celda solar considerando que N_p es 1 y N_s también tiene el mismo valor.

La corriente de saturación inversa queda reescrita por:

$$I_{0,REF} \left[\frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{V_{oc}}{N_S} * a \right) - 1} \right]$$

4. CONCLUSIÓN

El método investigativo presentado en este avance permitió adquirir el conocimiento base para el principio de funcionamiento de los paneles solares. Conociendo las variables que inciden sobre este y además conociendo el modelo matemático que se utilizara para simular una celda solar en el programa modélica.

5. REFERENCIA

1. América Fotovoltaica. (s.f.). Top 5 de proyectos exitosos de energía solar en Colombia. Obtenido de <http://www.laguia solar.com/top-5-proyectos-exitosos-de-energia-solar-en-colombia/>
2. Estado del arte sistemas solares fotovoltaico aislado. [file:///C:/Users/Jorge%20Esteban/Downloads/ESTADO-DEL-ARTE%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Jorge%20Esteban/Downloads/ESTADO-DEL-ARTE%20(1).pdf)
3. Castells, X., & Boards, S. (2011). Energía, agua, medioambiente territorialidad y sostenibilidad. Tomado de: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10250/1/UPS-GT001338.pdf>
4. Hanasoge, S., Duvall, T., & Sreenivasan, K. (07 de 12 de 2013). Red de educación fotovoltaica. Tomado de: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10250/1/UPS-GT001338.pdf>
5. Ujaen.es. (2018). *Curso de Energía Solar Fotovoltaica*. [online] Available at: https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_03.htm [Accessed 14 Oct. 2018].
6. Ujaen.es. (2018). *Curso de Energía Solar Fotovoltaica*. [online] Available at: https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_03.htm [Accessed 14 Oct. 2018].
7. Forget, A. (16 de Junio de 2011). <http://www.astridforget.com/wp-content/uploads/2014/09/Manualdifusi%C3%B3n-AF-ENR-Per%C3%BA-VF3-110617.pdf>. Obtenido de <http://www.astridforget.com/wp-content/uploads/2014/09/Manual-difusi%C3%B3n-AF-ENRPer%C3%BA-VF3-110617.pdf>
8. Libro.Energía Solar Fotovoltaica. Autor.Oscar Perpiñán Lamigueiro. Versión 1.5 Marzo de 2013
9. Anon, (2018). [online] Available at: https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/homemain_frame/03_celula/01_basico/ico_images/ico_func_cel.gif [Accessed 14 Oct. 2018].
10. Anon, (2018). [online] Available at: https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/homemain_frame/03_celula/01_basico/ico_images/ico_func_cel.gif [Accessed 14 Oct. 2018].
11. https://www.researchgate.net/publication/265767005_MODELADO_Y_SIMULACION_DE_CELDAS_Y_PANELES_SOLARES
12. https://www.fceia.unr.edu.ar/control/modelica/notas_mod.pdf