

**IDENTIFICACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS PVP PARA
SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA
FOTOVOLTAICA**

**ANDRÉS MAURICIO JÁCOME GARCIA
JHON ALEXANDER CABRERA RAMIREZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

2015

**IDENTIFICACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS PVP PARA
SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGIA
FOTOVOLTAICA**

**ANDRÉS MAURICIO JÁCOME GARCIA
JHON ALEXANDER CABRERA RAMIREZ**

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros Electricistas.

Director:

**JAVIER ENRIQUE SOLANO MARTÍNEZ
Ingeniero Electricista, Ph.D**

Co-director:

**JUAN MANUEL REY LÓPEZ
Ingeniero Electricista**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

2015

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Industrial de Santander por la oportunidad de realizar los estudios de educación superior, además, agradecer de manera especial a los profesores Javier Enrique Solano Martínez y Juan Manuel Rey López por la orientación y colaboración prestada durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

DEDICATORIA

Primero a Dios, mi mamá, mi papá y mi hermano.

Segundo a mello y a mi novia.

Finalmente a mi compañero de trabajo de grado.

Andrés Mauricio Jácome García

DEDICATORIA

Este proyecto de grado se lo dedico a mi DIOS quién supo guiarme por el buen sendero, darme fuerzas como las de un Búfalo para seguir adelante y no desfallecer antes los problemas y circunstancias que se me presentaban, enseñándome a enfrentar los obstáculos como oportunidades para crecer.

A mi madre Nancy Ramírez y a mi padre Martin Cabrera, por su esfuerzo, comprensión, amor, apoyo en los momentos difíciles y por brindarme los recursos necesarios para estudiar. No hay un momento en el que no agradezca a DIOS el poder haber nacido en esta familia.

A mi amigo y compañero de proyecto Andrés Jácome, por el interés, la disciplina que aportó en el proyecto.

Jhon Alexander Cabrera Ramirez

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS.....	21
1.1 OBJETIVO GENERAL	21
1.1.1 Objetivos Específicos.....	21
2. MODELOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS	22
2.1. CELDA, PANEL Y ARREGLO FOTOVOLTAICO	22
2.2. CIRCUITOS EQUIVALENTES Y MODELOS MATEMÁTICOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS	23
2.2.1. Modelo Ideal.	25
2.2.2. Modelo de un Diodo Tomando en Cuenta Rs.....	25
2.2.3. Modelo de un Diodo Considerando la Resistencia Serie y Paralelo.	27
2.2.4. Modelo de Dos Diodos.....	28
3. SIMULACIÓN DE MODELOS FOTOVOLTAICOS EN MATLAB/SIMULINK.	29
3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN PARA EL MODELO RS.....	29

3.2. DESCRIPCIÓN DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE UN DIODO CONSIDERANDO LA RESISTENCIA SERIE Y PARALELO	33
3.3. DESCRIPCIÓN DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE DOS DIODOS.....	35
4. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS Y VALIDACIÓN.....	39
4.1 MODELO DE UN DIODO CONSIDERANDO SOLO LA RESISTENCIA SERIE.....	40
4.2. MODELO DE UN DIODO CONSIDERANDO LA RESISTENCIA SERIE Y PARALELO.....	44
4.3. MODELO DE DOS DIODOS.....	49
4.4. SELECCIÓN DEL MODELO PARA SIMULACIÓN.....	51
4.5. IDENTIFICACIÓN DE PARAMETROS A PARTIR DE LAS ESPECIFICACIONES DE LOS PVP.....	51
4.5.1. Validación del Procedimiento Presentado.....	51
4.5.2. Validación del Modelo Seleccionado con el Modulo Solar Shell SM55.....	57
4.5.3. Validación del Modelo Seleccionado con el Modulo Solar Shell ST40.	61
5. SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA.....	66
5.1 FORMALISMO DE REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA (REM)	66

5.2. REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA (REM) DEL SISTEMA ESTUDIADO	68
5.2.1 Resultados de Simulación.....	71
6. CONCLUSIONES	75
BIBLIOGRAFIA.....	77
ANEXOS.....	79

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Formación de arreglos fotovoltaicos: (a) Panel PV, (b) Arreglo PV.	23
Figura 2. Circuitos eléctricos de la celda fotovoltaica. (a) Modelo ideal [6]. (b) Modelo de un diodo considerando R_s [2]. (c) Modelo de un diodo considerando R_s y R_p [5]. (d) Modelo de dos diodos [4]......	24
Figura 3. Entradas y salida del modelo R_s en Matlab/Simulink.	29
Figura 4. Modelo para simulación de un Módulo Solar en Matlab/Simulink utilizando el modelo R_s	30
Figura 5. Modelado de la corriente de salida para un arreglo fotovoltaico. Ecuación 8.	31
Figura 6. Modelado de la corriente de saturación del módulo PV. Ecuación 4.	31
Figura 7. Modelado de la corriente fotovoltaica del módulo PV. Ecuación 3.	32
Figura 8. Modelado de la tensión de circuito abierto del módulo solar. Ecuación 6.	32
Figura 9. Modelado de un Módulo Solar en Matlab/Simulink utilizando el modelo de un diodo considerando R_s y R_p	33
Figura 10. Modelado en Matlab/Simulink de la Ecuación 13.	34
Figura 11. Modelado en Matlab/Simulink de la ecuación 10.	34
Figura 12. Modelado en Matlab/Simulink de la ecuación 14.	35
Figura 13. Modelo para simulación en Matlab/Simulink de un Módulo Solar utilizando el modelo de dos diodos.	36
Figura 14. Modelado en Matlab/Simulink de la ecuación 16.	36
Figura 15. Modelado en Matlab/Simulink de la ecuación 10.	37
Figura 16. Modelado en Matlab/Simulink de la ecuación 18.	37
Figura 17. Modelado en Matlab/Simulink de la función 1.	38
Figura 18. Modelado en Matlab/Simulink de la Función 2.	38

Figura 19. Diagrama de flujo del algoritmo de identificación de parámetros de módulos PV [12].....	40
Figura 20. Módulo PV SM55- R_s Vs G . $a=1$; $T=25^\circ\text{C}$	42
Figura 21. Módulo PV SM55- a Vs G . $R_s=0.5$ [ohm]; $T=25^\circ\text{C}$	42
Figura 22. Módulo PV SM55- I Vs V . $a=1$; $T=25^\circ\text{C}$	42
Figura 23. Módulo PV SM55- R_s Vs T . $a=1$; $G=1000$ W/m^2	43
Figura 24. Módulo PV SM55- I Vs V . $R_s=0.5$ [ohm]; $G=1000$ W/m^2	43
Figura 25. Módulo PV SM55- a VS G ; $T=25$ $^\circ\text{C}$	45
Figura 26. Módulo PV SM55- R_s VS G ; $T=25$ $^\circ\text{C}$	45
Figura 27. Módulo PV SM55- R_p Vs G ; $T=25$ $^\circ\text{C}$	46
Figura 28. Módulo SM55- I Vs V . $T=25$ $^\circ\text{C}$	46
Figura 29. Módulo PV SM55- R_s VS T ; $G=1000$ W/m^2	47
Figura 30. Módulo SM55 - R_p VS T ; $G=1000$ W/m^2	47
Figura 31. Módulo SM55- a VS T ; $G=1000$ W/m^2	47
Figura 32. Módulo SM55 - I VS V ; $G=1000$ W/m^2	48
Figura 33. Módulo PV SM55- R_s VS G : $a_1=1$; $a_2=1.3$; $p=2.3$; $T=25$ $^\circ\text{C}$	49
Figura 34. Módulo PV SM55- R_p VS G : $a_1=1$; $a_2=1.3$; $p=2.3$; $T=25$ $^\circ\text{C}$	49
Figura 35. Módulo PV SM55 - I VS V ; $a_1=1$; $a_2=1.3$; $p=2.3$; $T=25$ $^\circ\text{C}$	50
Figura 36. Módulo PV SM55- a VS G ; $R_s=0.5$ [ohm]; $T=25$ $^\circ\text{C}$; Función de ajuste $a=-0.00022637G+1.4223$. $R^2=0.997$	52
Figura 37. Módulo PV SM55 - I VS V ; $R_s=0.5$ [ohm]; $T=25$ $^\circ\text{C}$	53
Figura 38. Módulo PV SM55- R_s VS G ; $a=1$; $T=25$ $^\circ\text{C}$; Función de ajuste $R_s=704.53G^{(-1.035)}$. $R^2=0.9917$	54
Figura 39. Módulo PV SM55 - I VS V ; $a=1$; $T=25$ $^\circ\text{C}$	54
Figura 40. Módulo PV ST40- a VS G ; $R_s=0.5$ [ohm]; $T=25$ $^\circ\text{C}$. Función de ajuste $a=-0.001G+1.7367$. $R^2=0.9986$	55
Figura 41. Módulo PV ST40 - I VS V ; $R_s=0.5$ [ohm]; $T=25$ $^\circ\text{C}$	55
Figura 42. Módulo PV ST40- R_s VS G ; $a=1$; $T=25$ $^\circ\text{C}$. Función de ajuste $R_s=61655G^{(-1.78)}$. $R^2=0.994$	56
Figura 43. Módulo PV ST40 - I VS V ; $a=1$; $T=25$ $^\circ\text{C}$	57

Figura 44. Módulo PV SM55- R_s VS G ; $a=1$; $T=25$ °C. Función de ajuste $R_s=562.37G^{(-1.005)}$. $R^2=0.9778$	58
Figura 45. Módulo PV SM55- a VS G ; $R_s=0.5$; $T=25$ °C; Función de ajuste $a=-0.0002G+1.4135$. $R^2=0.9733$	59
Figura 46. Módulo PV SM55 - I VS V ; $R_s=0.5$ [ohm]; $T=25$ °C.	59
Figura 47. Módulo PV SM55- I VS V ; $a=1$; $T=25$ °C.	60
Figura 48. Módulo PV ST40- R_s VS G ; $a=1$; $T=25$ °C. Función de ajuste $R_s=48777G^{(-1.764)}$. $R^2=0.9644$	62
Figura 49. Módulo PV ST40- a VS G ; $R_s=0.5$ [ohm]; $T=25$ °C. Función de ajuste $a=-0.00096G+1.6399$. $R^2=0.9488$	62
Figura 50. Módulo PV ST40- I VS V ; $R_s=0.5$; $T=25$ °C.....	63
Figura 51. Módulo PV ST40- I VS V ; $a=1$; $T=25$ °C.	64
Figura 52. Bloques de asignación del formalismo REM. (a) Elemento de fuente, (b) Elemento de conversión mono-físico (c) Elemento de Control en lazo cerrado (d) Elemento de estrategia.....	67
Figura 53. Bloques del sistema estudiado empleando el formalismo REM. (a) Bloque de generación PV, (b) Bloque convertidor ideal DC/DC, (c) Bloque de inversión, (d) Bloque de control. (e)Barraje DC.	69
Figura 54. Sistema de generación de energía fotovoltaico utilizando el formalismo de representación energética macroscópica (REM).....	70
Figura 55. Sistema de generación de energía fotovoltaico implementado en Matlab/Simulink.....	70
Figura 56. Caso I, $G_1=1000$ W/m ² ; $G_2=800$ W/m ²	71
Figura 57. Módulo PV SM55 - P Vs T . $G_1=1000$ W/m ² ; $G_2=800$ W/m ² ; $T=25$ °C.....	72
Figura 58. Caso II, $G_1=200$ W/m ² ; $G_2=1000$ W/m ²	72
Figura 59. Módulo PV SM55 - P Vs T . $T=25$ °C. $G_1=200$ W/m ² ; $G_2=1000$ W/m ² ; $T=25$ °C.....	73
Figura 60. Caso III, $G(t) = (\exp((-0.5(t - 12)^2)/(\sqrt{5})^2)) * 1000$	73
Figura 61. Arreglo PV SM55 1x5. P Vs T . $T=25$ °C.	74

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Error para cada nivel de irradiancia.	43
Tabla 2. Error para cada nivel de temperatura.....	44
Tabla 3. Error para cada nivel de irradiancia.	46
Tabla 4. Error para cada nivel de temperatura.....	48
Tabla 5. Error para cada nivel de irradiancia.	50
Tabla 6. Error para dos niveles de irradiancia.....	53
Tabla 7. Error para dos niveles de irradiancia.....	54
Tabla 8. Error para dos niveles de irradiancia.....	56
Tabla 9. Error para dos niveles de irradiancia.....	57
Tabla 10. Error para cada nivel de irradiancia.	60
Tabla 11. Error para cada nivel de irradiancia.	60
Tabla 12. Error para cada nivel de irradiancia.	63
Tabla 13. Error para cada nivel de irradiancia.	64

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. CAP. 2 SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK DE MODELOS PV

Anexo B. CAP. 3 IDENTIFICACIÓN DE PARAMETROS

Anexo C. CAP. 4 SIMULACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

Anexo D. ESPECIFICACIONES_MÓDULO SOLAR SM55

Anexo E. ESPECIFICACIONES_MÓDULO SOLAR ST40

Anexo F. CÓDIGO DE FIGURAS

NOTA: los anexos de esta investigación pueden ser consultados en la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander – Sala Base de datos.

RESUMEN

TITULO: IDENTIFICACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS PVP PARA SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA*.

AUTORES: ANDRÉS MAURICIO JÁCOME GARCIA, JHON ALEXANDER CABRERA RAMIREZ*

PALABRAS CLAVES: Modelado y simulación, Panel fotovoltaico, Arreglo fotovoltaico, identificación de parámetros, Sistema fotovoltaico.

DESCRIPCIÓN: El objetivo principal de este trabajo de grado es identificar modelos de sistemas de generación de energía mediante paneles fotovoltaicos (PVP). Estos modelos de simulación se implementan en un software especializado, utilizando las ecuaciones matemáticas representativas. El sistema de generación de energía mediante PVP estudiado en este trabajo, está conformado por los siguientes sub sistemas: etapa de generación fotovoltaica, etapa de electrónica de potencia, sistema de control y un barraje DC. El sistema de control es estudiado e implementado en un proyecto de grado realizado en paralelo¹, la etapa de la electrónica de potencia y el barraje DC son modelados mediante elementos ideales. Con respecto a la etapa de generación, en este trabajo se consideran tres modelos basados en circuitos equivalentes de paneles fotovoltaicos.

Este trabajo aporta con el modelado de paneles fotovoltaicos utilizando modelos PV identificados en la literatura, además, se presenta un algoritmo de optimización para determinar los parámetros de estos modelos fotovoltaicos a partir de las especificaciones suministradas por el fabricante. Los modelos de PVP y el algoritmo de identificación de parámetros son validados mediante comparación entre los resultados de simulación y las especificaciones de dos diferentes módulos solares. Las ventajas y desventajas de los diferentes modelos considerados, son presentadas en orden a determinar la mejor solución para simular paneles fotovoltaicos con el fin de aplicaciones de dimensionado y gestión de energía. Para la simulación del sistema de generación de energía mediante PVP y su sistema de control, el modelo PV seleccionado en este trabajo, se acopla con el control desarrollado en². Para validar el modelo del sistema, se presentan tres casos de simulación implementadas en Matlab Simulink y empleando el formalismo de representación energética macroscópica (REM).

* Trabajo de grado.

* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Javier Enrique Solano Martínez. Codirector: Juan Manuel Rey López.

¹ DUARTE CARRASCAL, José Luis y VARGAS BERNAL, Erwin Alexander. Modelado y simulación de un algoritmo de control de potencia de sistemas de generación fotovoltaicos basado en la técnica p&o-mppt (perturb and observe maximum power point tracking). Tesis de grado Ingeniero Electricista. Bucaramanga: Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2015.

² Ibid.

ABSTRACT

TITTLE: IDENTIFICATION AND IMPLEMENTATION OF PVP MODELS FOR SIMULATION OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM POWER GENERATION*.

AUTHORS: ANDRÉS MAURICIO JÁCOME GARCIA, JHON ALEXANDER CABRERA RAMIREZ*

KEYWORDS: Modeling and simulation, photovoltaic panels, parameter identification, photovoltaic system.

DESCRIPTION: The main aim of this project is to identify models of power generation systems by photovoltaic panels (PVP). These models of simulation are implemented in a specialized software with their mathematical equations.

For this work the power generation system using photovoltaic panels is formed by the following subsystems: photovoltaic module, power electronic system, control system and a DC busbar. The control system is analyzed and implemented in a project by³. The power electronic system and the DC busbar are modelled using ideal models. Regarding the photovoltaic module, this project uses three models based on equivalent electric circuits from photovoltaic panels.

This project provides the modeling of photovoltaic panels by PV models, which are identified on the literature. In addition, this work proposes an algorithm to determine photovoltaic modules model parameters using the information provided by the PV module suppliers. The PVP models and parameter identification are validated with the specifications of two different PV modules. Advantages and drawbacks of the models are compared to determine the best adapted to be used in simulation of PV modules for sizing and energy management. To simulate the power generation system using photovoltaic panels and the control system developed by⁴, the retained PV model is used in this case. The photovoltaic system is validated using the energetic macroscopic representation in Matlab/Simulink for three cases of simulation.

* Degree work

* Faculty of physical-mechanical Engineering. Electric, Electronic and Telecommunications School. Director: Javier Enrique Solano Martínez. Codirector: Juan Manuel Rey López.

³ Ibid.

⁴ Ibid.

INTRODUCCIÓN

El grupo GISEL de la E3T planea la construcción de un laboratorio de integración energética y micro-redes en las instalaciones del Parque Tecnológico de Guatiguará (Piedecuesta, Santander). Una de las etapas del proyecto es la simulación de una micro red con diferentes fuentes de energía y almacenamiento de energía. Este trabajo contribuye con la implementación de modelos que permitan simular el sistema de generación mediante PVP^(*).

La celda o célula fotovoltaica PV^(*), es el elemento base de un panel fotovoltaico (PVP), la cual está compuesta de un material semiconductor, comúnmente de silicio. La celda PV es un elemento que convierte la radiación electromagnética en electricidad, este proceso de conversión se conoce como efecto fotovoltaico. Dicho efecto, es el proceso en que la luz solar incide sobre la celda PV, permitiendo la liberación de electrones. Los electrones fluyen durante el proceso, dando origen a la corriente eléctrica. Las celdas pueden conectarse en serie para formar paneles PV, adicionalmente estos se pueden conectar en serie y/o paralelo para formar arreglos PV.

Dependiendo del área de superficie disponible expuesta al sol, los paneles fotovoltaicos pueden ser empleados en aplicaciones de pequeña o gran escala como generadores eléctricos auxiliares en edificios y plantas de potencia autónomas.⁵ El rendimiento de las celdas fotovoltaicas es afectado por la

^(*) Panel fotovoltaico (PVP)

^(*) Fotovoltaico (PV)

⁵ CARRERO, C.; AMADOR J., and ARNALTES, S. A single procedure for helping PV designers to select silicon PV modules and evaluate the loss resistances. *Renewable Energy*. [Online] December, 2007. Vol. 32 N° 15. [Cited 4 July 2015] pp. 2579-2589. Available from ELSEVIER-SCIENCE DIRECT. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

temperatura y la irradiancia. La irradiancia es la potencia incidente por unidad de superficie, medida en W/m^2 . No hay que confundir irradiancia con irradiación, son magnitudes físicas diferentes. La irradiación es la energía incidente por unidad de superficie en un determinado periodo de tiempo y se mide en J/m^2 .

Los sistemas de generación de energía fotovoltaica constan de generadores PV, convertidores DC/DC, inversores DC/AC, reguladores y baterías. Dependiendo la etapa de diseño del sistema, *e.g.*, dimensionado, gestión de energía o análisis de estabilidad, diferentes modelos de simulación pueden ser usados. Los estudios de estabilidad requieren modelos muy precisos y pasos de simulación muy pequeños (fracciones de segundos), de otra parte, los estudios de dimensionado requieren el estudio de escenarios de muy larga duración (meses) y usa datos de entrada de baja precisión (perfiles de irradiancia y temperatura del PVP). La selección de los modelos más adecuados depende no únicamente de la precisión de la solución deseada, sino también de la calidad de los datos de entrada y del costo computacional.

El objetivo de este trabajo es implementar un modelo que permita el estudio de los flujos energéticos (gestión de energía) y/o el dimensionado de los elementos constituyentes de una micro red. El sistema de control es estudiado e implementado en un proyecto de grado realizado en paralelo⁶, la etapa de la electrónica de potencia y el barraje DC son modelados mediante elementos ideales.

Tres modelos de PVP son estudiados e implementados en Matlab/Simulink, así mismo se propone y valida un algoritmo de optimización, para determinar el conjunto de parámetros para los modelos identificados. Este algoritmo minimiza la diferencia entre los resultados de simulación y las especificaciones del módulo solar. Los modelos fotovoltaicos considerados son comparados en orden a

⁶ DUARTE CARRASCAL, José Luis y VARGAS BERNAL, Erwin Alexander. Op. Cit.

determinar la mejor solución para simular paneles fotovoltaicos con el fin de realizar aplicaciones de dimensionado y gestión de energía. El sistema de generación de energía fotovoltaica con el modelo PV seleccionado se válida para tres casos de simulación implementados en Matlab/Simulink y utilizando el formalismo de representación energética macroscópica (REM). Este formalismo se empezó a utilizar a partir del año 2000 en Francia, para el desarrollo de investigaciones de unidades electromecánicas complejas.⁷

⁷ CHEN, Keyu; BOUSCAYROL, Alain and LHOMME, Walter. Energetic Macroscopic Representation and Inversion-based control: Application to an Electric Vehicle with an electrical differential. Journal of Asian Electric Vehicles. [Online] 2008. Vol. 6 N° 1. [Cited: 3 August 2015]. Available from Internet: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaev/6/1/6_1_1097/pdf

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Identificar modelos de paneles fotovoltaicos, e implementar un modelo para simulación en Matlab/Simulink de un sistema de generación de energía fotovoltaica.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Realizar una búsqueda de modelos de paneles fotovoltaicos en artículos o revistas de categoría A1 (Generar un banco de modelos de paneles fotovoltaicos)
- Implementar un modelo para simulación en Matlab/Simulink, de paneles fotovoltaicos, incluyendo la etapa de electrónica de potencia en sistemas de generación de energía fotovoltaica.

2. MODELOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS

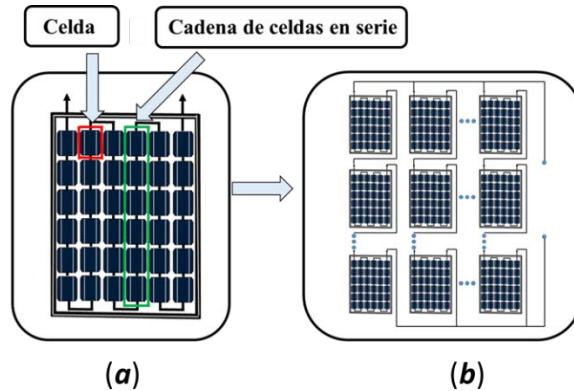
En esta sección se presenta tres modelos de PVP identificados en la literatura. Además se presentan las ecuaciones matemáticas representativas de cada uno de los modelos. Sin embargo, es conveniente iniciar esta sección definiendo conceptos que serán utilizados durante el transcurso de este trabajo, como son: celda solar, panel PV, cadena PV y arreglo PV.

2.1. CELDA, PANEL Y ARREGLO FOTOVOLTAICO

En la Figura 1 se ilustra la formación de arreglos fotovoltaicos, en donde su elemento base es la celda fotovoltaica. La conexión en serie de celdas forma cadenas de celdas. Las cadenas se agrupan para obtener paneles fotovoltaicos así como se ilustra en la Figura 1(a). En la Figura 1(b) se aprecia los arreglos fotovoltaicos, estos son construidos mediante la conexión de cadena de paneles conectados en paralelo. Para obtener una mayor tensión se conectan los paneles en serie y para lograr mayores corrientes los paneles se conectan en paralelo⁸.

⁸ MA, Tao; YANG, Hongxing and LU, Lin. Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [Online] 2014. Vol. 36. [Cited 17 June 2015]. Available from ELSEVIER-SCIENDE DIRECT. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

Figura 1. Formación de arreglos fotovoltaicos: (a) Panel PV, (b) Arreglo PV.



2.2. CIRCUITOS EQUIVALENTES Y MODELOS MATEMÁTICOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS

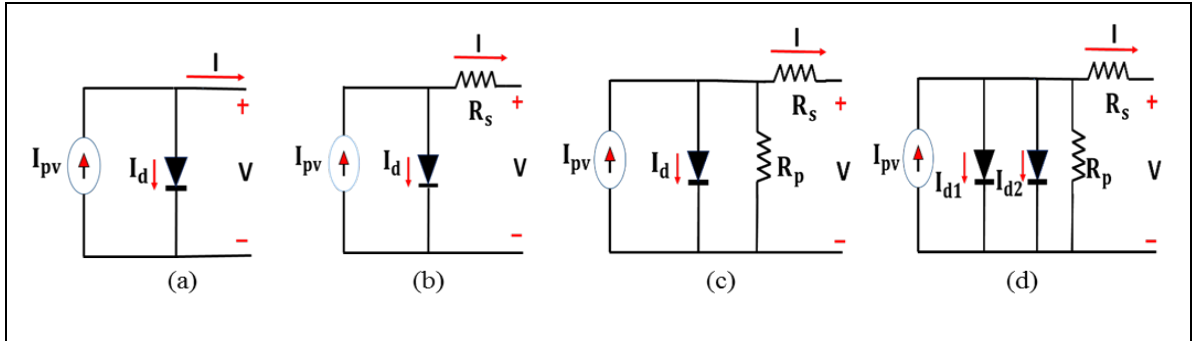
Los modelos de las celdas fotovoltaicas mostrados en la Figura 2, son los más frecuentemente utilizados en las referencias consultadas. Cada uno de estos tiene características importantes y únicas que los diferencian. La relación I-V de los paneles fotovoltaicos tiene un comportamiento no lineal, muy similar al comportamiento descrito por la ecuación del diodo de Shockely, por tal motivo, todos los modelos de circuito equivalente de PVP utilizan diodos^{9 10 11}.

⁹ Ibid.

¹⁰ SALOUX, Etienne; TEYSSEDOU, Alberto y SORIN, Mikhail. Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point. Solar Energy. [Online] May, 2011. Vol. 85 N° 5. [Cited 14 August 2 2015]. Available from ELSEVIER-SCIENCE DIRECT. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

¹¹ CARRERO, C.; AMADOR J., and ARNALTES, S. Op.Cit.

Figura 2. Circuitos eléctricos de la celda fotovoltaica. (a)¹² Modelo ideal. (b)¹³ Modelo de un diodo considerando R_s . (c)¹⁴ Modelo de un diodo considerando R_s y R_p . (d)¹⁵ Modelo de dos diodos.



¹² SALOUX, Etienne; TEYSSEDOU, Alberto y SORIN, Mikhail. Op. Cit.

¹³ KHEZZAR, R; ZEREG, M. and KHEZZAR, A. Modeling improvement of the four parameter model for photovoltaic modules. Solar Energy. [Online] December 2014. Vol. 110. [Cited: 12 Jan 2015] p. 452- 462. Available from ELSEVIER – SCIENCE DIRECT. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

¹⁴ GRADELLA, Marcelo. *Et al.* Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Transactions on Power Electronics. [Online] May 2009. Vol. 24 N° 5. [Cited: 19 February 2015]. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

¹⁵ ISHAQUE, Kashif; SALAM, Zainal and Taheri Hamed. Accurate MATLAB Simulink PV System Simulator Based on a Two-Diode Model. Journal of Power Electronics. [Online] 2011. Vol.11 No.2. [Cited: 15 June 2015] p.179-187. Available from Internet: <http://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/NODE01613149>

2.2.1. Modelo Ideal. En la Figura 2(a) se presenta el modelo ideal de la celda fotovoltaica, según¹⁶ este modelo es la representación circuital más sencilla para la celda. La ecuación matemática que describe el comportamiento de la relación (I-V) para la celda fotovoltaica, es dada por las ecuaciones (1), (2), (3) y (4). La tensión térmica en el diodo es denotada por V_t , K representa la constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} [J/K]), a representa el factor de idealidad del diodo, q es el valor absoluto de la carga de un electrón (1.602×10^{-19} [C]), T es la temperatura de la celda o la temperatura de la unión p-n, T_n es la temperatura a condiciones estándar (25 °C), G representa la irradiancia, G_n es la irradiancia a condiciones STC^(*), I_{pv} es la corriente fotovoltaica, $I_{pv,n}$ representa la corriente fotovoltaica bajo condiciones estándar, I_0 es la corriente de saturación inversa del diodo, V_{oc} es la tensión de circuito abierto, K_I es el coeficiente de temperatura de corriente de cortocircuito y I_{sc} es la corriente de cortocircuito. Es importante resaltar que la revisión en la literatura muestra que el modelo de la celda ideal, no es el más adecuado para el modelado de la relación entre corriente y tensión (I-V).

$$I = I_{pv} - I_0 * \left(\exp\left(\frac{V}{V_t * a}\right) - 1 \right) \quad (1).$$

$$V_t = \frac{K * T}{q} \quad (2).$$

$$I_{pv} = I_{pv,n} \left(\frac{G}{G_n} \right) + K_I (T - T_n) \quad (3)$$

$$I_0 = I_{sc} \left[\exp\left(-\frac{V_{oc}}{a * V_t}\right) \right] \quad (4)$$

2.2.2. Modelo de un Diodo Tomando en Cuenta Rs. En la Figura 2(b) se ilustra el circuito eléctrico equivalente para el modelo $R_s^{(*)}$, se puede observar que el modelo ideal es modificado mediante la adición de una resistencia serie¹⁷. Debido a su

¹⁶ MA, Tao; YANG, Hongxing and LU, Lin. Op. Cit.

(*) Standard Conditions (STC) para temperatura (25°C) e irradiancia (1000W/m²)

(*) Modelo R_s o modelo de un diodo considerando solo la resistencia serie

¹⁷ KHEZZAR, R; ZEREG, M. and KHEZZAR, A. Op. Cit.

simplicidad, es uno de los modelos de mayor uso para encontrar la curva característica I-V de un panel fotovoltaico.

Según¹⁸ este modelo también es conocido como el modelo de cuatro parámetros, ya que para lograr la simulación del panel fotovoltaico se necesitan de cuatro variables como, la corriente fotovoltaica (I_{pv}), la corriente de saturación inversa del diodo (I_0), la resistencia serie (R_s) y el factor de idealidad del diodo (a). Cabe resaltar que el circuito eléctrico equivalente de la celda PV para el modelo Rs presentado en¹⁹ es incorrecto, debido a que no ilustra la resistencia serie.

Para este modelo la corriente fotovoltaica es igual a la corriente de cortocircuito $I_{pv} = I_{sc}$, no hay que confundir I_{sc} con $I_{sc,n}$, ya que $I_{sc,n}$ representa la corriente de cortocircuito bajo condiciones estándar de temperatura e irradiancia, N_s representa el número de celdas conectadas en serie para un PVP, $V_{oc,n}$ es la tensión de circuito abierto bajo condiciones estándar y K_V es coeficiente de temperatura de tensión de circuito abierto. Las ecuaciones (3), (4), (6) y (7) complementan la ecuación (5), la cual representa la relación (I-V) para un PVP.

$$I = I_{pv} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V + IR_s}{a \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (5).$$

$$V_{oc} = V_{oc,n} + V_t a \ln \left(\frac{G}{G_n} \right) + K_V (T - T_n) \quad (6).$$

$$V_t = \frac{N_s K T}{q} \quad (7).$$

La ecuación (8) indica la relación (I-V) para un arreglo fotovoltaico donde V_A e I_A representan la tensión y corriente de salida, N_{SS} indica el número de paneles

¹⁸ Ibid.

¹⁹ MA, Tao; YANG, Hongxing and LU, Lin. Op. Cit.

fotovoltaicos conectados en serie y N_{PP} es el número de cadenas de módulos conectados en paralelo²⁰.

$$I_A = N_{PP}I_{pv} - N_{PP}I_0 \left(\exp \left(\frac{(V_A + I_A \frac{N_{SS}}{N_{PP}} * R_s)}{V_t * a * N_{SS}} \right) - 1 \right) \quad (8).$$

2.2.3. Modelo de un Diodo Considerando la Resistencia Serie y Paralelo.

Según²¹ y ²² cuando se adiciona la resistencia en derivación (R_p) al modelo ilustrado en la Figura 2(b), permite obtener una mayor precisión para describir la relación entre corriente versus tensión (I-V). La resistencia en derivación representa la corriente de fuga de la unión p-n y la resistencia en serie equivale a las perdidas internas debido al flujo de corriente y conexión de cables. En la Figura 2(c) se ilustra el circuito eléctrico del modelo. Las ecuaciones matemáticas que describen la relación I-V para un panel fotovoltaico son las siguientes:

$$I = I_{pv} - I_0 * \left(\exp \left(\frac{V + R_s * I}{V_t * a} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s * I}{R_p} \quad (9).$$

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_I * \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (10).$$

$$I_{pv,n} = \left(\frac{R_s + R_p}{R_p} \right) * I_{sc,n} \quad (11).$$

$$\Delta T = T - T_n \quad (12).$$

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I * \Delta T}{\exp \left(\frac{V_{oc,n} + K_V * \Delta T}{V_t * a} \right) - 1} \quad (13).$$

Las ecuaciones (7), (10), (11), (12) y (13) complementan la ecuación (9). La ecuación (14) representa la relación matemática (I-V) para un arreglo fotovoltaico²³.

²⁰ KHEZZAR, R; ZEREG, M. and KHEZZAR, A. Op. Cit.

²¹ MA, Tao; YANG, Hongxing and LU, Lin. Op. Cit.

²² GRADELLA, Marcelo. *Et al.* Op. Cit.

²³ MA, Tao; YANG, Hongxing and LU, Lin. Op. Cit.

$$I_A = N_{pp} * I_{pv} - I_0 * N_{PP} * \left[\exp \left(\frac{1}{V_t} \left(\frac{V_A}{N_{SS}} + \frac{I_A}{N_{pp}} * R_s \right) \right) - 1 \right] - \frac{N_{pp}}{R_p} \left(\frac{V_A}{N_{SS}} + \frac{I_A}{N_{pp}} * R_s \right) \quad (14).$$

2.2.4. Modelo de Dos Diodos. Según²⁴ en una celda solar real las pérdidas de recombinación en la región de agotamiento del diodo son significativas, especialmente en niveles de baja tensión, por esta razón, se adiciona un diodo al circuito eléctrico equivalente que se muestra en la Figura 2(c). La ecuación (15) representa la relación (I-V) del panel fotovoltaico.

$$I = I_{pv} - I_{01} * \left(\exp \left(\frac{V+R_s*I}{V_t*a1} \right) - 1 \right) - I_{02} * \left(\exp \left(\frac{V+R_s*I}{V_t*a2} \right) - 1 \right) - \frac{V+R_s*I}{R_p} \quad (15).$$

$$I_{01} = I_{02} = I_2 = \frac{I_{sc,n} + K_I * \Delta T}{\exp \left(\frac{V_{oc,n} + K_V * \Delta T}{V_t * \left(\frac{a1+a2}{p} \right)} \right) - 1} \quad (16).$$

Las variables I_{01} y I_{02} representan las corrientes de saturación inversa respectivamente para cada diodo. Los factores de idealidad son denotados por $a1$ y $a2$. Según²⁵, se plantean las siguientes condiciones: Si $a1=1$, $a2 \geq 1.2$ y se tiene que $(a1+a2)/p=1$, entonces la variable p puede ser elegida para $p \geq 2.2$. Estas condiciones facilitan encontrar los parámetros y permiten que la ecuación (15) se pueda simplificar, como se ilustra en la ecuación (17), quedando en términos de p .

$$I = I_{pv} - I_2 * \left(\exp \left(\frac{V+R_s*I}{V_t} \right) + \exp \left(\frac{V+R_s*I}{V_t*(P-1)} \right) - 2 \right) - \frac{V+R_s*I}{R_p} \quad (17).$$

La ecuación (18) indica la expresión matemática de un arreglo fotovoltaico²⁶.

$$I_A = Npp * \left\{ I_{pv} - I_2 * \left(\exp \left(\frac{V_A + R_s * I_A * \left(\frac{Nss}{Npp} \right)}{V_t * Nss} \right) + \exp \left(\frac{V_A + R_s * I_A * \left(\frac{Nss}{Npp} \right)}{V_t * (P-1) * Nss} \right) - 2 \right) \right\} - \frac{V_A + R_s * I_A * \left(\frac{Nss}{Npp} \right)}{R_p * \left(\frac{Nss}{Npp} \right)} \quad (18).$$

²⁴ ISHAQUE, Kashif; SALAM, Zainal and Taheri Hamed. Op Cit.

²⁵ Ibid.

²⁶ Ibid.

3. SIMULACIÓN DE MODELOS FOTOVOLTAICOS EN MATLAB/SIMULINK.

Para la simulación de modelos PV se implementaron las ecuaciones matemáticas utilizando bloques de Matlab/Simulink como se presenta en el Anexo A. Para validar los resultados de simulación se realiza una comparación directa entre los resultados obtenidos a partir de los modelos fotovoltaicos y las especificaciones del fabricante.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN PARA EL MODELO RS.

El módulo solar consta de tres entradas fundamentales irradiancia G , temperatura T y la tensión V , la salida corresponde a la corriente I , como se puede apreciar en la Figura 3. En la Figura 4, cada bloque representa las ecuaciones matemáticas mostradas en las subsecciones 1.2.1 y 1.2.2 como lo son: la corriente de saturación I_0 , la tensión de circuito abierto V_{oc} , la corriente fotovoltaica o de cortocircuito I_{pv} y la corriente de salida del módulo fotovoltaico I .

Figura 3. Entradas y salida del modelo Rs en Matlab/Simulink.

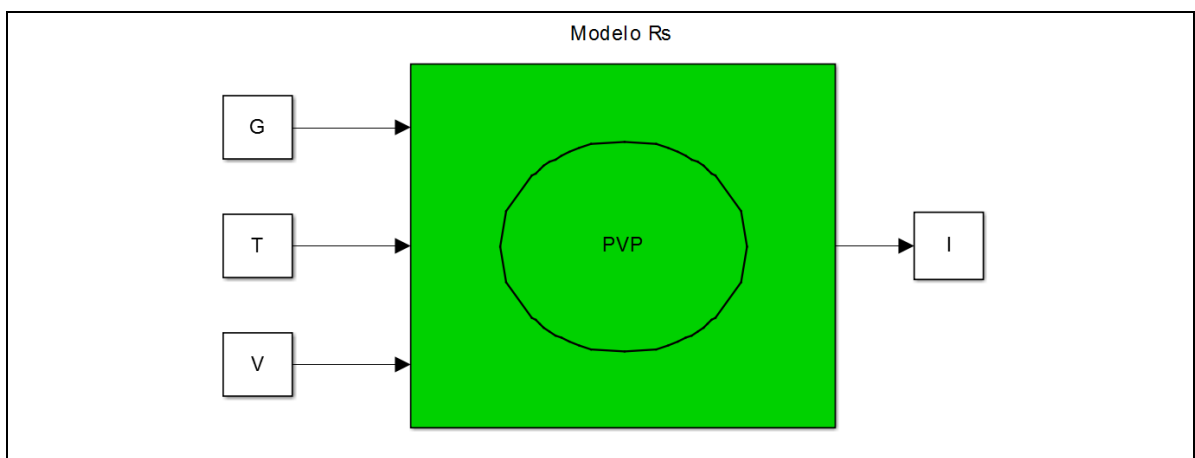
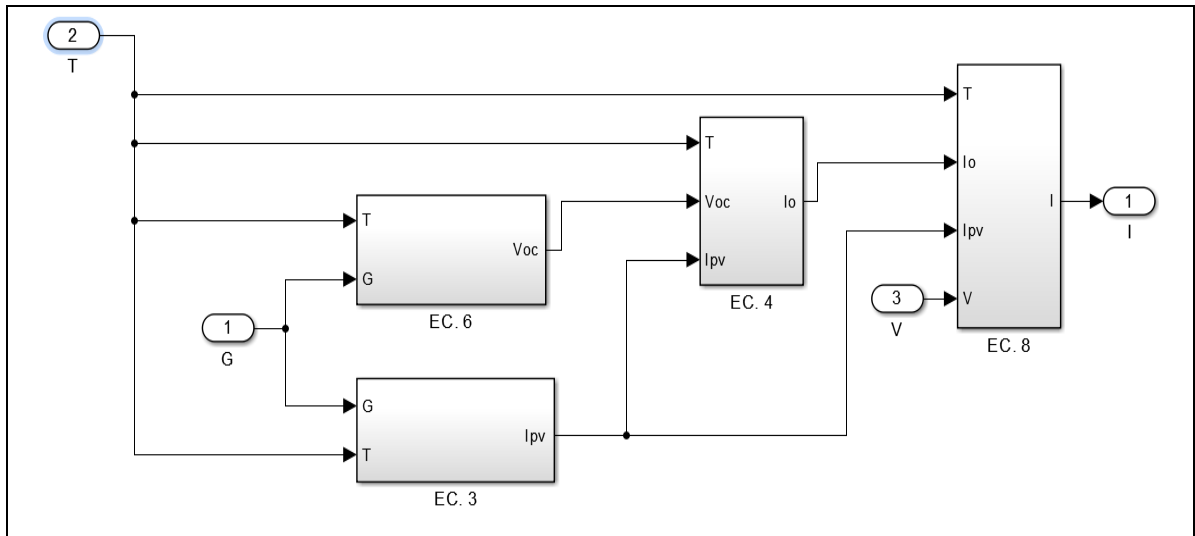


Figura 4. Modelo para simulación de un Módulo Solar en Matlab/Simulink utilizando el modelo R_s .



En la Figura 5 se puede ver el modelado mediante bloques de Simulink de la corriente de salida para un arreglo fotovoltaico con número de paneles PV conectados en serie N_{ss} por número de cadenas de módulos PV conectadas en paralelo N_{pp} usando la ecuación (8). En esta ecuación se encuentran dos parámetros en la obtención de las curvas I-V como lo son: la resistencia serie R_s y el factor de idealidad a . En las Figuras 6, 7 y 8 se encuentran implementada la corriente de saturación I_0 , la corriente fotovoltaica I_{pv} y la tensión de circuito abierto V_{oc} empleando la ecuación (4), (3) y (6) respectivamente.

Figura 5. Modelado de la corriente de salida para un arreglo fotovoltaico.

Ecuación 8.

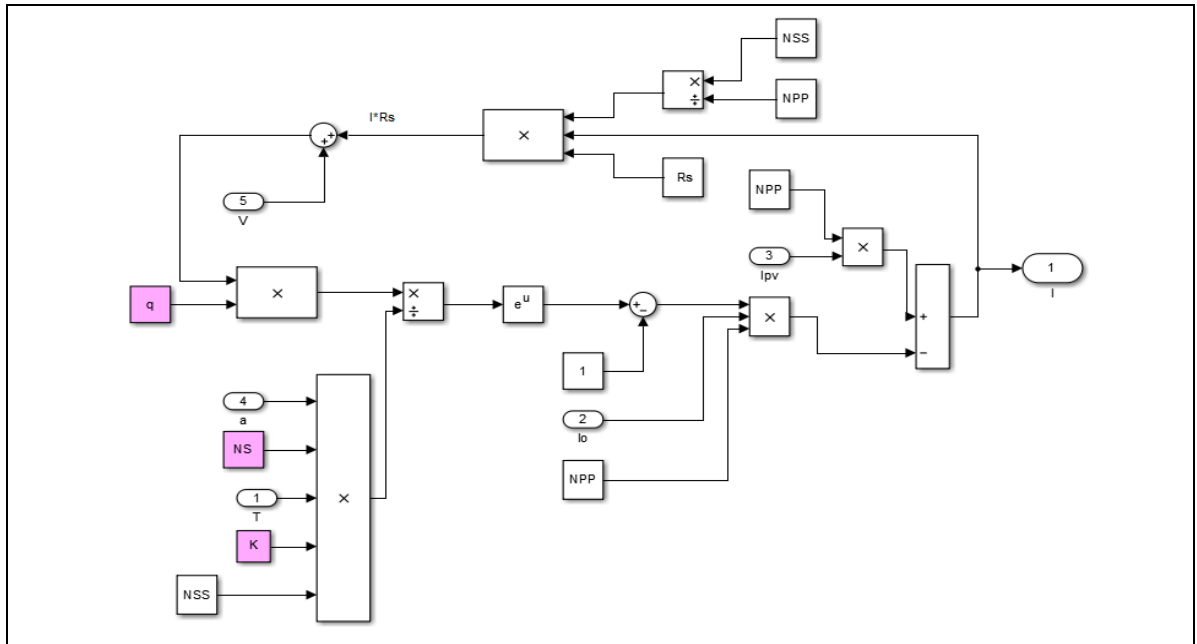


Figura 6. Modelado de la corriente de saturación del módulo PV. Ecuación 4.

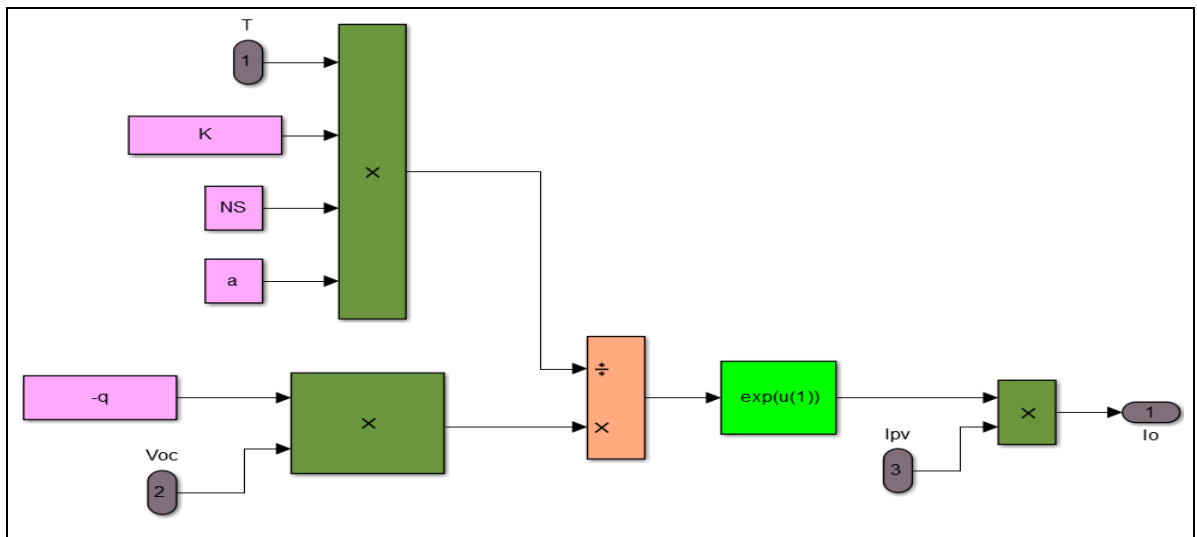


Figura 7. Modelado de la corriente fotovoltaica del módulo PV. Ecuación 3.

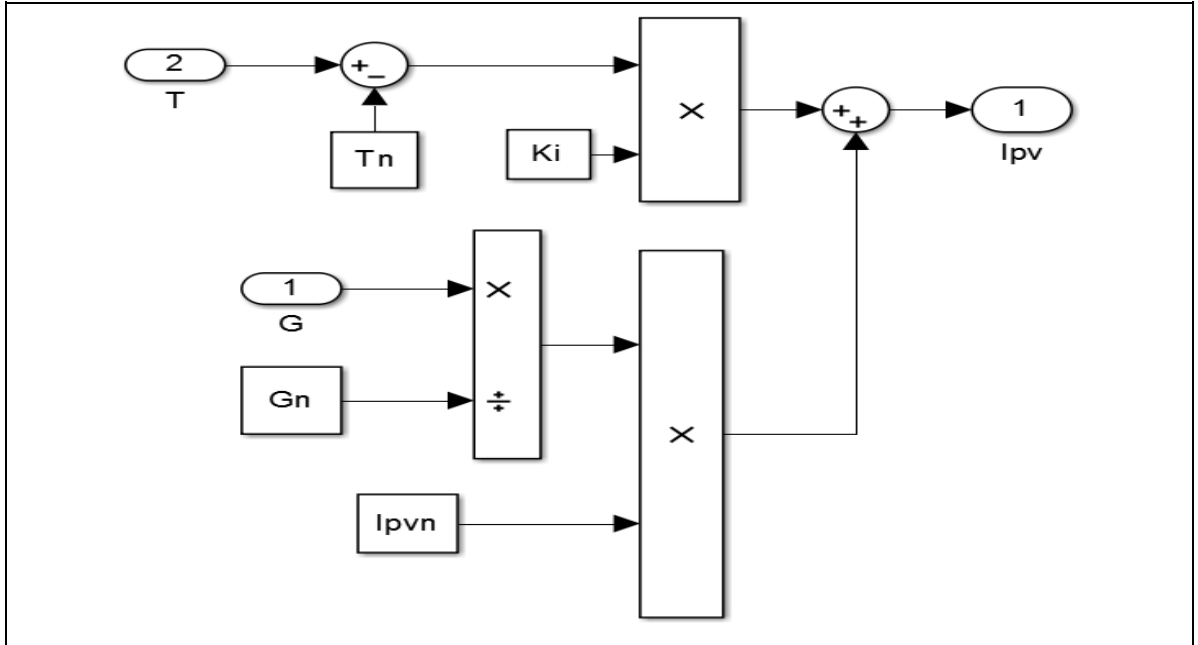
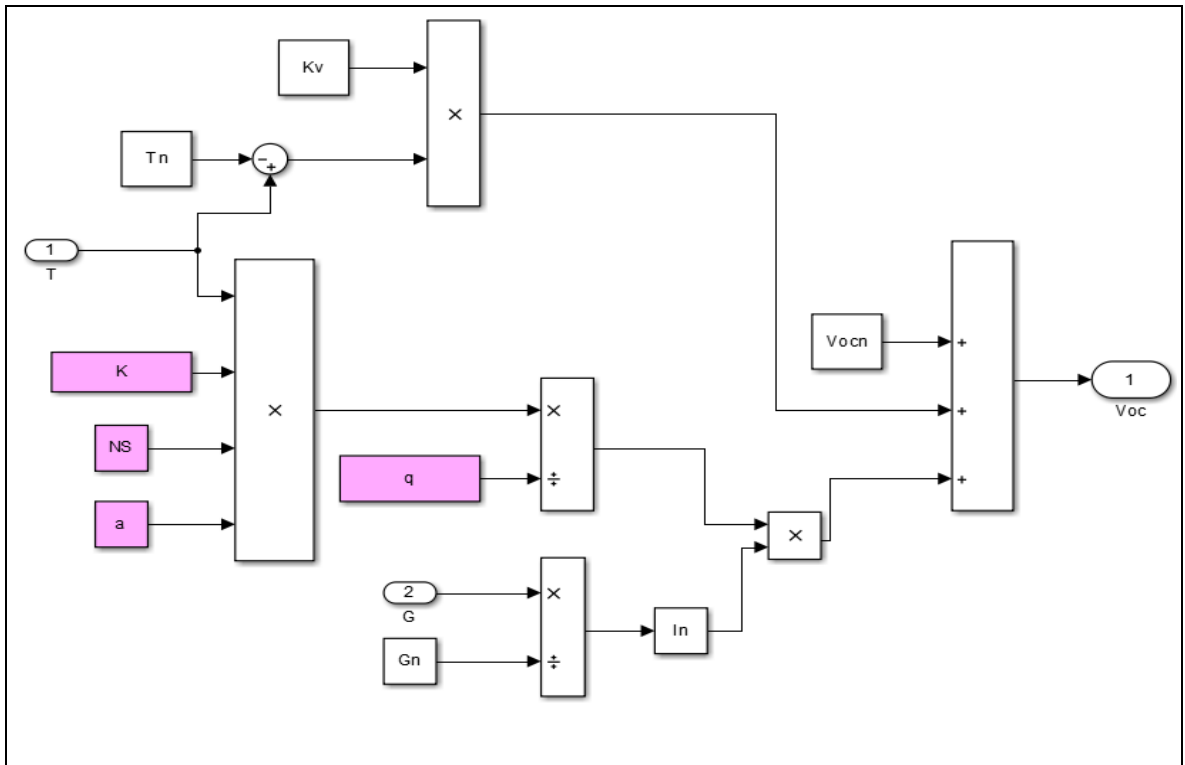


Figura 8. Modelado de la tensión de circuito abierto del módulo solar. Ecuación 6.



3.2. DESCRIPCIÓN DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE UN DIODO CONSIDERANDO LA RESISTENCIA SERIE Y PARALELO

En la Figura 9 se ilustra el modelo para simulación en Matlab/Simulink para módulos solares utilizando el modelo de un diodo considerando la resistencia serie (R_s) y la resistencia paralelo (R_p), en la imagen se puede ver tres subsistemas, los cuales tienen por nombre ecuación (13), ecuación (10) y ecuación (14); la representación en Matlab/Simulink de estos subsistemas se puede observar en la Figura 12, Figura 11 y Figura 10, respectivamente.

Figura 9. Modelado de un Módulo Solar en Matlab/Simulink utilizando el modelo de un diodo considerando R_s y R_p .

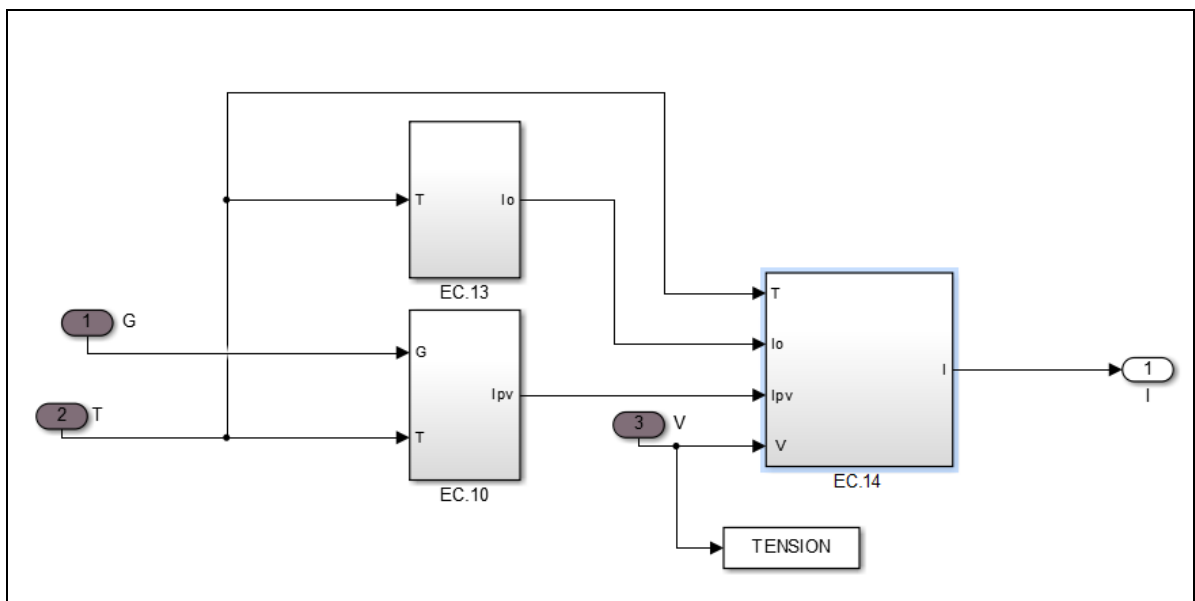


Figura 10. Modelado en Matlab/Simulink de la Ecuación 13.

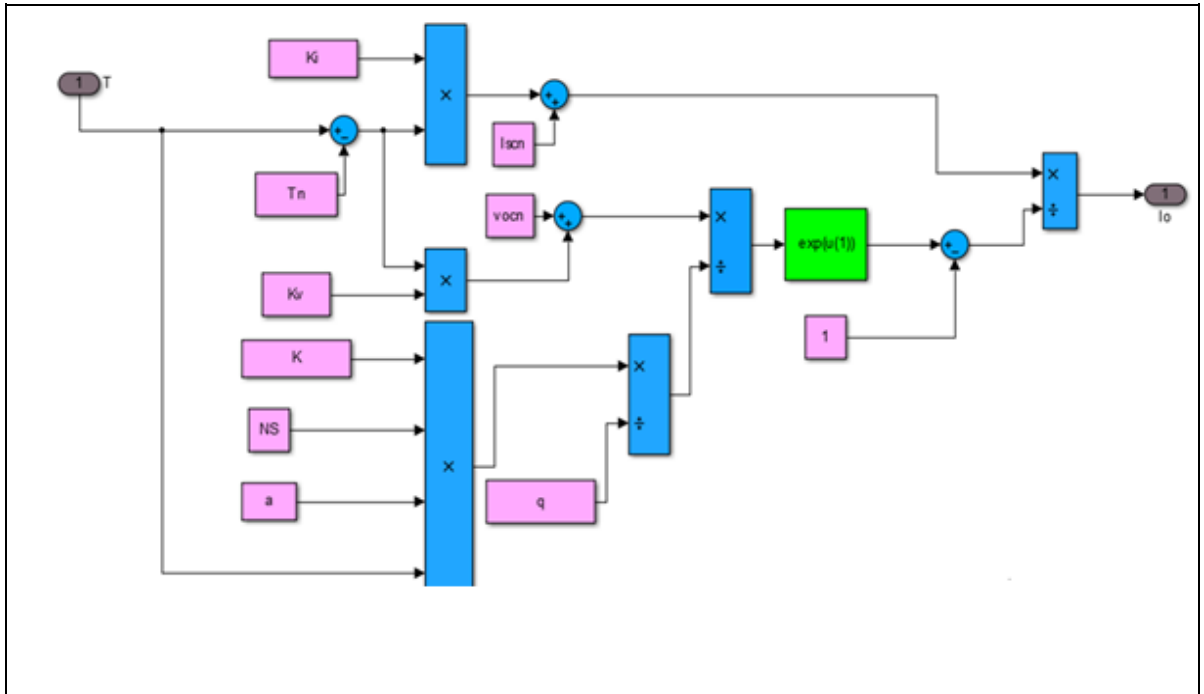


Figura 11. Modelado en Matlab/Simulink de la ecuación 10.

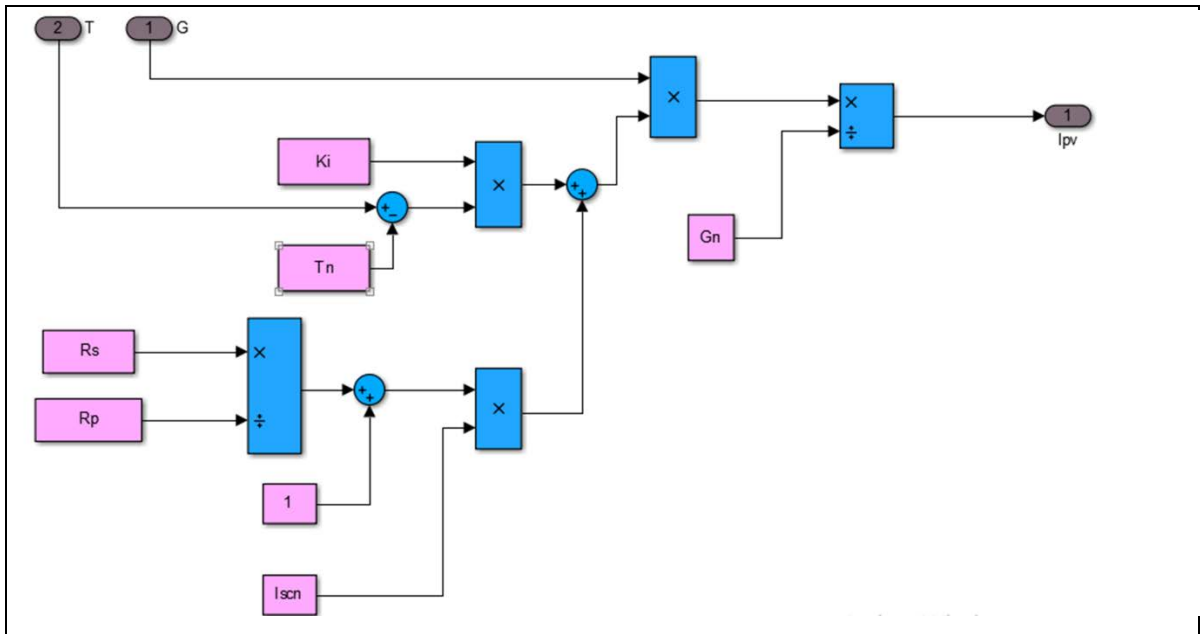
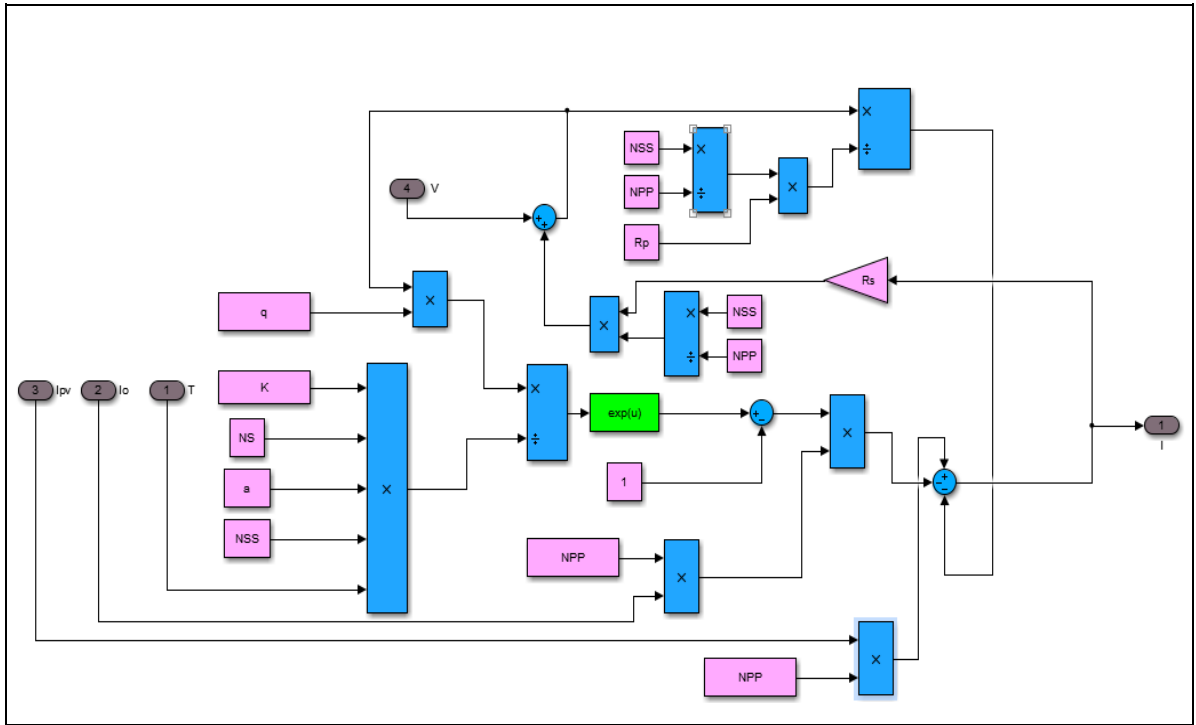


Figura 12. Modelado en Matlab/Simulink de la ecuación 14.



3.3. DESCRIPCIÓN DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE DOS DIODOS.

En la Figura 13 se ilustra el modelo para simulación en Matlab/Simulink de paneles fotovoltaicos empleando el modelo de dos diodos, como se puede ver en la imagen se divide en tres subsistemas, los cuales tienen por nombre ecuación (10), ecuación (16) y ecuación (18), mostradas en las subsecciones 1.2.3 y 1.2.4, la representación en Matlab/Simulink de estas ecuaciones se ilustran en las Figuras 14, Figura 15, y la Figura 16. En la Figura 16 se encuentran dos subsistemas con el nombre de función 1 y función 2, su representación en Matlab/Simulink se ilustra en la Figura 17 y Figura 18.

Figura 13. Modelo para simulación en Matlab/Simulink de un Módulo Solar utilizando el modelo de dos diodos.

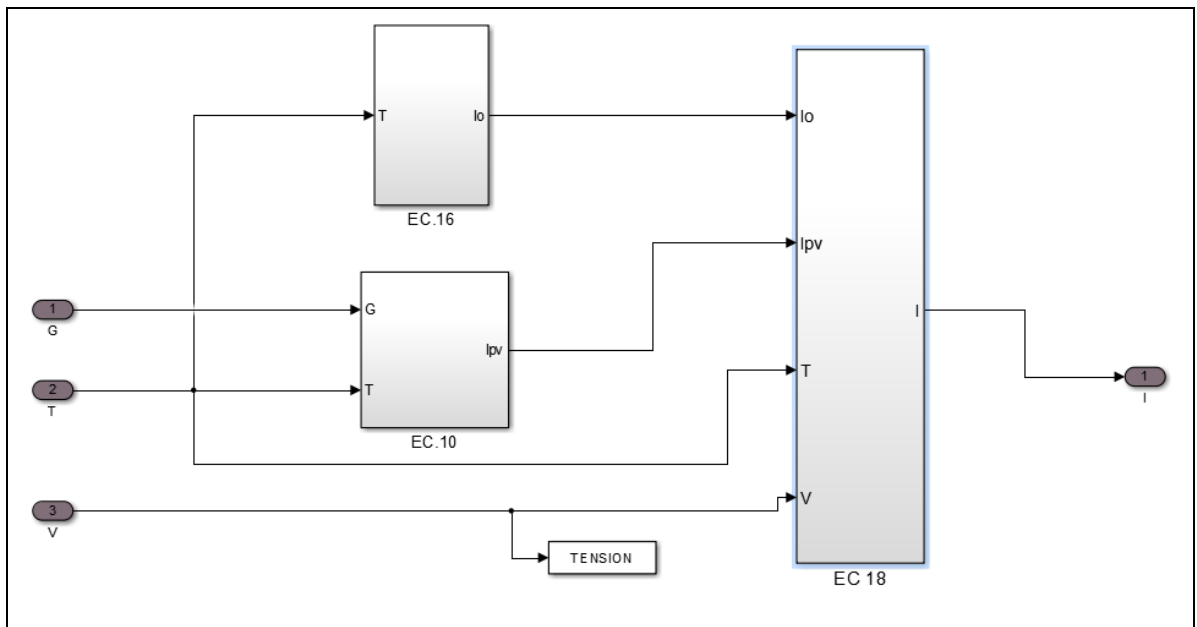


Figura 14. Modelado en Matlab/Simulink de la ecuación 16.

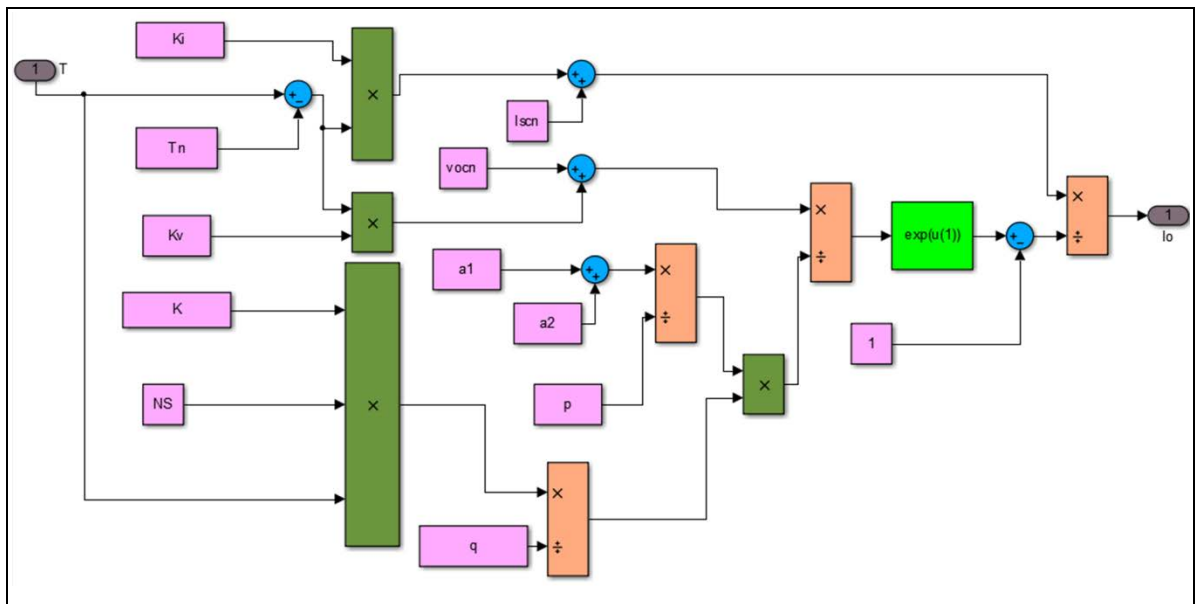


Figura 15. Modelado en Matlab/Simulink de la ecuación 10.

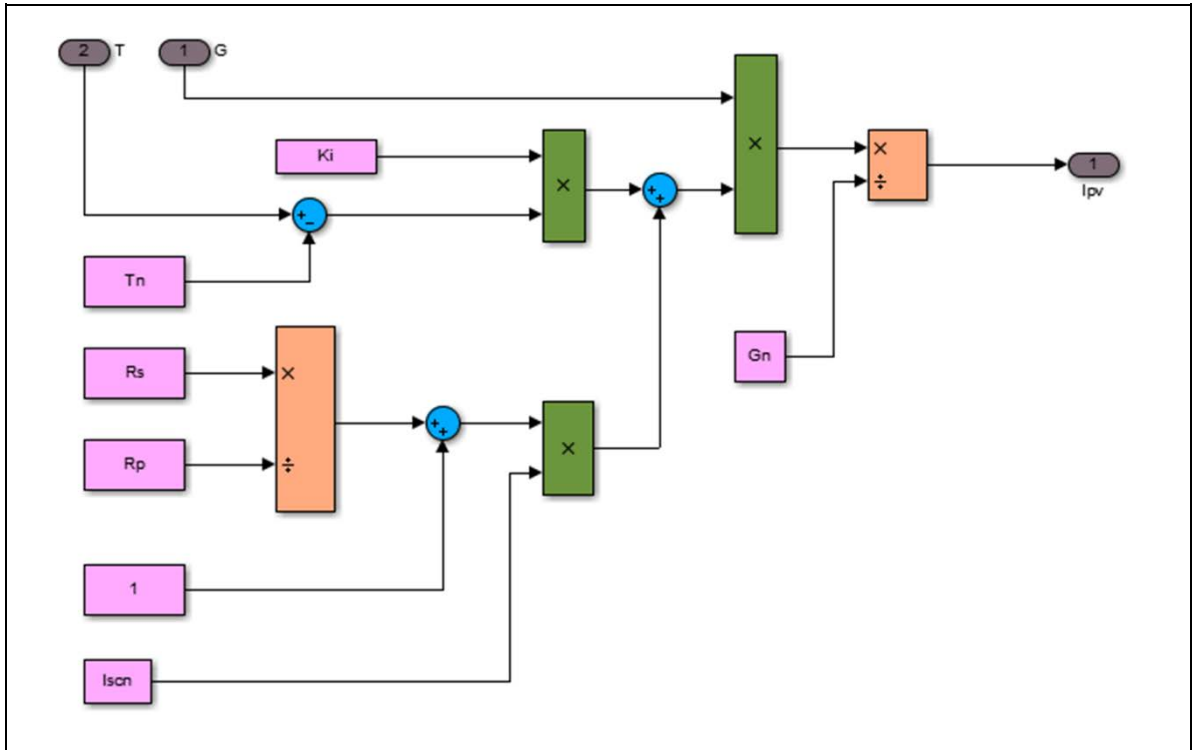


Figura 16. Modelado en Matlab/Simulink de la ecuación 18.

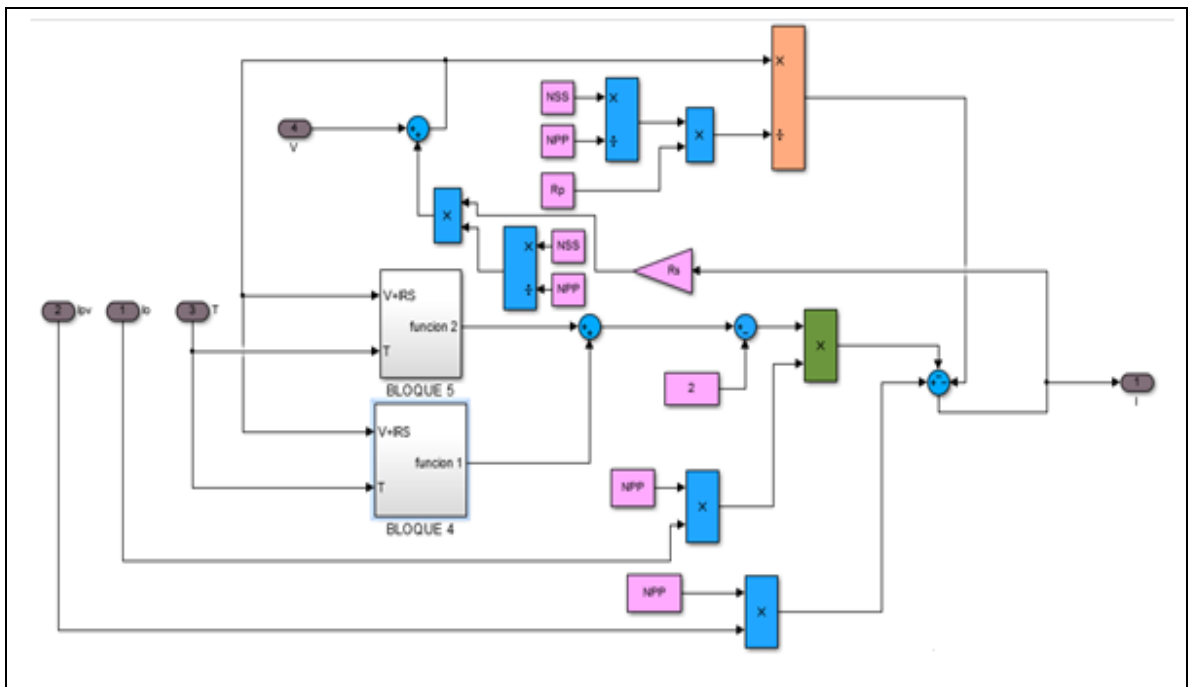


Figura 17. Modelado en Matlab/Simulink de la función 1.

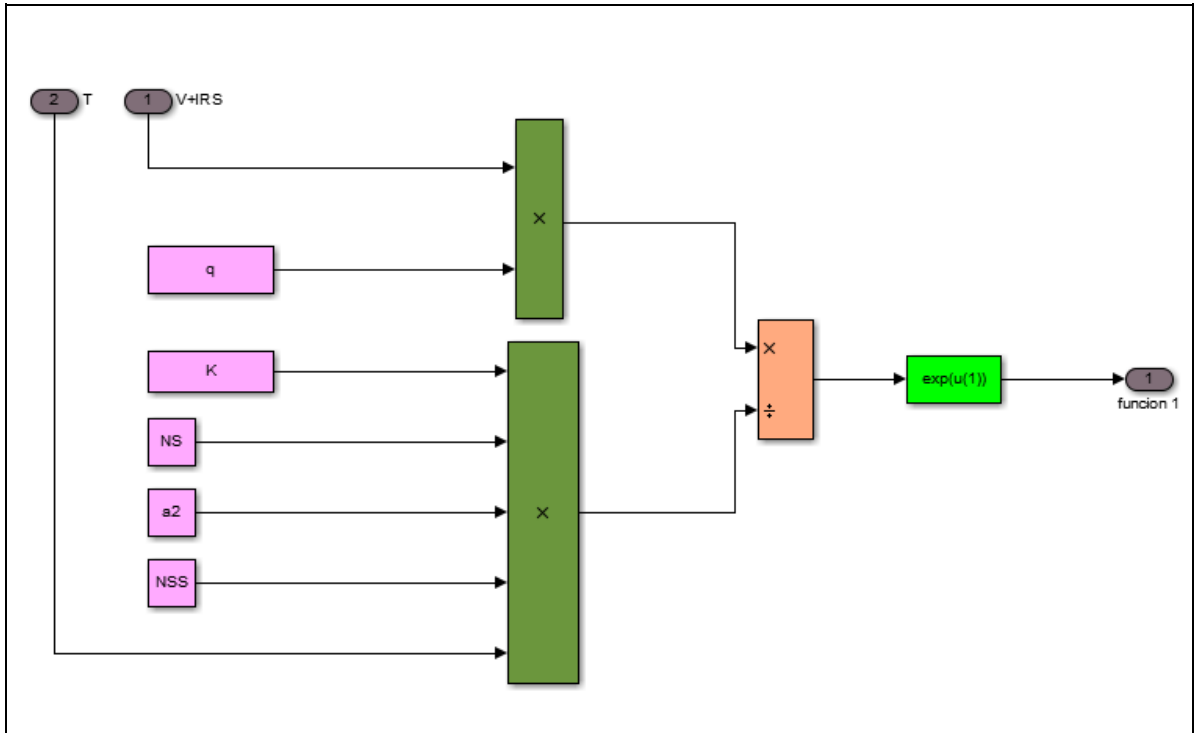
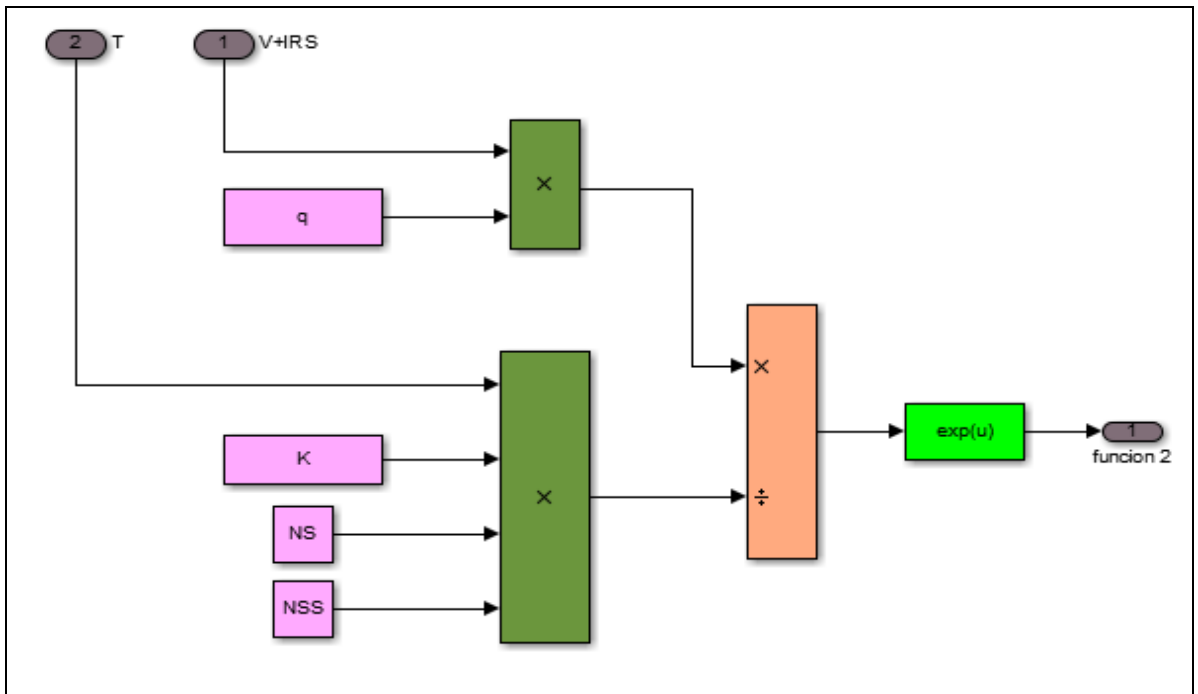


Figura 18. Modelado en Matlab/Simulink de la Función 2.



4. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS Y VALIDACIÓN

Las especificaciones de módulos PV o datasheets no suministran información de los parámetros del modelo; pero estas especificaciones muestran las curvas características no lineales I-V. Esas curvas son generalmente presentadas para diferentes niveles de irradiancia a temperatura constante y para diferentes valores de temperatura a un valor de irradiancia constante. El objetivo de esta sección es proponer y validar un procedimiento para determinar los parámetros del modelo PV (e.g. R_s , R_p o a) usando la información proporcionada por el fabricante.

El algoritmo ilustrado en la Figura 19 es propuesto para determinar el conjunto de parámetros que minimiza la diferencia entre los datos suministrados por el fabricante y los obtenidos por simulación²⁷. En este trabajo el algoritmo es implementado en Matlab usando la función *Fmincon* (Find minimum of constrained nonlinear multivariable function), sin embargo el algoritmo pudo ser implementado usando otras técnicas de optimización como algoritmos genéticos.

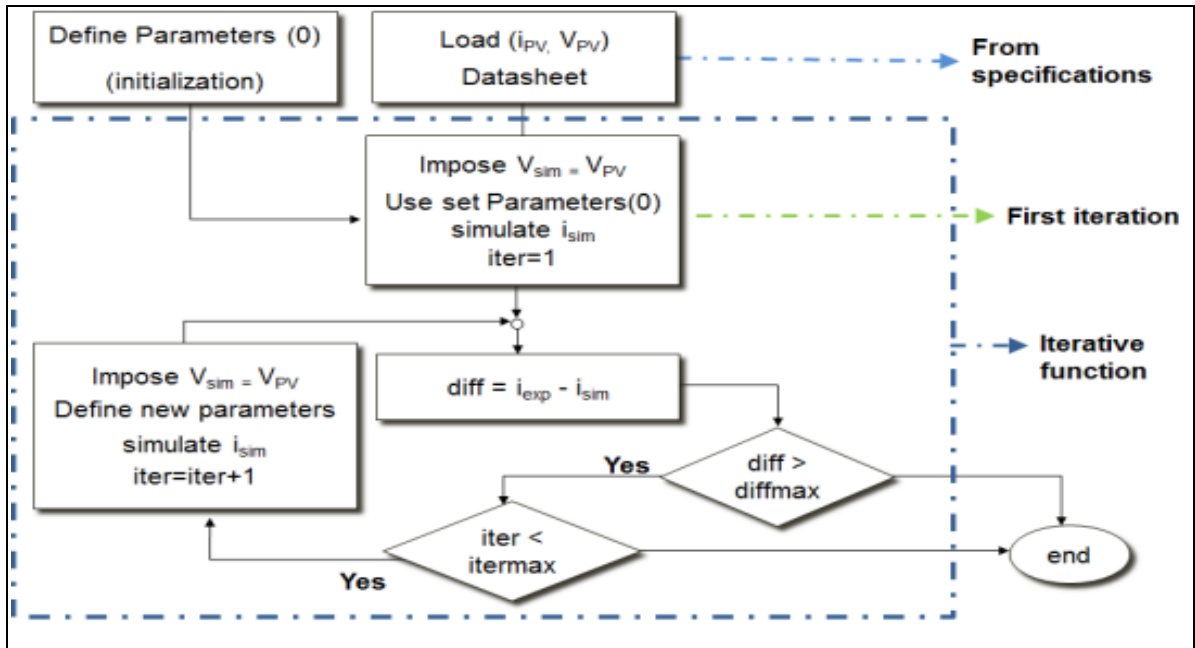
El algoritmo iterativo requiere definir un conjunto de parámetros de inicialización que defina la convergencia del algoritmo. Considerando valores típicos encontrados en la literatura, los siguientes valores de inicialización son considerados: el rango de la resistencia serie es definido como $0.3 < R_s < 1$, la resistencia paralelo es definida como $R_p > 10$ y el rango del factor de idealidad del diodo es definido como $1 < a < 1.6$.

En esta sección el algoritmo propuesto es usado para determinar el conjunto de parámetros de los tres modelos PV identificados usando la información suministrada

²⁷ SOLANO, Javier; HISSEL, Daniel; PERA, M.-C. Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). [Online] 15-18 October, 2013. [cited: 21 July 2015] p. 1-4. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

en las especificaciones del Módulo Solar fotovoltaico Shell SM55 que se encuentra en el Anexo D. El algoritmo de identificación de parámetros se encuentra en el Anexo B.

Figura 19. Diagrama de flujo del algoritmo de identificación de parámetros de módulos PV.



4.1 MODELO DE UN DIODO CONSIDERANDO SOLO LA RESISTENCIA SERIE.

Este modelo requiere definir un conjunto de dos parámetros, la resistencia serie R_s y el factor de idealidad del diodo a . Para encontrar estos parámetros el algoritmo es implementado para encontrar un solo parámetro mientras el otro permanece constante.

La curva I-V con temperatura constante es usada para determinar el valor de R_s y a , en cinco valores de irradiancia de acuerdo a las especificaciones suministradas por el fabricante. En la Figura 20 se ilustra la relación obtenida entre R_s y G , para un valor constante de factor de idealidad a . En la Figura 21 se muestra la relación

entre a y G , para un valor constante de resistencia serie. Para validar los resultados, se realizaron simulaciones para determinar las curvas I-V usando los valores obtenidos de R_s . En la Figura 22 se compara los resultados de simulación con los valores del datasheet. Se obtuvieron resultados similares utilizando valores de a para obtener las curvas I-V y luego fueron comparadas con las especificaciones del módulo solar.

Para analizar la precisión de los resultados de simulación se calcula un error absoluto, que consiste en determinar la diferencia entre los valores de corriente experimental y los de simulación de las curvas I-V para un punto de tensión dado, esto se desarrolla para diferentes niveles de irradiancia y temperatura. En la Tabla 1 se presenta el error calculado para cada nivel de irradiancia de la curva I-V variando la resistencia serie a temperatura constante en condiciones estándar, se puede notar que para bajas irradiancias ($200\text{W}/\text{m}^2$) el error aumenta.

La curva I-V con irradiancia constante es usada para determinar el valor de R_s en cinco valores diferentes de temperatura, dejando constante el factor de idealidad del diodo (a). Los resultados muestran que el valor de R_s no depende de la temperatura del panel fotovoltaico como se puede apreciar en la Figura 23. Resultados similares son encontrados para la dependencia de a y T . Este resultado es útil, ya que facilita la implementación del modelo. En la Figura 24 se ilustra los resultados de simulación que verifican que el modelo puede ser usado para modelar el comportamiento de módulos PV con variaciones de temperatura. En la Tabla 2 se puede observar el error porcentual para cada nivel de temperatura de la curva I-V, variando el factor de idealidad con G en condición estándar. El modelo presenta alta precisión a las variaciones de temperatura.

Figura 20. Módulo PV SM55- R_s Vs G . $a=1$; $T=25^\circ\text{C}$.

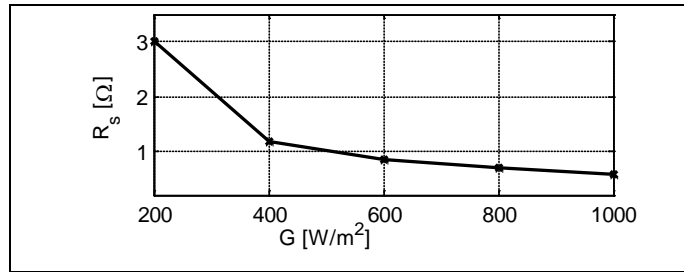


Figura 21. Módulo PV SM55- a Vs G . $R_s=0.5$ [ohm]; $T=25^\circ\text{C}$.

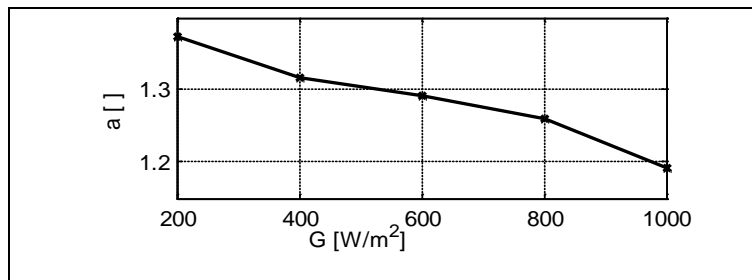


Figura 22. Módulo PV SM55- I Vs V . $a=1$; $T=25^\circ\text{C}$.

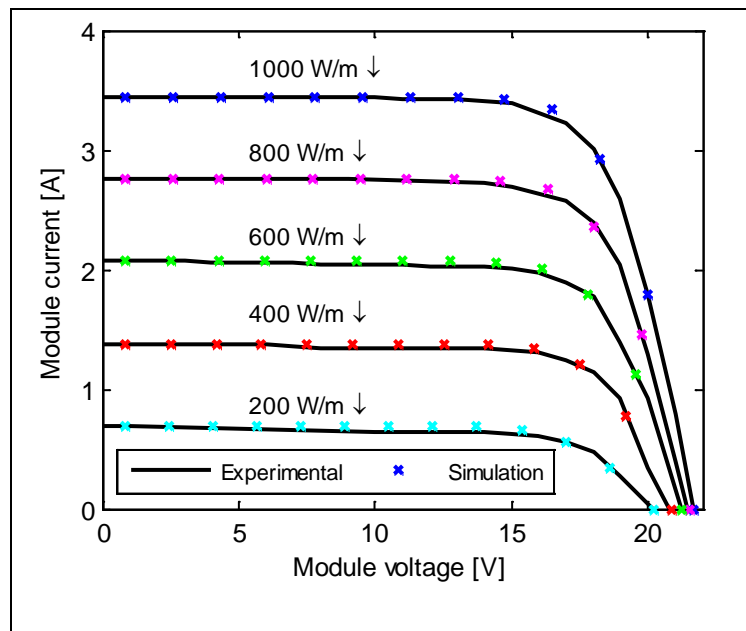


Tabla 1. Error para cada nivel de irradiancia.

Niveles de Irradiancia [W/m ²]	Error porcentual [%]
200	2.859
400	1.1645
600	0.7494
800	0.2806
1000	0.1828

Figura 23. Módulo PV SM55- R_s Vs T. $a=1$; $G=1000$ W/m².

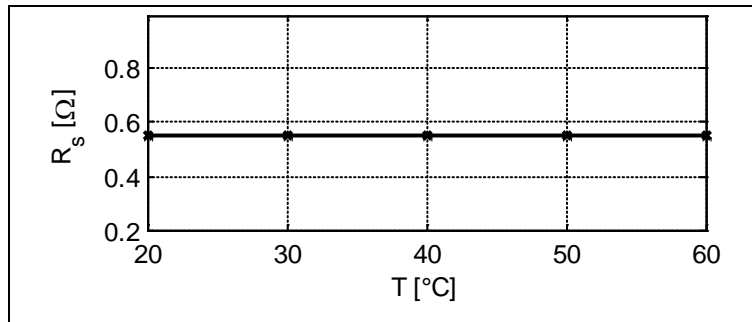


Figura 24. Módulo PV SM55- I Vs V. $R_s=0.5$ [ohm]; $G=1000$ W/m².

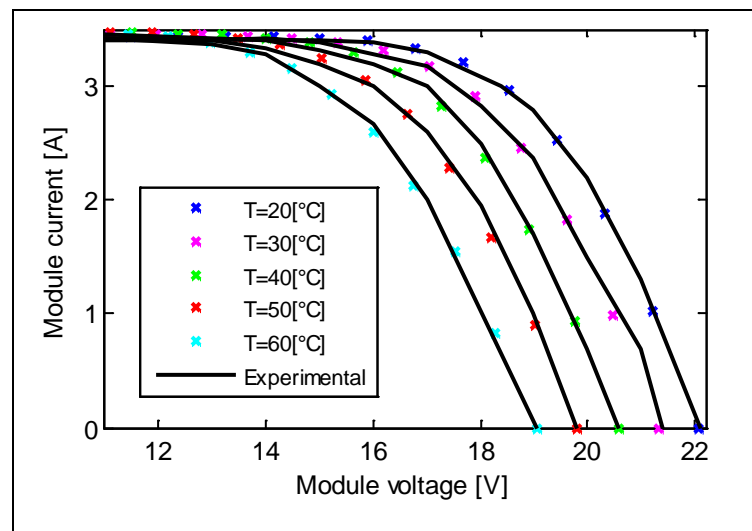


Tabla 2. Error para cada nivel de temperatura.

Niveles de Temperatura [°C]	Error porcentual [%]
20	0.3628
30	0.7612
40	0.3632
50	1.3196
60	0.3609

En esta subsección se verificó que el modelo R_s proporciona resultados precisos de simulación en funcionamiento para valores de irradiancia y temperatura suministrados por el fabricante. Se puede notar que R_s y a son funciones monótonas decrecientes cuando varía la irradiancia. Lo anterior es útil porque las relaciones pueden ser representadas por funciones exponenciales o lineales.

4.2. MODELO DE UN DIODO CONSIDERANDO LA RESISTENCIA SERIE Y PARALELO

Este modelo requiere definir un conjunto de tres parámetros, la resistencia serie R_s , la resistencia paralelo R_p y el factor de idealidad del diodo a . El algoritmo es usado para determinar simultáneamente todos los parámetros. En las Figuras 25, 26 y 27 se ilustran los resultados del algoritmo para determinar la relación entre a , R_s , R_p con G . En la Figura 28 se compara los resultados de simulación con los valores de la curva I-V del datasheet. En la Tabla 3 se puede observar el error calculado en los cinco niveles de irradiancia de la curva I-V variando el conjunto de parámetros (R_s , R_p y a) con temperatura constante en condición estándar. Los errores calculados son muy bajos en los cinco niveles de irradiancia, esto indica una gran cercanía entre los resultados de simulación y la hoja de datos del módulo solar para este caso.

En las Figuras 29, 30 y 31 se ilustran los resultados del algoritmo para determinar la relación entre R_s , R_p y a con T . En la Figura 32 se ilustra y compara los resultados de simulación con los valores de la curva I-V del datasheet. En la Tabla 4 se puede apreciar el error porcentual para cada nivel de temperatura de la curva I-V variando el conjunto de parámetros con G constante en condición estándar. Los errores calculados son relativamente bajos, esto indica una gran respuesta del modelo a las variaciones de temperatura.

Figura 25. Módulo PV SM55- a VS G; T=25 °C.

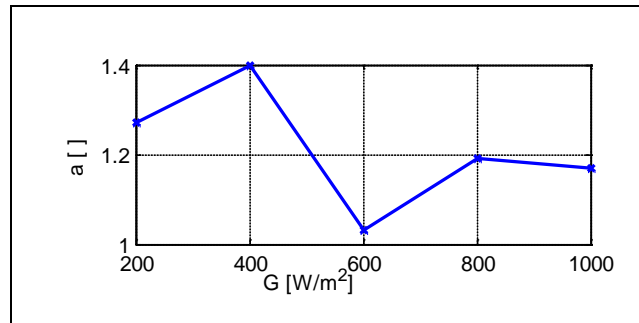


Figura 26. Módulo PV SM55- R_s VS G; T=25 °C

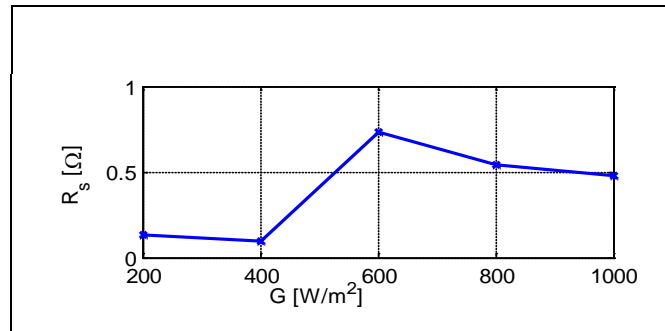


Figura 27. Módulo PV SM55- R_p Vs G ; $T=25\text{ }^\circ\text{C}$.

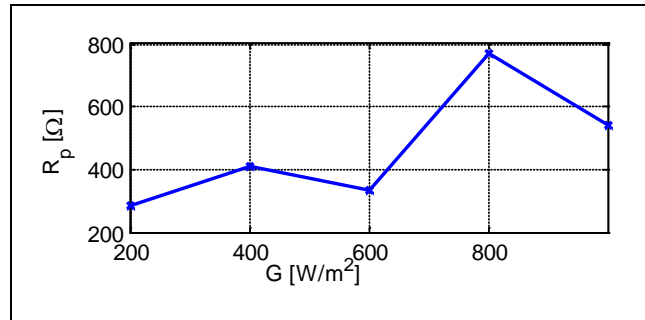


Figura 28. Módulo SM55- I Vs V . $T=25\text{ }^\circ\text{C}$.

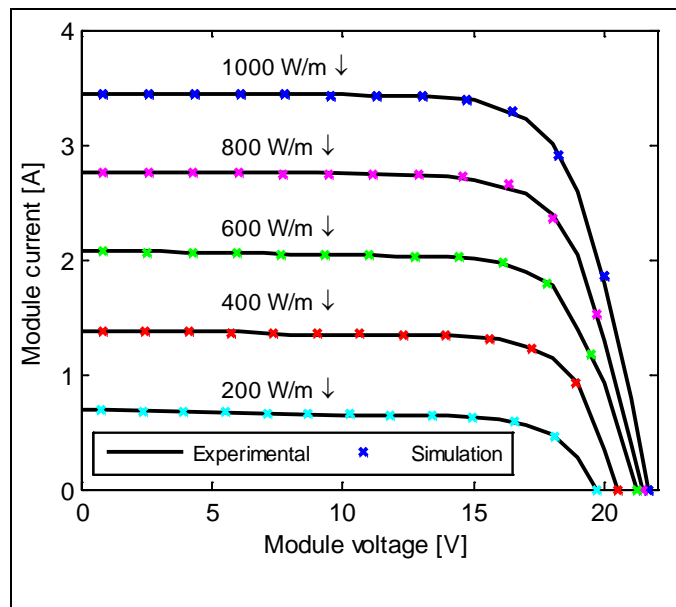


Tabla 3. Error para cada nivel de irradiancia.

Niveles de Irradiancia [W/m^2]	Error porcentual [%]
200	0.3248
400	0.2236
600	0.09829
800	0.1385
1000	0.2036

Figura 29. Módulo PV SM55- R_s VS T; $G=1000 \text{ W/m}^2$.

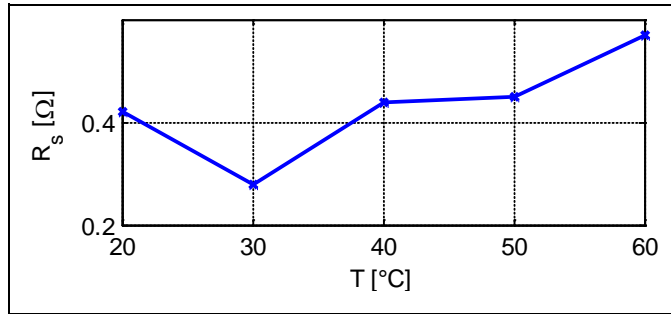


Figura 30. Módulo SM55 - R_p VS T; $G=1000 \text{ W/m}^2$.

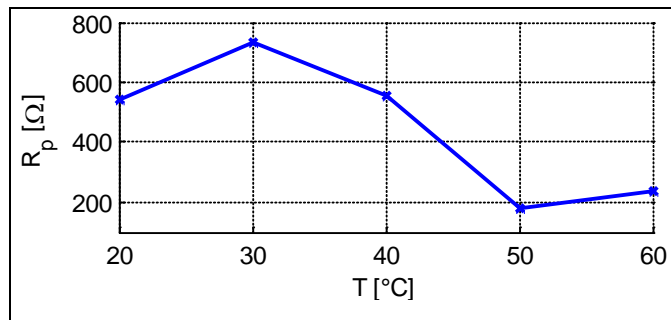


Figura 31. Módulo SM55- a VS T; $G=1000 \text{ W/m}^2$.

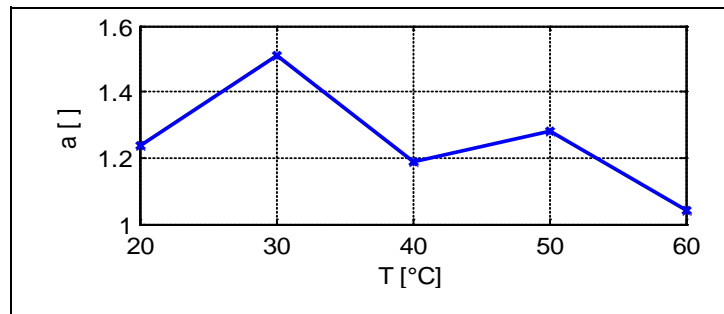


Figura 32. Módulo SM55 -I VS V; G=1000 W/m²

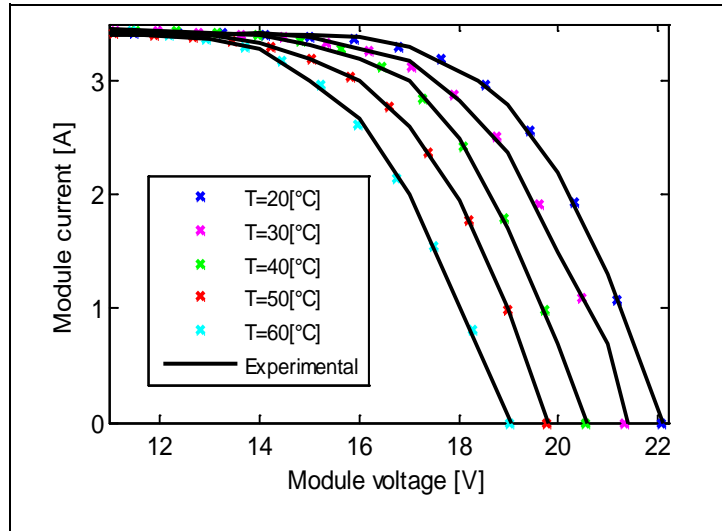


Tabla 4. Error para cada nivel de temperatura.

Niveles de Temperatura [°C]	Error porcentual [%]
20	0.1168
30	0.7211
40	0.1835
50	0.5258
60	0.2054

Los resultados obtenidos en esta subsección muestran que el modelo con R_s y R_p aporta resultados precisos de simulación en operación para valores de irradiancia y temperatura suministrados por el fabricante. Sin embargo, se presenta dificultad para identificar funciones monótonas entre los parámetros (R_s , R_p y a) con las entradas del modelo (G y T), que permitan entregar información del conjunto de parámetros a valores de irradiancia y temperatura distintos a los encontrados en las especificaciones del módulo.

4.3. MODELO DE DOS DIODOS

Como el modelo de dos resistencias, este modelo requiere tres parámetros, la resistencia serie R_s , la resistencia paralelo R_p y el factor de idealidad del diodo a . El algoritmo es utilizado para determinar simultáneamente R_s y R_p con el factor de idealidad constante. En las Figuras 33 y 34 se ilustran los resultados del algoritmo para determinar la relación entre R_s , y R_p con G . En la Figura 35 se compara los resultados de simulación con los valores de la curva I-V del datasheet. En la Tabla 5 se presenta el error para la curva I-V variando R_s y R_p con temperatura constante en condición estándar. Los errores calculados son bajos en los cinco valores de G para este caso.

Figura 33. Módulo PV SM55- R_s VS G : $a_1=1$; $a_2=1.3$; $p=2.3$; $T=25$ °C.

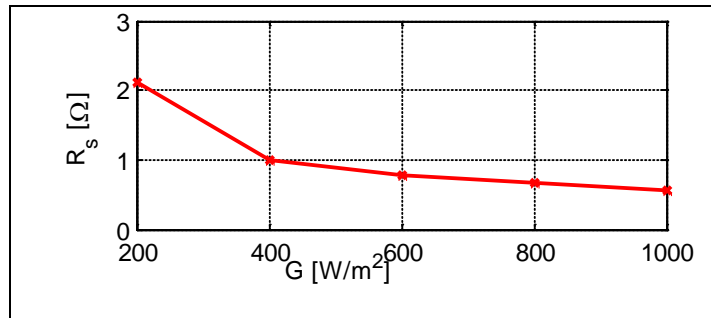


Figura 34. Módulo PV SM55- R_p VS G : $a_1=1$; $a_2=1.3$; $p=2.3$; $T=25$ °C.

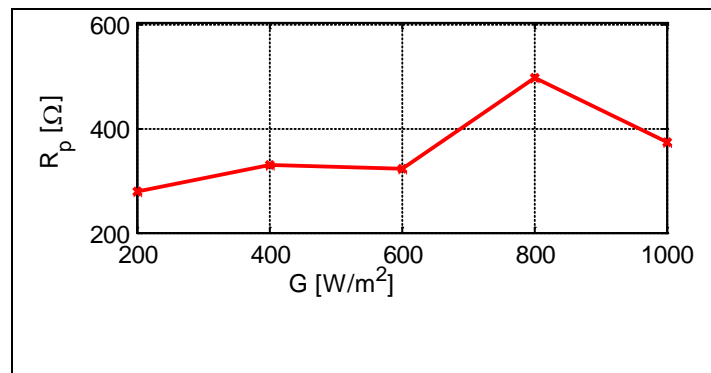


Figura 35. Módulo PV SM55 - I VS V; $a_1=1$; $a_2=1.3$; $p=2.3$; $T= 25\text{ }^\circ\text{C}$.

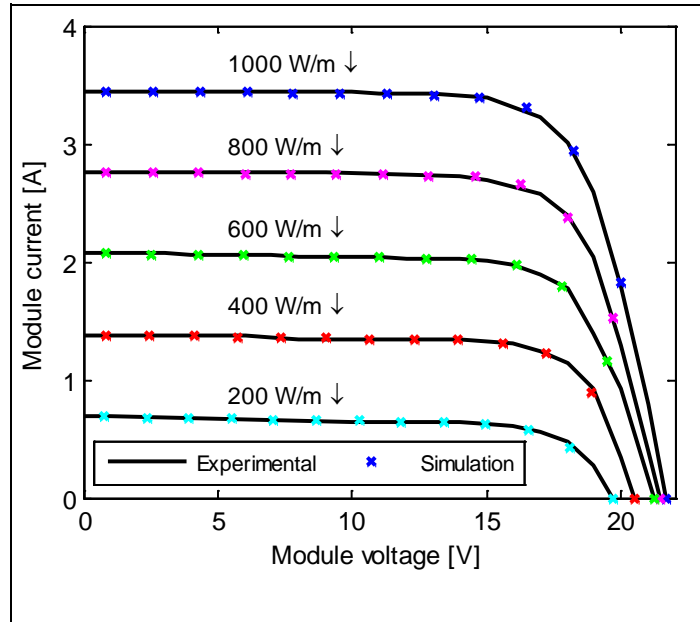


Tabla 5. Error para cada nivel de irradiancia.

Niveles de Irradiancia [W/m ²]	Error porcentual [%]
200	0.2688
400	0.1479
600	0.0982
800	0.2111
1000	0.2613

Los resultados obtenidos en esta subsección muestran que el modelo de dos diodos provee resultados precisos de simulación en operación para valores de irradiancia y temperatura suministrados por el fabricante. Sin embargo, su dificultad para encontrar funciones monótonas entre los parámetros del modelo (R_s , R_p y a) con las entradas del modelo (G y T), que faciliten determinar el conjunto de parámetros a valores de temperatura e irradiancia, que no son suministrados por el fabricante.

4.4. SELECCIÓN DEL MODELO PARA SIMULACIÓN

En la últimas subsecciones se mostró que los módulos PV pueden ser modelados con precisión con todos los modelos considerados al menos en condiciones estáticas tal como se presenta en las especificaciones del fabricante. Se puede ver que el modelo de un diodo tomando en cuenta solo la resistencia serie R_s es el modelo más simple para identificar sus parámetros (R_s y a), el único donde los parámetros no son dependientes de la temperatura, y la ventaja más importante es que la dependencia de los parámetros con la entrada G puede ser modelada con funciones monótonas. A pesar que en irradiancias bajas ($200\text{W}/\text{m}^2$) el error es más alto que en los otros modelos PV, es relativamente bajo y se puede considerar adecuado para aplicaciones de gestión de energía.

4.5. IDENTIFICACIÓN DE PARAMETROS A PARTIR DE LAS ESPECIFICACIONES DE LOS PVP

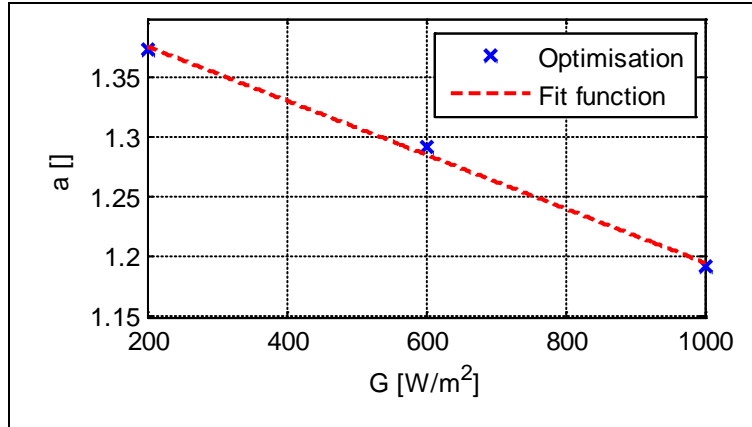
En esta sección se presenta un procedimiento para determinar los parámetros, el cual consiste en dividir las especificaciones del PVP en dos partes o grupos de datos; el primer grupo para obtener los parámetros y el segundo para validar. De este modo, sí funciona utilizando una parte de datos de las especificaciones para determinar los parámetros, funcionará utilizando el grupo completo de datos para la misma finalidad.

4.5.1. Validación del Procedimiento Presentado. Las especificaciones suministradas por el fabricante del módulo solar presentan las curvas I-V en cinco niveles de irradiancia. En esta subsección se propone utilizar tres curvas para identificar los parámetros y las dos restantes para validar los resultados utilizando las especificaciones de dos tipos diferentes de módulos solares. De esta forma, las relaciones de a Vs G y R_s Vs G son obtenidas mediante un grupo del datasheet

(200, 600 y 1000W/m²) y la validación es realizada mediante otro grupo de datos (400 y 800W/m²).

En la Figura 36 se presenta la función de ajuste que modela la relación entre a y G para tres puntos de irradiancia, como son: 200W/m², 600W/m² y 1000 W/m² a temperatura constante en condiciones estándar. En la Figura 37 se presenta la curva I-V para valores de irradiancia (400W/m² y 800W/m²) con a variable y temperatura constante (25°C), que se obtuvieron a partir de la función lineal. Los resultados de simulación fueron validados con las especificaciones del módulo solar Shell SM55. En la Tabla 6 se presenta el error para los dos valores de irradiancia; se puede notar que utilizando la función lineal de ajuste, el error es relativamente bajo y este puede ser aceptado para la aplicación considerada.

Figura 36. Módulo PV SM55- a VS G ; $R_s=0.5$ [ohm]; $T=25$ °C; Función de ajuste $a=-0.00022637G+1.4223$. $R^2=0.997^{(*)}$.



^(*) R^2 es el Coeficiente de determinación

Figura 37. Módulo PV SM55 - I VS V; $R_s=0.5$ [ohm]; $T=25$ °C.

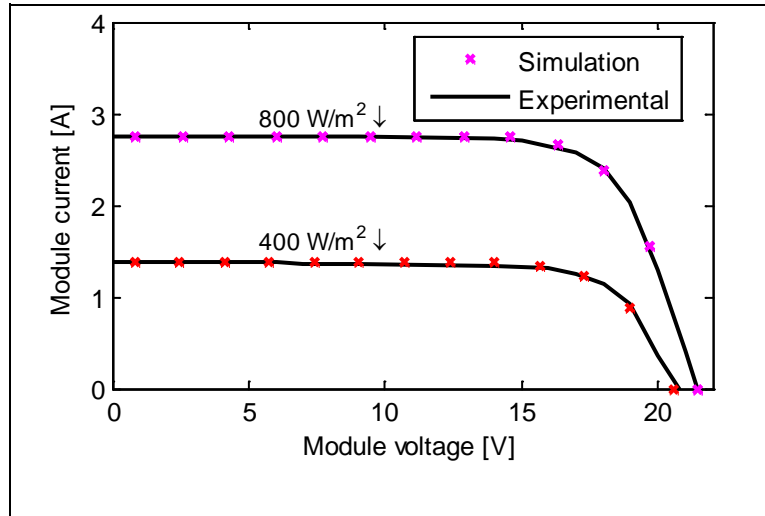


Tabla 6. Error para dos niveles de irradiancia.

Niveles de Irradiancia [W/m ²]	Error porcentual [%]
400	1.3
800	0.46

En la Figura 38 se presenta la función de ajuste que modela la relación entre R_s y G para tres puntos de irradiancia, como son: 200W/m^2 , 600W/m^2 y 1000W/m^2 a temperatura constante en condiciones estándar. En la Figura 39 se presenta la curva I-V para valores de irradiancia (400W/m^2 y 800W/m^2) con R_s variable y temperatura constante (25°C), que se obtuvieron a partir de la función potencial. Los resultados de simulación fueron validados con las especificaciones del módulo solar Shell SM55. En la Tabla 7 se presenta el error para los dos valores de irradiancia; se puede observar que utilizando la función potencial de ajuste se logra una precisión similar a la alcanzada por la función lineal.

Figura 38. Módulo PV SM55- R_s VS G ; $a=1$; $T=25$ °C; Función de ajuste $R_s=704.53G^{(-1.035)}$. $R^2= 0.9917$.

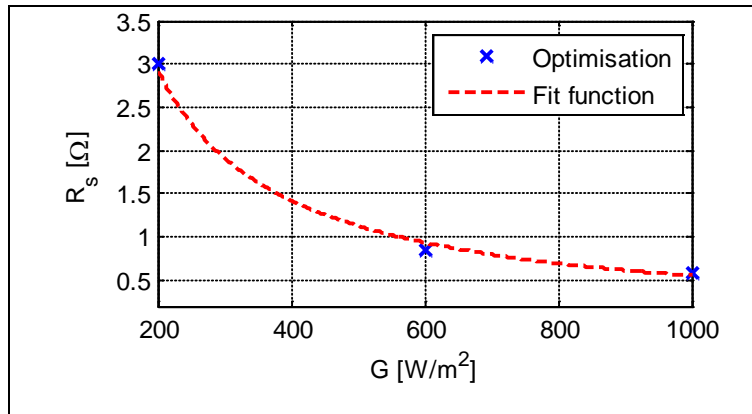


Figura 39. Módulo PV SM55 - I VS V ; $a=1$; $T=25$ °C.

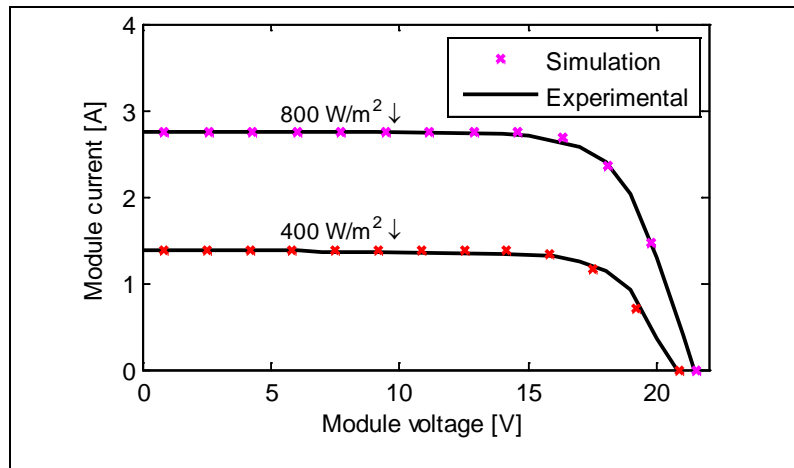


Tabla 7. Error para dos niveles de irradiancia.

Niveles de Irradiancia [W/m ²]	Error porcentual [%]
400	1.5
800	0.13

Se presenta el mismo procedimiento anterior utilizando el panel fotovoltaico ST40. En la Figura 40 se puede observar la función lineal de ajuste que modela la dependencia de a con G utilizando tres puntos de irradiancia: 200W/m², 600W/m²

y 1000 W/m². En la Figura 41 se compara los resultados de simulación, obtenidos a partir de la función de ajuste, con el datasheet del módulo solar para valores de irradiancia (400 y 800 W/m²). En la Tabla 8 se presenta el error para los dos valores de irradiancia utilizados, los resultados obtenidos muestran errores relativamente bajos y aceptables para la aplicación considerada.

Figura 40. Módulo PV ST40- a VS G; Rs=0.5 [ohm]; T=25 °C. Función de ajuste a=-0.001G+1.7367. R²=0.9986.

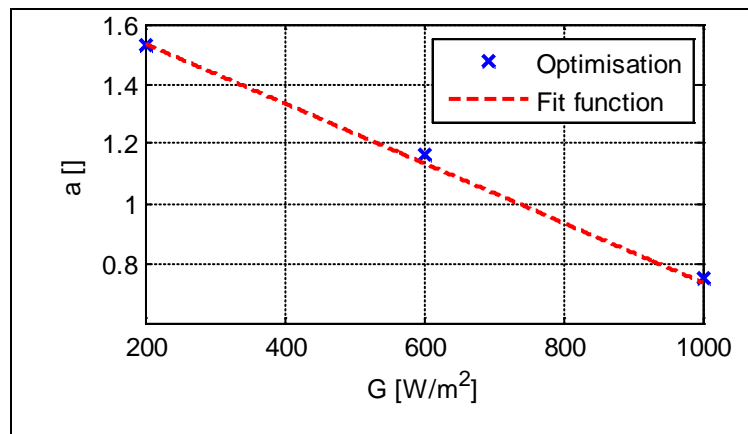


Figura 41. Módulo PV ST40 - I VS V; Rs=0.5 [ohm]; T=25 °C.

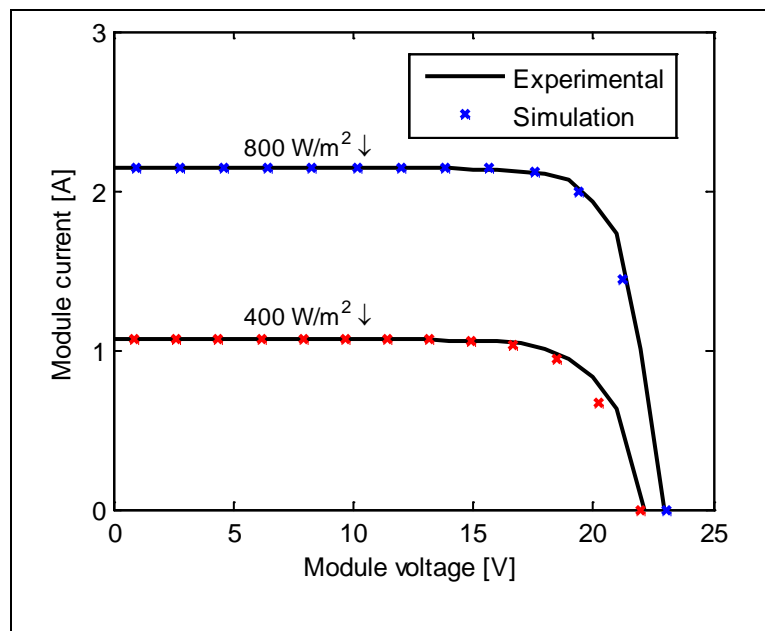


Tabla 8. Error para dos niveles de irradiancia.

Niveles de Irradiancia [W/m ²]	Error porcentual [%]
400	1.14
800	0.2

En la Figura 42 se puede observar la función potencial de ajuste que modela la dependencia de R_s con G utilizando tres puntos de irradiancia: 200W/m², 600W/m² y 1000 W/m². En la Figura 43 se realiza una comparación entre los resultados de simulación obtenidos mediante la función de ajuste y las especificaciones del módulo solar para valores de irradiancia (400W/m² y $G=800W/m^2$). En la Tabla 9 se presenta el error para los dos valores de irradiancia; similar a lo ocurrido con el Módulo solar SM55, ambas funciones de ajuste entregan resultados que permiten obtener las curvas I-V.

Figura 42. Módulo PV ST40- R_s VS G ; $a=1$; $T=25$ °C. Función de ajuste $R_s=61655G^{-1.78}$. $R^2=0.994$.

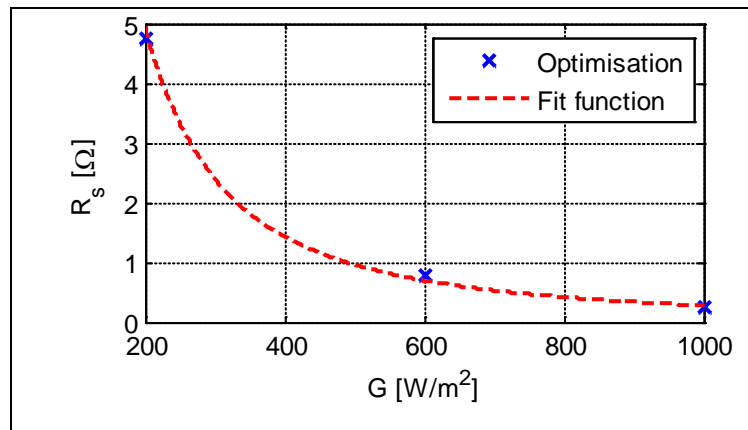


Figura 43. Módulo PV ST40 - I VS V; a=1; T=25 °C.

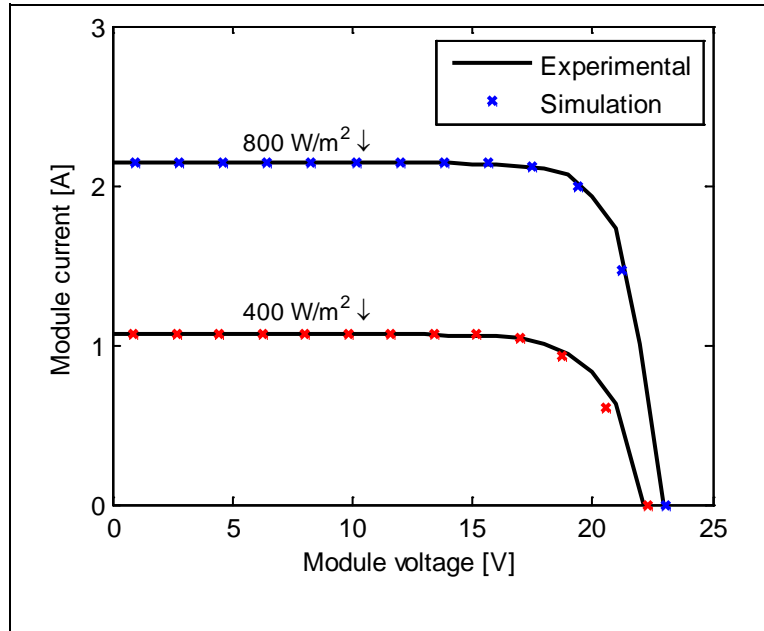


Tabla 9. Error para dos niveles de irradiancia.

Niveles de Irradiancia [W/m ²]	Error porcentual [%]
400	1.17
800	0.103

4.5.2. Validación del Modelo Seleccionado con el Modulo Solar Shell SM55.

Luego de validar el procedimiento presentado en la subsección 4.5.1, se propone identificar los parámetros utilizando las cinco curvas de I-V del datasheet y validar los resultados con las mismas especificaciones del módulo solar. Se emplearon funciones de ajuste para modelar la dependencia de R_s y a con G . Esto puede ser útil para obtener la curva característica I-V para valores de irradiancia que no son suministrados en las especificaciones del fabricante.

La Figura 44 y 45 muestran la relación obtenida entre R_s y G , y entre a y G respectivamente, obtenida con el algoritmo de identificación de parámetros, y la

función de ajuste. R_s Vs G se ajustó usando una curva potencial, y para el factor de idealidad se ajustó con una curva lineal. Los resultados obtenidos con la resistencia serie constante y el factor de idealidad variable son mostrados en la Figura 46, y en la Figura 47 con factor de idealidad constante y como variable R_s .

En la Tabla 10 se presenta el error porcentual para cada nivel de irradiancia de la curva I-V, que se obtiene a partir de la función lineal variando el factor de idealidad y temperatura a condiciones estándar. Se puede observar que el error aumenta para baja irradiancia (200 W/m^2).

En la Tabla 11 se presenta el error para cada nivel de irradiancia de la curva I-V, que se obtiene a partir de la función potencial variando la resistencia serie y temperatura constante a condiciones estándar. Los resultados son muy similares a los obtenidos con la función lineal de ajuste.

Figura 44. Módulo PV SM55- R_s VS G ; $a=1$; $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$. Función de ajuste $R_s=562.37G^{(-1.005)}$. $R^2=0.9778$.

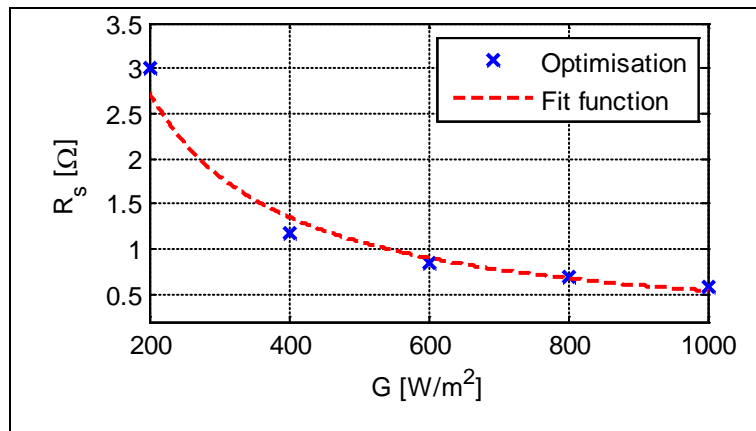


Figura 45. Módulo PV SM55- a VS G; Rs=0.5; T=25 °C; Función de ajuste a=-0.0002G+1.4135. R²=0.9733.

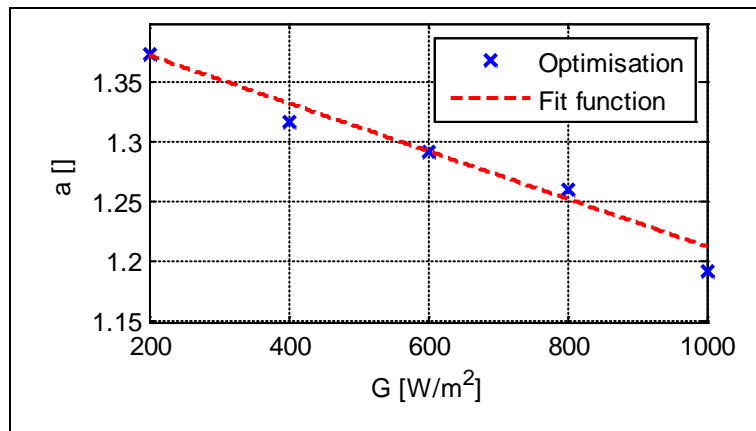


Figura 46. Módulo PV SM55 - I VS V; Rs=0.5 [ohm]; T=25 °C.

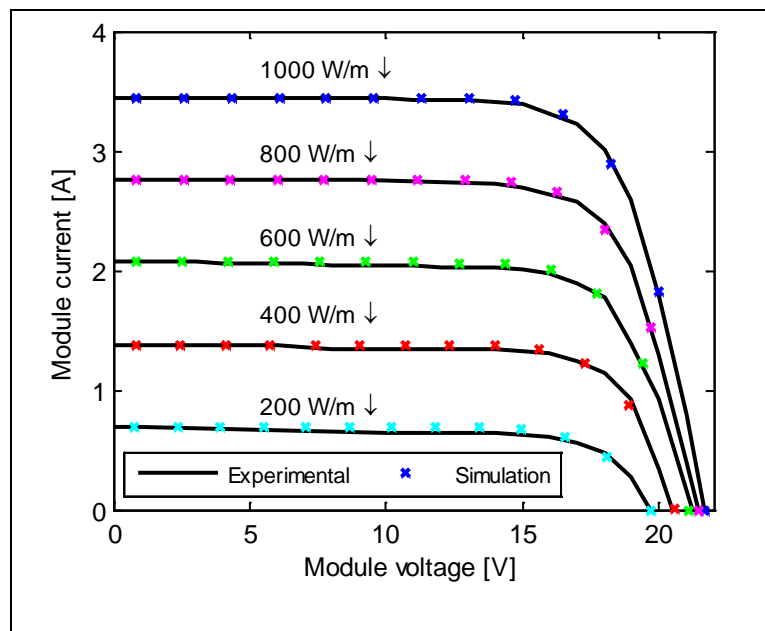


Tabla 10. Error para cada nivel de irradiancia.

Niveles de Irradiancia [W/m ²]	Error porcentual [%]
200	2.891
400	1.0286
600	0.6102
800	0.1326
1000	0.08839

Figura 47. Módulo PV SM55- I VS V; a=1; T=25 °C.

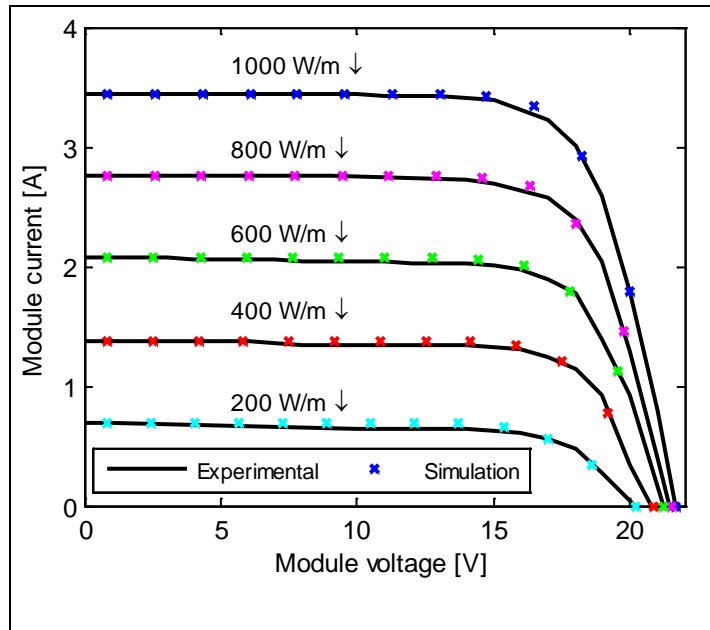


Tabla 11. Error para cada nivel de irradiancia.

Niveles de Irradiancia [W/m ²]	Error porcentual [%]
200	2.8622
400	1.1645
600	0.7494
800	0.2806
1000	0.1828

4.5.3. Validación del Modelo Seleccionado con el Modulo Solar Shell ST40. En esta subsección se propone utilizar el procedimiento aplicado en 4.5.2 empleando las especificaciones del módulo solar Shell ST40 que se encuentra en el Anexo E, cuyos resultados son presentados a continuación. En la Figura 48 y 49 se ilustran la relación entre R_s Vs G y a Vs G junto con las curvas de ajuste correspondientes. Al igual que para el módulo solar SM55, R_s Vs G se ajustó usando una curva potencial, y para el factor de idealidad se ajustó con una curva lineal.

En la Figura 50 se presenta los resultados obtenidos utilizando los parámetros interpolados en la función lineal de ajuste. En la Tabla 12 se puede observar el error calculado para cada nivel de irradiancia de la curva I-V obtenida mediante la función lineal de ajuste variando el factor de idealidad con temperatura a condición estándar, los resultados indican que el error aumenta para valores de baja irradiancia ($200\text{W}/\text{m}^2$).

En la Figura 51 se muestran los resultados obtenidos utilizando los parámetros interpolados en la función potencial de ajuste. En la Tabla 13 se presentan los errores calculados para los cinco niveles de irradiancia de la curva I-V obtenida a partir de la función potencial de ajuste variando la resistencia serie a temperatura en condición estándar. Los resultados de error son similares en ambos casos para baja irradiancia ($200\text{W}/\text{m}^2$), sin embargo, es mucho más práctico utilizar la condición de variar el factor de idealidad ya que la relación de a Vs G se puede modelar mediante una función lineal mientras que para el caso de R_s Vs G se modela con una función potencial.

Figura 48. Módulo PV ST40- R_s VS G ; $a=1$; $T=25$ °C. Función de ajuste $R_s=48777G^{-1.764}$. $R^2=0.9644$.

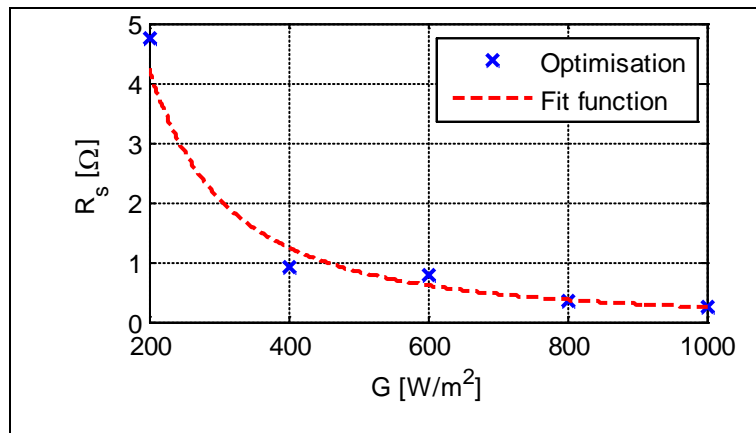


Figura 49. Módulo PV ST40- a VS G ; $R_s=0.5$ [ohm]; $T=25$ °C. Función de ajuste $a=-0.00096G+1.6399$. $R^2=0.9488$.

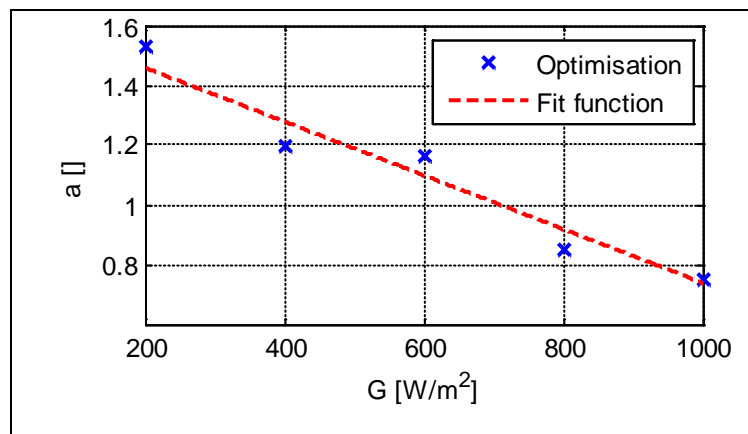


Figura 50. Módulo PV ST40- I VS V; Rs=0.5; T=25 °C.

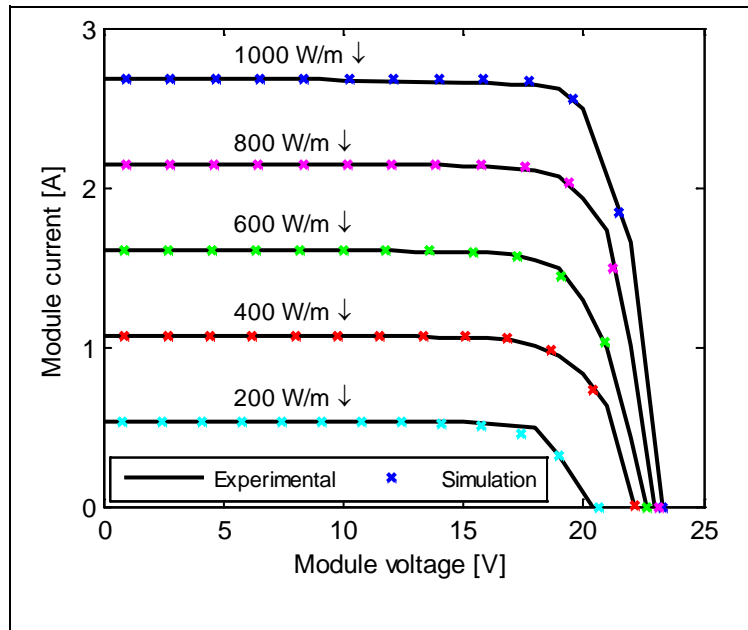


Tabla 12. Error para cada nivel de irradiancia.

Niveles de Irradiancia [W/m ²]	Error porcentual [%]
200	2.8275
400	0.2442
600	0.01244
800	0.1123
1000	0.2177

Figura 51. Módulo PV ST40- I VS V; a=1; T=25 °C.

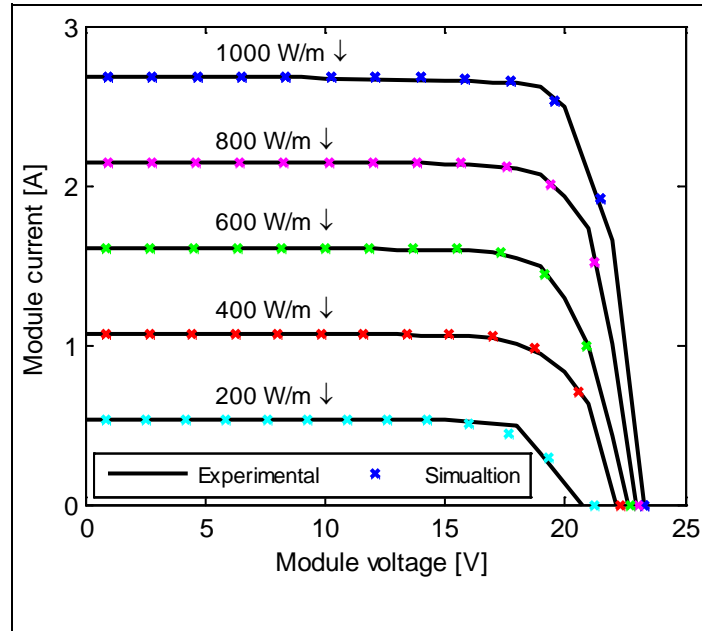


Tabla 13. Error para cada nivel de irradiancia.

Niveles de Irradiancia [W/m ²]	Error porcentual [%]
200	2.855
400	0.3
600	0.08
800	1.56
1000	0.54

En esta sección se presentó un algoritmo de optimización para determinar los parámetros de los modelos fotovoltaicos como lo son: la resistencia serie R_s , la resistencia paralelo R_p y el factor de idealidad a , utilizando las especificaciones del módulo solar. El algoritmo de identificación de parámetros y los modelos PV identificados fueron validados con las especificaciones suministradas por el fabricante, los resultados indican que los paneles fotovoltaicos pueden ser modelados con precisión utilizando estos modelos PV. El modelo de un diodo considerando la resistencia serie parece ser el más adecuado para modelar paneles

fotovoltaicos. Este modelo PV requiere solo dos parámetros a determinar (R_s y a), adicionalmente sus parámetros no dependen de la temperatura y su dependencia con la irradiancia puede ser modelada mediante funciones monótonas. Estas funciones son muy importantes ya que permiten encontrar la resistencia serie y el factor de idealidad a valores de irradiancia que no son mostrados en las especificaciones del fabricante.

Se realizaron dos casos de validación, el primer caso consiste en determinar los parámetros del modelo PV seleccionado utilizando tres niveles de irradiancia de la curva I-V del datasheet (200, 600 y 1000 W/m²) y validar los resultados con los dos niveles de irradiancia restante (400 y 800 W/m²). El segundo caso es identificar los parámetros del modelo fotovoltaico considerado utilizando los cinco niveles de irradiancia presentados en las especificaciones del fabricante y validarlos con los mismos valores del datasheet; esto fue aplicado para dos tipos diferentes de módulos solares. Las relaciones de a Vs G y R_s Vs G se modelan mediante funciones de ajuste lineal y potencial respectivamente, estas funciones de ajuste presentan un coeficiente de determinación muy cercano a 1, entre 0.9488 y 0.997. Para las dos relaciones se alcanzan resultados precisos para obtener las curvas I-V; por efecto de practicidad se utiliza la condición de variar el factor de idealidad a temperatura constante en condición estándar (a Vs G).

5. SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTVOLTAICA.

Para la simulación de un sistema fotovoltaico se utiliza el formalismo de representación energética macroscópica mediante bloques de Matlab/Simulink como se puede apreciar en el Anexo C, esto con el fin de realizar un análisis en estado estable del sistema para aplicaciones de dimensionado y gestión de energía. El sistema de generación de energía fotovoltaica, está conformado por los siguientes sub sistemas: etapa de generación PV, etapa de electrónica de potencia, sistema de control y un barraje DC. El sistema de control es estudiado e implementado en un proyecto de grado realizado en paralelo²⁸, la etapa de la electrónica de potencia y el barraje DC son modelados mediante elementos ideales.

5.1 FORMALISMO DE REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA (REM)

A partir del año 2000, se ha venido implementando la Representación Energética Macroscópica, para el desarrollo de investigaciones de sistemas electromecánicos complejos. Esta descripción funcional es un formalismo gráfico y multi-físico que permite destacar las propiedades de cada subsistema y admite la comprensión de cada una por separado. Además de esto, presenta la posibilidad de realizar fácilmente el cambio de cualquier bloque funcional con el fin de simular otro sistema PV diferente²⁹.

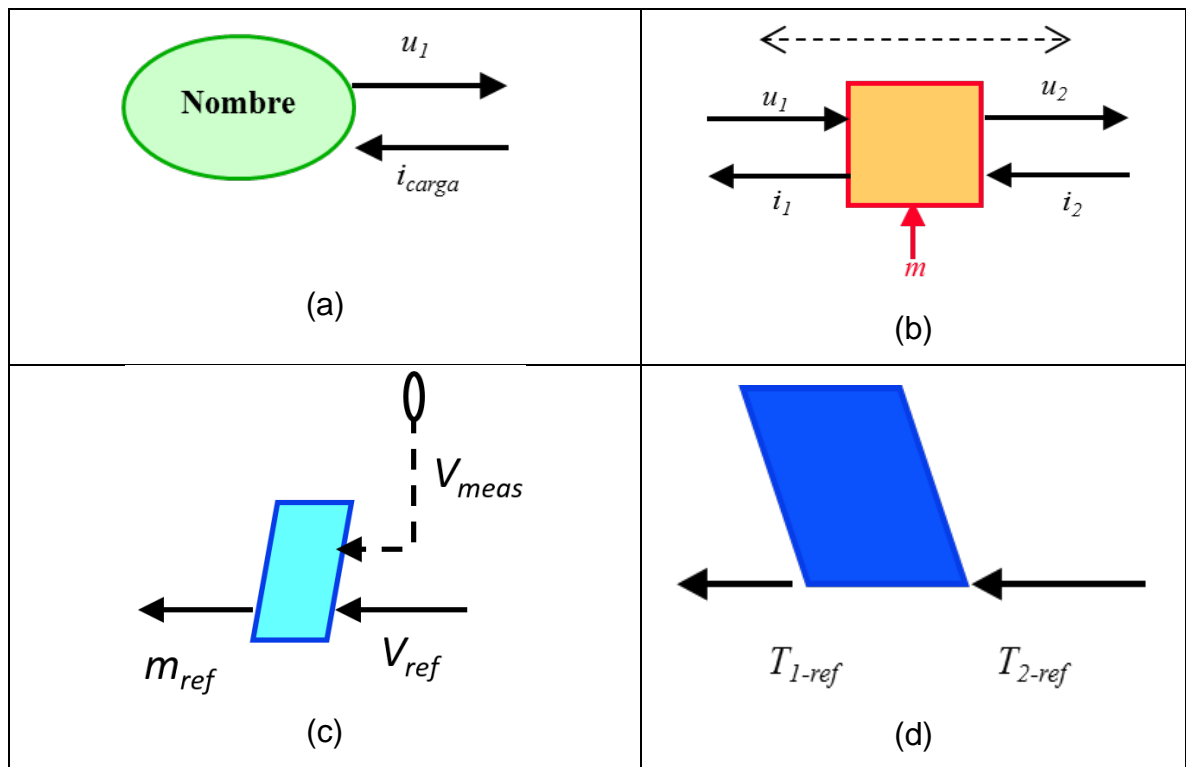
²⁸ DUARTE CARRASCAL, José Luis y VARGAS BERNAL, Erwin Alexander. Op. Cit.

²⁹ CHEN, Keyu; BOUSCAYROL, Alain and LHOMME, Walter. Op. Cit.

Este formalismo utiliza distintos bloques para asignar funciones, así mismo sus respectivos colores describen las características de desempeño que cumplen. A continuación, se desarrolla una descripción de cada una de las funciones utilizadas en la Representación Energética Macroscópica.

La Figura 52 (a) representa una fuente de energía, ya sea de tipo mecánico, eléctrico, químico, nuclear, etc. La Figura 52(b) representa un elemento de conversión mono-físico, e.g., un transformador eléctrico, un reductor de velocidad (multiplicador de par), etc. En la Figura 52(c) se puede ver el elemento empleado para el control en lazo cerrado. La Figura 52(d) muestra un bloque de estrategia, el cual fue usado para el seguimiento del punto de máxima potencia, este representa la maniobra utilizada para generar las referencias para los sistemas de control.

Figura 52. Bloques de asignación del formalismo REM. (a) Elemento de fuente, (b) Elemento de conversión mono-físico (c) Elemento de Control en lazo cerrado (d) Elemento de estrategia.



5.2. REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA (REM) DEL SISTEMA ESTUDIADO

En la Figura 53 se puede apreciar cada uno de los bloques que componen el sistema fotovoltaico estudiado, utilizando el formalismo de representación energética macroscópica. En la Figura 53(a), se encuentra el bloque de generación fotovoltaica, dentro de este aparece el modelo R_s utilizando la condición de variar el factor de idealidad a temperatura constante en condición estándar (a Vs G), esto fue seleccionado para modelar paneles solares por las razones expuestas en la subsección 4.5. En la Figura 53(b), se puede observar el bloque convertidor ideal DC/DC, que se encarga de elevar o reducir la tensión de entrada del bloque PVP, esto con el fin de ubicar el punto de máxima potencia de salida. En la Figura 53(c), se puede ver el bloque de inversión, el cual realiza la tarea de invertir y generar una señal de referencia utilizada por el bloque convertidor. En la Figura 53(d), aparece el bloque de control para el sistema, el cual se encarga de hacer seguimiento del punto de máxima potencia de salida de la etapa de generación. En la Figura 53(e) se encuentra el bloque que representa el barraje o bus de tensión DC del sistema. En la Figura 54 se presenta el sistema de generación de energía fotovoltaico utilizando el formalismo de representación energética macroscópica, y en la Figura 55 se muestra el mismo sistema fotovoltaico implementado mediante bloques de Matlab/Simulink.

Figura 53. Bloques del sistema estudiado empleando el formalismo REM. (a) Bloque de generación PV, (b) Bloque convertidor ideal DC/DC, (c) Bloque de inversión, (d) Bloque de control. (e) Barraje DC.

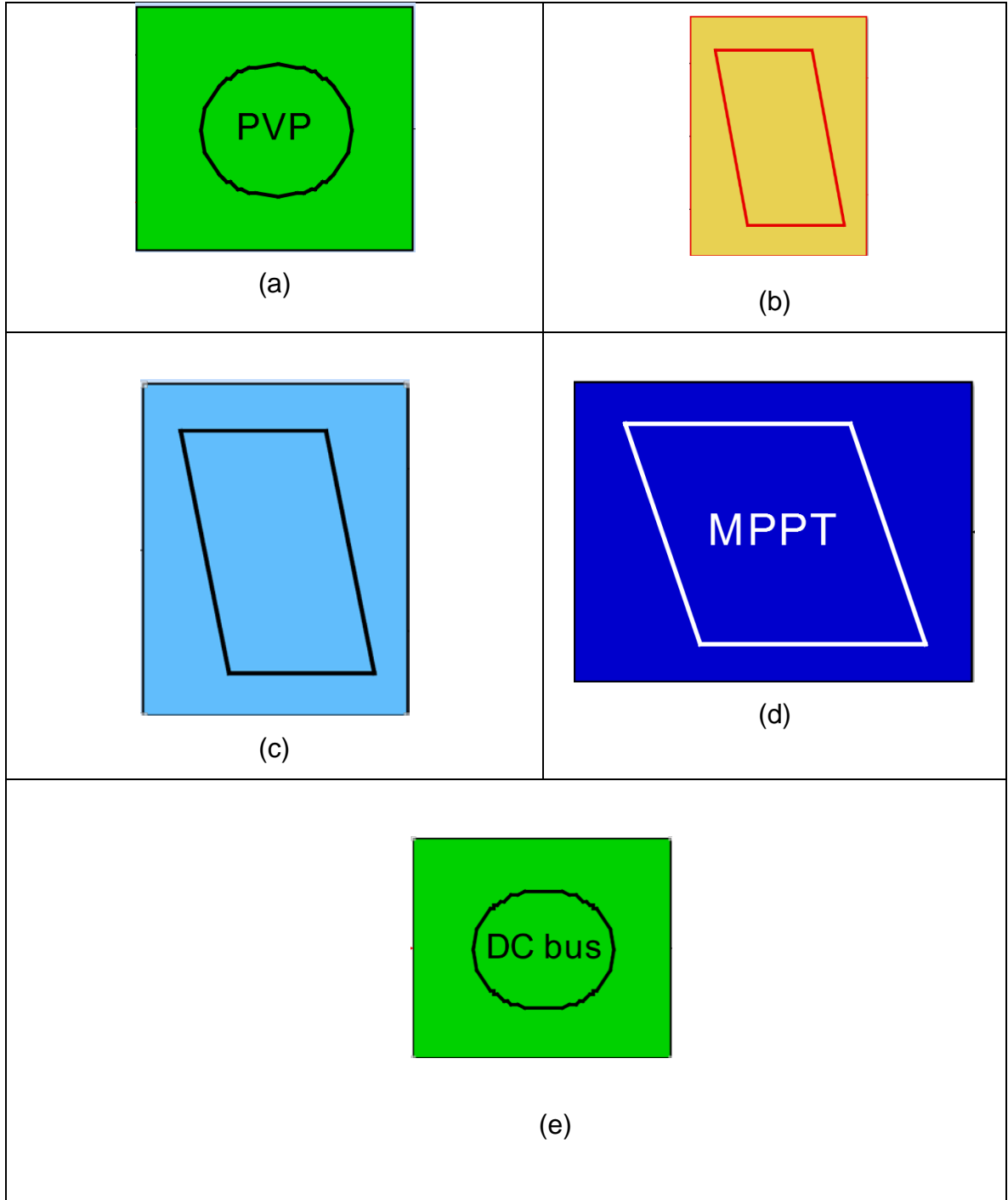


Figura 54. Sistema de generación de energía fotovoltaico utilizando el formalismo de representación energética macroscópica (REM).

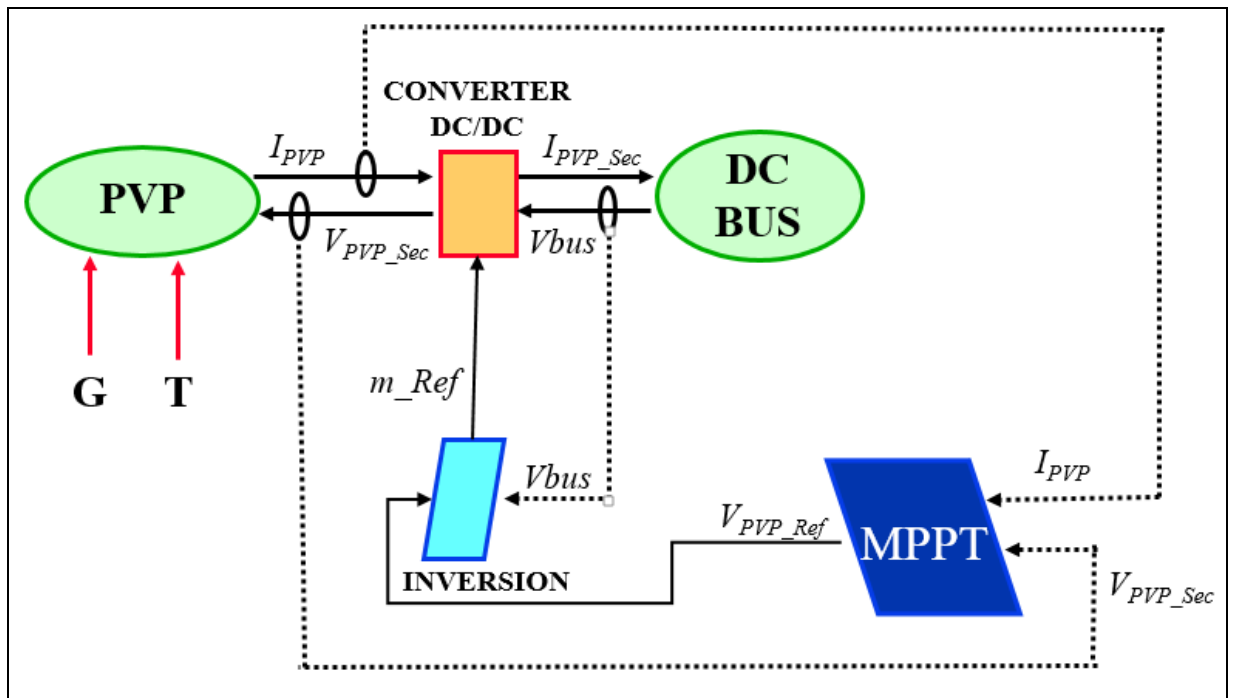
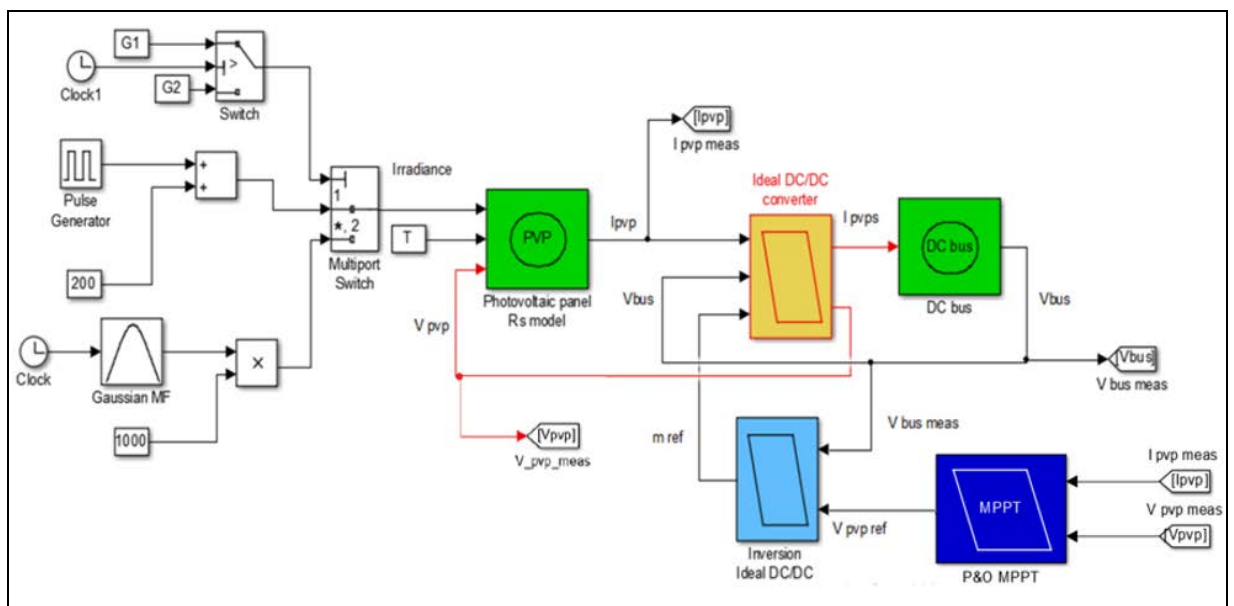


Figura 55. Sistema de generación de energía fotovoltaico implementado en Matlab/Simulink.



5.2.1 Resultados de Simulación. En el ANEXO C se presentan los tres casos de simulación del sistema fotovoltaico. El primer caso corresponde a una función escalón que simula la irradiancia, es decir, G1 (1000 W/m²) durante 5 segundos y luego de esto cambia a G2 (800 W/m²) durante los siguientes 5 finales, como se puede apreciar en la Figura 56. En la Figura 57 se muestra que para G1 la máxima potencia entregada es de 54.9W, muy cercano al mostrado en las especificaciones del fabricante 55W, para G2 la máxima potencia suministrada por el módulo es de 43.8287W, 40W en el datasheet del módulo solar SM55.

Figura 56. Caso I, G1=1000 W/m²; G2=800 W/m².

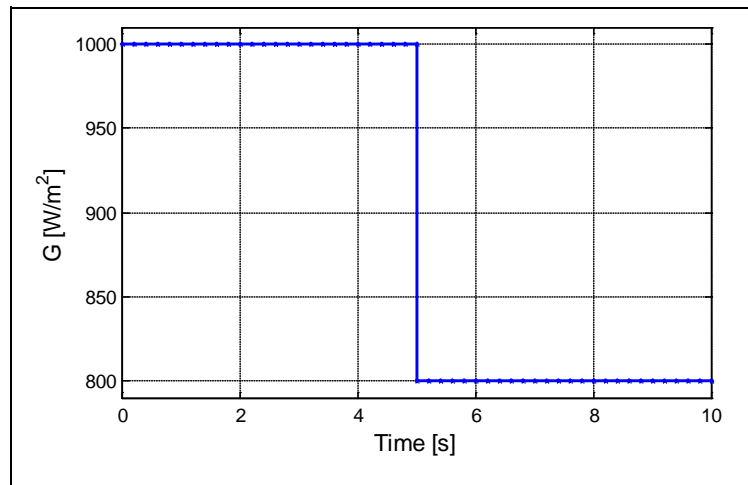
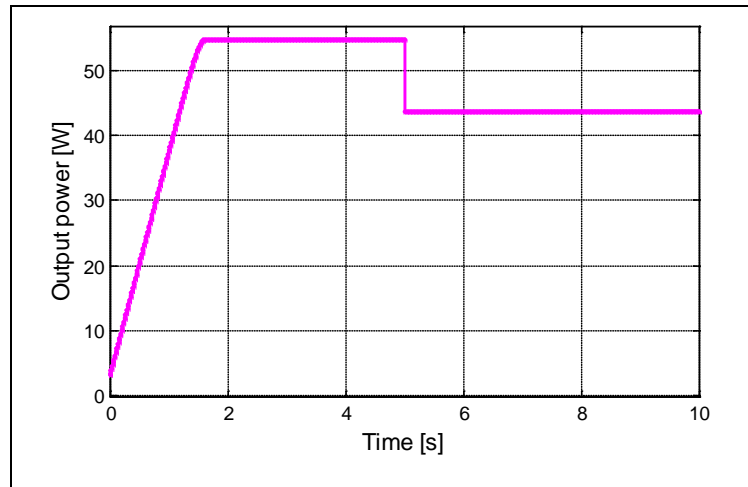


Figura 57. Módulo PV SM55 - P Vs T. $G_1=1000 \text{ W/m}^2$; $G_2=800 \text{ W/m}^2$; $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$.



El segundo caso consiste en simular la irradiancia por medio de una función de pulsos con periodo de 20 segundos, G_1 (200 W/m^2) durante 10 segundos, luego G_2 (1000 W/m^2) durante los siguientes 10 segundos, como aparece en la Figura 58. En la Figura 59 se puede ver la potencia de salida entregada por el bloque PVP, la cual fue validada con las especificaciones del fabricante.

Figura 58. Caso II, $G_1=200 \text{ W/m}^2$; $G_2=1000 \text{ W/m}^2$.

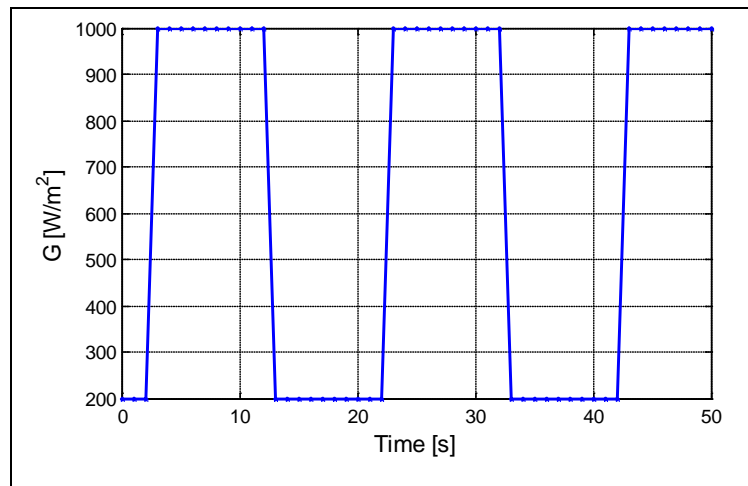
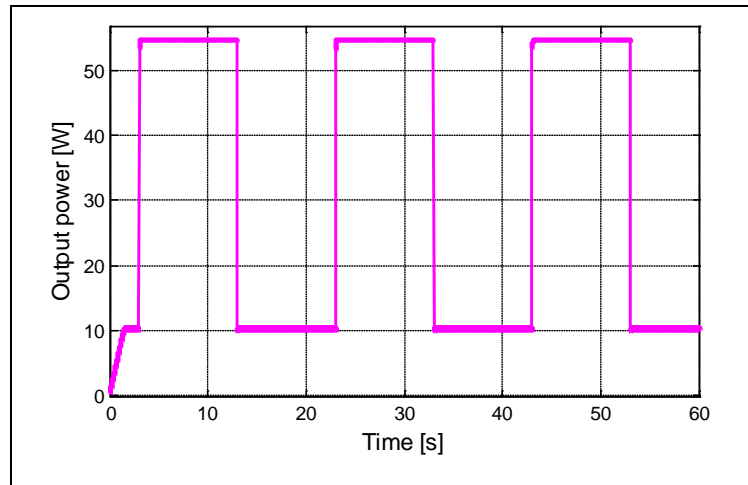


Figura 59. Módulo PV SM55 - P Vs T. T=25 °C. G1=200 W/m²; G2=1000 W/m²; T=25 °C.



El tercer caso consiste en modelar la irradiancia mediante una función gaussiana, esto simula la irradiancia a temperatura constante durante las 4:00 y 20:00 h, como se puede apreciar en la Figura 60. En la Figura 61 se muestra la potencia de salida para un arreglo fotovoltaico de 5 módulos conectados en paralelo (1x5) durante las horas mencionadas.

Figura 60. Caso III, $G(t) = (\exp((-0.5(t - 12)^2) / (\sqrt{5})^2)) * 1000$.

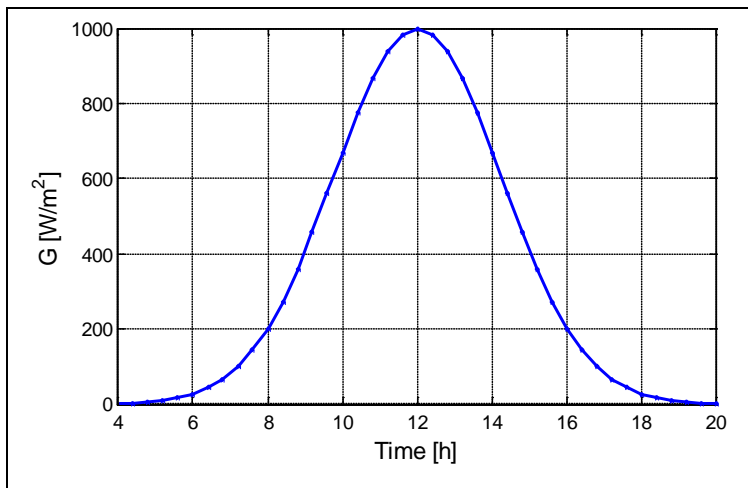
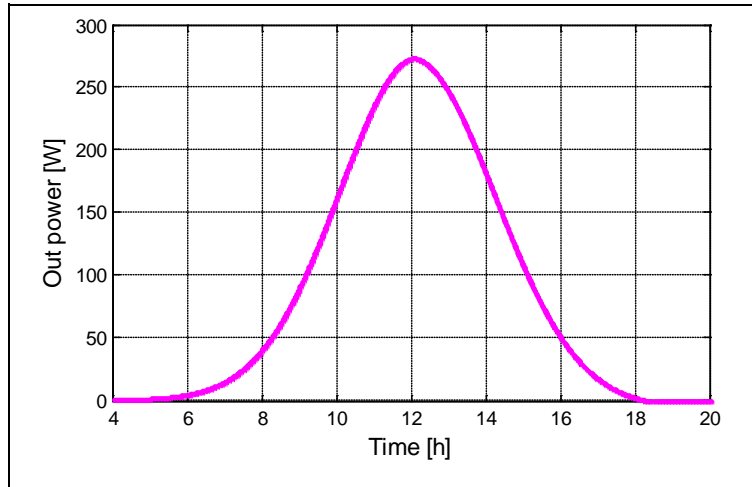


Figura 61. Arreglo PV SM55 1x5. P Vs T. T=25°C.



En esta sección se presentó el modelo para simulación en Matlab/Simulink de un sistema de generación de energía fotovoltaica y utilizando el formalismo de representación energética macroscópica. Este formalismo permite adicionar o cambiar fácilmente elementos al sistema, e.g., baterías. El sistema fue validado para tres casos de simulación; primero se modeló la irradiancia mediante una función escalón, luego utilizando una señal de pulsos con periodo de veinte segundos y finalmente con una función gaussiana. Los resultados en términos de potencia de salida de la etapa de generación PV fueron validadas en las especificaciones del fabricante. Este trabajo aporta en el modelado de paneles fotovoltaicos para la etapa de generación del sistema PV, se recomienda que para los próximos aportes al laboratorio de integración energética y micro redes, que el grupo GISEL de la E³T planea llevar a cabo, se realice el modelado en Matlab/Simulink de fuentes de generación eólica, baterías, etapa de electrónica de potencia con el fin de desarrollar un estudio de estabilidad, el cual requiere datos de entrada que utilice perfiles de irradiancia y/o temperatura del PVP más preciso.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se implementó un modelo que permite el estudio de los flujos energéticos (gestión de energía) y/o dimensionado de los elementos constituyentes de una micro red. El modelo estudiado es representado por la etapa de generación de energía fotovoltaica, el sistema de control que fue implementado en un proyecto de grado realizado en paralelo³⁰, la etapa de la electrónica de potencia y el barraje DC fueron modelados mediante elementos ideales.

Para la etapa de generación fotovoltaica se identificaron tres modelos de PVP. Las ecuaciones matemáticas representativas de estos modelos PV fueron implementadas mediante bloques de Matlab/Simulink y posteriormente, los resultados de simulación fueron comparados directamente con las especificaciones de un módulo solar. Las especificaciones del panel fotovoltaico no brindan información suficiente para caracterizar el módulo PV utilizando circuitos eléctricos equivalentes, por lo tanto, se presenta un algoritmo de identificación de parámetros que permite determinar los valores de resistencia serie R_s , resistencia paralelo R_p y el factor de idealidad a para cada uno de los modelos PV considerados. Este conjunto de parámetros (R_s , R_p y a) fue analizado variando la temperatura y la irradiancia. Los modelos fotovoltaicos fueron comparados, presentando las ventajas y desventajas para determinar la mejor solución para simular paneles fotovoltaicos con el fin de aplicaciones de dimensionado y gestión de energía.

Los paneles fotovoltaicos pueden ser modelados con precisión con los tres modelos PV seleccionados, al menos para las condiciones mostradas en las especificaciones del fabricante. El modelo de un diodo considerando la resistencia serie parece ser

³⁰ DUARTE CARRASCAL, José Luis y VARGAS BERNAL, Erwin Alexander. Op. Cit.

el más adecuado en orden a obtener las curvas características I-V de módulos solares, debido a que es el modelo más simple para identificar sus parámetros (R_s y a), el único donde los parámetros no son dependientes de la temperatura, y la ventaja más importante es que la dependencia de los parámetros con la entrada G puede ser modelada con funciones monótonas. Las relaciones de a Vs G y R_s Vs G se modelan mediante una función lineal y potencial respectivamente, ambos casos presentan resultados precisos y similares para obtener las curvas I-V, por lo tanto, se selecciona la relación de a Vs G . El modelo R_s fue validado con las especificaciones de dos tipos diferentes de paneles fotovoltaicos. Los resultados muestran que el modelo PV seleccionado puede simular con precisión la curva característica I-V para ambos paneles fotovoltaicos.

Se implementó un modelo para simulación en Matlab/Simulink del sistema de generación de energía fotovoltaica con el modelo PV seleccionado y utilizando el formalismo de representación energética macroscópica (REM). El sistema fotovoltaico fue validado para tres casos de irradiancia, el primer caso consiste en simular la irradiancia mediante una función escalón, el segundo caso corresponde a una señal de pulsos con periodo de veinte segundos y finalmente una función gaussiana. La respuesta de potencia de salida en la etapa de PVP fue validada con las especificaciones del fabricante para los tres casos.

Este trabajo contribuye con el modelado de la fuente de generación de energía fotovoltaica para el modelo de simulación del laboratorio de integración energética y micro redes, que el grupo GISEL de la E³T planea construir. Se recomienda que los próximos aportes a este proyecto, incluyan el modelado en Matlab/Simulink de fuentes de generación eólica, baterías, convertidores, inversores y topologías de electrónica de potencia para estudios de estabilidad, así mismo se sugiere que los datos de entrada para este tipo de estudio presenten un perfil de irradiancia y temperatura del PVP más preciso.

BIBLIOGRAFIA

CARRERO, C.; AMADOR J., and ARNALTES, S. A single procedure for helping PV designers to select silicon PV modules and evaluate the loss resistances. *Renewable Energy*. [Online] December, 2007. Vol. 32 N° 15. [Cited 4 July 2015] pp. 2579-2589. Available from ELSEVIER –SCIENCE DIRECT [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

CHEN, Keyu; BOUSCAYROL, Alain and LHOMME, Walter. Energetic Macroscopic Representation and Inversion-based control: Application to an Electric Vehicle with an electrical differential. *Journal of Asian Electric Vehicles*. [Online] 2008. Vol. 6 N° 1 [Cited: 3 August 2015]. Available from Internet:
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaev/6/1/6_1_1097/_pdf

DUARTE CARRASCAL, José Luis y VARGAS BERNAL, Erwin Alexander. Modelado y simulación de un algoritmo de control de potencia de sistemas de generación fotovoltaicos basado en la técnica p&o-mppt (perturb and observe maximum power point tracking). Tesis de grado Ingeniero Electricista. Bucaramanga: Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2015.

GRADELLA, Marcelo. *Et al.* Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions On Power Electronics*. [online] Mayo 2009. Vol. 24 N° 5. [Cited: 19 February 2015]. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

ISHAQUE, Kashif; SALAM, Zainal and Taheri Hamed. Accurate MATLAB Simulink PV System Simulator Based on a Two-Diode Model. Journal of Power Electronics. [Online] 2011. Vol.11 No.2. [Cited: 15 June 2015] p.179-187. Available from Internet: <http://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/NODE01613149>

KHEZZAR, R; ZEREG, M. and KHEZZAR, A. Modeling improvement of the four parameter model for photovoltaic modules. Solar Energy. [Online] December 2014. Vol. 110. [Cited 12 Jan 2015] p. 452- 462. Available from ELSEVIER – SCIENCE DIRECT [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

MAO, Ta; YANG, Hongxing and LU, Lin. Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [online] 2014. Vol. 36. [Cited 17 June 2015]. Available from: Base de datos ELSEVIER-SCIENCE DIRECT. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

SALOUX, Etienne; TEYSSEDOU, Alberto y SORIN, Mikhail. Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point. Solar Energy. [Online] May, 2011. Vol. 85 N° 5. [Cited 14 August 2 2015] Available from ELSEVIER-SCIENCE DIRECT. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

SOLANO, Javier; HISSEL, Daniel; PERA, M.–C. Modeling and parameter identification of ultracapacitors for hybrid electrical vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). [Online] 15-18 October, 2013. [Cited: 21 July 2015] p. 1-4. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

ANEXOS

NOTA: LOS ANEXOS DE ESTA INVESTIGACIÓN PUEDEN SER CONSULTADOS EN LA BIBLIOTECA DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER – SALA BASE DE DATOS.