

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ Departamento de Ingeniería Eléctrica Facultad: Metalurgia — Electromecánica

Trabajo de Díploma

Para Optar por el Título de Ingeniero Eléctrico

Modelación y simulación de paneles fotovoltaicos para condiciones variables de irradiancia y temperatura

Marco Antonio Vazquez Mola

Tutores: Ing. Liomnis Osorio Laurencio Dr. C. Reineris Montero Laurencio

> Moa, 2016 "Año 58 de la Revolución"

Declaración de autoridad

En decisión conjunta, el autor Marco Antonio Vázquez Mola y los tutores Ing. Liomnis Osorio Laurencio Dr. C. Reineris Montero Laurencio, certificamos nuestra propiedad intelectual sobre este Trabajo de Diploma con título: Modelación y simulación de paneles fotovoltaicos para condiciones variables de irradiancia y temperatura. Somos los únicos autores de este Trabajo de Diploma, y autorizamos al Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, a hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

Marco Antonio Vazquez Mola

Ing. Liomnis Osorio Laurencio

Dr. C. Reineris Montero Laurencio

Agradecimientos

A mis padres en especial a mi madre.

A mis tutores Liomnis Osorio Laurencio y Reineris Montero Laurencio por su dedicación, paciencia y esfuerzo para realizar esta investización.

A Keiler Kobas Cardoza por toda la ayuda prestada.

A mi novia Karen for saber estar cuando más lo necesité. A mis amigos Arnaldo y Manuel for estar en los buenos y en los

malos momentos.

A mis compañeros de aula, que compartieron conmiço este difícil camino.

> A los profesores de la carrera por haberme entregado el conocimiento vasto para llegar a ser un buen profesional.

Dedicatoria

A mi madre Elvira Mola de la Peña.

Pensamiento

"Debemos preocuparnos por prestar servicios con eficiencia y óptima calidad, y simultáneamente producir el nuevo hombre que constituye y crea la nueva sociedad socialista, que es el hombre que produce, sirve, dirige, controla y supervisa. Hace falta tener control y supervisión para prestar servicios con eficiencia..."

Ernesto Che Guevara

Resumen

Para la instalación de paneles solares en localidades específicas, se deben realizar estudios preliminares que definen la realización o no de proyectos de este tipo. En esta etapa, resulta de vital importancia el empleo de plataformas de simulación que describan y permitan cuantificar la cantidad de energía disponible en paneles fotovoltaicos para diferentes condiciones de operación. En este sentido, el presente trabajo describe una aplicación informática capaz de modelar y simular el comportamiento de paneles fotovoltaicos sujetos a condiciones variables de temperatura e irradiancia.

Para ello se utilizó la herramienta matemática MATLAB v8.5.0.197613 (R2015a), específicamente el *Toolbox GUIDE (Graphical User Interface Development Environment)* permitió el diseño de un GUI de fácil manejo.

A partir de la ecuación del modelo de dos diodos y aplicando el método numérico Newton-Raphson, se calculan algunos parámetros desconocidos y necesarios para la simulación.

Como caso de estudio se escogieron 4 paneles fotovoltaicos de diferentes marcas y tecnologías de fabricación, para mostrar su comportamiento bajo condiciones climatológicas variables. Los resultados obtenidos muestran que el *software* desarrollado trabaja con gran precisión, lo que le confiere gran confiablidad para su utilización en proyectos de este tipo.

VI

Abstract

For the installation of solar panels on specific locations should conduct preliminary studies that define the performance or nonperformance of such projects. At this stage, it is vital the use of simulation platforms to describe and to quantify the amount of energy available in photovoltaic panels for different operating conditions. In this sense, this paper describes a software application able to model and simulate the behavior of photovoltaic panels subject to varying conditions of temperature and irradiance.

For this purpose, the MATLAB v8.5.0.197613 (R2015a), specifically the Toolbox GUIDE (Graphical User Interface Development Environment) allowed the design of a user-friendly GUI mathematical tool used.

From the model equation of two-diode and applying the Newton-Raphson method numeric, and some unknown parameters required for the simulation they are calculated.

As a case study four different brands of photovoltaic panels and manufacturing technologies were chosen to show their behavior under variable weather conditions. The results show that the developed software works with great precision, which gives it great drive ability for use in such projects.

Índice

Introducción	1
CAPITULO I. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL	4
1.1 Introducción	4
1.2 Conceptos fundamentales sobre radiación solar	4
1.3 Radiación solar en la superficie de la tierra	5
1.4 Celdas fotovoltaicas	6
1.5 Modelo eléctrico de una celda fotovoltaica tipo p-n	9
1.6 Modelo de una celda p-n con un diodo y una resistencia serie	12
1.7 Modelo de un diodo con resistencias serie y paralela	14
1.8 Modelo de dos diodos	15
1.9 Modelo de un arreglo solar fotovoltaico	18
1.10 Condiciones Estándares de Medida (CEM)	19
1.11 Condiciones Nominales de Operación (CNO)	20
1.12 Parámetros característicos de una celda fotovoltaica	20
1.13 Parámetros de catálogos de los paneles fotovoltaicos	21
1.14 Efecto de la temperatura en el rendimiento del panel	22
CAPÍTULO II. MODELACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS	25
2.1 Introducción	25
2.2 Modelo general del módulo fotovoltaico	25
2.3 Método de solución del modelo de dos diodos	26
2.3.1 Simplificación de la corriente de saturación inversa del diodo	26
2.3.2 Determinación de los valores de Rs y Rp	28
2.4 Algoritmo de solución	30
2.4 Aplicación informática basada en GUIDE/Matlab	33
2.5 Técnica experimental	34
2.6 Instalación experimental	35
CAPÍTULO III. SIMULACIÓN BAJO EL EFECTO DE LA IRRADIANCIA Y TEMPERATURA	39
3.1 Introducción	39
3.2 Validación del modelo	39
3.3 Simulación de un caso de estudio	42
3.3.1 Efecto de la irradiancia en las curvas I-V y P-V	44
3.3.2 Efecto de la temperatura en las curvas I-V y P-V	45

3.4 Valoración económica y técnica de la aplicación	47
3.5 Efecto medioambiental de las tecnologías fotovoltaicas	48
CONCLUSIONES	52
RECOMENDACIONES	53
BIBLIOGRAFÍA	54

Introducción

La generación solar fotovoltaica (FV) representa una energía limpia, no contaminante e inagotable que está adquiriendo en la actualidad mayor importancia debido a su actual desarrollo tecnológico y al compromiso medioambiental de los países desarrollados [1]. En este contexto, existe una comunidad científica realizando esfuerzos en investigaciones para mejorar la precisión de los métodos de estimación de la energía que producen estos sistemas.

Por otro lado, 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 en paneles FV para diferentes condiciones de operación [2].

Sin embargo, la modelación matemática de paneles fotovoltaicos se ve afectada por una razón, las fichas técnicas que proporcionan los fabricantes de los paneles no ofrecen suficiente información que permita su modelación y consecuentemente la obtención de las curvas I-V y P-V. Esto significa que, con los datos del catálogo no se puede replicar el comportamiento de un panel bajo condiciones variables de irradiancia y temperatura.

Por tal motivo, se necesita conocer algunos parámetros internos que provocan cambios significativos en la respuesta de los paneles fotovoltaicos en condiciones climatológicas variables. En este trabajo se menciona condiciones climatológicas variables, considerando solamente la irradiancia y la temperatura, ya que son las variables que más inciden en la potencia de salida de un panel fotovoltaico.

Una indagación en la literatura científica indica que la mayoría de los autores dedicados a este tema, utilizan como herramienta para la modelación y

1

simulación al *Simulink* del MATLAB [3-11]. Sin embargo, esto requiere cierto nivel de conocimiento sobre las librerías del *Simulink*, aunque ciertamente, una vez que se aprende a trabajar con este componente, se facilita mucho el trabajo.

En el contexto del ISMMM, existen proyectos destinados a fomentar el uso de este tipo de fuente renovable. Además, en el plan D de estudios de la carrera de Ingeniería Eléctrica se imparte la Asignatura Energías Renovables, donde se profundiza en temas relaciones con esta temática. Sin embargo, aún no se cuenta con una plataforma de simulación de paneles fotovoltaicos que permita el desarrollo de investigaciones de este tipo.

Problema

Desconocimiento de los parámetros internos de los módulos fotovoltaicos, que impide la simulación bajo el efecto de irradiancia y temperatura variable.

Objetivo

Modelar y simular el comportamiento eléctrico de paneles solares bajo el efecto de diferentes niveles de irradiancia y temperaturas, empleando el *Toolbox GUIDE* de MATLAB.

Objetivos específicos

- 1. Desarrollar el marco teórico de la investigación para establecer los fundamentos teóricos necesarios para la comprensión del objeto de estudio.
- 2. Modelar y simular el comportamiento de paneles fotovoltaicos para obtener curvas I-V y P-V en condiciones variables de temperatura e irradiancia.
- 3. Realizar la valoración económica de la aplicación y explicar efecto medioambiental de los sistemas fotovoltaicos.

Objeto de estudio

Paneles fotovoltaicos de diferentes tecnologías de silicio.

Campo de acción

Modelación y simulación.

Hipótesis

A través los métodos matemáticos y técnicas de simulación apropiadas, es posible programar una herramienta en Matlab, para la extracción de parámetros internos de paneles fotovoltaicos, que permita su modelación y simulación de bajo el efecto variable de la irradiancia y la temperatura.

Principales métodos de investigación utilizados

- Método de investigación documental y bibliográfica.
- Método de investigación teórico para la correcta caracterización del objeto de estudio.
- Simulación computacional: para la obtención de las curvas características de I-V y P-V del panel bajo estudio.

CAPITULO I. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL

1.1 Introducción

En este capítulo se desarrolla un estudio a la fenomenología física de la conversión fotovoltaica de la energía solar, incluyendo las características de la radiación solar y los fenómenos que ocurren en el interior de los materiales semiconductores de uso fotovoltaico al producirse la absorción de radiación. Se exponen fundamentos teóricos a partir de una celda solar y su funcionamiento. También se muestran los métodos de simulación de paneles fotovoltaicos más empleados en el contexto científico internacional y al concluir los efectos que ocasionan la temperatura en el rendimiento de un panel fotovoltaico.

1.2 Conceptos fundamentales sobre radiación solar

Los términos utilizados para denominar a la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra son diversos, entre ellos se utilizan los siguientes:

Flujo radiante: es la energía emitida por unidad de tiempo. Se mide en J/s= W.

Densidad de flujo radiante: es el flujo radiante por unidad de superficie y es lo mismo que irradiancia.

Irradiancia (G): mide la proporción de energía solar que llega a una superficie por unidad de tiempo y por unidad de área. Se mide en W/m².

Irradiación e insolación: son intercambiables y ambas se refieren a la cantidad de energía solar que llega a una superficie durante un período de tiempo. Se mide en kJ/m² h o MJ/m² h.

Radiación: Se utiliza en sentido genérico.

Intensidad radiativa: es la irradiancia en una dirección particular contenida en un ángulo sólido. Se mide en W/m² sr.

Constante Solar: es la energía total, a todas las longitudes de onda, incidente sobre una superficie normal a los rayos del Sol a una distancia de una unidad astronómica (1 UA). Su valor es de 1,367 W/m² según la escala del *World*

Radiation Center (WRC) y de 1,373 W/m² según la escala del World *Meteorological Organization* (WMO).

1.3 Radiación solar en la superficie de la tierra

La radiación solar que llega a la tierra está condicionada por diversos factores: Factores astronómicos: son aquellos que dependen de la geometría Tierra-Sol. Dichos factores son función de la posición relativa Tierra-Sol y de las coordenadas geográficas del lugar considerado: latitud y longitud.

Estos factores condicionan el recorrido de la radiación a través de la atmósfera y el ángulo de incidencia de los rayos solares; son función de la altura solar en cada instante. Factores climáticos: para cada altura solar, la radiación máxima teórica que se espera en un lugar, no suele nunca tomar dicho valor.

Existen factores llamados climáticos que atenúan la radiación que incide sobre la superficie terrestre. Las nubes, la cantidad de vapor de agua, ozono, aerosoles, etc., contenidos en la atmósfera son los responsables de dicha atenuación, que ocurre fundamentalmente por absorción, reflexión y difusión. En la figura 1.1 se representa un esquema de los procesos principales que intervienen en el fenómeno de atenuación de la radiación solar.



Figura 1.1. Radiación que alcanza la superficie de la Tierra bajo cielo con nubes.

Hay que tener en cuenta también que el espectro de la radiación solar, al atravesar la atmósfera, sufre modificaciones debido a la absorción desigual de las distintas longitudes de onda del mismo.

La radiación total que procedente del sol incide sobre la superficie terrestre está formada por:

Radiación directa, B: la que llega a la Tierra directamente del Sol.

Radiación difusa, D: originada por los efectos de dispersión de los componentes de la atmósfera, incluidas las nubes.

Radiación reflejada, R: radiación incidente que vuelve a la superficie después de ser reflejada en el suelo. El cociente entre la radiación reflejada y la porción de ésta que vuelve a incidir se denomina albedo.

A partir de lo anterior, la radiación global G, o total que llega a la superficie terrestre, puede ser expresada como la suma de estas tres componentes y se refleja en la ecuación 1.1.

 $\mathbf{G} = \mathbf{B} + \mathbf{D} + \mathbf{R}$

1.1

1.4 Celdas fotovoltaicas

Aunque las celdas solares eficientes han estado disponibles recién desde mediados de los años 50, la investigación científica del efecto fotovoltaico comenzó en 1839, cuando el científico francés, Henri Becquerel descubrió que una corriente eléctrica podría ser producida haciendo brillar una luz sobre ciertas soluciones químicas.

El efecto fue observado primero en un material sólido (el metal selenio) en 1877. Este material fue utilizado durante muchos años para los fotómetros, que requerían de cantidades muy pequeñas de energía. Una comprensión más profunda de los principios científicos, fue provista por Albert Einstein en 1905 y Schottky en 1930, la cual fue necesaria antes de que celdas solares eficientes pudieran ser confeccionadas. Una celda solar de silicio que convertía el 6% de

la luz solar que incidía sobre ella en electricidad fue desarrollada por Chapin, Pearson y Fuller en 1954, y esta es la clase de celda que fue utilizada en usos especializados tales como satélites orbitales a partir de 1958.

Las celdas solares de silicio disponibles comercialmente en la actualidad tienen una eficiencia de conversión en electricidad de la luz solar que cae sobre ellas de cerca del 18%, a una fracción del precio de hace treinta años. En la actualidad existen una gran variedad de métodos para la producción práctica de celdas solares de silicio (amorfas, monocristalinas o policristalinas), del mismo modo que para las celdas solares hechas de otros materiales (seleniuro de cobre e indio, teluro de cadmio, arseniuro de galio, etc).

Las celdas o celdas solares son dispositivos que convierten energía solar en electricidad, ya sea directamente vía el efecto fotovoltaico, o indirectamente mediante la previa conversión de energía solar a calor o a energía química. La forma más común de las celdas solares se basa en el efecto fotovoltaico, en el cual la luz que incide sobre un dispositivo semiconductor de dos capas produce una diferencia del fotovoltaje o del potencial entre las capas. Este voltaje es capaz de conducir una corriente a través de un circuito externo de modo de producir trabajo útil.

Funcionamiento de las celdas fotovoltaica

Para entender la operación de una celda fotovoltaica, se necesita considerar la naturaleza del material y la naturaleza de la luz del sol. Las celdas solares están formadas por dos tipos de material, generalmente silicio tipo p y silicio tipo n.

La luz de ciertas longitudes de onda puede ionizar los átomos en el silicio y el campo interno producido por la unión que separa algunas de las cargas positivas ("agujeros") de las cargas negativas (electrones) dentro del dispositivo fotovoltaico. Los agujeros se mueven hacia la capa positiva o capa de tipo p y los electrones hacia la negativa o capa tipo n.

Aunque estas cargas opuestas se atraen mutuamente, la mayoría de ellas solamente se pueden recombinar pasando a través de un circuito externo fuera del material debido a la barrera de energía potencial interno. Por lo tanto, si se hace un circuito se puede producir una corriente a partir de las celdas iluminadas, puesto que los electrones libres tienen que pasar a través del circuito para recombinarse con los agujeros positivos lo cual es mostrado de mejor manera en la figura 1.2.



Figura 1.2. Efecto fotovoltaico en una celda solar.

La cantidad de energía que entrega un dispositivo fotovoltaico se determina por:

- El tipo y el área del material
- · La intensidad de la luz del sol
- La longitud de onda de la luz del sol

Por ejemplo, las celdas solares de silicio monocristalino actualmente no pueden convertir más el de 25% de la energía solar en electricidad, porque la radiación en la región infrarroja del espectro electromagnético no tiene suficiente energía como para separar las cargas positivas y negativas en el material.

Las celdas solares de silicio policristalino en la actualidad tienen una eficiencia de menos del 20% y las celdas amorfas de silicio tienen actualmente una eficiencia cerca del 10%, debido a pérdidas de energía internas más altas que las del silicio monocristalino.

Una típica celda fotovoltaica de silicio monocristalino de 100 cm² producirá cerca de 1,5 vatios de energía a 0,5 voltios de Corriente Continua y 3 amperios bajo la luz del sol en pleno verano (el 1000 W/m²). La energía de salida de la celda es casi directamente proporcional a la intensidad de la luz del sol. (Por ejemplo, si la intensidad de la luz del sol se divide por la mitad la energía de salida también será disminuida a la mitad).

Una característica importante de las celdas fotovoltaicas es que el voltaje de la celda no depende de su tamaño, y sigue siendo bastante constante con el cambio de la intensidad de luz. La corriente en un dispositivo, sin embargo, es casi directamente proporcional a la intensidad de la luz y al tamaño. Para comparar diversas celdas se las clasifica por densidad de corriente, o amperios por centímetro cuadrado del área de la celda.

La potencia entregada por una celda solar se puede aumentar con bastante eficacia empleando un mecanismo de seguimiento para mantener el dispositivo fotovoltaico directamente frente al sol, o concentrando la luz del sol usando lentes o espejos. Sin embargo, hay límites a este proceso, debido a la complejidad de los mecanismos, y de la necesidad de refrescar las celdas.

La corriente es relativamente estable a altas temperaturas, pero el voltaje se reduce, conduciendo a una caída de potencia a causa del aumento de la temperatura de la celda. Otros tipos de materiales fotovoltaicos que tienen potencial comercial incluyen el diselenio de cobre e indio (CuInSe2) y teluro de cadmio (CdTe) y silicio amorfo como materia prima.

1.5 Modelo eléctrico de una celda fotovoltaica tipo p-n

Las celdas solares están fabricadas con material semiconductor, la mayoría de las veces silicio, y pueden ser de tipo monocristalinas, policristalinas o amorfas. Están basadas en una unión p-n que hace posible la existencia de un campo eléctrico en la celda. Este campo tiene la dirección del lado n al lado p, y su fuerza separa los pares electrón-hueco. Los huecos o ausencia de electrones, los dirige hacia el contacto del lado p, lo que provoca la extracción de electrones del metal que constituye el contacto. Los electrones en la celda son dirigidos hacia el contacto del lado n inyectándolos en el metal. Esto, cuando hay una conexión eléctrica entre los extremos de la celda hace posible el mantenimiento de una corriente eléctrica por el circuito exterior y, en consecuencia, el funcionamiento de la celda como generador fotovoltaico.

Una única celda es capaz de proporcionar una tensión de apenas 0,5 V y una potencia de entre 1 y 2 W. Para elevar tanto la tensión como la potencia suministrada, las celdas se conectan en serie y en paralelo respectivamente, dando lugar a lo que se denomina panel o módulo fotovoltaico. Éstos a su vez se conectan también en serie formando *arrays*, los cuales a continuación se conectan en paralelo para conformar la tensión de salida y potencia necesarias de una instalación solar fotovoltaica.

La estructura básica del modelo de una celda o celda solar es semejante a la de un fotodiodo, en general de silicio, diseñada para maximizar la absorción de fotones procedentes de la luz y minimizar la reflexión. Cuando ésta recibe una luz incidente (LUX) se comporta como un generador de corriente inversa cuyo valor aumenta con la cantidad de luz que incide sobre él.

El circuito equivalente ideal de una celda FV está dado por una fuente de corriente con un diodo en paralelo, la configuración de dicha celda solar ideal es mostrada en figura 1.3.



Figura 1.3. Circuito de un modelo Ideal de una celda solar con un diodo.

Si se estudia su comportamiento en detalle se puede ver que esta generación de corriente se expresa como la diferencia entre la corriente fotogenerada (I_L) I_{PV} debida a la generación de portadores en la iluminación incidente y la corriente del diodo ld correspondiente a la corriente en oscuridad por la recombinación de portadores que produce el voltaje externo, entonces se expresa la corriente generada con la siguiente expresión 1.3 debido a la Ley de Kirchhoff de Corriente (LkC) en el circuito de la figura 1.3.

$$I = I_{PV} - I_D$$
 1.3

Desarrollando la expresión de la oscuridad según la teoría de Shockley se obtiene la ecuación 1.4.

$$I_D = I_O \left[\exp\left(\frac{V}{AV_T}\right) - 1 \right]$$
 1.4

La ecuación que describe correctamente la característica I-V de la mayoría de las celdas solares fotovoltaicas al sustituir la ecuación 1.4 en la 1.3 es la expresión 1.5.

$$I = I_{PV} - I_O \left[\exp\left(\frac{V}{AV_T}\right) - 1 \right]$$
 1.5

Una celda FV es caracterizada por tener una pequeña corriente de cortocircuito (I_{SC}) , el voltaje de circuito abierto (V_{OC}) y el factor de idealidad (A). La salida de corriente de la fuente es directamente proporcional a la luz que incide en la celda. Para las mismas condiciones de irradiancia y temperatura de la unión p-n, la corriente de cortocircuito (I_{SC}) es el máximo valor de corriente que genera la celda. La corriente de cortocircuito y el voltaje térmico de un panel FV está dada por la igualdad 1.6 y 1.7 respectivamente.

Para
$$V = 0$$
;
 $I_{sc} = I = I_{PV}$
Donde:
1.6

$$V_T = \frac{N_s \cdot \mathbf{k} \cdot \mathbf{T}}{q}$$
 1.7

N_S: Numero de celdas conectadas en serie del panel solar.

V_T: Voltaje térmico de un panel fotovoltaico.

I_{PV}: Corriente fotogenerada (generada por el efecto fotovoltaico).

I_D: Corriente en oscuridad por recombinación de portadores que produce el voltaje externo.

q: Carga del electrón.

V: Tensión eléctrica en bornes del diodo.

K: Constante de Boltzmann.

A: Factor de idealidad del diodo.

T: Temperatura absoluta en grados kelvin.

I₀: Corriente de saturación inversa del diodo.

También, para las mismas condiciones de irradiancia y temperatura en la unión p-n, el voltaje de circuito abierto (V_{OC}) es el máximo valor del voltaje en los terminales de la celda y se puede manifestar en la expresión 1.8.

Para I = 0

$$V = V_{OC} = A \cdot V_T \ln\left(1 + \frac{I_{SC}}{I_O}\right)$$
 1.8

Y en las mismas condiciones, la potencia de salida es revelada en la ecuación 1.9.

$$P = V \left\{ I_{SC} - I_O \left[\exp\left(\frac{V}{A \cdot V_T}\right) - 1 \right] \right\}$$
 1.9

1.6 Modelo de una celda p-n con un diodo y una resistencia serie

Para ilustrar un poco mejor el comportamiento y tener una mayor exactitud de una celda en cuanto a corriente y tensión es ilustrado el circuito 1.4, con una resistencia serie R_s, su comportamiento no es el mismo que el circuito 1.3.



Figura 1.4. Circuito de un modelo FV con un diodo y una resistencia serie. Dado que el circuito no es el mismo ya que se le ha agregado una resistencia serie su correspondiente ecuación es la 1.10.

$$I = I_{PV} - I_O \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{A \cdot V_T}\right) - 1 \right]$$
 1.10

Una simple técnica iterativa sólo converge para corrientes positivas. El método de Newton Raphson converge más rápidamente y para ambas corrientes positivas y negativas. En este caso, la ecuación 1.11 explica la corriente de cortocircuito I_{SC.}

Para V = O

$$I_{SC} = I = I_{PV} - I_O \left[\exp\left(\frac{I_{PV} \cdot R_S}{A \cdot V_T}\right) - 1 \right]$$
 1.11

Normalmente la resistencia serie es muy pequeña e insignificante al calcular en la ecuación 1.11. Por lo tanto, se usa la ecuación 1.8 como una buena aproximación de la ecuación 1.11. El voltaje de circuito abierto (V_{OC}) puede estar escrita como se expone en la ecuación 1.12.

Para I = O

$$V = V_{OC} = A \cdot V_T \ln\left(1 + \frac{I_{SC}}{I_O}\right)$$
 1.12

Y la potencia de salida es dada por la igualdad 1.13.

$$P = V \left\{ I_{SC} - I_O \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_S}{A \cdot V_T}\right) - 1 \right] \right\}$$
 1.13

1.7 Modelo de un diodo con resistencias serie y paralela

El panel solar es el resultado de asociar un conjunto de celdas fotovoltaicas en serie. El modelado de una celda fotovoltaica ha sido por mucho tiempo una fuente de descripción para así detallar mejor el comportamiento de un módulo fotovoltaico. El circuito eléctrico equivalente de un panel solar está constituido por dos resistencias, una en serie R_S y otra resistencia en paralelo (R_P) o Shunt (R_{SH}) es mostrado en la figura 1.5.

La resistencia serie es debida a la resistencia de carga del material semiconductor, a los contactos metálicos y a las interconexiones y resistencias de contacto entre el semiconductor y los contactos metálicos. La resistencia shunt se debe a las no idealidades y a las impurezas cerca de la junción p-n.



Figura 1.5. Modelo eléctrico básico de una celda solar con dos resistencias. El comportamiento eléctrico de la celda se detalla en la ecuación 1.14. Una simple inspección de la expresión pone de manifiesto que la corriente I, se ha definido de forma implícita respecto la tensión V, ya que la resistencia serie R_S, impide aislarla a un lado de la igualdad. Este planteamiento conlleva la necesidad de utilizar métodos de cálculo numérico para la resolución de la ecuación.

$$I = I_{l} - I_{O} \left(e^{\frac{V + R_{S} \cdot I}{\eta \cdot V_{l}}} - 1 \right) - \frac{V + R_{S} \cdot I}{R_{SH}}$$
 1.14

Debe hacerse notar que el modelo presenta una resistencia Shunt (R_{SH}), que modela las fugas de corriente. R_{SH} suele tener un valor muy elevado y puede tomarse como hipótesis despreciar el tercer término de la ecuación por lo que se puede ilustrar en la expresión 1.15.

$$I = I_{PV} - I_O \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{A \cdot V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{SH}}$$
 1.15

El comportamiento de este modelado nos ofrece una mejor precisión de cómo es el comportamiento de una celda p-v, aunque después nos proporcione una mayor complejidad computacional.

1.8 Modelo de dos diodos

Un panel fotovoltaico está formado por un conjunto de celdas de material semiconductores, normalmente agrupados en serie. La curva característica I-V de una célula solar está basada en la de un diodo, por lo que debido a su naturaleza semiconductora tiene forma exponencial. La región a tener en cuenta es aquella en la que tanto la corriente como la tensión son positivas, lo cual ocurre cuando la celda está produciendo potencia.

El modulo eléctrico de un panel consiste normalmente en un circuito equivalente cuyo comportamiento se asemeja lo máximo posible al de un panel real. Es decir, se busca que las curvas características proporcionadas por el modelo se asemeje a la que producirá el panel bajo esas mismas condiciones. Muchos de los modelos se basan en una fuente de intensidad con un diodo en paralelo, pudiendo incluir más componentes para obtener una mayor precisión, a cambio de aumentar la complejidad.

El modelo de los dos diodos como se muestra en el circuito eléctrico de la figura 1.6 está basado en la fuente de intensidad que representa la corriente fotogenerada. Los diodos representan las corrientes de difusión y recombinación que se producen en el interior de los paneles. El diodo adicional permite compensar las pérdidas por recombinación en la región de depleción, donde se sitúa la unión de los semiconductores tipo p y tipo n.

15



Figura 1.6. Modelo eléctrico de una celda con dos diodos.

Como se muestra en el circuito de la figura 1.6 esta generación de corriente se expresa como la diferencia entre la corriente fotogenerada I_{PV} y las corrientes de los diodos Id_1 e Id_2 por la ley de Kirchhoff, entonces se expresa la corriente generada con la siguiente ecuación 1.16.

$$I = I_{PV} - I_{D1} - I_{D2}$$
 1.16

Las ecuaciones 1.17 y 1.18 fueron desarrolladas de la ecuación 1.4 para los dos diodos del circuito 1.6.

$$I_{D1} = I_{01} \left[\exp\left(\frac{V}{A \cdot V_T}\right) - 1 \right]$$
 1.17

$$I_{D2} = I_{02} \left[\exp\left(\frac{V}{A_2 \cdot V_T}\right) - 1 \right]$$
 1.18

Después de la sustitución de las ecuaciones 1.17 y 1.18 e incluir los parámetros $R_S y R_{SH}$ en la ecuación 1.16 se obtiene la expresión 1.19.

$$I = I_{PV} - I_{01} \left[\exp\left(\frac{V + R_S \cdot I}{A_1 \cdot V_T}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{V + R_S \cdot I}{A_2 \cdot V_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_S \cdot I}{R_{SH}}\right)$$
 1.19

En el cual:

 I_{01} e I_{02} son las corrientes inversas de saturación de los diodos que representan a los fenómenos de difusión en las zonas neutras y de recombinación en la zona de carga respectivamente, A₁=1 factor de idealidad del diodo 1; A₂ ≥1.2 factor de idealidad del diodo 2. Los demás parámetros fueron explicados anteriormente. La corriente fotogenerada es directamente proporcional a la irradiancia y la temperatura, acorde a la ecuación 1.20.

$$I_{PV} = \left(I_{PV,n} + K_i \cdot \Delta T\right) \frac{G}{G_n}$$
 1.20

Donde I_{PV}, es la corriente fotogenerada en el módulo a *Standard Test Conditions* (STC).

Este modelo es de complejidad media-alta y permite obtener unos resultados más precisos que muchos de los modelos más básicos que incluyen un único diodo esto se pone de manifiesto especialmente en simulaciones bajo condiciones muy diferentes a las STC, consistentes en una temperatura T=25°C y una irradiancia G=1000W/m². Estas condiciones son las que habitualmente se utilizan en la caracterización de paneles. El modelo de los diodos también destaca porque permite modelar con una precisión aceptable paneles de diferentes tipos: de cilicio policristalino, monocristalino, amorfo, de capa delgada, etc.

La ecuación 1.21 expresa la dependencia de la corriente inversa de saturación I_0 con la temperatura.

$$I_{O} = I_{O,n} \left(\frac{T_{n}}{T}\right)^{3} \exp\left[\frac{q \cdot E_{g}}{A \cdot K} \left(\frac{1}{T_{n}} - \frac{1}{T}\right)\right]$$
1.21

En donde:

I₀: Es función de la corriente inversa de saturación en condiciones estándar (Io, n) de temperatura T (25°C) y Eg es la energía del electrón-hueco del semiconductor. (Eg =1.12_ev para cilicio policristalino a 25°C).

$$I_{0,n} = \frac{I_{SC,n}}{\left[\exp\left(\frac{V_{OC,n}}{A \cdot V_{T,n}}\right) - 1\right]}$$
1.22

Ahora bien, el modelo de un diodo fue desarrollado para poder modificar la ecuación y quedar como la expresión 1.23.

$$I_{0,n} = \frac{I_{SC,n} + K_i \cdot \Delta T}{\left[\exp\left(\frac{V_{OC,n} + K_v \cdot \Delta T}{A \cdot V_{T,n}}\right) - 1 \right]}$$
1.23

En el que *Isc*, *n* es la corriente de cortocircuito; *Voc*, *n* voltaje de circuito abierto; $V_{T,n}$ voltaje térmico; *Gn* la irradiancia y *Tn* la temperatura, a *Standard Test Conditions*. *Ki* y *Kv* coeficiente de temperatura de cortocircuito y coeficiente de temperatura de circuito abierto respectivamente.

1.9 Modelo de un arreglo solar fotovoltaico

El panel fotovoltaico surge por la necesidad de adecuar los niveles de tensión y corriente del generador fotovoltaico a los requisitos del sistema eléctrico al cual alimenta. Para ello se disponen las celdas fotovoltaicas en serie o paralelo en función de las necesidades. El circuito equivalente para un arreglo solar FV con Np *strings* de celdas FV en paralelo y N_S celdas en serie se muestra en la Figura 1.7.



Figura 1.7. Arreglo solar FV con Np strings de celdas FV en paralelo y NS celdas en serie.

La correspondiente ecuación característica corriente-tensión para el circuito de la figura 1.7 está dada por la ecuación 1.24.

$$I = N_P \left\{ I_l - I_0 \left[e^{\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{R_s \cdot I}{N_p} \right)}{n \cdot K \cdot T}} - 1 \right] - \frac{\frac{V}{N_s} + \frac{R_s \cdot I}{N_p}}{R_{SH}} \right\}$$
 1.24

Donde

N_S: es el número de celdas en serie.

N_p: es el número de celdas en paralelo.

I_A: corriente de salida del arreglo FV.

V_A: tensión de salida del arreglo FV.

I_F: fotocorriente del *string* FV.

I_S: corriente de saturación inversa de diodo.

q: carga de un electrón, 1,60217733e-19 C.

T: temperatura de la celda en K.

R_S: resistencia intrínseca serie de la celda solar.

R_P: resistencia intrínseca paralelo de la celda solar.

P_m: valor máximo de potencia que puede entregar el dispositivo.

I_{MP}: corriente a la máxima potencia.

V_{MP}: tensión a la máxima potencia.

 $V_{O} = V_{OC}$: tensión de cortocircuito.

 $I_{S} = I_{SC}$: corriente de cortocircuito.

1.10 Condiciones Estándares de Medida (CEM)

Son las de uso más generalizado y universal, y están definidas por:

- Irradiancia 1000 W/m²
- Distribución espectral AM8 1.5G
- Incidencia normal
- Temperatura de la celda 25°C

Normalmente los parámetros característicos de los módulos o celdas incluidos en las hojas de especificaciones técnicas de los fabricantes vienen definidos en estas condiciones. Sin embargo, la experiencia muestra que pocas veces los módulos fotovoltaicos trabajan en estas condiciones, ya que con un nivel de irradiancia de 1000 W/m² que puede alcanzarse al mediodía, los módulos

adquieren temperaturas de más de 25°C, a no ser que sea un día claro de invierno. Por esta razón se definen además de las anteriores, las condiciones nominales de operación (CNO), las cuales pretenden representar el comportamiento del módulo de manera más realista.

1.11 Condiciones Nominales de Operación (CNO)

TONC se define como la temperatura nominal de operación de la celda, y representa la temperatura que alcanzarían las celdas solares para un nivel de irradiancia de 800 W/m², temperatura ambiente de 20°C, velocidad del viento de 1 m/s e incidencia normal. El valor de TONC también viene incluido en las hojas de características técnicas de los módulos, y para un módulo de silicio monocristalino suele estar en torno a los 47°C. Dado que las condiciones normales de operación hacen referencia a la temperatura ambiente, y no a la temperatura del módulo, es necesaria una expresión que relacione ambas. Se puede considerar una buena aproximación la ecuación 1.2.

$$Tc = Ta + \frac{TONC - 20}{800}G$$

En el que:

Tc: es la temperatura de la celda o módulo Ta: es la temperatura ambiente TONC: es la Temperatura de Operación Nominal de la Celda G: es la irradiancia (W/m²)

1.12 Parámetros característicos de una celda fotovoltaica

Dado que las ecuaciones estudiadas anteriormente tienen su base en fenómenos físicos y están ampliamente validadas para dispositivos fotovoltaicos, el problema en el modelado de celdas y módulos consiste no tanto en la elaboración de un modelo adecuado, que ya existe, sino en el modo de determinar sus parámetros.

Así, la ecuación 1.19 representa un modelo de dos exponenciales donde hay 7 parámetros a determinar R_S, R_P, A₁, A₂, I_{PV} , I_{01} , I_{02} . Sin embargo, en el modelo

de un diodo ecuación 1.15 se pueden asumir ciertas simplificaciones que reducen el número de parámetros a saber, se asignan a los factores de idealidad sus valores teóricos A1 = 1 y A2 \ge 1.2, como dicho modelo presenta una sola exponencial, lo que equivale a que $I_{02} = 0$.

Esto reduce a 5 el número de parámetros a determinar R_S, R_P, A, I_{PV}, I₀. Si asume que el valor de RP $\rightarrow \propto$, hipótesis aceptable en celdas de elevada calidad, con lo que se tendría del modelo de una exponencial sólo cuatro parámetros a determinar.

1.13 Parámetros de catálogos de los paneles fotovoltaicos

En este apartado se explican los parámetros que caracterizan el modelo del panel viceversa, considerando la irradiancia G, la temperatura T y las características propias del panel simulado. Para la mayoría de paneles comerciales, los siguientes datos pueden encontrarse en sus catálogos de fabricante:

V_{OC}: Tensión de circuito abierto bajo condiciones STC (V).

I_{SC}: Intensidad de cortocircuito bajo condiciones STC (A).

V_{MPP}: Tensión en el punto de máxima potencia bajo condiciones STC (V).

I_{MPP}: Intensidad en el punto de máxima potencia bajo condiciones STC (A).

 K_{I} : Coeficiente de variación de la corriente de cortocircuito con la T^a (A/K).

K_V: Coeficiente de variación de la tensión de circuito abierto con la T^a (V/K).

Los diodos del circuito equivalente son una representación de determinadas pérdidas que se producen en las uniones p-n, por lo que sus características no aparecen en los catálogos de fabricante de los paneles. El valor de su factor de calidad debe ajustarse de modo que la respuesta del panel modelado se ajuste lo máximo posible a la del panel real. Su valor depende fundamentalmente del tipo de panel: silicio policristalino, monocristalino, amorfo, capa fina, etc.

Los parámetros que utiliza este modelo son:

A1: Factor de idealidad del primer diodo.

A₂: Factor de idealidad del segundo diodo.

Las resistencias serie y paralelo también representan pérdidas en los paneles. La resistencia serie representa las pérdidas que se producen en las regiones neutras y los contactos en la salida del material semiconductor, mientras que la resistencia en paralelo representa las pérdidas que se producen en el material. Sus valores tampoco aparecen explícitamente en las hojas de características.

1.14 Efecto de la temperatura en el rendimiento del panel

La temperatura de trabajo que alcanza un panel FV obedece a una relación lineal dada por la expresión 1.25.

$$T_t = T_a + k \cdot G \tag{1.25}$$

Donde T_t es la temperatura de trabajo del panel, Ta es la máxima temperatura ambiente, G es el valor de la irradiancia expresado en mW/cm², y k es un coeficiente que varía entre 0,2 y 0,4 °C cm²/mW, dependiendo de la velocidad media del viento. Cuando ésta es muy baja, o inexistente, el enfriamiento del panel es pobre o nulo, y k toma valores cercanos o iguales al máximo (0,4). Si la velocidad media del viento produce un enfriamiento efectivo del panel, el valor de k será el mínimo (0,2).

El valor de G varía entre 80 y 100 mW/cm².

Para lugares con alto valor de irradiancia diaria se usa el valor máximo. Si existen nubes pasajeras que reducen el valor de irradiación, el valor de G se reduce a 80 mW/cm². El producto k*G representa el incremento de temperatura que sufre el panel sobre la máxima temperatura ambiente.

El primer paso en el cálculo de la potencia de salida de un panel FV trabajando a una temperatura mayor de la estándar a 25°C, es determinar los valores de radiación solar y temperatura ambiental para la zona en que éste vaya a ser usado. Si se asumen como ejemplo las condiciones siguientes:

• Radiación solar: 80 mW/cm².

- Máxima temperatura de verano: 30 °C.
- Baja velocidad media del viento durante esa estación: k = 0,3.

El ejemplo 1 proporciona el valor de la potencia de salida de un panel trabajando a una temperatura Tt, fueron remplazados los valores anteriormente reflejados en la expresión 1.25.

Ejemplo 1: $Tt = 30 + (0, 3 \times 80) = 30 + 24 = 54^{\circ}C$

Una vez conocido este valor, se determina el incremento en la temperatura de trabajo respecto a la de prueba estándar (25 °C). En el ejemplo, este valor es de 29°C.

Las variables temperatura, radiación y velocidad del viento, influyen notablemente en la potencia de salida a la temperatura de trabajo generada por un módulo fotovoltaico y la expresión 1.26 es su ecuación característica.

$$Pt = Pp - (Pp \cdot d \cdot D_T)$$
 1.26

En cuanto:

Pt: Es la potencia de salida a la temperatura de trabajo Tt.

P_P: Es la potencia pico estándar del panel (a 25 °C)

d: Es el coeficiente de degradación (0,6%/°C)

D_T: Es el incremento de temperatura sobre la referencia de 25 °C

Asumiendo que $P_P = 60$ W y reemplazando los valores dados para cada una de las variables se obtiene el ejemplo 2.

Ejemplo (2) Pt = 60-(60x0.006x29) = 60-10.44=49.56 W

Nótese la enorme influencia que tiene la temperatura de trabajo del panel en la potencia generada. Para este ejemplo se produce una pérdida de casi un 20%. Para temperaturas de trabajo aún más elevadas, como es común en las zonas desérticas, donde la radiación es alta y los vientos son inexistentes durante el verano, la pérdida de potencia es más acusada.

En este ejemplo se pone de manifiesto la necesidad de monitorizar las variables temperatura, radiación y velocidad del viento, ya que influyen de forma muy notable en la potencia generada por un módulo fotovoltaico.

CAPÍTULO II. MODELACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS

2.1 Introducción

En este capítulo se describen los componentes de la instalación experimental empleada en el trabajo. Se justifica la utilización del Matlab como plataforma de programación de los modelos matemáticos. Finalmente se describe la metodología computacional empleada para obtener los parámetros internos de los paneles FV, que permiten la modelación y simulación bajo condiciones climatológicas variables.

2.2 Modelo general del módulo fotovoltaico

La aplicación programada que permite la extracción automática de los parámetros internos del modelo, utiliza un método iterativo que engloba dentro de sus pasos, el método Newton-Raphson.

La figura 2.1 muestra el diagrama de bloques del modelo programado. La función base programada es la del panel FV. El modelo parte con los parámetros internos desconocidos del panel, descritos en el modelo teórico 2D7P.



Figura 2.1. Diagrama de bloques del modelo de panel FV programado.

Como variables de entrada se toman los valores de tensión de polarización, V en Volt, Irradiancia G en W/m2, y temperatura T en grados Celsius °C, para calcular la corriente que genera el panel, I en Amperes A (ecuación 2.1).

$$I = \left[I_{PV_STC} + K_{i} \cdot \left(T - T_{STC}\right)\right] \cdot \left(\frac{G}{G_{STC}}\right) - I_{OI} \cdot \left[exp\left(\frac{V + I \cdot R_{s}}{n_{1} \cdot V_{TI}}\right) - 1\right] - I_{O2} \cdot \left[exp\left(\frac{V + I \cdot R_{s}}{n_{2} \cdot V_{T2}}\right) - 1\right] - \left(\frac{V + I \cdot R_{s}}{R_{p}}\right)$$

$$(2.1)$$

Como se mostró en la tabla 1.2 del epígrafe 1.5, la resolución del modelo 2D7P empleando el método Newton-Raphson, tiene un nivel de complejidad alto, una carga computacional alta y una precisión alta. Por esta razón, se debe buscar una metodología apropiada que permita obtener los siete parámetros desconocidos.

2.3 Método de solución del modelo de dos diodos

La metodología computacional seguida en este trabajo se basa en la propuesta de [12] para obtener los parámetros internos de módulos FV aplicada al modelo de un diodo (o una exponencial). Años después, esta metodología fue mejorada y aplicada al modelo de dos diodos por [13-16], donde se obtienen resultados muy precisos y además, resulta efectivo para las diversas tecnologías de silicio existentes.

La misma consta de dos fases fundamentales, éstas son:

2.3.1 Simplificación de la corriente de saturación inversa del diodo

La ecuación de la corriente fotogenerada (IPV) de un módulo FV se expresa en función de la temperatura y la irradiancia, según se indica en la ecuación 1.14. de igual manera, se considera que la corriente de saturación inversa del diodo I0 depende de la temperatura y se expresa según la ecuación 2.1 [12-14].

$$I_{O} = I_{O_{STC}} \cdot \left(\frac{T_{STC}}{T}\right)^{3} \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_{g}}{n \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T}\right)\right]$$
(2.1)

Donde L_g es la energía en la banda Gap del semiconductor y la corriente nominal de salutación $I_{O_{-STC}}$ está representada en la ecuación 2.2 [17, 18].

$$I_{O_{STC}} = \frac{I_{STC}}{\left[exp\left(\frac{V_{OC_{STC}}}{n \cdot V_{T_{STC}}}\right) - 1 \right]}$$
(2.2)

La ecuación 2.2 se modifica en aras de buscar que coincida el voltaje de circuito abierto Voc calculado con el que proporciona el fabricante en la ficha técnica del módulo FV, para un rango amplio de temperaturas. Para mejorar la precisión del cálculo de la corriente I_{0_STC} , se emplea la ecuación 2.3 donde se incluye al coeficiente de temperatura/voltaje que se encuentra disponible en la ficha técnica del panel [12, 14].

$$I_{O_{STC}} = \frac{I_{STC} + K_i \cdot (T - T_{STC})}{\left[exp\left(\frac{V_{OC_{STC}} + K_v \cdot (T - T_{STC})}{n \cdot V_{T_{STC}}}\right) - 1 \right]}$$
(2.3)

Donde

 I_{STC} : Corriente de cortocircuito (proporcionada en la ficha técnica)

 V_{OC_STC} : Voltaje a circuito abierto (proporcionado en la ficha técnica)

 K_v : Coeficiente temperatura/voltaje (proporcionado en la ficha técnica)

Todos los valores presentes en la ecuación 2.3 se pueden extraer de la ficha técnica del módulo fotovoltaico. Para simplificar el cálculo, se asume que ambas corrientes de saturación son iguales en magnitud, según la ecuación 2.4.

$$I_{O1_STC} = I_{O2_STC} = \frac{I_{STC} + K_i \cdot (T - T_{STC})}{\left[exp\left(\frac{V_{OC_STC} + K_v \cdot (T - T_{STC})}{\left(\frac{n1 + n2}{p} \right) \cdot V_{T_STC}} \right) - 1 \right]}$$
(2.4)

Con esta nueva ecuación, se simplifica considerablemente el tiempo de cómputo empleado en la iteración y la solución puede ser obtenida de forma analítica.

Los factores de idealidad n1 y n2 representan la difusión y recombinación de los componentes de la corriente respectivamente [13, 14, 17].

Según la teoría de la difusión de Shockley, la corriente de difusión del diodo n1 es igual a la unidad. Sin embargo, la decisión del valor que tomará n2 es flexible, basado en los trabajos de modelación encontrados en la bibliografía, se asume que n2 = 1,2 [12-14, 17, 19].

Asimismo se asume que la expresión (a1+a2/p) = 1, por tanto se debe escoger un valor de p \geq 2,2. Basado en estas suposiciones se obtiene la ecuación 2.3 [14].

$$I_{O1_STC} = I_{O2_STC} = \frac{I_{STC} + K_{i} \cdot (T - T_{STC})}{\left[exp\left(\frac{V_{OC_STC} + K_{v} \cdot (T - T_{STC})}{V_{T_STC}}\right) - 1 \right]}$$
(2.3)

Esta generalización evita la ambigüedad de tener que seleccionar un valor de n1 y n2. De esta forma se agiliza el cálculo de los parámetros Ipv, lo1, lo2, a1 y a2, repercutiendo en menos tiempo de modelación en la computadora.

2.3.2 Determinación de los valores de Rs y Rp

Todavía faltaría calcular los valores de Rs y Rp, éstos se obtienen mediante un lazo iterativo. Algunos investigadores estiman estos dos parámetros de forma independiente, obteniendo resultados satisfactorios. Pero en este trabajo se calculan los valores de Rp y Rs simultáneamente.

Para ello, se maximiza el punto de máxima potencia (Pm), luego se va reduciendo lentamente hasta que el punto de máxima potencia calculado (PmaxC) coincida con el punto de máxima potencia de la ficha del fabricante (en lo adelante punto de máxima potencia experimental PmaxE).

El punto de coincidencia PmaxC con PmaxE será posible, si se incrementa de forma iterativa el valor de Rs mientras se calcula simultáneamente Rp. A partir del modelo de dos diodos representado en la ecuación 1.13, en el punto de máxima potencia se extrae la expresión de Rp y se reescribe según la ecuación 2.4.

$$R_{p} = \frac{V_{mp_{STC}} + I_{mp_{STC}} \cdot R_{s}}{\left\{I_{pV} - I_{O1} \cdot \left[exp\left(\frac{V_{mp_{STC}} + I_{mp_{STC}} \cdot R_{s}}{a_{1} \cdot V_{T}}\right) - 1\right] - \left\{-I_{O2} \cdot \left[exp\left(\frac{V_{mp_{STC}} + I_{mp_{STC}} \cdot R_{s}}{a_{2} \cdot V_{T}}\right) - 1\right] - \frac{P_{maxE}}{V_{mp_{STC}}}\right\}$$

$$(2.4)$$

Las condiciones iniciales de ambas resistencias vienen dadas por las ecuaciones 2.5 y 2.6 [12-14].

$$R_{so} = 0$$
 (2.5)

$$R_{po} = \frac{V_{mp_STC}}{I_{sc_STC} - I_{mp_STC}} - \frac{V_{oc_STC} - V_{mp_STC}}{I_{mp_STC}}$$
(2.6)

La ecuación 2.6 describe el valor inicial de Rp, que es la pendiente del segmento de línea entre la corriente de cortocircuito (Isc) y el punto de máxima potencia Pm. Para cada iteración el valor de Rp se calcula simultáneamente según la ecuación 2.4. Combinando la ecuación 2.1 y 2.4, se sustituyen los valores de las corrientes IPV, lo1 y lo2, obteniéndose finalmente el modelo general como se muestra en la ecuación 2.7.

$$\begin{split} \mathbf{I} &= \left[\mathbf{I}_{PV_STC} + \mathbf{K}_{i} \cdot \left(\mathbf{T} - \mathbf{T}_{STC} \right) \right] \cdot \left(\frac{\mathbf{G}}{\mathbf{G}_{STC}} \right) - \frac{\mathbf{I}_{STC} + \mathbf{K}_{i} \cdot \left(\mathbf{T} - \mathbf{T}_{STC} \right)}{\left[\exp \left(\frac{\mathbf{V}_{OC_STC} + \mathbf{K}_{v} \cdot \left(\mathbf{T} - \mathbf{T}_{STC} \right)}{\left(\frac{n_{1} + n_{2}}{p} \right) \cdot \mathbf{V}_{T_STC}} \right) - 1 \right]} \cdot \\ &\cdot \left[\exp \left(\frac{\mathbf{V} + \mathbf{I} \cdot \mathbf{R}_{s}}{n_{1} \cdot \mathbf{V}_{T1}} \right) - 1 \right] - \frac{\mathbf{I}_{STC} + \mathbf{K}_{i} \cdot \left(\mathbf{T} - \mathbf{T}_{STC} \right)}{\left[\exp \left(\frac{\mathbf{V}_{OC_STC} + \mathbf{K}_{v} \cdot \left(\mathbf{T} - \mathbf{T}_{STC} \right)}{\left(\frac{n_{1} + n_{2}}{p} \right) \cdot \mathbf{V}_{T_STC}} \right) - 1 \right]} \cdot \\ &\cdot \left[\exp \left(\frac{\mathbf{V} + \mathbf{I} \cdot \mathbf{R}_{s}}{n_{2} \cdot \mathbf{V}_{T2}} \right) - 1 \right] - \left(\frac{\mathbf{V} + \mathbf{I} \cdot \mathbf{R}_{s}}{\mathbf{R}_{p}} \right) \end{split}$$

(2.7)

Con las consideraciones descritas anteriormente, se elimina la necesidad de calcular los siete parámetros del modelo 2D7P, siendo solamente necesario calcular los valores de RS y RP de forma iterativa. Este constituye el principal aporte del algoritmo seguido en este trabajo y propuesto por [12-14, 17, 19].

2.4 Algoritmo de solución

El método de solución del modelo 2D7P descrito en el epígrafe anterior permite calcular los siete parámetros desconocidos del modelo. Con la disponibilidad de estos siete parámetros, se calcula la corriente de salida I de la celda utilizando el método de Newton-Raphson. En la figura 2.2 se muestra el algoritmo seguido para determinar el punto de máxima potencia.



Figura 2.2. Diagrama de flujo del algoritmo de cálculo del punto de máxima potencia.

En las figuras 2.3 y 2.4 se muestra el funcionamiento del algoritmo, en el gráfico 2.3 se observa el movimiento hacia la izquierda del punto de máxima potencia calculado (PmaxC) según se incrementa el valor de la resistencia Rs. El panel FV empleado es el K50CT, tiene una potencia Pm = 54 Wp, con un voltaje en el punto de máxima potencia Voc = 17,4.



Figura 2.3. Curvas P-V que muestran el funcionamiento del algoritmo.

En las gráficas de la figura 2.4 y 2.5 se observa como el valor de R_S y R_P es calculado de forma simultánea, mientras el punto de máxima potencia PmaxC se va moviendo hacia la izquierda de la gráfica. Cuando finalmente el punto PmaxC coincide con el PmaxE, es decir, cuando el error es menor que la tolerancia (fijada en 0,01), el algoritmo llega a su fin.



Figura 2.4. Curva P-R_S que muestra el funcionamiento del algoritmo.



Figura 2.5. Curva P-R_P que muestra el funcionamiento del algoritmo.

Las herramientas tradicionales de simulación de sistemas fotovoltaicos permiten realizar extensos y precisos análisis, pero generalmente, no permiten al usuario modificar los algoritmos que describen la respuesta individual de cada uno de los componentes. Teniendo en cuenta estas restricciones, se escoge al Matlab como plataforma de programación favorita para la realización de este trabajo, puesto que forma parte de las herramientas genéricas con arquitectura abierta disponibles en el mercado, caracterizada por su alto nivel de flexibilidad en la interacción entre sus componentes.

2.4 Aplicación informática basada en GUIDE/Matlab

Matlab fue creado por Mathworks en 1984 y ha sido ampliado y mejorado en numerosas ocasiones. Es un entorno abierto de cálculo numérico que ofrece avanzadas herramientas de manipulación matemática con un potente e intuitivo lenguaje de programación. Proporciona numerosos paquetes de librerías, toolboxes, para ampliar las prestaciones de análisis en múltiples campos de matemática aplicada.

Como se mostró en el epígrafe 1.5, el Simulink del Matlab es una de las plataformas favoritas para la modelación y simulación de paneles fotovoltaicos. Esto se debe a que el Simulink permite incorporar modelos, de dispositivos y sistemas, enlazándolos con métodos de cálculo numérico avanzado para el análisis estadístico automático de instalaciones fotovoltaicas.

Los modelos con Matlab permiten la interacción con métodos de extracción automática de parámetros, a costa de un mayor tiempo de cálculo. Los modelos en Simulink, en cambio, aprovechan la mayor potencia de los métodos de cálculo numérico disponibles y el entorno gráfico, para optimizar el tiempo de cálculo y diseño.

Sin embargo, para este trabajo se ha programado una aplicación con el *toolbox* GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*) de Matlab. El empleo de este *toolbox* le ofrece al usuario un entorno humanizado para la simulación de paneles FV bajo efecto variable de irradiancia y temperatura. La aplicación informática confeccionada, constituye un aporte práctico que permite que cualquier usuario que no tenga conocimientos de programación, pueda interactuar fácilmente con su trabajo.

Finalmente, utilizando Matlab Compiler[™] v4.18.1 se obtuvo una aplicación (curvetracer.exe) autónoma capaz de ejecutarse en cualquier computadora que no tenga Matlab instalado. La pantalla principal de la aplicación se muestra en la figura 2.6.

33

📣 Simulador de Paneles Fotovoltaic	OS		
Exportar Ayuda Acerca de	Salir		ע
Si	mulador o	de Panel	les Fotovoltaicos
DATOS DE CATÁL	0G0		CURVAS CARACTERÍSTICAS
Reset Fabricante	CCE		Número de curvas 5
Modelo	DSM-18	0-C	Irradiancia inicial 200 W/m^2
Potencia Máxima (PMP)	180	Wp	Incremento de irradiancia 200
Voltaje cortocircuito (Voc_STC)	21.8	v	Temperatura inicial 25 °C
Voltaje en PMP (Vpmp)	17.4	V	Incremento de temperatura 0
Corriente en PMP (Ipmp)	10.34	Α	Tipo de curvas
Corriente circ. abierto (Isc_STC)	11.5	Α	Orriente vs. Tensión
Coeficiente Ki	0.0006	mA/℃	Potencia vs. Tensión
Coeficiente Kv	-0.0037	mV/°C	- Parámetros de curvas
Celdas en serie	36		Irradiancia incidente
Celdas en paralelo	2		 Temperatura
Tipo de tecnología	Si: Mono		🔿 Resistencia Serie
DADÁMETDOS INTE	THOS		Resistencia Paralelo
PARAMETROSINTE	KNUS-		
Resistencia Serie (Rs)	1.55	Ohm	Reset Graficar
Resistencia Paralelo (Rp)	637.5	Ohm	ARREGLO DE PANELES
Factor de idealidad (n)	0.1		
Corriente saturación inversa (lo)	2.863e-6	A	Paneles en serie
Corriente fotogenerada (Ipv)	11.5	A	Paneles en paralelo
Reset	C	alcular	Reset Graficar

Figura 2.6. Pantalla principal de la aplicación GUI de Matlab.

2.5 Técnica experimental

Las mediciones siempre se realizaron a cielo despejado, el ángulo de inclinación de los módulos fue de 34º que es considerado como el valor óptimo para Madrid [20], con una orientación de 0º Este. La figura 2.7 muestra un círculo amarillo del lugar exacto donde se realizaron las mediciones.



Figura 2.7. Lugar del emplazamiento de la instalación experimental.

Obtención de curvas I-V experimentales

Para obtener las curvas características de I-V del panel fotovoltaico, el sistema de adquisición de datos primeramente descarga el capacitor que hace función de carga de los paneles.

Luego se acciona a través del software de adquisición un interruptor virtual para la toma de las mediciones puntuales. Se toman un total de 200 puntos de la curva I-V en un periodo de tiempo de 200 milisegundos.

Simultáneamente a los valores de corriente y tensión medidos, también se toman los valores de irradiancia y temperatura en el momento del accionamiento del interruptor.

2.6 Instalación experimental

El método de solución adoptado en este trabajo, para determinar los parámetros internos desconocidos del modelo 2D7P, ha sido suficientemente utilizado y validado en investigaciones precedentes. Tiene un tiempo de ejecución un poco demorado, pero ofrece resultados muy precisos. La aplicación informática creada con el *tolboox* GUIDE, permite realizar simulaciones con pocos conocimientos del usuario y además, puede ser ejecutada de forma autónoma sin necesidad de tener el Matlab instalado en la computadora.

Para el desarrollo experimental de esta investigación, se empleó un "carro" fotovoltaico (figura 2.8) del Laboratorio de Tecnologías Aplicadas (LTA) del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M).



Figura 2.8. Instalación experimental

Este carro fotovoltaico está equipado con los siguientes elementos:

- 1) Tres módulos solares KC50T
- 2) Controlador MPPT (Maximum Power Point Tracking)
- 3) Baterías
- 4) Sistema de adquisición de datos.

La figura 2.9 muestra la conexión de los componentes de la estación experimental.



Figura 2.9. Esquema en bloques de la conexión de los componentes del carro fotovoltaico.

Tres módulos fotovoltaicos KC50T de 54 Wp: Silicio monocristalino. El fabricante es KYOCERA y tienen fecha de producción de marzo de 2007. Los módulos han sido conectados en paralelo, de forma que se obtendrán corrientes mayores, mientras que las tensiones se mantienen en el mismo orden que las de uno solo. Los datos en CEM que aporta el fabricante se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Datos de catálogo de los módulos KYOCERA KC50T.

Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)				
Maximum Power (Pmax)	54W (+10%∕-5%)			
Maximum Power Voltage (Vmpp)	17.4V			
Maximum Power Current (Impp)	3.11A			
Open Circuit Voltage (Voc)	21.7V			
Short Circuit Current (Isc)	3.31A			
Max System Voltage	600V			
Temperature Coefficient of Voc	-8.21×10 ⁻² V/°C			
Temperature Coefficient of Isc	1.33×10 ⁻³ A/°C			
*STC : Irradiance 1000W/m², AM1.5 spectrum, module temperture 25°C				
Electrical Performance at 800W/m ² , NOCT, AM1.5				
Maximum Power (Pmax)	38W			
Maximum Power Voltage (Vmpp)	15.3V			
Maximum Power Current (Impp)	2.49A			
Open Circuit Voltage (Voc)	19.7V			
Short Circuit Current (Isc)	2.67A			

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) : 47°C

Controlador MPPT (Maximum Power Point Tracking): El fabricante es Victron de la serie Blue Solar. Su función es imponer en el panel la tensión cuya potencia correspondiente sea la máxima posible, de forma dinámica, según vayan cambiando la irradiancia y la temperatura. Tiene tres tomas de conexión: a la carga (las resistencias o reóstatos), a la batería y a la salida del panel. La conexión de estas salidas se realizó en el orden enumerado, mientras que la desconexión se hizo de forma contraria.

Baterías: El fabricante es HITACHI y la serie es la HP24-12. Tiene una capacidad de 24 A·h (Amperios·hora). Su tensión nominal es 12 V, no debiendo salirse de los límites inferior (11,8 V) y superior (13,6 V).

Sistema de adquisición de datos: Se fueron tomando simultáneamente datos de temperatura ambiente, temperatura del panel solar, irradiancia, tensión e intensidad a la salida del panel. Las medidas se tomaron en días soleados, sin nubosidad; no se ha tenido en cuenta en el modelo el índice de claridad.

CAPÍTULO III. SIMULACIÓN BAJO EL EFECTO DE LA IRRADIANCIA Y TEMPERATURA

3.1 Introducción

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones en Matlab. Se valida el modelo explicado en el capítulo anterior. Se realizan varias simulaciones de paneles de diferentes tecnologías de silicio, bajo el efecto de la irradiancia y la temperatura. Finalmente se realiza una breve valoración económica y explican los efectos medioambientales de los sistemas fotovoltaicos.

3.2 Validación del modelo

La validación del modelo se realizó de forma experimental. Con el carro fotovoltaico se pudieron realizar mediciones en condiciones variables de irradiancia y temperatura.

Primeramente, se muestra en la tabla 3.1 los parámetros extraídos a diferentes modelos de paneles fotovoltaicos de diferentes tecnologías.

Doró	Bará- Multicristalino		Monocristalino	Amorfo
Fala-	KYOCERA TSM310		Isofotón	RESIGUM
metros	KC50T	PC14	ISF250	EPV144S
Ns	36	72	60	22
Pm	54 W	310 W	250 W	144 W
Isc_STC	3,31 A	8,85 A	8,75 A	5,3 A
Voc_STC	21,7 V	45,5 V	37,8 V	46,2 V
Impp	3,11 A	8,38 A	8,17 A	4,36 A
Vmpp	17,4 V	37 V	30,6 V	33 V
Ki	0,00133 A/°C	0,004425 A/°C	0,0042 A/°C	0,0001 A/°C
Kv	-0,0821 V/°C	-0,1456 V/°C	-0,126252 V/°C	-0,0038 V/°C
I _{PV}	3,31 A	8,85 A	8,75 A	5,3 A
I ₀₁ =I ₀₂	2,1869e-10 A	7,7873e-09 A	2,0057e-10 A	1.8134e-35 A
n1	1	1	1	1
n2	1,2	1,2	1,2	1,2
R _P	533,015 Ω	1536,781 Ω	210,844 Ω	51,332 Ω
R _s	0,491 Ω	0,348 Ω	0,304 Ω	2,487 Ω

Como ya se comentó anteriormente, este modelo tiene la ventaja de servir para simular el comportamiento de cualquier tecnología de silicio: monocristalino, multicristalino y amorfo.

Según se explicó en el Capítulo 2, la aplicación creada en GUIDE del Matlab no es tan rápida en el procesamiento de los datos como el SIMULINK. Se prefiere ganar en mejorar el manejo e interacción de los usuarios con la aplicación, a costa de mayor tiempo de ejecución del código para obtener los parámetros internos de los módulos FV. La tabla 3.2 muestra el tiempo en segundos y minutos que demoró la aplicación informática en sus cálculos.

Tabla 3.2. Tiempo de ejecución del código en Matlab para la extracción de parámetros.

Tiempo Multicristalino		Monocristalino	Amorfo	
de ejecución	KYOCERA KC50T	TSM310 PC14	Isofotón ISF250	RESIGUM EPV144S
Segundos	2077,707872	1204,896825	900,649912	2771,180290
Minutos	34,628464	20,081613	15,010831	46,186338

Los tiempos de ejecución del código de Matlab, fueron registrados en una computadora con las siguientes características:

Sistema operativo: Microsoft Windows 10 Pro 10.0.10240.16384 (Win10 RTM)

Tipo de CPU: Mobile Dual Core Intel Core i5-3230M, 3200 MHz (32 x 100)

Nombre de la placa base: Lenovo 20160

Chipset de la placa base: Intel Panther Point HM77, Intel Ivy Bridge

Memoria del sistema: 3656 MB (DDR3-1600 DDR3 SDRAM)

Tipo de BIOS: Phoenix (04/10/2013)

Plataforma Simulación: Matlab v8.6.0.267246 (R2015b)

La validación experimental del modelo se pudo realizar solamente con la tecnología de silicio monocristalino, ya que el carro fotovoltaico solo contaba con este tipo de tecnología de fabricación.

Las gráficas de las figuras 3.1 y 3.2 muestran las curvas características de I-V y P-V a una irradiancia de 1150 W/m² y una temperatura de 49,1 grados Celsius. A simple vista se puede apreciar que el modelo responde muy bien a las condiciones climatológicas indicadas.



Figura 3.1. Curvas I-V medidas experimentalmente vs simulada en el GUI de Matlab. Panel KYOCERA KC50T



Figura 3.2. Curvas P-V medidas experimentalmente vs simulada en el GUI de Matlab. Panel KYOCERA KC50T.

Como al modelo se le pasa como variable de entrada la tensión V, en la salida se obtiene el valor correspondiente a la corriente para cada valor de entrada de V. Recuérdese que se aclaró anteriormente que son 200 valores de tensión de entrada, por lo que se obtienen 200 valores de corriente en la salida.

En la tabla 3.3 se muestra la validación realizada a los valores de corriente en la salida del modelo, bajo condiciones climatológicas variables. Se calculó el coeficiente de correlación entre los 200 valores de la corriente simulada contra los 200 valores de la corriente medida experimentalmente.

Tabla 3.3. Coeficiente de correlación calculado para condiciones variables de irradiancia y temperaturas.

G (W/m ²)	T (°C)	Error (R)
1150	49,1	0,9998
1080	42,8	0,9998
630	31,7	0,9880
470	27,5	0,9994
288	24,6	0,9955

Los resultados evidencian que el modelo teórico se ajusta muy bien a la realidad.

3.3 Simulación de un caso de estudio

En las figuras 3.3 y 3.4 se muestran las curvas obtenidas cuando se varia la resistencia serie $R_S y$ la resistencia paralela R_P respectivamente. Estas graficas evidencia que, si no se calculan los parámetros del modelo adecuadamente, se podrían obtener curvas erróneas y el ajuste sería peor.

De ahí, la importancia de escoger el método apropiado para la extracción de parámetros del modelo de dos diodos. El algoritmo escogido responde muy bien a las curvas características I-V y P-V para condiciones climatologías variables.



Figura 3.3. Curva I-V variando el valor de R_s . Panel KYOCERA KC50T.



Figura 3.4. Curva I-V variando el valor de R_P. Panel KYOCERA KC50T.

3.3.1 Efecto de la irradiancia en las curvas I-V y P-V

La idea de realizar simulaciones del comportamiento de los módulos fotovoltaicos es comprobar la veracidad de los modelos teóricos explicados anteriormente, por eso ahora se procede a variar los parámetros de la simulación y que afectan a las curvas I-V y P-V, en este caso se varia la irradiancia G.

En general la irradiancia afecta principalmente a la corriente, de forma que se puede considerar que la corriente de cortocircuito del generador fotovoltaico es proporcional a la irradiancia.

En la figura 3.5 se muestran las curvas características de I-V y I-V-P respectivamente, bajo condiciones de irradiancia variable y a una temperatura constante de 25 °C.



Figura 3.5. Curvas características I-V del panel KC50T bajo el efecto de irradiancia variable.

Se puede observar como la irradiancia G influye directamente en la curva desplazándola hacia valores más grandes en corriente y manteniéndola

constante en valores de tensión Voc, puesto que esta última no varía con la irradiancia sino con la temperatura.

De igual forma, la figura 3.6 muestra las curvas P-V para los cambios en la irradiancia detallados y a una temperatura fija de 25 °C.



Figura 3.6. Curvas características P-V del panel KC50T bajo el efecto de irradiancia variable.

Como se puede apreciar en los gráficos anteriores, la irradiancia es una variable climatológica que afecta a la corriente (y por ende a la potencia) de los paneles fotovoltaicos. El conocimiento del comportamiento de esta variable es de vital importancia, ya que define el potencial de generación de energía eléctrica de los paneles FV en el lugar del emplazamiento.

3.3.2 Efecto de la temperatura en las curvas I-V y P-V

La temperatura afecta principalmente a los valores de tensión de la curva característica I-V y tiene su mayor influencia en el voltaje de circuito abierto (V_{OC}) , aunque también modifica los valores del punto de máxima potencia y el valor de I_{SC} (éste muy ligeramente).

En la figura 3.7 puede observarse la variación de la curva característica I-V del panel KC50T bajo el efecto de la temperatura, manteniendo la irradiancia constante. En las figuras 3.7 y 3.8 se muestran las curvas características de I-V y P-V respectivamente, bajo condiciones de temperatura variable y a una irradiancia constante de 1000 W/m².



Figura 3.7. Curvas características I-V del panel KC50T bajo el efecto de temperatura variable.



Figura 3.8. Curvas características P-V del panel KC50T bajo el efecto de temperatura variable.

Como se muestra en ambos gráficos, la temperatura es una variable climatológica que afecta a la tensión (y por ende a la potencia) de los paneles fotovoltaicos.

El conocimiento de estas curvas es de gran importancia, puesto que permite conocer el comportamiento que tendrán los paneles, en las condiciones de temperatura reales de las regiones donde se proyecten emplazarlos. Nótese la diferencia de potencial entre los valores de temperatura de 75 °C y 25 °C.

Uniendo los resultados anteriores se obtiene el gráfico 3D de la figura 3.9, la escala de colores demuestra la variación que sufre la corriente fotogenerada Ipv según el comportamiento de la irradiancia y la temperatura.



Figura 3.9. Influencia de la variación de la temperatura en Ipv.

3.4 Valoración económica y técnica de la aplicación

Una vez mostrados los resultados obtenidos por la aplicación, se puede afirmar que el código creado en esta puede constituir uno de los primeros pasos para su uso con el conjunto de herramientas técnicas y novedosas con que cuenta el Matlab para el estudio a fondo de las Energías renovables. Como este trabajo incluye la programación de una aplicación para realizar un análisis de paneles y arreglos de sistemas fotovoltaicos, la valoración económica que se evaluó fue el salario de un programador para que programe el software, el tiempo de trabajo empleado en el desarrollo de la aplicación y el precio comercial del propio Matlab.

El precio de la versión de Matlab Home que se empleó para la programación del GUI fue Matlab2015b y cuesta 127 USD el *WorkSpace* y 59 USD cada *Toolbox*.

En la tabla 3.4 se resume el costo total de la energía consumida en la programación del GUI de la aplicación en Matlab. Para esto, se tuvo en cuenta que el total de tiempo empleado en la programación fue de 60 días con un máximo de 10 horas diarias, lo que equivale a 2 * 30 * 10 = 600 horas de uso de los equipos. (La tabla refleja sólo el primer mes)

Equipo	Potencia(W)	Tiempo de uso	Energía consumida	
		(horas)	(W/h)	
PC Escritorio	100	300	30000	
Monitor	50	300	15000	
Lámpara	18	300	5400	
fluorescente	10	000	0400	
Energía	50,40			
C	4,50			

Tabla 3.4. Valoración económica de la aplicación en el GUIDE/Matlab

3.5 Efecto medioambiental de las tecnologías fotovoltaicas

Los efectos de la energía solar fotovoltaica sobre los principales factores ambientales son los siguientes [21]:

Clima

La generación de energía eléctrica directamente a partir de la luz solar no requiere ningún tipo de combustión, por lo que no se produce polución térmica ni emisiones de CO2 que favorezcan el efecto invernadero.

En cuanto al "robo" de radiación solar por parte de los paneles al medio ambiente circundante que, en teoría podría modificar el microclima local, es necesario recordar que aproximadamente sólo el 10% de la energía solar incidente por unidad de tiempo sobre la superficie del campo fotovoltaico es transformada y transferida a otro lugar en forma de energía eléctrica, siendo el 90% restante reflejada o transferida a través de los módulos.

Geología

Las células fotovoltaicas se fabrican con silicio, elemento obtenido de la arena, muy abundante en la Naturaleza y del que no se requieren cantidades significativas. Por lo tanto, en la fabricación de los paneles fotovoltaicos no se producen alteraciones en las características litológicas, topográficas o estructurales del terreno.

Suelo

Al no producirse ni contaminantes, ni vertidos, ni movimientos de tierra, la incidencia sobre las características físico-químicas del suelo o su erosión es nula.

En el primer caso, el territorio utilizado puede reducirse casi a cero porque los paneles pueden ser instalados sobre terrenos ya ocupados, como tejados, fachadas y terrazas de los edificios existentes, cubiertas de aparcamientos o, normalmente, de áreas de descanso, bordes de autopistas, etc. El potencial para la utilización descentralizada de los sistemas fotovoltaicos puede considerarse, por lo tanto, bastante amplio.

Aguas superficiales y subterráneas

No se produce alteración de los acuíferos o de las aguas superficiales ni por consumo, ni por contaminación por residuos o vertidos.

Flora y fauna

La repercusión sobre la vegetación es nula, y, al eliminarse los tendidos eléctricos, se evitan los posibles efectos perjudiciales para las aves.

Paisaje

El impacto visual está relacionado con la orientación de estas superficies respecto a los posibles puntos de observación y puede minimizarse respetando unas distancias oportunas respecto a los centros habitados, las carreteras etc., o utilizando elementos como árboles o setos entre los paneles y los puntos de observación, respetando, en todo caso, la exigencia de evitar sombras indeseadas en el campo fotovoltaico.

En algunos casos, los sistemas fotovoltaicos pueden rechazarse por cuestiones estéticas. En general, el impacto visual depende sobre todo del tamaño del sistema. El tamaño no representa un problema en el caso de su utilización descentralizada, ya que los sistemas pueden estar bien integrados sobre los tejados o en las fachadas de los edificios.

Los sistemas fotovoltaicos de tamaño medio o grande pueden, en cambio, tener un impacto visual no evitable, que depende sensiblemente del tipo de paisaje (de su valor).

Ruidos

El sistema fotovoltaico es absolutamente silencioso, lo que representa una clara ventaja frente a los generadores de motor en viviendas aisladas.

Medio social

El suelo necesario para instalar un sistema fotovoltaico de dimensión media, no representa una cantidad significativa como para producir un grave impacto. Además, en gran parte de los casos, se pueden integrar en los tejados de las viviendas.

Otros impactos ambientales de esta fuente energética están relacionados con las infraestructuras necesarias para la operación de instalaciones fotovoltaicas. Quizás el factor más conocido y esgrimido contra las instalaciones fotovoltaicas sea la ocupación de espacio por parte de los paneles solares no integrados en la arquitectura. Hay que añadir también la ocupación de terreno debido a carreteras, líneas de transmisión instalaciones de acondicionamiento y almacenamiento de energía, subestaciones etc. Estos factores afectan, esencialmente a las grandes centrales FV. Desde el movimiento ecologista, se apuesta por un desarrollo prioritario de la ESFV integrada en la arquitectura y de un modo más simple, aprovechando la superficie de tejados y fachadas ya disponibles.

Es evidente que ni siquiera las tecnologías poco contaminantes, como la fotovoltaica, están exentas de conllevar impactos al medio ambiente y encuentran dificultades de aceptación por parte de la población. Sin embargo, la magnitud y la significación de estos sistemas son claramente inferiores a los de otras tecnologías de producción de energía tradicionales, aunque a veces puedan provocar oposiciones difíciles de superar.

CONCLUSIONES

- El desarrollo del marco teórico de la investigación permitió establecer los fundamentos teóricos necesarios para la comprensión del objeto de estudio.
- El modelo utilizado sirve para la extracción de parámetros internos desconocidos de todas las tecnologías de silicio existentes en el mercado.
- 3. Se simularon y validaron las curvas I-V y P-V del panel de prueba KT50C, bajo el efecto de irradiancia y temperaturas variables.
- La valoración medioambiental indica que es teóricamente factible y socialmente útil, el empleo de sistemas fotovoltaicos como fuente alternativa de generación de energía.

RECOMENDACIONES

- Utilizar la aplicación en GUI programada en Matlab como una herramienta didáctica para fines docentes en pregrado y de investigación en posgrado en el ISMMM.
- 2. Comparar los resultados del modelo de los dos diodos con otros modelos existentes en la literatura científica.

BIBLIOGRAFÍA

- Gandolfo, D.C, Molina, M.G y Patiño, H. D. 2011. Estimación de la energía [1] generada por sistemas fotovoltaicos mediante redes neuronales artificiales. In Proceedings of the Cuarto Congreso Nacional – Tercer Congreso Iberoamericano. Hidrógeno Fuentes Sustentables de Energía V HYFUSEN2011. 6.
- [2] Ospino, Adalberto, Robles, Carlos y Duran, Alejandro. Modelado y simulación de un panel fotovoltaico empleando técnicas de inteligencia artificial. Ingeniería Energética, 16 de febrero de 2016 2014, vol. XXXV, no. 3, p. 9.
- [3] Salmi, Tarak, Bouzguenda, Mounir, Gastli, Adel y Masmoudi, Ahmed. MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell. International Journal of Renewable Energy Research, 20 de febrero de 2016 2012, vol. 2, no. 2, p. 6.
- [4] Gupta, Aarti, Khare, Anula y Shrivastava, Amit. A Matlab-Simulink Model for Photovoltaic Cell with Single Cell Application. International Journal on Emerging Technologies, 16 de marzo de 2016 2014, vol. 5, no. 1, p. 4.
- [5] CAN, Hayrettin. Model of a photovoltaic panel emulator in MATLAB-Simulink. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2013, vol. 21, p. 9.
- [6] Boujemaa, Mehimmedetsi y Rachid, Chenni. Different methods of modeling a photovoltaic cell using Matlab/Simulink/Simscape. International Journal of Scientific & Engineering Research, 18 de febrero de 2016 2014, vol. 5, no. 6, p. 7.
- [7] Rustemli, S. y Dincer, F. Modeling of Photovoltaic Panel and Examining Effects of Temperature in Matlab/Simulink ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING, 5 de enero de 2016 2011, vol. 3, no. 109, p. 6.
- [8] Said, Samer, Massoud, Ahmed, Benammar, Mohieddine y Ahmed, Shehab. A Matlab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems Toolbox Journal of Energy and Power Engineering, 1 de febrero de 2016 2012, vol. 6, p. 11.
- [9] Mahor, Amita, Khan, Ashfaq y Soni, Mukta. Development and Simulation of Solar Photovoltaic model using Matlab/simulink. International Journal on Emerging Technologies, 2013, vol. 4, no. 1, p. 4.
- [10] Ahmad, Zameer y Singh, S.N. Extraction of the Internal Parameters of Solar photovoltaic Module by developing Matlab / Simulink Based Model. International Journal of Applied Engineering Research, 23 de enero de 2016 2012, vol. 7, no. 11, p. 5.
- [11] Pearson, T., Bhuvaneswari, S. y Samuel, S. Abish. Solar Radiation Prediction with Single Diode Photovoltaic Module. International Journal Of Engineering And Computer Science, 13 de marzo de 2016 2015, vol. 4, no. 1, p. 4.
- [12] Villalva, Marcelo Gradella, Gazoli, Jonas Rafael y Ernesto, Ruppert Filho. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, 11 de abril de 2016 2009, vol. 24, no. 5.

- [13] Ishaque, Kashif, Salam, Zainal y Taheri, Hamed. Accurate MATLAB Simulink PV System Simulator Based on a Two-Diode Model. Journal of Power Electronics, 11 de abril de 2016 2011, vol. 11, no. 2.
- [14] Soltani, Iman, Sarvi, Mohammad y Mirebrahimi, Seyyed Mehdi. A Novel modeling method for photovoltaic system during partial shading. Applied mathematics in Engineering, Management and Technology, 11 de abril de 2016 2014.
- [15] Alsayid, Basim. Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell/Module/Array with Two-Diode Model. International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE), 11 de abril de 2016 2012, vol. 1, no. 3.
- [16] Neçaibia, Amar, Boutasseta, Nadir y Mouhajer, Samir. A Simple Theoretical Method for the Estimation of Dynamic Resistance in Photovoltaic Panels. International Journal of Computer Applications, 11 de abril de 2016 2012, vol. 45, no. 14.
- [17] Eteiba, M.B., Shenawy, E.T. El, Shazly, J.H. y Hafez, A.Z. A Photovoltaic (Cell, Module, Array) Simulation and Monitoring Model using MATLAB®/GUI Interface. International Journal of Computer Applications, 13 de abril de 2016 2013, vol. 69, no. 6, p. 15.
- [18] Vajpai, Jayashri y Khyani, Harish Kumar. Mathematical Modeling and Experimental Validation of Performance Characteristics of Solar Photovoltaic Modules. International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM), 2 de febrero de 2016 2013, vol. 2, no. 11, p. 7.
- [19] Jena, Debashisha y Ramana, Vanjari Venkata. Modeling of photovoltaic system for uniform and non-uniform irradiance: A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 de abril de 2016 2015, vol. 52, p. 18.
- [20] Masa Bote, Daniel. Contribución a la integración de sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica: Recurso solar y predicción de generación. In.: Departamento De Electrónica Física. Escuela Técnica Superior De Ingenieros De Telecomunicación, 2014, p. 257.
- [21] <u>http://www.mem.gob.ni/index.php?s=1&idp=852&idt=1#</u> [online]. 2016.