



Tesis de Maestría

**METODOLOGÍA PARA OPTIMIZAR EL SEGUIMIENTO
DEL MÁXIMO PUNTO DE POTENCIA DE LOS
GENERADORES FOTOVOLTAICOS USANDO TÉCNICAS
DE CONTROL MULTI-MODELO**

Por:

Andrés Felipe Tobón Mejía

Maestría en automatización y control industrial

Facultad de Ingenierías

Instituto Tecnológico Metropolitano

Medellín, Colombia

2015

**METODOLOGÍA PARA OPTIMIZAR EL
SEGUIMIENTO DEL MÁXIMO PUNTO DE
POTENCIA DE LOS GENERADORES
FOTOVOLTAICOS USANDO TÉCNICAS DE
CONTROL MULTI-MODELO**

Andrés Felipe Tobón Mejía

Tesis de grado para optar al título de:
Magister en automatización y control industrial

Director:

Ph.D. Jorge Aurelio Herrera Cuartas

Codirector:

Ph.D. Julián Peláez Restrepo

Línea de Investigación:

Electrónica, telecomunicaciones e informática

Grupo de Investigación:

Automática, electrónica y ciencias computacionales

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingenierías

Medellín, Colombia

2015

ÍNDICE GENERAL

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo	I
Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo	2
Índice general	I
ÍNDICE de figuras	V
Agradecimientos	VIII
Resumen	IX
Palabras clave:	X
Abstract	XI
Keywords:	XI
Introducción	1
Justificación	3
Descripción del problema	5
Síntesis del problema	5
Hipótesis	6
Mapa conceptual y estado del arte	6
Voltaje de circuito abierto y corriente en corto circuito	8
Cálculo numérico	8

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

Modelo de primer orden	8
Perturbar y observar (P&O).....	9
Red neuronal artificial (Artificial Neural Networks-ANN)	9
Búsqueda caótica	10
Control por lógica difusa (FLC)	11
Evolución diferencial (DE).....	11
Búsqueda directa	12
Optimización de enjambres de partículas (PSO).....	12
Colonia de hormigas (ACO, por sus siglas en inglés).....	13
Dos diodos.....	14
Off line	15
Enjambre de partículas (PSO)	15
Evaluación de ecuaciones explícitas.....	15
Evolución diferencial (DE).....	15
Algoritmos Genéticos (GA).....	15
Redes neuronales (ANN)	16
Objetivos	17
General.....	17
Específicos	17
Capítulo 1	18
Algoritmos MPPT	18
1.1. MPPT basado en algoritmo P&O	18

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

1.2	MPPT basado en optimización de enjambre de partículas (PSO)	20
Capítulo 2.....22		
2.1	Modelo de panel fotovoltaico de un diodo	22
2.2	Materiales y métodos.....	23
2.3	Algoritmo Pattern Search Method (PSM)	25
ALGORITMO 1: PATTERN SEARCH METHOD		27
ALGORITMO 2: MÉTODO PROPUESTO BASADO EN PATTERN SEARCH METHOD		28
2.4	Función de coste.....	28
2.5	Algoritmo Improved Pattern Search Method (IPSM).....	29
2.6	Estimación y respuesta de los parámetros propuestos basados en PSM e IPSM.....	30
2.6.1.1	Estimación de los parámetros PSM	30
2.6.1.2	Evolución de los parámetros con el algoritmo PSM	31
2.6.2.1	Estimación de parámetros del algoritmo IPSM.....	34
2.6.2.2	Evolución de los parámetros con el algoritmo IPSM	35
2.7	Comparación de resultados del algoritmo PSM e IPSM para calcular los parámetros del modelo del módulo fotovoltaico.	38
2.8	Metodología para la asignación de pesos del modelo matemático de un diodo de una celda fotovoltaica.....	41
Capítulo 3.....42		
3.1	Elementos empleados en la simulación del MPPT con PSIM®...43	

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

3.1.1	Bloques C Block	44
3.1.2	Simulador de celdas fotovoltaicas	45
3.1.3	Fuente de voltaje controlada	46
3.2	Simulación del algoritmo de optimización PSM en el MPPT actuando en una celda fotovoltaica.	46
3.2.1	Simulación del algoritmo de optimización P&O y PSO en el MPPT actuando en una celda fotovoltaica.	48
3.2.2	Resultado de la simulación del algoritmo de optimización PSO en el MPPT.	48
3.2.2	Resultados de la simulación del algoritmo de optimización P&O en el MPPT.....	49
3.3	Metodología para validar el algoritmo de optimización PSM para el MPPT.	49
Capítulo 4	.....	50
Conclusiones y futuras líneas de trabajo	.....	50
Futuras líneas de trabajo	.....	51
Anexos	.....	52
Algoritmo PSM para hallar los pesos del modelo matemático de una celda fotovoltaica en el software de Matlab®.....		52
Algoritmo IPSM para hallar los pesos del modelo matemático de una celda fotovoltaica en el software de Matlab®.....		54
Algoritmo de optimización para el MPPT en C en un bloque de C Block de PSIM®		60
Bibliografía	.....	65

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

Publicaciones que ha generado este trabajo.....74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa conceptual con las distintas corrientes de investigación actuales, presentes en el seguimiento del MPPT.6

Figura 2: Convertidor DC-DC de celdas fotovoltaicas.7

Figura 3: Mapa conceptual con las distintas corrientes de investigación actuales, presentes en la extracción de los parámetros del modelo matemático de una celda fotovoltaica.14

Figura 4: Diagrama de flujo del algoritmo P&O.19

Figura 5: Diagrama de flujo algoritmo (PSO).21

Figura 6: Circuito equivalente del modelo de una celda fotovoltaica.23

Figura 7: Montaje experimental del sistema de emulación de una celda fotovoltaica24

Figura 8: Respuesta típica de un emulador de celdas fotovoltaicas. Voltaje vs Potencia (a) y Voltaje vs Corriente (b).25

Figura 9: Evolución de parámetros R_p, R_s, n, I_0 y I_{pv} con el algoritmo PSM.32

.....32

Figura 10: Zoom del parámetro R_s con el algoritmo PSM.32

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

Figura 11: Zoom del parámetro n con el algoritmo PSM.....	33
Figura 12: Zoom del parámetro I_0 con el algoritmo PSM.....	33
Figura 13: Zoom del parámetro I_{pv} con el algoritmo PSM.....	34
Figura 14: Error absoluto obtenido de la comparación de los datos tomados del emulador de celdas fotovoltaicas vs los resultados de los parámetros acotados por el algoritmo PSM.	34
Figura 15: Evolución de los parámetros R_p, R_s, n, I_0 y I_{pv} iteración a iteración.	36
Figura 16: a) Parámetro R_p b) Parámetros R_s	36
Figura 17: a) Parámetro n b) Parámetro I_0	37
Figura 18: Parámetro I_{pv}	37
Figura 19: Error absoluto entre los datos del emulador y los datos extraídos del algoritmo IPSM.	38
Figura 20: Comparación Corriente vs Voltaje, entre los datos tomados del emulador de celdas fotovoltaicas vs los resultados de los parámetros acotados por el algoritmo PSM.	40
Figura 21: Resultados comparativos entre los datos tomados del emulador de celdas fotovoltaicas y los resultados obtenidos con el algoritmo IPSM.	40
Figura 22: Comparación Potencia vs Voltaje, entre los datos tomados del emulador de celdas fotovoltaicas vs los resultados de los parámetros acotados por el algoritmo PSM.	40
Figura 23: Resultados comparativos entre los datos tomados del emulador de celdas fotovoltaicas y los resultados obtenidos con el algoritmo IPSM.	40
Figura 24: Diagrama circuital de un simulador de panel fotovoltaico con su fuente de voltaje controlada y módulo de MPPT.....	43
Figura 25: Diagrama circuital del bloque “C Block” en PSIM® que permite introducir un programa personalizado en C.	44
Figura 26: Módulo de un simulador de celdas fotovoltaicas en PSIM®.....	45

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

Figura 27: Parámetros que se pueden manipular en el simulador de celdas fotovoltaicas	45
Figura 28: Diagrama circuital de una fuente de voltaje controlada	46
Figura 29: Perfil de extracción de potencia del MPPT y variación del voltaje de referencia con el algoritmo de optimización PSM.	47
Figura 30: Perfil de extracción de potencia del MPPT y variación del voltaje de referencia con el algoritmo de optimización PSO.....	48
Figura 31: Perfil de extracción de potencia del MPPT y variación del voltaje de referencia con el algoritmo de optimización P&O.....	49

AGRADECIMIENTOS

A Dios, familia, colegas y amigos.

Dedico el éxito y satisfacción de este trabajo de investigación a Dios quien me regala los dones de la sabiduría y el entendimiento, a mis padres quienes hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que no tenía más caminos, a mi hermana, maestros, amigos, compañeros de estudio, Diana Gómez quien me brindó su ayuda incondicional, a Aurelio Herrera asesor insistente y persona respetuosa, a Julián Peláez coasesor incondicional y al ITM que me ha dado todas las oportunidades en mano de la señora Rectora Luz Mariela Sorza, a todos, gracias por acompañarme en este trabajo tan laborioso, lleno de sacrificios y dificultades.

“Si una persona es perseverante, aunque sea dura de entendimiento, se hará inteligente; y aunque sea débil se transformará en fuerte.

La sabiduría es hija de la experiencia.”

Leonardo Da Vinci

RESUMEN

Este trabajo presenta el estudio del seguimiento del punto máximo de potencia de una celda fotovoltaica, utilizando algoritmos de optimización multi-modelo como Pattern Search Method (PSM, por sus siglas en inglés) para mejorar la eficiencia de la transformación de energía en una celda fotovoltaica.

La primera parte muestra el estado del arte de los diferentes algoritmos empleados para el seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) y algunos métodos para el cálculo de los parámetros del modelo matemático de un diodo del módulo fotovoltaico. En el capítulo 1 se describen los algoritmos de optimización para el MPPT: Perturbar y observar (P&O, por sus siglas en inglés), y Optimización de enjambre de partículas (PSO, por sus siglas en inglés), los algoritmos fueron simulados utilizando la herramienta PSIM®, software dedicado a la simulación de circuitos de potencia con módulos especializados en energías renovables.

En el capítulo 2 se toman los datos técnicos del datasheet del panel fotovoltaico MSX60 y se genera en un emulador de paneles solares una curva característica. A partir del algoritmo PSM se obtuvieron los parámetros del módulo del modelo matemático y se presenta una mejora sustancial con el nuevo algoritmo IPSM Improved Pattern Search Method (IPSM, por sus siglas en inglés). El modelo matemático depende de 5 variables: corriente generada por la celda fotovoltaica, resistencia en paralelo, resistencia en serie, factor de diodo y corriente de salida a las cuales se le asigna un peso para que el modelo matemático sea aproximado a la curva característica extraída del emulador de celdas fotovoltaicas. El software utilizado para simular el comportamiento del panel fotovoltaico mediante el modelo matemático fue MATLAB®. En el capítulo 3 se implementa el algoritmo de optimización PSM para el MPPT

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

usando el mismo modelo matemático con los pesos encontrados. Para lograr esto, se tomó el algoritmo, se introdujo en un bloque C Block y se implementó en el software PSIM®. Una vez se implementa el algoritmo de optimización PSM, se hace la comparación entre los algoritmos de optimización para el MPPT: P&O, PSO y PSM en donde se puede evidenciar su desempeño.

Palabras clave:

MPPT: El seguimiento de máximo punto de potencia.

PSM: Método de búsqueda de patrones.

FLC: Control lógico difuso.

PSO: Optimización de enjambre de partículas.

P&O: Perturbar y observar.

Sistemas fotovoltaicos

Electrónica de potencia

ABSTRACT

For computing the mathematical model parameters of a diode in a photovoltaic module. In chapter 1, optimization algorithm for the MPPT such as perturb and observe algorithm (P&O) and particle swarm optimization (PSO) are described. The algorithm were simulated using PSIM®, software used to simulate power circuits with specialized module in renewable energy. Chapter 2 describes the use of technical data from the photovoltaic panel MSX60 datasheet to generate an emulator of characteristic curves of solar panels. Using PSM, the parameters of the mathematical models are estimated, and an improved algorithm, named as IPSM – Improved Pattern Search Methods, is presented. The mathematical model has five variables: generated current by the photovoltaic cell, parallel resistor, series resistor, factor of diode, and output current; a weight is assigned to each variable to approximate the mathematical model to the characteristic curve obtained from the emulator of photovoltaic cells. MATLAB was employed to simulate the behavior of the photovoltaic panel using the mathematical model. In the Chapter 3, it is described the implementation of the optimization algorithm PSM for MPPT using the mathematical model and proposed weights. For this, a C Block implemented in PSIM® is introduced. A comparison between the optimization algorithms for MPPT: P&O, PSO and PSM is presented to evaluate the performance.

Keywords:

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

PSM: Pattern Search Method.

FLC: Fuzzy Logic Control.

PSO: Particle Swarm Optimization.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

P&O: Perturb and Observe.

Photovoltaic systems

Power electronics

INTRODUCCIÓN

La energía del sol, es una fuente de energía alternativa propicia para las regiones tropicales. A pesar de los avances tecnológicos en la transformación de energía para este medio, el desarrollo de sistemas fotovoltaicos se ha visto limitado por diversos factores como: la dependencia de condiciones ambientales como temperatura ambiente e intensidad de irradiación, que afectan la potencia de salida de las celdas solares o fotovoltaicas, haciendo que tenga baja eficiencia (Farivar, G M, 2012)(Moradi & Reisi, 2011) y el alto costo de adquisición (Bhatnagar & Nema, 2013)(Farivar, G M, 2012)(Moradi & Reisi, 2011). Es necesario suplir la creciente demanda de energía limpia obtenida a partir de las celdas solares, desarrollando tecnologías de producción más eficientes, asequibles y que permitan maximizar la transformación de energía en las diferentes condiciones ambientales.

Una forma de mejorar la transformación de energía es a partir de algoritmos de optimización, algunos de ellos son: PSO (Ishaque, Salam, Amjad, & Mekhilef, 2012), evolución diferencial (DE, por sus siglas en inglés) (Jiang, Maskell, & Patra, 2013b) y algoritmos genéticos (GA, por sus siglas en inglés) (Zagrouba, Sellami, Bouaïcha, & Ksouri, 2010a), mejorando la eficiencia de la transformación energética de dichas celdas.

Se presenta una nueva metodología para hallar el modelo de una celda fotovoltaica usando los algoritmos PSM e IPSM. También se elabora el control del MPPT usando el algoritmo de optimización PSM para optimizar la transformación de energía de las celdas fotovoltaicas. Como resultado se presentan dos modelos de la misma celda fotovoltaica bajo las mismas condiciones, muy similares al modelo obtenido de un emulador de celdas

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

fotovoltaicas. De igual manera se hace el control del MPPT con el algoritmo de optimización PSM y se validan los resultados con los algoritmos PSO y P&O.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

Justificación

Actualmente en el mundo, existe una creciente demanda energética que viene siendo suplida a través de diferentes medios de transformación de electricidad, como combustibles fósiles y energía nuclear, que ponen en riesgo la salud humana y amenazan la estabilidad climática del planeta. Se está intentando reemplazar estas fuentes de transformación de energía, por fuentes alternativas más amigables con el medio ambiente y menos riesgosas para el hombre, permitiendo así generar diversidad en los modos de transformación energética y disminuir su dependencia de recursos no renovables (Iowa et al., 2015). En el caso particular de Colombia, se ha reportado en el 2013 un consumo de mil Petajoules por año, de los cuales el 67% son atribuidos a fuentes de energía fósiles (Carbón, hidrocarburos y sus derivados), el 13% a biomasas y un 20% a energía eléctrica. El país presenta un incremento en la demanda energética del 3.5% anual (R. de C. M. de M. y Energía, 2013) que ha impulsado el desarrollo de investigaciones enfocadas en el descubrimiento de nuevas fuentes de energía y en métodos para incrementar la eficiencia de las ya existentes (Bhatnagar & Nema, 2013). En las investigaciones y estudios realizados, se ha mostrado especial interés en la energía eólica y fotovoltaica, como fuentes confiables de transformación de energía renovable, por considerarse libres de contaminación (Bhatnagar & Nema, 2013)(Farivar, G M, 2012). En el caso particular de los sistemas de generación basados en energía solar, se presenta una gran acogida gracias a su funcionamiento silencioso, de larga duración y a sus costos de funcionamiento y mantenimiento reducidos, principalmente por tener al sol como fuente de energía inagotable para su operación (Bhatnagar & Nema, 2013).

Como forma de incentivar el desarrollo de métodos de generación energética no convencionales en Colombia, el ministerio de minas y energía creó la

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

resolución 18-919 del 2010, donde se adopta el plan de acción indicativo 2010-2015 para desarrollar el PROURE (programa de uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales), que fomenta abiertamente las actividades de investigación, desarrollo e innovación en el área de las energías no convencionales como: fotovoltaica y eólica, entre otras. En el PROURE se establecen estas actividades como puntos clave para lograr que en el 2020 la participación de fuentes no convencionales de energía llegue a ser del 6.5%, en el sistema interconectado, y 30% en las zonas no interconectadas (M. de minas y Energía, 2010). Sumado a esta iniciativa, las directrices gubernamentales convirtieron al país en un integrante de la agencia internacional de energías renovables, conformada actualmente por cincuenta países, con el fin de evitar que se mantuviera ajeno a los nuevos retos y tendencias a los que se enfrenta el mundo en materia de energía eléctrica en la actualidad. Mediante el ingreso a esta agencia, Colombia ratificó su posición como país gestor de desarrollo de tecnologías de producción limpias y amigables con el ambiente (República, 2013).

A pesar del auge actual de los métodos de generación de energía no convencionales, y de los distintos estudios e investigaciones que se han venido realizando sobre ellos, el desarrollo de sistemas alternativos de generación energética se ha visto limitado por diversos factores. En el caso particular de los sistemas fotovoltaicos, el coste de adquisición es alto (Bhatnagar & Nema, 2013)(Farivar, G M, 2012)(Moradi & Reisi, 2011), su eficiencia de conversión es baja, a pesar de los múltiples avances tecnológicos existentes, además son dependientes de las condiciones ambientales (temperatura ambiente e intensidad de la radiación) (Farivar, G M, 2012)(Moradi & Reisi, 2011). Por lo anterior, el diseño de sistemas que permitan la optimización del MPPT es de vital importancia, debido a que contribuye con el desarrollo de tecnologías de producción energética eficientes, que sean asequibles para el país y que

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

permitan contribuir al suministro de electricidad exigido por la creciente demanda de energía.

Descripción del problema

Uno de los requerimientos para obtener un desempeño adecuado del sistema, es la implementación de un buen MPPT, el cual debe ser eficiente sin importar las diferentes condiciones ambientales, principalmente radiación solar, sombreado y temperatura, que son variables en el tiempo, afectando directamente la extracción de energía de las celdas fotovoltaicas. El MPPT se puede traducir en un problema de optimización, que se puede resolver mediante diferentes técnicas de cálculo computacional, sin embargo, ante cambios climáticos extremos, todos los métodos que se han desarrollado presentan falencias. Sumado a esto, se pueden encontrar dentro de los modelos expuestos métodos aún no implementados, de los que se desconoce su desempeño real en una implementación física como colonia de hormigas y evolución diferencial.

Síntesis del problema

Dentro de la presente investigación, se darán solución a dos problemas críticos del control multi-modelo relacionados con la selección y cambio entre modelos durante la toma de decisiones del controlador: el tiempo invertido en la selección y cambio de un modelo a otro y la calidad de la selección hecha. Basados en estos dos problemas principales, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Mejorará el rendimiento de la extracción de energía en una celda fotovoltaica con un control multi-modelo basado en búsqueda de patrones?

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

Hipótesis

Usando técnicas de control multi-modelo basado en búsqueda de patrones se mejorará el rendimiento en la extracción de energía en una celda fotovoltaica con respecto a la misma celda, utilizando controladores convencionales.

Mapa conceptual y estado del arte

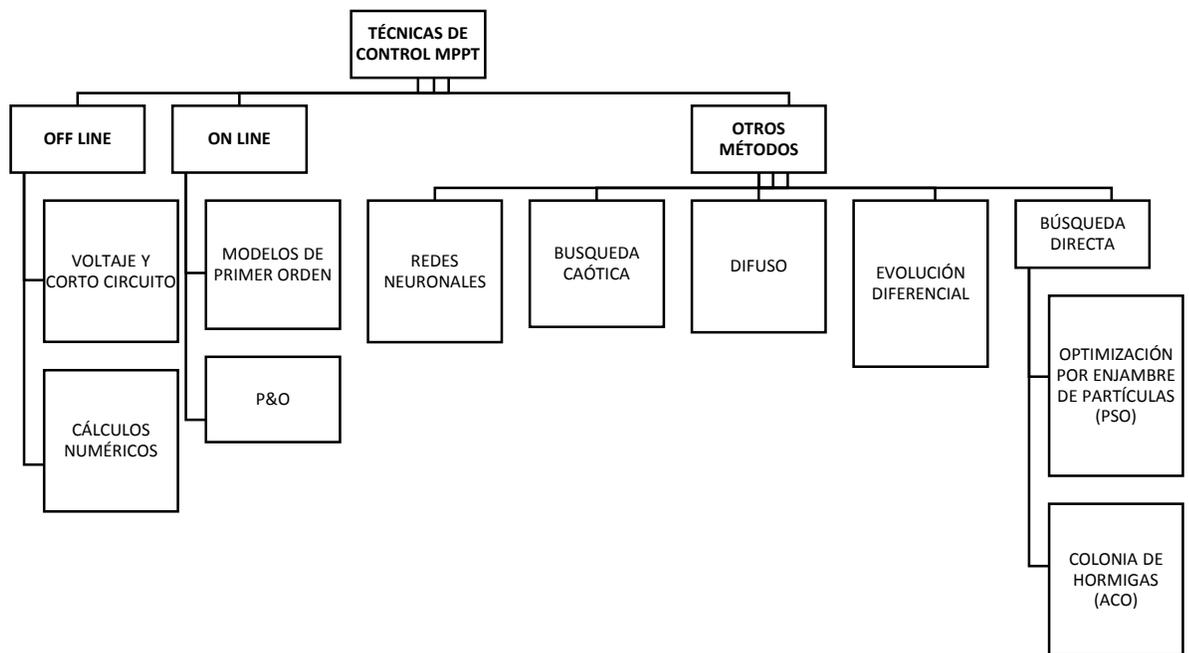


Figura 1: Mapa conceptual con las distintas corrientes de investigación actuales, presentes en el seguimiento del MPPT.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

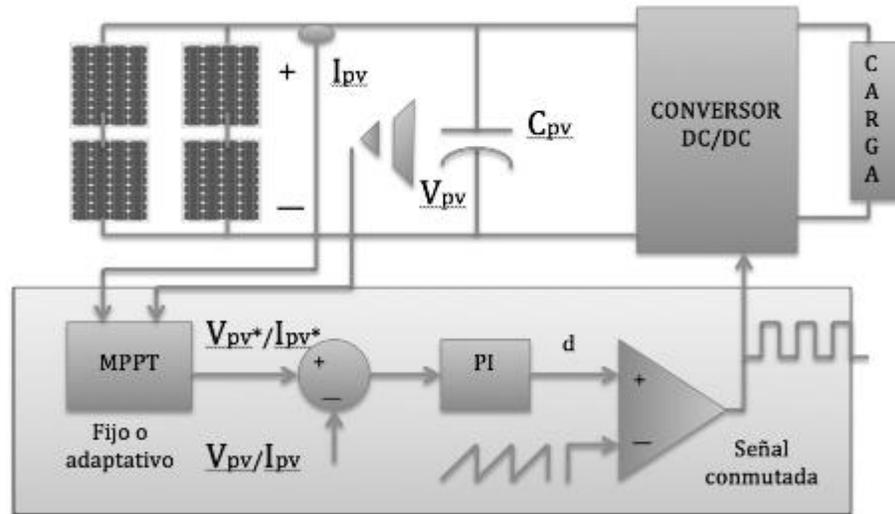


Figura 2: Convertidor DC-DC de celdas fotovoltaicas.

El control de MPPT, consiste en realizar un seguimiento con el fin de extraer la máxima potencia de un generador fotovoltaico ante cualquier condición ambiental (radiación solar, sombreado parcial o temperatura). Esto se obtiene haciendo coincidir el MPPT con el correspondiente voltaje y corriente de operación del convertidor, ver Figura 2. Existen actualmente distintas vertientes en la investigación de control de MPPT que pueden dividirse principalmente en técnicas off-line, on-line y otros métodos, Figura 1. Las técnicas de control off-line, utilizan por lo general el voltaje de circuito abierto y la corriente de cortocircuito del panel solar como parámetros iniciales, así como los parámetros ambientales tales como temperatura e intensidad de radiación solar para determinar la señal de control necesaria para impulsar la célula solar a su MPP (Moradi & Reisi, 2011). Dentro de este tipo de técnicas, se pueden mencionar como más relevantes las siguientes:

Voltaje de circuito abierto y corriente en corto circuito

Dos enfoques simples y prácticos del MPPT, son los basados en el voltaje y la corriente de circuito abierto (VMPPT y CMPPT). El VMPPT y CMPPT se basan en el hecho de que el voltaje y la corriente del sistema correspondientes al MPPT son factores constantes del voltaje en el circuito abierto y las corrientes del cortocircuito respectivamente. Existen dos problemas principales con la aplicación práctica de VMPPT y CMPPT: el efecto de la temperatura en el sistema y las consecuencias del sombreado parcial que deterioran el rendimiento de la extracción de energía de los paneles solares (Masoum & Member, 2008) .

Cálculo numérico

En (Hu, Zhang, & Wu, 2009a) se muestra que la potencia máxima de los sistemas fotovoltaicos se puede rastrear rápida y eficientemente mediante el uso del método de cálculo numérico, sugiriendo que puede mejorar la disponibilidad de energía de las células solares fotovoltaicas. Este sistema trabaja bajo unos parámetros ya establecidos lo que dificulta el proceso bajo perturbaciones reales (Papaioannou & Purvins, 2012).

Los métodos on-line se caracterizan por hacer uso de la variable instantánea (voltaje y corriente) para generar señales de control. A diferencia de los métodos off-line, la señal de control no es constante e incluso bajo condiciones de estado estacionario la salida oscila en torno al valor óptimo (Moradi & Reisi, 2011).

Algunas de las técnicas off-line más relevantes incluyen:

Modelo de primer orden

El modelo de primer orden, explota solamente los parámetros disponibles; se debe hacer una toma de datos para luego obtener el modelo. Como ventajas,

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

no necesita ninguna instalación ni aproximación para modelar, su sencillez simplifica en gran medida su aplicación, reduciendo considerablemente el tiempo de ejecución del programa. Como desventajas, cuando los parámetros no son constantes como la sombra y la intensidad de luz solar hay que modelar de nuevo, lo cual obliga a precisar su variación en intervalos más amplios variando así las condiciones de trabajo (Amrouche, Guessoum, & Belhamel, 2012).

Perturbar y observar (P&O)

Es un método iterativo del MPPT, donde el algoritmo P&O es uno de los más adoptados entre los algoritmos de optimización para el MPPT y uno de los más comerciales (Mamarelis, Petrone, & Spagnuolo, 2014); consiste en seguir el estado estacionario (Hu, Zhang, & Wu, 2009b). Implica la perturbación en el voltaje del terminal del generador fotovoltaico periódicamente y a continuación, se compara la potencia de salida fotovoltaica con la de la potencia en el ciclo anterior de perturbación (Sayal, 2012). Este enfoque presenta problemas de las oscilaciones alrededor del MPP (Q. Zhang et al., 2014), debido a que se genera una pérdida considerable del MPP (Bianconi et al., 2013). También la respuesta del algoritmo P&O es lenta y puede tener errores de cálculo bajo condiciones de cambios rápidos en el medio ambiente (J. Zhang & Guo, 2009)(Tang, Xul, Zengl, Member, & Member, 2012).

Además de las técnicas on-line y off-line, se tienen los siguientes métodos para el control del MPPT:

Red neuronal artificial (Artificial Neural Networks-ANN)

Una ANN es una interconexión de neuronas artificiales que emulan el funcionamiento de un cerebro. La habilidad de una ANN para seguir el MPPT depende del entrenamiento que tenga la ANN y en el MPPT se mide la tensión

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

a partir de las curvas en diferentes condiciones (Chekired, Mellit, Kalogirou, & Larbes, 2014). Generalmente, las ANN deben ser entrenadas por meses e incluso años para obtener una respuesta óptima del MPPT ante diferentes condiciones ambientales. Es de aclarar, que una vez que una ANN es debidamente entrenada y diseñada para un arreglo fotovoltaico específico, esta no funcionará correctamente en otro arreglo. A modo de ejemplo, una ANN se ha utilizado como optimizador de una MPPT tradicional, basado en P&O (Alabedin, El-Saadany, & Salama, 2011) (Lin, Hong, & Chen, 2011) (Jiang, Nayanisiri, Maskell, & Vilathgamuwa, 2013) con el fin de mejorar la eficiencia. Por lo general, la combinación de varias técnicas resultan en mejoras del desempeño (Jie & Ziran, 2011).

Búsqueda caótica

Caos es definido matemáticamente como un sistema altamente sensible a las condiciones iniciales, que a pesar de ser determinista introduce algunos comportamientos impredecibles. Esta característica puede ser explotada para buscar el punto óptimo de un sistema dinámico tal como un MPPT. Para que se pueda realizar una búsqueda caótica se necesita una variable de optimización y una función de coste. Para el caso de un MPPT, el voltaje fotovoltaico y la potencia son seleccionadas como la variable de optimización y la función de coste, respectivamente. Usando dos operadores la búsqueda caótica mejora la eficiencia, precisión y robustez del sistema. Adicionalmente, hace que el control se simplifique notoriamente (Zhou, Chen, Guo, & Jia, 2011). Adicionalmente, la búsqueda usando dos parámetros garantiza el seguimiento de múltiples puntos, siendo útil para problemas de sombreado parcial. Más aún, no se garantiza que el MPPT bajo cualquier condición

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

ambiental “parcial”, sea la más optimizada (Conditions, Koutroulis, & Blaabjerg, 2012).

Control por lógica difusa (FLC)

Basado en el conocimiento de expertos el FLC proporciona un enfoque sistemático para crear un algoritmo de control automático mediante la exploración de variables lingüísticas, las variables difusas pueden asumir cualquier valor entre 0 y 1. Dado que no se requiere un modelo matemático exacto estos controladores son útiles cuando se trabaja con entradas imprecisas. Esto es una ventaja significativa ya que la presencia de incertidumbres debido a cantidades físicas no modeladas, no linealidades y cambios impredecibles en el punto de operación, se pueden manejar de forma correcta con FLC (Alajmi, Ahmed, Finney, & Williams, 2011) (Besheer & Adl, 2012)(Arulmurugan & Suthanthira Vanitha, 2013).

Se demostró que en los cambios ambientales en el seguimiento del MPP aplicados al desempeño del FLC mejora su eficiencia significativamente (Farivar, G M, 2012). Trabajos donde se haga frente al sombreado parcial usando FLC no han sido reportados. Para superar este inconveniente, el FLC se combina con otros controladores, por ejemplo P&O (Chin, Neelakantan, Yoong, Yang, & Teo, 2011) y FLC adaptativo (Gao, Dougal, & Member, 2009) y con controles PID (Mahammad, Saon, & Chee, 2013).

Evolución diferencial (DE)

H. Taheri, Salam, & Ishaque, (2010) proponen un algoritmo del MPPT basado en (DE, por sus siglas en inglés); se optimiza el problema mediante el mantenimiento y la creación de una población de soluciones candidatas que exhibe el mejor ajuste, se basa en la generación de población aleatoria, se

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

hace un modelo y se simula en Matlab® (S. Taheri, Taheri, Salam, Ishaque, & Hemmatjou, 2012) (Ishaque, Salam, Taheri, & Shamsudin, 2011). Entre sus bondades, es capaz de seguir el MPPT bajo condiciones de sombra parcial, pero este sistema no se ha implementado (Ishaque & Salam, 2013).

Búsqueda directa

La búsqueda directa, consiste en tomar tres muestras de las cuales el algoritmo evalúa y escoge una. Paso seguido esta muestra se convierte entonces en una nueva de tres muestras, que el algoritmo evalúa nuevamente y así sucesivamente. La principal ventaja es que el sistema requiere de solo dos muestras por ciclo (T. L. Nguyen, Low, & Member, 2010). Este método es particularmente importante para un sistema que tiende a estar sombreado parcialmente, adicionalmente trabaja bien en condiciones cambiantes y puede ser implementado fácilmente por medio de micro-controladores (T. L. Nguyen et al., 2010). Sin embargo, no garantiza que en todas las condiciones de sombra parcial sea igual de efectivo (Conditions et al., 2012)(Xiao, Elnosh, Khadkikar, & Zeineldin, 2011).

Optimización de enjambres de partículas (PSO)

Este sistema está basado en el comportamiento de persecución de enjambres para aumentar el rendimiento del MPPT. Cada módulo fotovoltaico es visto como una partícula y como resultado el MPPT es considerado como el objetivo móvil. Así cada módulo fotovoltaico puede perseguir el MPPT. El sistema muestra un rendimiento mejorado del 12,9 % comparado con los sistemas convencionales como P&O, adicionalmente es flexible y robusto (Chen, Tsai, Lin, Lai, & Member, 2010). Sin embargo, es un método que cuya precisión de seguimiento está determinado por la exactitud de los modelos y las

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

condiciones externas, por lo tanto debe cumplir con modelos precisos y sensores de alta precisión (Fu & Tong, 2012) (Ishaque & Salam, 2011) (Ishaque, Salam, Amjad, et al., 2012), adicionalmente cuando hay fuertes cambios en el sistema puede no responder siempre de la misma forma (K, S, & T, 2013).

Colonia de hormigas (ACO, por sus siglas en inglés)

La optimización basada en colonia de hormigas se obtiene usando el tiempo de establecimiento y el error de estado estacionario. Se basa en el comportamiento de las hormigas que buscan un camino entre sus colonias y una fuente de alimentación. Como ventaja logra una respuesta óptima del MPPT, incluso bajo variaciones extremas de los niveles de irradiación (Besheer & Adl, 2012), otra ventaja que presenta este enfoque es la capacidad del algoritmo para funcionar continuamente mientras se adapta a los cambios en tiempo real (Salam, Ahmed, & Merugu, 2013a) (Adly, 2011) (Jiang, Maskell, & Patra, 2013a). Este sistema aún no ha sido implementado, sin embargo se propone implementarlo en micro-controladores (Besheer & Adl, 2012).

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

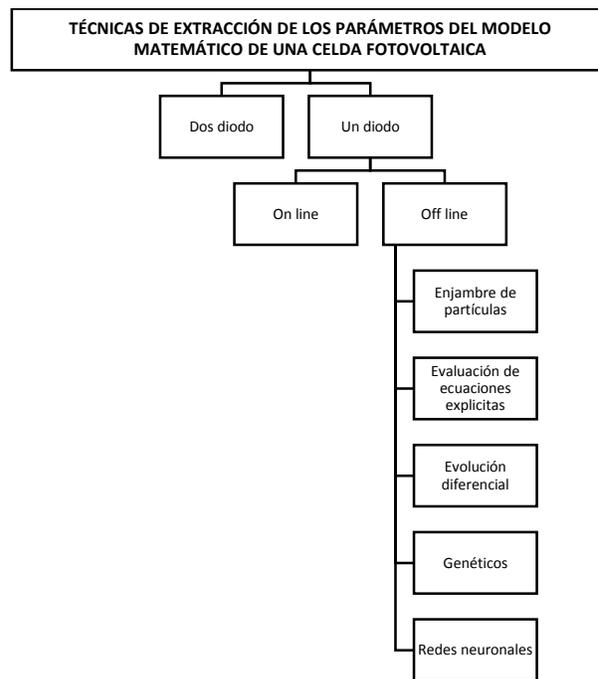


Figura 3: Mapa conceptual con las distintas corrientes de investigación actuales, presentes en la extracción de los parámetros del modelo matemático de una celda fotovoltaica.

Dos diodos

En la actualidad hay diversos artículos planteando la extracción de los parámetros del modelo matemático de una celda fotovoltaica con dos diodos, aunque el método puede ser confiable, resulta con un gasto computacional bastante alto, ya que hay que encontrar 7 variables a diferencia del modelo con un diodo que hay que encontrar 5 variables, algunos ejemplos son los siguientes: (Ishaque, Salam, Taheri, & Syafaruddin, 2011), (Kish, Lee, & Lehn, 2012) y (Ishaque, Salam, & Taheri, 2011).

Off line

Enjambre de partículas (PSO)

El enjambre de partículas basado en la persecución de un punto a partir de diferentes partículas que hacen una búsqueda sistemática en toda el área de trabajo. Presenta buenos resultados en la búsqueda de los parámetros del modelo de una celda fotovoltaica de un diodo, con un error hasta del 0.02% (Soon, Low, & Member, 2012).

Evaluación de ecuaciones explícitas

Basado en la función de Lambert W , es el cálculo de las ecuaciones no lineales del modelo matemático del panel fotovoltaico. Se utiliza para encontrar los parámetros del modelo de un diodo de una celda fotovoltaica (Batzelis, Routsolias, & Papathanassiou, 2014)(Accarino, Petrone, Ramos-Paja, & Spagnuolo, 2013).

Evolución diferencial (DE)

En (Ishaque, Salam, Mekhilef, & Shamsudin, 2012) proponen el algoritmo DE para encontrar los parámetros del modelo matemático de la celda fotovoltaica de un diodo. Se inicializa con una población la cual muta mientras se hacen encuestas hasta encontrar el mínimo o máximo según sea el caso. El sistema funciona pero tiene un gasto computacional alto, por lo que en (Jiang, Maskell, & Patra, 2013c) proponen un sistema automático que permita encontrar los parámetros al hacer una mejora en el algoritmo DE con un algoritmo mejorado y adaptativo (IADE) alcanzando el gasto computacional sea menor.

Algoritmos Genéticos (GA)

Los algoritmos genéticos consisten en introducir cambios en algunos genes (parámetros) de un cromosoma en una población. Las mutaciones aleatorias

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

alteran un pequeño porcentaje de la población excepto para los mejores cromosomas. Algunos ejemplos (Zagrouba, Sellami, Bouaïcha, & Ksouri, 2010b)(Bastidas-Rodriguez, J.D. Petrone, G. Ramos, C.A. Spagnuolo, 2014) para encontrar los parámetros del modelo matemático de un diodo de una celda fotovoltaica. Tienen como ventaja que el sistema no se queda en mínimo locales haciendo del sistema más preciso.

Redes neuronales (ANN)

Las redes neuronales funcionan entrenando el sistema en el tiempo, esto quiere decir que a medida que pasa el tiempo, el sistema va a responder mejor, en (D. D. Nguyen & Lehman, 2009) adaptan las redes neuronales a la búsqueda de los parámetros del modelo matemático de una celda fotovoltaica de un diodo logrando buenos resultados. El gasto computacional es alto mientras la red es entrenada.

OBJETIVOS

General

Proponer una metodología de optimización basada en control multi-modelo y técnicas de reconocimiento de patrones, aplicada al seguimiento del MPPT en una celda fotovoltaica.

Específicos

- Proponer una función de coste que permita valorar la selección del modelo de extracción de energía, realizada por el algoritmo de reconocimiento de patrones.
- Proponer una metodología de asignación de pesos a las variables de la función de coste propuesta, de acuerdo a las condiciones de operación del panel.
- Proponer una metodología de validación experimental del esquema de control propuesto para verificar la eficiencia de desempeño.

CAPÍTULO 1

Algoritmos MPPT

Las celdas fotovoltaicas presentan en su respuesta de potencia (W) una curva característica Figura 8, determinando según el cambio de voltaje la potencia entregada por el panel fotovoltaico.

El MPP varía constantemente dependiendo de cambios ambientales en el tiempo como: temperatura, sombras e intemperie en general. Para optimizar la extracción de energía de las celdas fotovoltaicas, se utilizan algoritmos de optimización que sigan el MPP. Dichos algoritmos son diseñados para entregar un valor de referencia a un controlador diseñado para regular el convertidor al MPP de la celda fotovoltaica y mitigar perturbaciones existentes en el sistema. Estos controladores pueden ser diseñados a partir de técnicas de control lineales como: PI, PID, adelanto atraso (Trejos, Gonzalez, & Ramos-Paja, 2012) o técnicas de control avanzadas como: modos deslizantes, control predictivo, etc. (Gonzalez, Carrejo, & Ci, 2013) (Gonzalez Montoya, Ramos, & Giral, 2015).

En el presente capítulo se hace la descripción del funcionamiento de algunos algoritmos de optimización dedicados al MPPT: P&O y PSO.

1.1. MPPT basado en algoritmo P&O

El algoritmo P&O ha sido expuesto en numerosos artículos, (Kang et al., 2011; Liu et al., 2014) se expone el algoritmo P&O implementado, su diagrama de flujo se ve en la Figura 4. Este algoritmo opera perturbando (incrementando o decrementando) el voltaje de salida del panel fotovoltaico. Si el punto de operación del voltaje cambia y la potencia generada se incrementa ($\frac{dP}{dv_{cell}} > 0$), el sistema continúa moviendo el punto de operación en esa dirección, pero si

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

la potencia generada no se incrementa el punto de operación se mueve en la dirección contraria.

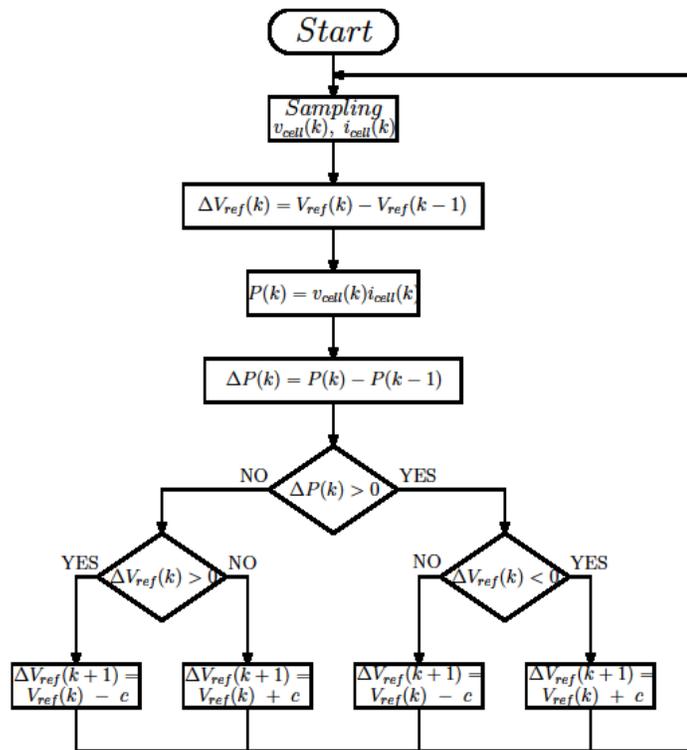


Figura 4: Diagrama de flujo del algoritmo P&O.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

1.2 MPPT basado en optimización de enjambre de partículas (PSO)

La optimización basada en enjambre de partículas PSO (Salam, Ahmed, & Merugu, 2013b; Soon et al., 2012), es un método de búsqueda con una población que toma valores estocásticos, el cual está inspirado en el comportamiento de las bandadas de aves.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

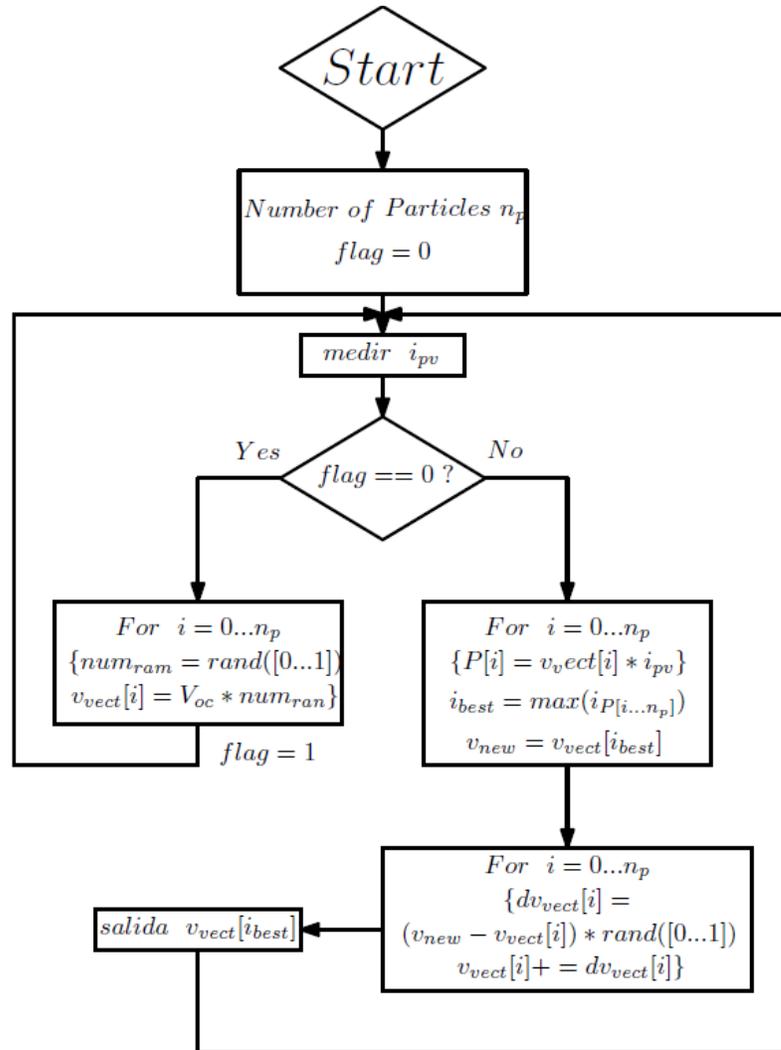


Figura 5: Diagrama de flujo algoritmo (PSO).

Donde cada partícula representa una solución candidata. La posición de cada partícula es influenciada por la partícula que esté en mejor posición, en el caso de un MPPT el valor de voltaje de referencia que genere la mayor extracción de potencia. El algoritmo aplicado a la extracción de potencia de un panel fotovoltaico es descrito en la Figura 5.

CAPÍTULO 2

En este capítulo se propone dos nuevos métodos para la estimación de los pesos del modelo matemático de una celda fotovoltaica de un solo diodo. El trabajo está basado en el algoritmo de optimización llamado Pattern Search Method (PSM) e improved Pattern Search Method (IPSM). Los parámetros estimados son: corriente de diodo (I_0), corriente de saturación (I_{pv}), resistencia en serie (R_s), resistencia en paralelo (R_p), y el factor del diodo ideal (n). Los resultados muestran que es posible obtener el modelo matemático equivalente a una celda fotovoltaica específica encontrando la asignación de pesos de los parámetros, los resultados son validados con datos obtenidos mediante un emulador de celdas fotovoltaicas. Para realizar los experimentos se asumió condiciones controladas, es decir, temperatura e irradiación constantes. Es importante decir que el modelo matemático debe de ser lo más preciso posible para poder validar el MPPT con un algoritmo de optimización.

2.1 Modelo de panel fotovoltaico de un diodo

Una celda fotovoltaica se puede modelar como un diodo semiconductor cuya unión p-n se expone a la luz. Las celdas fotovoltaicas están hechas de varios tipos de semiconductores como: celdas de silicio mono y poli cristalinas, siendo éstas últimas más económicas. Las celdas de silicio fotovoltaicas se componen de una fina capa de silicio que se conecta a las terminales eléctricas (Villalva, Gazoli, & Filho, 2009).

En la Ecuación 2 se presenta el modelo matemático de una celda fotovoltaica de un diodo propuesto por (Jiang, Maskell, et al., 2013b):

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

$$I = I_{pv} - I_o \left[\exp\left(\frac{V + I * R_s}{n * V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + I * R_s}{R_p} \quad (1)$$

Donde I es la corriente de salida, V es el voltaje de salida, I_{pv} es la corriente generada por la celda fotovoltaica, R_s y R_p son las resistencias en serie y en paralelo respectivamente, V_t es la tensión térmica del diodo ($V_t = k * T/q$), k , es la constante de Boltzmann ($k = 1.3806503 \times 10^{-23} \text{J/K}$), q es la carga del electrodo, T es la temperatura de la celda fotovoltaica en grados Kelvin, y n es el factor del diodo ideal.

El circuito de la Figura 6 se puede utilizar como circuito de un diodo equivalente a una celda fotovoltaica, sin embargo, es solo un modelo simplificado y no representa todas las dinámicas presentes en la celda.

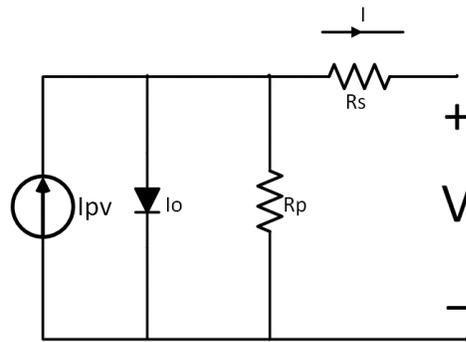


Figura 6: Circuito equivalente del modelo de una celda fotovoltaica.

2.2 Materiales y métodos

En la Figura 7 se muestra el hardware empleado para realizar las emulaciones del panel solar, que consta de: emulador de celdas fotovoltaicas 62000H series Chroma, carga eléctrica DC, BK Precision 8502 de 300 W, computador con procesador Core I5, 4 Gb de memoria RAM y un sistema operativo Windows 7.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

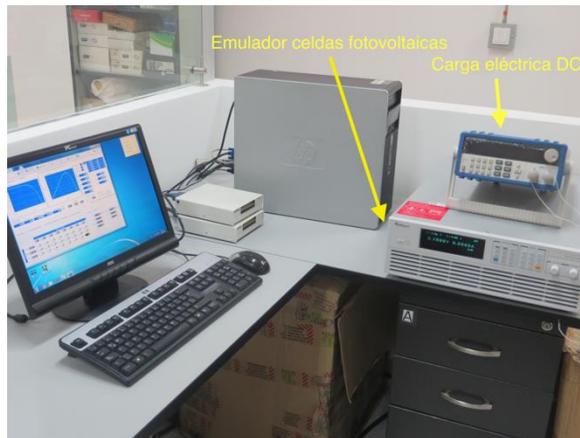


Figura 7: Montaje experimental del sistema de emulación de una celda fotovoltaica

El emulador de celdas fotovoltaicas permite hacer pruebas controladas bajo condiciones de laboratorio, emulando la iluminación aproximada de la luz solar natural. De esta manera el emulador es capaz de hacer los ajustes del hardware desde el software, mostrar en pantalla vistas previas y permite exportar los resultados en hojas de cálculo para su respectivo estudio.

En la Figura 8, se presenta una respuesta típica del emulador. En este caso se configura la temperatura de la celda $T = 25^{\circ}C$ y la irradiación solar $G = 1000 W/m^2$.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

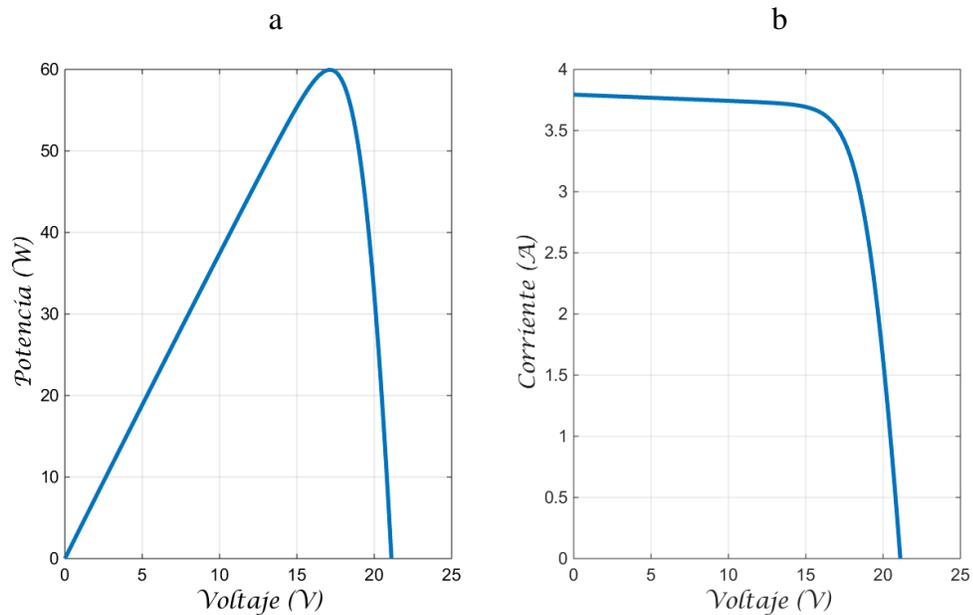


Figura 8: Respuesta típica de un emulador de celdas fotovoltaicas. Voltaje vs Potencia (a) y Voltaje vs Corriente (b).

Los algoritmos utilizados en el método propuesto para estimar los parámetros del modelo de una celda fotovoltaica de un diodo, fueron: Pattern Search Method (PSM) e Improved Pattern Search Method (IPSM). El algoritmo PSM presentó resultados aceptables, sin embargo al desarrollar el nuevo método IPSM los resultados fueron más que satisfactorios por lo que se presentan ambos procesos y resultados.

2.3 Algoritmo Pattern Search Method (PSM)

El PSM está conformado por dos partes fundamentales, una secuencia de mallas y una lista de las condiciones de encuesta. Una malla es una matriz donde la búsqueda de una iteración está restringida. A lo largo de la optimización las condiciones que generan las encuestas dan las directrices para la reducción de la malla actual, asegurando de esta manera la

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

convergencia del algoritmo. Una descripción más formal del PSM se presenta a continuación.

Sea M_0 de una malla con $\beta \equiv \{x | a \leq x \leq b\}$ donde $x_0 \in M_0$.

Sea $x_0 \in M_0$ contiene x_0 y $2n$ puntos adyacentes a x_0 donde la diferencia entre esos puntos y x_0 forman una base positiva máxima para R^n .

A medida que el algoritmo genera $X_k \in M_k$, sea $X_k \in M_k$, se define de la misma forma para $k = 0, 1, \dots$

En términos más simples, según el rango del vector de cada variable, se generan "n" cantidad de variables equidistantes entre el mismo rango, formando la malla. A cada una de ellas se les realiza una encuesta hasta determinar el error mínimo parcial al comparar el modelo con los datos obtenidos del emulador de celdas fotovoltaicas, este error es la función de coste y una vez encontrado, se conserva haciendo la malla más pequeña y encuestando nuevamente, si se encuentra un nuevo error mínimo, se cambia por el antes encontrado conservando un mínimo global. Este proceso se puede repetir hasta encontrar un error aceptado, es posible repetir el proceso infinitas veces teniendo en cuenta que cada vez el error es menor pero el tiempo de proceso aumenta. En este caso no es importante el tiempo de proceso ya que es para extraer los parámetros del modelo del módulo fotovoltaico.

ALGORITMO 1: PATTERN SEARCH METHOD

```
1: For k=0,1,2,... do
2:   Buscar: emplea una estrategia finita para elegir  $x_{k+1} \in M_k$  de tal forma que
    $f(x_{k+1}) < f(x_k)$ 
3:   if dado  $x_{k+1}$  se encuentra then
4:     declare la búsqueda exitosa
5:      $M_{k+1} = M_k$ 
6:     Incremente k;
7:   else
8:     Encuesta
9:     if  $x_k$  Minimizar  $f(x)$  para  $x \in X_k$  Then
10:      Declare la encuesta no exitosa,
11:       $x_{k+1} = x_k$ ,
12:       $M_{k+1} = M_k/2$ ;
13:    else
14:      declare la encuesta exitosa,
15:      Establecer  $x_{k+1}$  Para un punto en  $x_k$  en el que  $f(x_{k+1}) < f(x_k)$ 
16:      declare  $M_{k+1} = M_k$ 
17:      Incrementa k.
18:    end if
19:  end if
20: end for
```

En la línea del paso 8 del Algoritmo 1 se debe auto guardar, garantizando la convergencia en los resultados, tal como lo presenta (W. D. Zhang & Sun, 1996).

ALGORITMO 2: MÉTODO PROPUESTO BASADO EN PATTERN SEARCH METHOD

```

1:  $I_{pv} \in (0.5), I_s \in (1 \times 10^{-12}, 1 \times 10^{-5}), R_s \in (0.2), R_p \in (50, 5000), n \in (0.5, 10)$ 
2: Mod=tmod      Tamaño del modelo
3: It=nit        Número de iteraciones
4: For Tr=1:It
5:   For k=1:Mod Variación para  $R_p$ 
6:     For m=1:Mod Variación para  $R_s$ 
7:       For s=1:Mod Variación para n
8:         For t=1:Mod Variación para  $I_o$ 
9:           For r=1:Mod Variación para  $I_{pv}$ 
10:            Evaluar eq 1.
11:              $[R_p, R_s, n, I_o, I_{pv}] \rightarrow$ Guarda los mínimos
12:           end for
13:         end for
14:       end for
15:     end for
16:   end for
17: end for

```

2.4 Función de coste

Para validar los parámetros del modelo del módulo fotovoltaico se hace la diferencia entre los datos obtenidos del modelo matemático con los datos extraídos del simulador de celdas fotovoltaicas, cada iteración, haciendo así el error absoluto, identificando cuando el error es cada vez menor. Así se puede decir que la función de coste es la minimización del error al comparar el modelo matemático con los cálculos paramétricos y los datos del emulador de paneles fotovoltaicos. Una representación de la función a minimizar es:

$$f(I, [R_p, R_s, n, I_o, I_{pv}]) = 0 \quad (2)$$

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

En donde I , es el modelo matemático y R_p, R_s, n, I_0, I_{pv} son los parámetros del modelo del módulo fotovoltaico.

La función de coste es:

$$\sum_{V=0}^{Voc} |I_{emulador} - I_{calculada}| \approx 0 \quad (3)$$

Donde V es el voltaje, L_p son la cantidad de iteraciones que se debe de hacer hasta completar toda la función. $I_{emulador}$ Son los datos extraídos del emulador del módulo fotovoltaico y $I_{calculada}$ es la función del modelo matemático del módulo fotovoltaico con los datos obtenidos parcialmente, Ecuación 1.

2.5 Algoritmo Improved Pattern Search Method (IPSM)

El IPSM está conformado por dos partes fundamentales, una en la que se tienen “n” cantidad de mallas igual a la cantidad de variables, en donde cada una de estas mallas deberá estar acotada previamente. Se define la cantidad de variables que llevarán las mallas, adicionalmente deberán estar equidistantes entre sí. La segunda parte consiste en mallas pequeñas, una por cada malla y que no superan entre el mínimo y el máximo entre dos puntos de las mallas grandes. A modo de ejemplo si la malla grande está conformada por “Q” variables $M_n = [Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 Q_6 Q_7 Q_8]$ equidistantes donde $Q_1 < Q_2 < Q_3 < Q_4 < Q_5 < Q_6 < Q_7 < Q_8$. La malla pequeña será “q” variables de la forma $m_n = [q_1 q_2 q_3 q_4 q_5]$ donde $q_1 < q_2 < q_3 < q_4 < q_5$ y $q_5 - q_1 < Q_2 - Q_1$.

Una vez que se definieron las mallas grandes y pequeñas se procede a encuestar cada una de las variables de las mallas grandes, a continuación se define el mínimo de cada una de ellas.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

El mínimo de cada una de ellas será el centro de las mallas pequeñas, realizando de nuevo una encuesta, haciendo así una encuesta minuciosa. Si se encuentra un nuevo mínimo este sería reemplazado por el mínimo global de dicha malla. Por cada iteración se reducen las mallas tanto las grandes como las pequeñas y a su vez repitiendo el procedimiento.

Las iteraciones se repiten cuantas veces se requiera, se puede condicionar a un error para asegurar convergencia.

El algoritmo empleado es el mismo Algoritmo 2 haciendo dos algoritmos con mallas diferentes e independientes.

2.6 Estimación y respuesta de los parámetros propuestos basados en PSM e IPSM

2.6.1.1 Estimación de los parámetros PSM

Después de haber hecho las pruebas experimentales en el emulador que se muestra en la Figura 7, se toman los datos de las curvas: Voltaje (V) y Corriente (A). Para la estimación de los parámetros se delimitan las mallas en cada uno de los parámetros como lo proponen en (Jiang, Maskell, et al., 2013b), de la siguiente forma:

$$R_p \in [50,500], R_s \in [0,2], n \in [0.5,10], I_0 \in [1 \times 10^{-12}, 1 \times 10^{-5}], I_{pv} \in [0,5].$$

Estos datos se introducen en el Algoritmo 2 propuesto del PSM arrojando como resultado los 5 parámetros R_p, R_s, n, I_0 y I_{pv} , en el mismo orden así:

$$R_p = 636.4520 \Omega, R_s = 0.3366 \Omega, \\ n = 9.0203, I_0 = 7.03 \times 10^{-6} A \text{ y } I_{pv} = 0.4423$$

Los parámetros calculados del modelo del módulo fotovoltaico expresados en la Ecuación 1 quedan de la siguiente forma.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

$$I = 0.4423 - 7.03 \times 10^{-6} \left[\exp\left(\frac{V + I * 0.3366}{9.0203 * V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + I * 0.3366}{636.4520} \quad (4)$$

La Ecuación 4 se simula mediante el algoritmo propuesto por (Villalva et al., 2009), que detalla el algoritmo y la ecuación con uno o dos diodos.

2.6.1.2 Evolución de los parámetros con el algoritmo PSM

En la Figura 9 se muestra la evolución de los parámetros: R_p , R_s , n , I_0 y I_{pv} , hasta llegar a su estado estable, alrededor de las 30 iteraciones.

Haciendo uso del Algoritmo 2 se hacen iteraciones en paralelo de cada variable y a su vez se identifica el error de la Ecuación 1 al ser comparado con los datos tomados del emulador de celdas fotovoltaicas, este procedimiento se repite hasta alcanzar un error casi cero.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

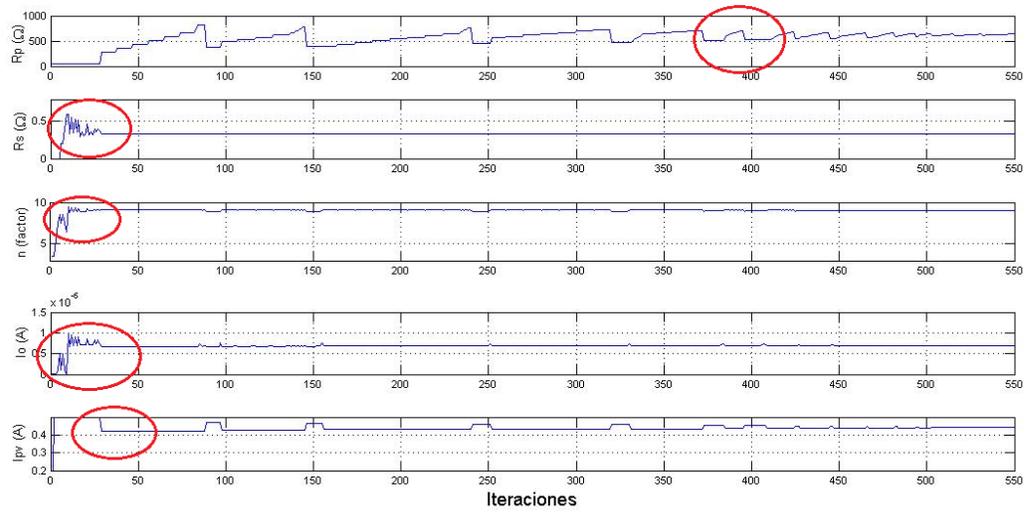


Figura 9: Evolución de parámetros R_p , R_s , n , I_0 y I_{pv} con el algoritmo PSM.

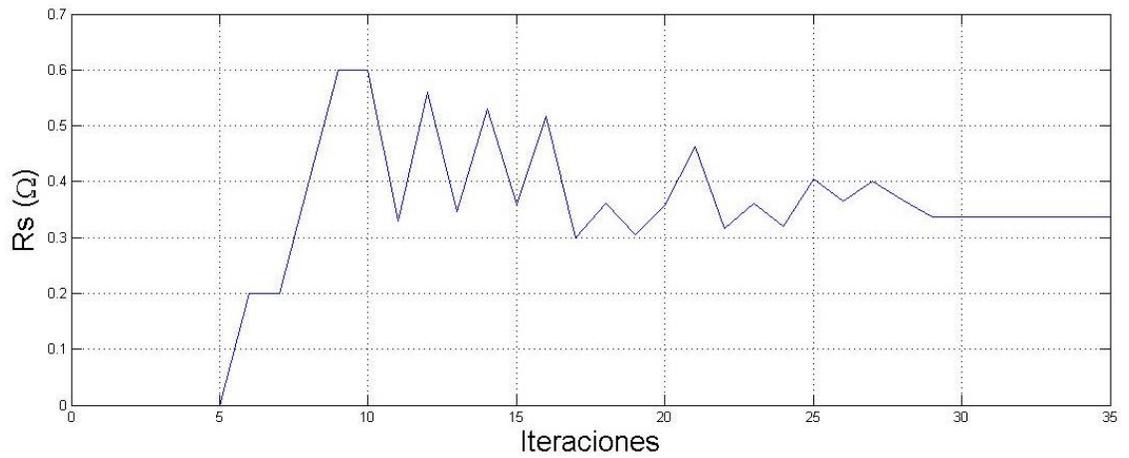


Figura 10: Zoom del parámetro R_s con el algoritmo PSM.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

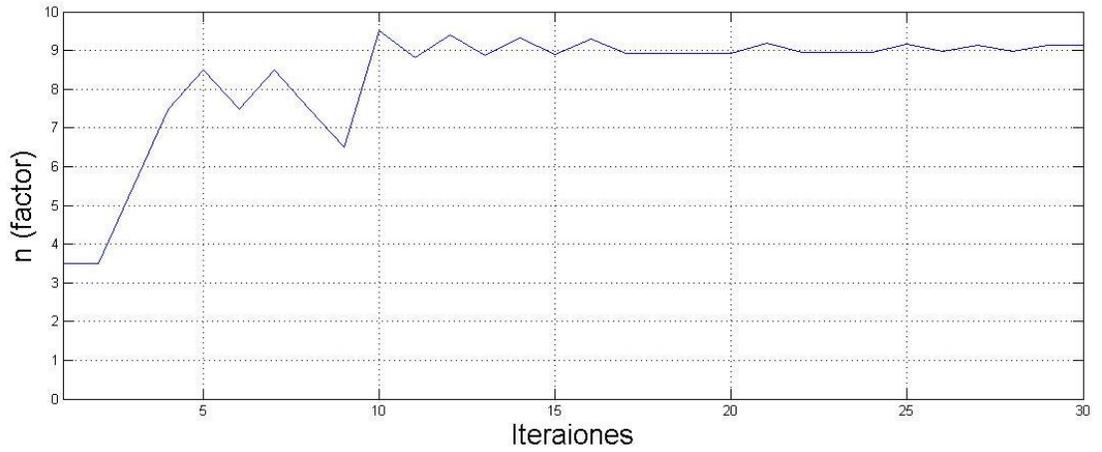


Figura 11: Zoom del parámetro n con el algoritmo PSM.

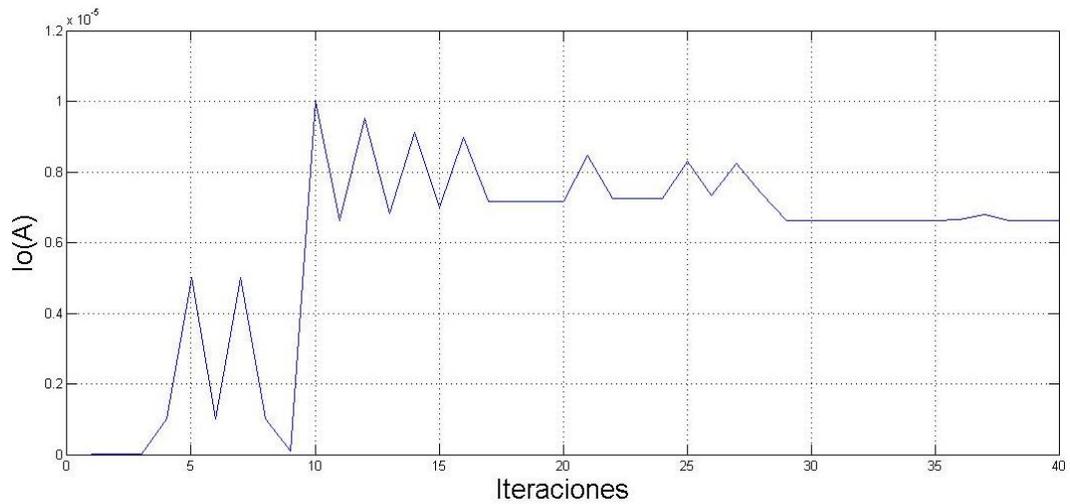


Figura 12: Zoom del parámetro I_0 con el algoritmo PSM.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

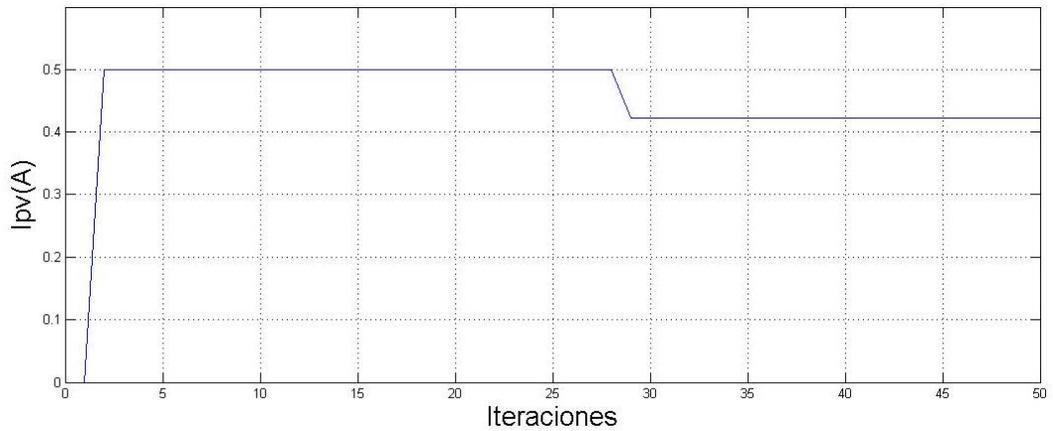


Figura 13: Zoom del parámetro I_{pv} con el algoritmo PSM.

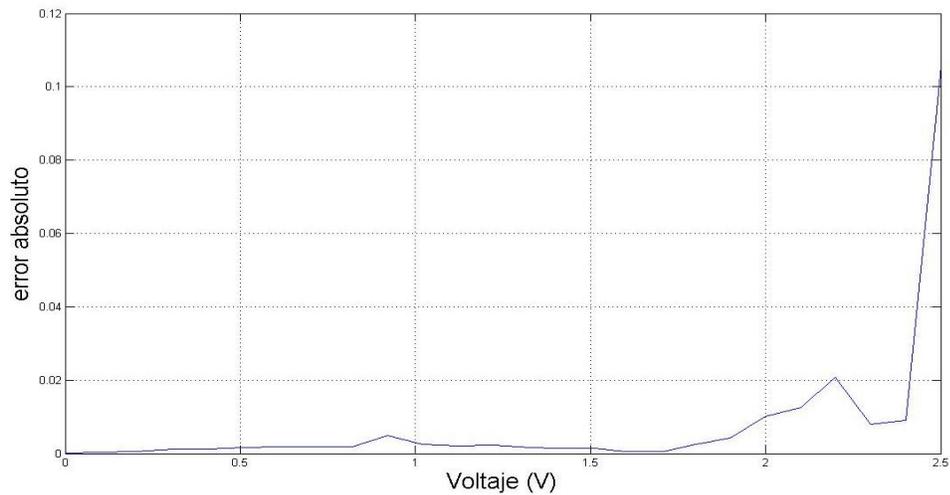


Figura 14: Error absoluto obtenido de la comparación de los datos tomados del emulador de celdas fotovoltaicas vs los resultados de los parámetros acotados por el algoritmo PSM.

2.6.2.1 Estimación de parámetros del algoritmo IPSM

Para el experimento se obtiene de nuevo los datos adquiridos por el emulador de celdas fotovoltaicas realizado en el numeral 2.2, obteniendo de nuevo los datos de las curvas: Voltaje (V) y Corriente (A). Para la estimación de los

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

parámetros se ha comenzado delimitando las mallas en cada uno de los parámetros como se propuso en el numeral 2.6.1.1 en donde:

$$R_p \in [50,500], R_s \in [0,2], n \in [0.5,10], I_0 \in [1 \times 10^{-12}, 1 \times 10^{-5}], I_{pv} \in [0,5].$$

Estos datos se introducen en el Algoritmo 2 propuesto y formulado como se propone en el numeral 2.5 (algoritmo IPSM) arrojando como resultado los 5 parámetros R_p, R_s, n, I_0 y I_{pv} , en el mismo orden así:

$$R_p = 392.7875 \Omega, R_s = 1.1050 \Omega, n = 8.8050, I_0 = 6.7650 \times 10^{-6} \text{A y } I_{pv} = 0.4400$$

Los parámetros calculados del modelo del módulo en la Ecuación 1 resultan de la siguiente forma.

$$I = 0.4400 - 6.7650 \times 10^{-6} \left[\exp\left(\frac{V + I * 1.1050}{8.8050 * V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + I * 1.1050}{392.7875} \quad (5)$$

2.6.2.2 Evolución de los parámetros con el algoritmo IPSM

A continuación se presenta los resultados obtenidos con el algoritmo IPSM. Cinco parámetros desconocidos: R_p, R_s, n, I_0 y I_{pv} en el mismo orden de la gráfica de las Figura 16, 17, y 18, tomados de la Ecuación 1, haciendo uso del algoritmo 2 se hacen iteraciones en paralelo de cada variable (ver Figura 15) y a su vez se identifica el error, como se muestra en la Figura 19. Este procedimiento se lleva a cabo hasta llegar a un error casi cero 6.6×10^{-3} . En la Figura 14 se puede observar la evolución de cada uno de los parámetros hasta llegar a estabilizarse.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

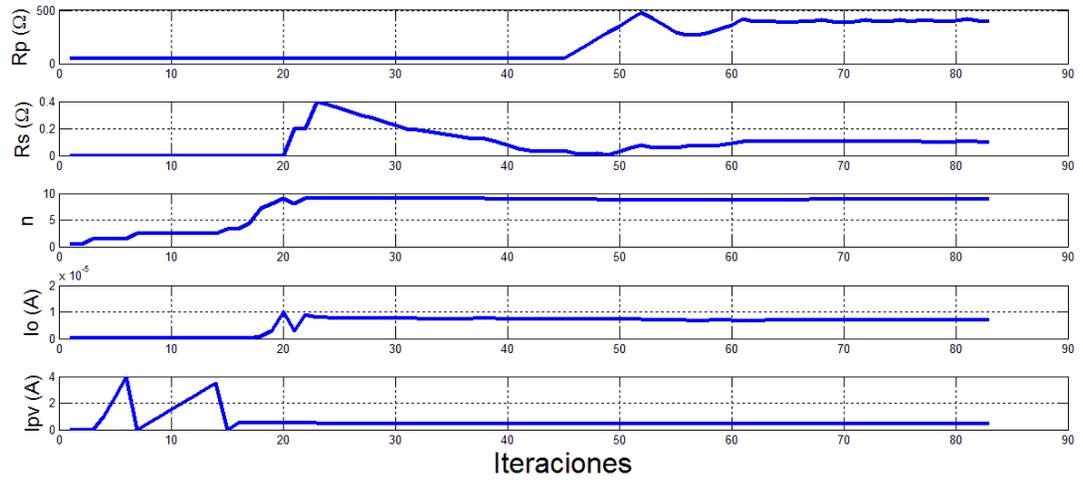


Figura 15: Evolución de los parámetros R_p , R_s , n , I_0 y I_{pv} iteración a iteración.

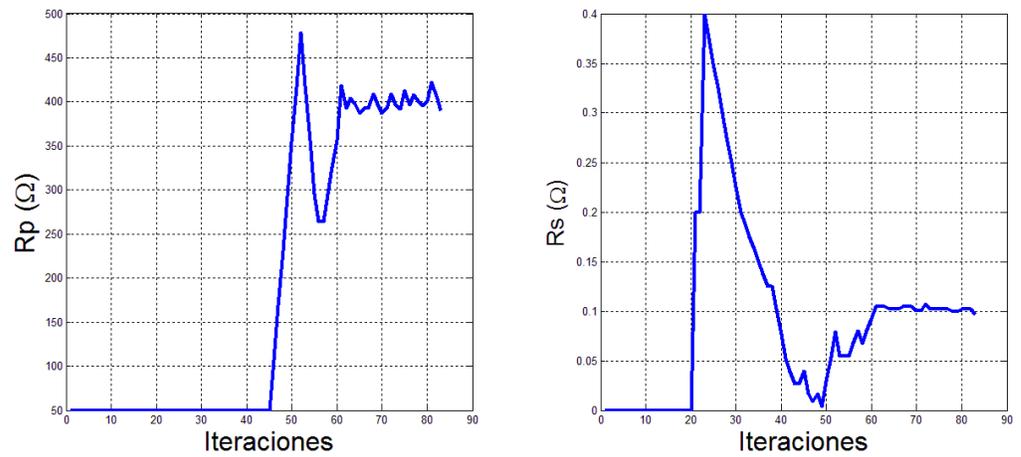


Figura 16: a) Parámetro R_p b) Parámetros R_s .

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

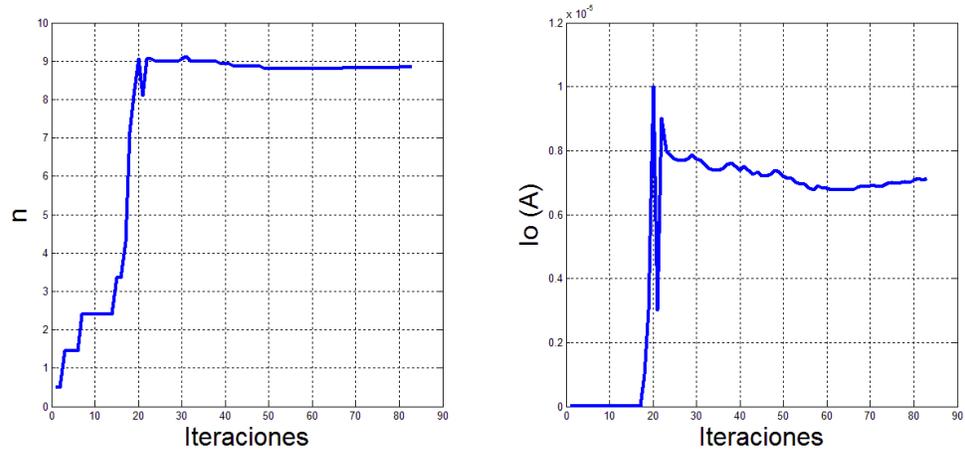


Figura 17: a) Parámetro n b) Parámetro I_o .

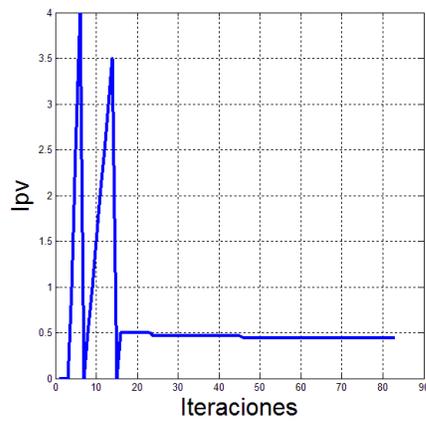


Figura 18: Parámetro I_{pv} .

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

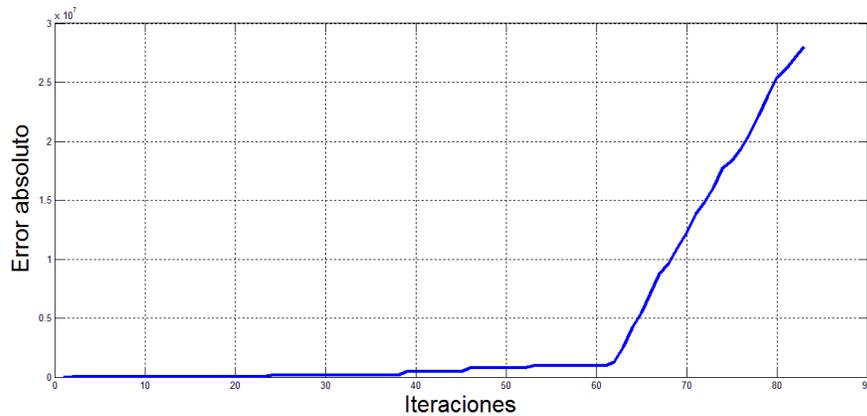


Figura 19: Error absoluto entre los datos del emulador y los datos extraídos del algoritmo IPSM.

Se puede detallar en las Figura 16, 17 y 18 como cada parámetro llega a estabilizarse hasta la iteración 60 Figura 15 en donde todos los parámetros presentan un valor casi constante.

2.7 Comparación de resultados del algoritmo PSM e IPSM para calcular los parámetros del modelo del módulo fotovoltaico.

En el numeral anterior se calcularon los parámetros del modelo del módulo fotovoltaico por medio de dos algoritmos PSM e IPSM. A continuación se hace una comparación gráfica y numérica de ambos algoritmos con los datos obtenidos del emulador de celdas fotovoltaicas.

En la Figura 20 se hace la comparación gráfica entre el modelo del módulo fotovoltaico con los parámetros calculados con el algoritmo PSM (línea roja) y el de los datos obtenidos del emulador de celdas fotovoltaicas (círculos azules) La gráfica asocia corriente vs voltaje, se puede ver gran similitud entre las dos gráficas. La Figura 22 hace la misma comparación asociando potencia vs voltaje, para el MPPT es de gran importancia esta última para el estudio del

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

MPPT que es en el área en donde se encuentra el punto de potencia máxima resaltado en la Figura 21 y Figura 23 con un círculo rojo. Si se hace un análisis más crítico, encontramos un error absoluto entre ambas gráficas de 0.02 % como se puede ver en la Figura 14.

Con estos resultados, teniendo en cuenta que el error absoluto es muy bajo, 0.02 %, se puede decir que es un buen modelo del módulo fotovoltaico para realizar algoritmos de optimización en el MPPT de una celda fotovoltaica.

Teniendo en cuenta que el modelo del módulo fotovoltaico con el algoritmo PSM es aceptable, se procedió a mejorar el algoritmo y se formuló el IPSM obteniendo resultados más que satisfactorios. En la Figura 21 se puede ver la misma comparación analizada anteriormente entre los datos obtenidos del emulador de celdas fotovoltaicas y el modelo del módulo fotovoltaico con los parámetros calculados con el PSM pero ahora con el IPSM. De igual forma se hace la comparación en la Figura 23 Potencia (W) vs Voltaje (V), la comparación es visualmente casi iguales, incluso en la parte del punto de potencia máxima, no es necesario resaltar esta área debido a que toda la gráfica se encuentra una sobre la otra. En la Figura 19 se puede ver el error absoluto con el algoritmo IPSM (0.0082), comparado con el error absoluto del algoritmo PSM de (0.02). Se puede concluir gracias a los resultados, que el modelo del módulo fotovoltaico con los parámetros calculados con el algoritmo IPSM es óptimo al ser un modelo matemático semejante a los datos obtenidos de un emulador de celdas fotovoltaicas.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

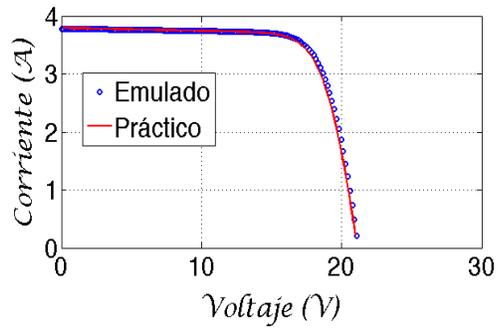


Figura 20: Comparación Corriente vs Voltaje, entre los datos tomados del emulador de celdas fotovoltaicas vs los resultados de los parámetros acotados por el algoritmo PSM.

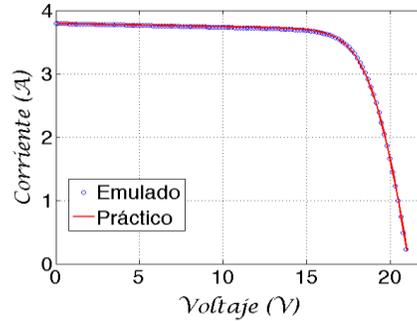


Figura 21: Resultados comparativos entre los datos tomados del emulador de celdas fotovoltaicas y los resultados obtenidos con el algoritmo IPSM.

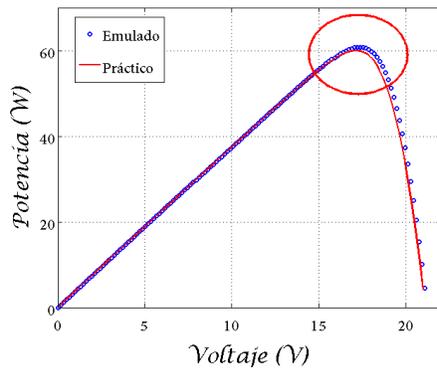


Figura 22: Comparación Potencia vs Voltaje, entre los datos tomados del emulador de celdas fotovoltaicas vs los resultados de los parámetros acotados por el algoritmo PSM.

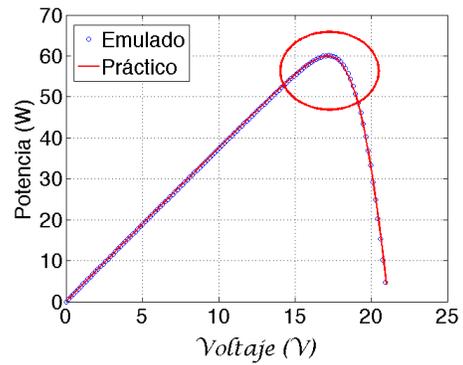


Figura 23: Resultados comparativos entre los datos tomados del emulador de celdas fotovoltaicas y los resultados obtenidos con el algoritmo IPSM.

2.8 Metodología para la asignación de pesos del modelo matemático de un diodo de una celda fotovoltaica.

- Hacer un estado del arte de los métodos empleados para encontrar los parámetros de un modelo matemático de una celda fotovoltaica.
- Hacer el montaje experimental de un emulador de celdas fotovoltaicas
- Ingresar las características del panel al emulador de celdas fotovoltaicas.
- Con ayuda de la carga electrónica funcionando en modo de voltaje, se hace un barrido desde cero voltios hasta el voltaje de circuito abierto.
- Extraer los datos obtenidos de la potencia obtenida [W] vs el voltaje [V] y hacer una gráfica de la respuesta obtenida.
- Identificar una función de coste que permita identificar los parámetros del modelo matemático de una celda fotovoltaica. En el caso particular se trabajó con un circuito equivalente del modelo de una celda fotovoltaica de un diodo.
- Identificar los parámetros que varían según el sistema, en el caso particular R_p , R_s , n , I_0 y I_{pv} .
- Delimitar cada uno de los parámetros. Para el caso particular se hace como lo propone (Jiang, Maskell, et al., 2013b).
- Se implementa el algoritmo PSM haciendo una búsqueda exhaustiva de cada uno de los parámetros hasta encontrar el mismo modelo matemático al obtenido con el simulador de celdas fotovoltaicas.
- Se implementa el algoritmo IPSM realizando el mismo procedimiento encontrando mejores resultados.
- Presentar los resultados.

CAPÍTULO 3

A continuación se presenta el algoritmo de optimización PSM para el MPPT con una celda fotovoltaica MSX60 (Solar, 1997), simulada en el software PSIM®, basada en el modelo del módulo fotovoltaico con los parámetros calculados en el Capítulo 2. Los resultados son validados con los algoritmos P&O y PSO bajo las mismas condiciones.

En la primera parte del capítulo se hace la descripción de los componentes que hacen parte de la simulación: Bloque C Block (algoritmo PSM), fuente de voltaje controlada, sensor de voltaje y panel fotovoltaico.

En la segunda parte se hace la simulación del MPPT con el algoritmo de optimización PSM, se valida con la simulación de los algoritmos de optimización P&O y PSO en el mismo simulador y bajo las mismas condiciones, finalizando con el análisis de los resultados obtenidos.

3.1 Elementos empleados en la simulación del MPPT con PSIM®

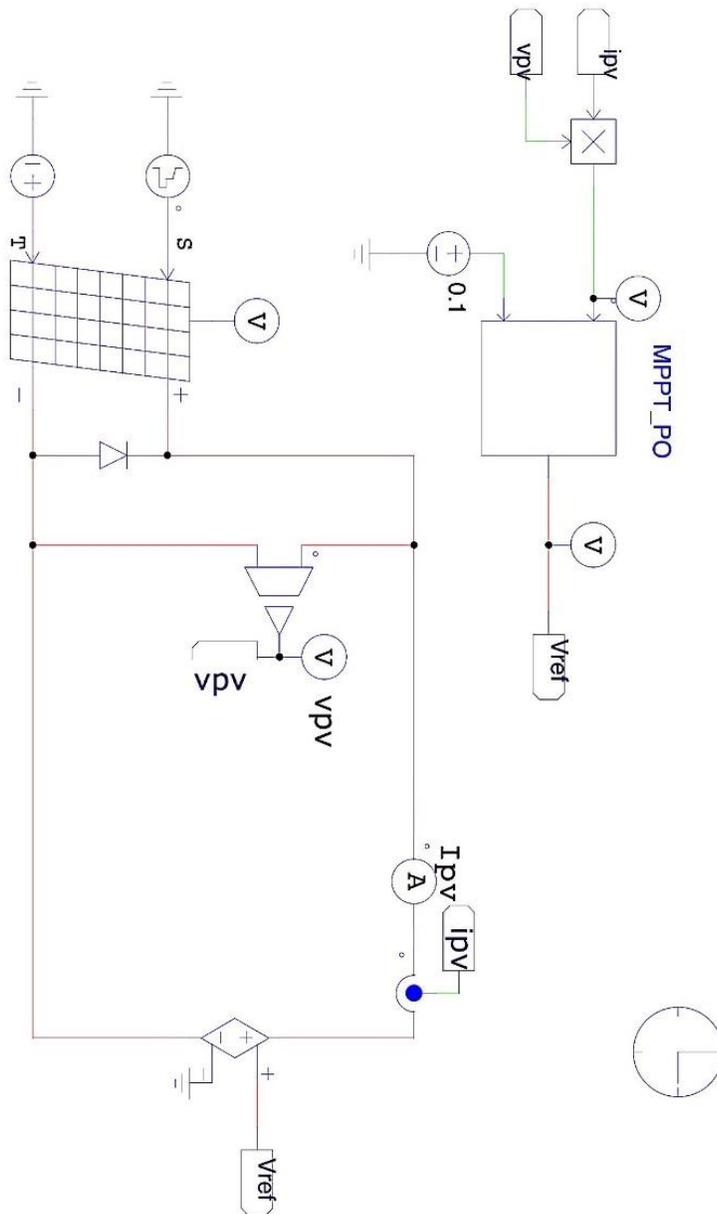


Figura 24: Diagrama circuital de un simulador de panel fotovoltaico con su fuente de voltaje controlada y módulo de MPPT.

3.1.1 Bloques C Block

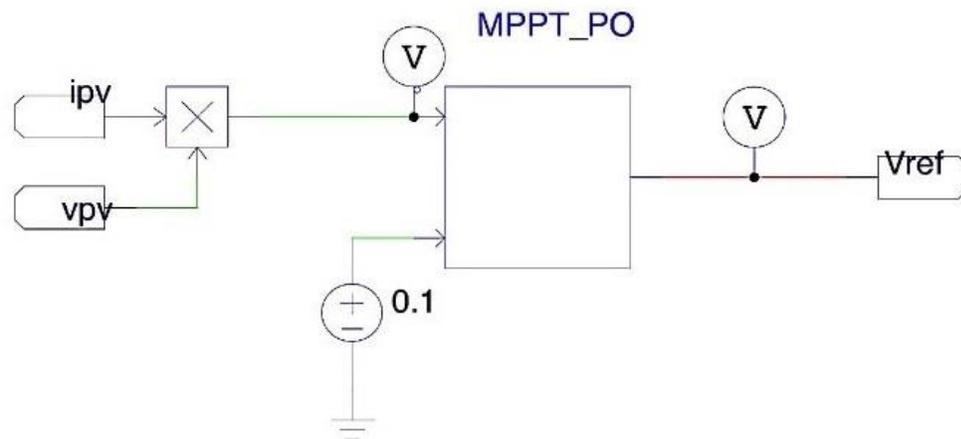


Figura 25: Diagrama circuital del bloque "C Block" en PSIM® que permite introducir un programa personalizado en C.

El bloque "C Block" permite introducir un código en "C" directamente en el simulador, compilándolo, sin necesidad de depender de un programa externo como: C++, C, Visual, entre otros.

Este bloque permite configurar la cantidad de entradas y salidas necesarias, adicionalmente cuenta con todos los atributos que tiene el código C como definir variables: float, double, etc. También se pueden hacer variables y matrices flotantes lo que facilita al usuario realizar programas con gran alcance permitiendo ponerlos a prueba rápidamente haciendo correcciones al instante.

El bloque "C Block" empleado contiene una entrada "V" Figura 25 que entrega la potencia actual del panel fotovoltaico y una salida "Vref" que es el voltaje [V] de referencia que se aplica directamente a la fuente de voltaje controlada Figura 24.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

3.1.2 Simulador de celdas fotovoltaicas

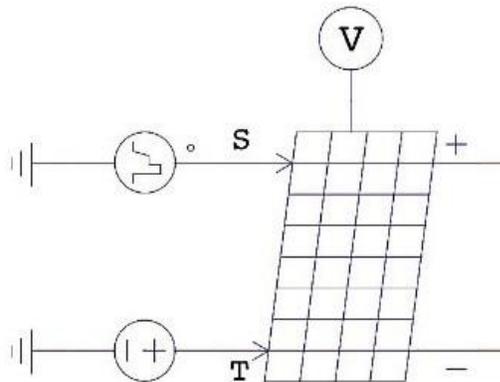


Figura 26: Módulo de un simulador de celdas fotovoltaicas en PSIM®

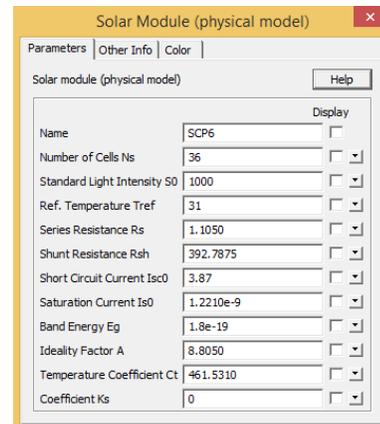


Figura 27: Parámetros que se pueden manipular en el simulador de celdas fotovoltaicas

El módulo de un simulador de celdas fotovoltaicas presenta dos entradas Figura 26: Irradiación [W/m^2] expresado con (S) y temperatura ambiente [$^{\circ}C$] expresado con (T). También presenta tres salidas: Potencia máxima del panel (V) y las terminales positivo (+) y negativo (-) del módulo.

El módulo de celdas fotovoltaicas permite simular el comportamiento de un panel solar bajo condiciones controladas en tiempos muy reducidos, facilitando su estudio en la investigación.

Se puede ver en la Figura 27 los parámetros que se pueden cambiar en el módulo de los paneles fotovoltaicos, entre los parámetros se puede encontrar: número de paneles, resistencia en serie, resistencia en paralelo, corriente de corto circuito, etc. Todos estos parámetros hace posible configurar cualquier panel comercial y bajo condiciones que se pueden encontrar en el campo.

3.1.3 Fuente de voltaje controlada

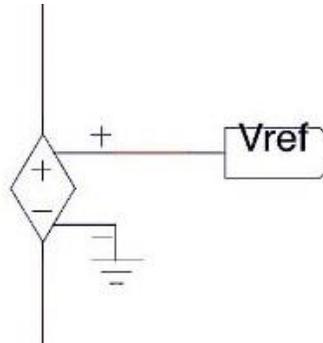


Figura 28: Diagrama circuital de una fuente de voltaje controlada

En la Figura 28 se observa una fuente de voltaje controlada que simula un convertidor regulado donde se han despreciado los rizados. El voltaje de referencia (V_{ref}) es la salida del algoritmo de optimización PSM que tiene como objetivo maximizar la potencia extraída del panel.

3.2 Simulación del algoritmo de optimización PSM en el MPPT actuando en una celda fotovoltaica.

Para la simulación del algoritmo de optimización del MPPT se implementa el Algoritmo 2, es decir el PSM en el bloque C Block, como se puede ver en la Figura 25. Una vez ingresado el PSM se hace la simulación bajo condiciones controladas, en este caso se hace el cambio de la irradiación entre 1000 W/m^2 en los 0.05 segundos y 500 W/m^2 hasta los 0.10 segundos como se puede detallar en la Figura 29, en donde se presenta un cambio de potencia de 60 W a 30 W siendo 60W la potencia máxima que puede entregar el panel fotovoltaico MSX60. Es importante detallar las características del panel fotovoltaico, debido a que se emplean los parámetros calculados del modelo del módulo fotovoltaico en el numeral 2.6.2.1.

La simulación de la Figura 29 del algoritmo de optimización PSM llega a encontrar el punto de potencia máxima rápidamente, conservándolo hasta

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

encontrar un cambio en la irradiación, a continuación encuentra de nuevo el MPP al hacer el seguimiento. En la ampliación se puede detallar la búsqueda exhaustiva realizada.

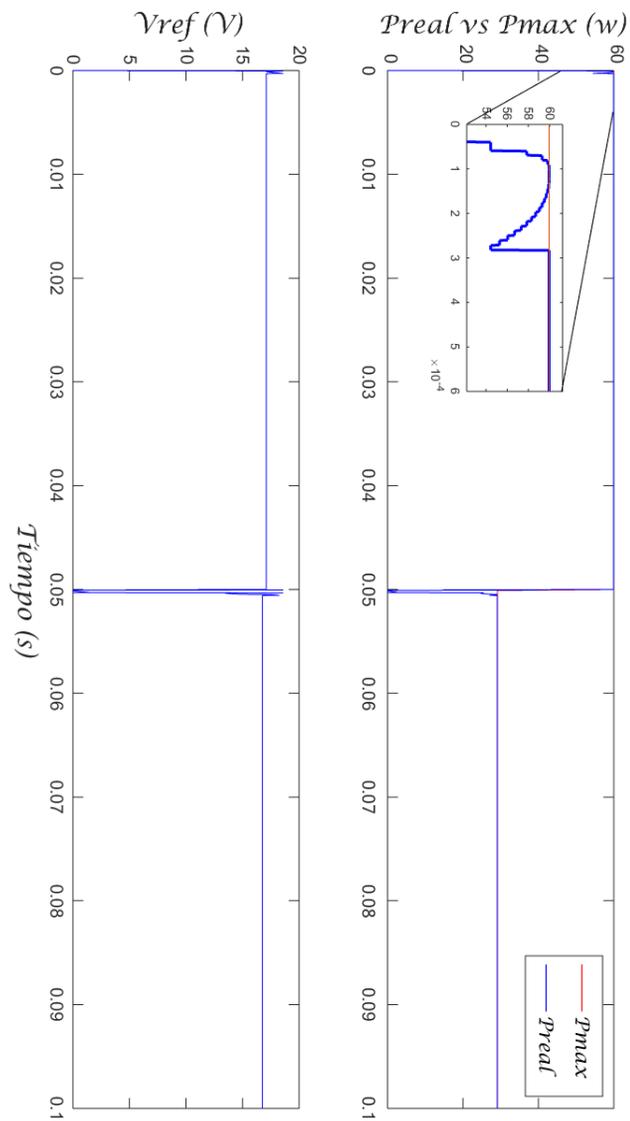


Figura 29: Perfil de extracción de potencia del MPPT y variación del voltaje de referencia con el algoritmo de optimización PSM.

3.2.1 Simulación del algoritmo de optimización P&O y PSO en el MPPT actuando en una celda fotovoltaica.

Para poder validar el algoritmo de optimización del MPPT con el PSM se realiza el mismo procedimiento del numeral 3.2 con los algoritmos P&O y PSO. Así con el mismo montaje de la simulación Figura 24 y bajo las mismas condiciones y parámetros del panel fotovoltaico.

3.2.2 Resultado de la simulación del algoritmo de optimización PSO en el MPPT.

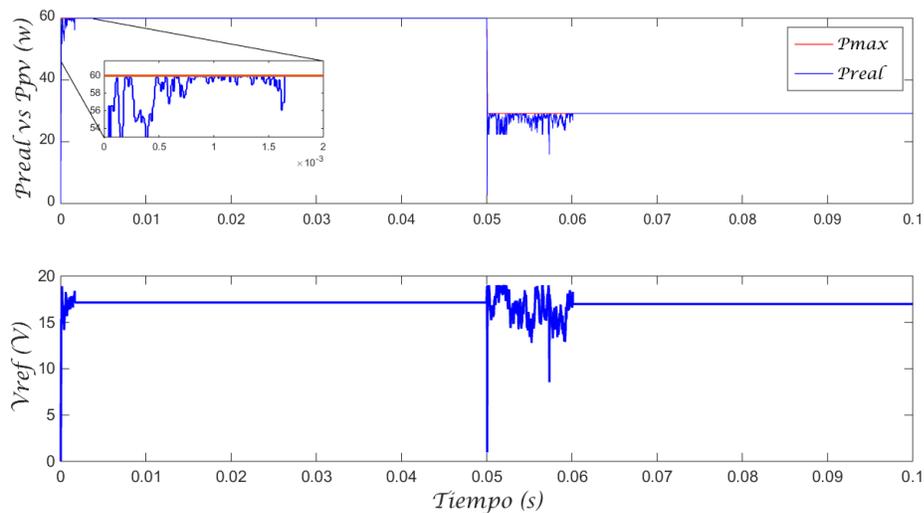


Figura 30: Perfil de extracción de potencia del MPPT y variación del voltaje de referencia con el algoritmo de optimización PSO

La Figura 30 muestra como el algoritmo de optimización funciona óptimamente al encontrar el punto de potencia máxima, sin embargo al generar partículas aleatorias podría demorar un tiempo en encontrar el MPP. Sin embargo es un buen algoritmo que sirve para validar el algoritmo de optimización PSM.

3.2.2 Resultados de la simulación del algoritmo de optimización P&O en el MPPT.

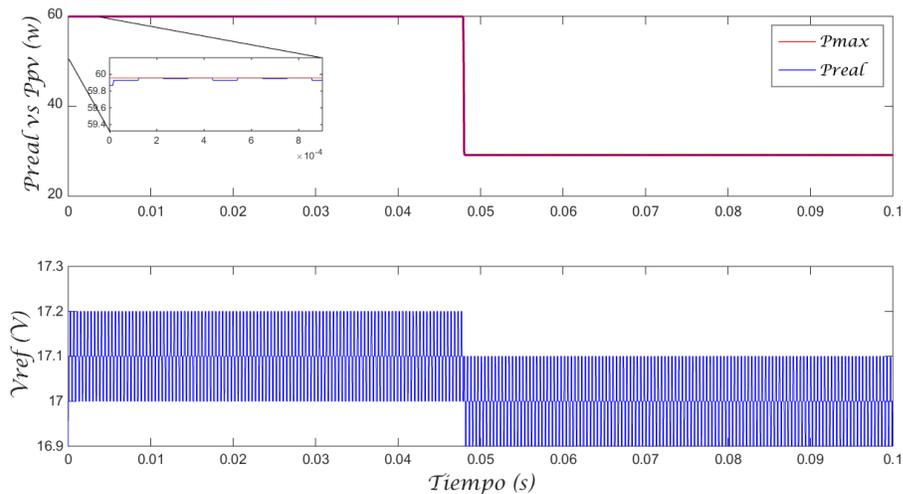


Figura 31: Perfil de extracción de potencia del MPPT y variación del voltaje de referencia con el algoritmo de optimización P&O

En la Figura 31 se puede ver como el algoritmo de optimización P&O encuentra rápidamente el MPP y permanece cerca de él en todo su trayecto sin importar los cambios en la irradiación. La mayor ventaja del P&O es la simplicidad del algoritmo, lo que lo hace flexible si se fuese a implementar en algún hardware embebido.

3.3 Metodología para validar el algoritmo de optimización PSM para el MPPT.

Para validar el algoritmo de optimización PSM para el MPPT se realizaron los siguientes pasos:

- Proponer un software que permita simular las celdas fotovoltaicas.
- Ingresar al simulador de celdas fotovoltaicas los parámetros calculados del modelo del módulo fotovoltaico.
- Adicionar una fuente de voltaje controlada.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

- Adicionar un bloque que permita implementar un algoritmo para la optimización del MPPT.
- Adicionar al algoritmo del optimizador una entrada de potencia (W) actual del panel fotovoltaico y una salida de voltaje (V) que conecta a la fuente de voltaje controlada.
- Diseñar el algoritmo de optimización PSM para el MPPT y simularlo.
- Implementar los algoritmos de optimización PSO y P&O para el MPPT y simularlos.
- Mostrar que efectivamente el algoritmo de optimización PSM sigue el punto de potencia máxima de una celda fotovoltaica.

CAPÍTULO 4

Conclusiones y futuras líneas de trabajo

La nueva metodología empleada para encontrar los parámetros de la función de coste de una celda fotovoltaica permite hacer simulaciones del MPPT con datos aproximados a la realidad gracias a los resultados obtenidos al compararlos con un emulador de celdas fotovoltaicas.

Con el algoritmo de optimización IPSM se pueden encontrar los parámetros del modelo matemático o función de coste de un diodo para cualquier celda fotovoltaica, conociendo la temperatura e irradiación.

La metodología empleada para optimizar el MPPT de una celda fotovoltaica mostró ser confiable al encontrar el punto de máxima potencia al ser comparado con los algoritmos P&O y PSO. Adicionalmente el algoritmo PSM encuentra el punto máximo de potencia sin oscilar alrededor de él, a diferencia del caso del P&O que nunca encuentra el MPP.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

Con los resultados obtenidos en la investigación expuesta en esta tesis, se podrá hacer estudios del MPPT confiables que aportarán al estudio de la extracción de energía de las celdas fotovoltaicas, contribuyendo en el estudio de energías renovables.

Futuras líneas de trabajo

El algoritmo PSM ha demostrado ser un algoritmo versátil y confiable para trabajar en sistemas no lineales lo que podría derivar en futuras investigaciones.

Hay un creciente interés por el estudio en fuentes de energía renovables, uno de ellos son los sistemas eólicos. Estos sistemas controlan el MPPT midiendo la velocidad del viento en el rotor de la turbina. Sin embargo, esto es muy difícil de implementar por lo cual se debe recurrir a algunas metodologías indirectas para su estimación. Para lograr esto hay que ajustar el ciclo de trabajo (Molina, Mercado, & Juan, 2008). El ciclo de trabajo depende del viento y este es variable, convirtiéndolo en un sistema no lineal por lo que trabajar con el algoritmo PSM puede ser una solución.

ANEXOS

Algoritmo PSM para hallar los pesos del modelo matemático de una celda fotovoltaica en el software de Matlab®

```
clear all
tic
T = 31 +273.15;      %Tn;
k = 1.3806503e-23;  %Boltzmann (J/K)
q = 1.60217646e-19; %Electron charge (C)
Vt = k * T / q;
load var1
Vi=var(1:1:128,1)
li=var(1:1:128,2)
final=length(Vi);
v=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10];
Ic=0.439; %Corriente de corte
Vc=2.55; %Voltaje de corte
Ipv=v/2;
Io=[1e-12 0.5e-11 1e-11 1e-10 0.5e-9 1e-9 1e-8 1e-7 1e-6 0.5e-5 1e-5];
Rs=v/5;
Rp=v*495+50
n=v+0.5; %PSM malla
mu=0.075;
ean=100;
In=0;
Im=1;
contador=0;
for Tr=1:80
    for k=1:length(Rs) %Rp variará con k
        for m=1:length(Rs) %Rs variará con m
            for s=1:length(Rs) %n variará con s
                for t=1:length(Rs) %Io variará con t
                    for r=1:length(Rs) %Ipv variará con r
                        contador=contador+1;
                        for i=1:final
                            ln(i)=0;
                            g=Ipv(r)-Io(t)*(exp((Vi(i)+ln(i)*Rs(m))/(Vt*n(s)))-1)-
                            (Vi(i)+ln(i)*Rs(m))/Rp(k)-ln(i);
```

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

```

while (abs(g) > 0.001)
    Id1=lo(t)*(exp((Vi(i)+ln(i)*Rs(m))/(Vt*n(s)))-1);
    g = lpv(r)-Id1-(Vi(i)+ln(i)*Rs(m))/Rp(k)-ln(i);
    glin = -lo(t)*Rs(m)/(Vt*n(s))*exp((Vi(i)+ln(i)*Rs(m))/(Vt*n(s)))-
Rs(m)/Rp(k)-1;
    ln(i) = ln(i) - g/glin;
end
er(lm,i)=abs(li(i)-ln(i))*1.0;
end
e=mean(er(lm,:));
pa=[Rp(k),Rs(m),n(s),lo(t),lpv(r),contador];
if e<ean
    ean=e;
    paan(:,lm)=pa;
    lm=lm+1;
    Vpa=[k,m,s,t,r];
end
end
end
end
end
end
Rpnom=paan(1,lm-1);
Rsnom=paan(2,lm-1);
nnom=paan(3,lm-1);
lonom=paan(4,lm-1);
lpvnom=paan(5,lm-1);
Rp=Rp+(Rpnom-Rp)*mu;
Rs=Rs+(Rsnom-Rs)*mu;
n=n+(nnom-n)*mu;
lo=lo+(lonom-lo)*mu;
lpv=lpv+(lpvnom-lpv)*mu;
end

```

Algoritmo IPSM para hallar los pesos del modelo matemático de una celda fotovoltaica en el software de Matlab®

```
clear all
clc
T = 31 +273.15; %Tn;
k = 1.3806503e-23; %Boltzmann (J/K)
q = 1.60217646e-19; %Electron charge (C)
Vt = k * T / q;
load var1
Vi=var(1:1:128,1)
li=var(1:1:128,2)
final=length(Vi);
v=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10];
Ic=0.439; %Corriente de corte
Vc=2.55; %Voltaje de corte
%Mallas grandes
Ipv=[0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5]; %Malla para Ipv
Io=[1e-12 0.5e-11 1e-11 1e-10 0.5e-9 1e-9 1e-8 1e-7 1e-6 0.5e-5 1e-5]; %Malla para Io
Rs=[0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 1.2 1.4 1.6 1.8 2]; %Malla para Rs
Rp=[50 545 1040 1535 2030 2525 3020 3515 4010 4505 5000]; %Malla para Rp
n=[0.5 1.5 2.5 3.5 4.5 5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5]; %Mala para n
%Mallas pequeñas
mIpv=[-0.125 -0.00625 0 0.00625 0.125]; %Malla pequeña para Ipv
mIo=[-2.5e-07 -1.25e-07 0 2.5e-07 1.25e-07 ]; %Malla pequeña para Io
mRs=[-0.05 -0.025 0 0.025 0.05 ]; %Malla pequeña para Rs
mRp=[-123.75 -61.875 0 123.75 61.875]; %Malla pequeña para Rp
mn=[-0.25 -0.125 0 0.125 0.25]; %Mala pequeña para n
SaltosM=0.1;
Saltosm=0.1;
%Saltos malla grande
sMIpv=(Ipv(11)-Ipv(1))/length(Ipv)*SaltosM;
sMIo=(Io(11)-Io(1))/length(Io)*SaltosM;
sMRs=(Rs(11)-Rs(1))/length(Rs)*SaltosM;
sMRp=(Rp(11)-Rp(1))/length(Rp)*SaltosM;
sMn=(n(11)-n(1))/length(n)*SaltosM;

%Saltos malla pequeña
smIpv=(mIpv(5)-mIpv(1))/length(mIpv)*Saltosm;
smIo=(mIo(5)-mIo(1))/length(mIo)*Saltosm;
smRs=(mRs(5)-mRs(1))/length(mRs)*Saltosm;
smRp=(mRp(5)-mRp(1))/length(mRp)*Saltosm;
```

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

```
smn=(mn(5)-mn(1))/length(mn)*Saltosm;

pt=0;
pr=0;
cont=1;
cont2=0;

glpv=[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1];
glo=[2 2 2 2 2 2 2 2 2 2];
gRs=[3 3 3 3 3 3 3 3 3 3];
gRp=[4 4 4 4 4 4 4 4 4 4];
gn=[5 5 5 5 5 5 5 5 5 5];

gmIpv=[1 1 1 1];
gmlo=[2 2 2 2];
gmRs=[3 3 3 3];
gmRp=[4 4 4 4];
gmn=[5 5 5 5];

for loop=1:15

    figure (1)
    hold on
    plot(glpv,lpv,'-')
    plot(glo,lo,'-')
    plot(gRs,Rs,'-')
    plot(gRp,Rp,'-')
    plot(gn,n,'-')

    plot(gmIpv,mIpv,'vk')
    plot(gmlo,mlo,'vk')
    plot(gmRs,mRs,'vk')
    plot(gmRp,mRp,'vk')
    plot(gmn,mn,'vk')

    In=0;

    for k=1:length(Rs)%lpv variará con k
        for m=1:length(Rs)%lo variará con m
            for s=1:length(Rs)%Rs variará con s
                for t=1:length(Rs)%Rp variará con t
                    for r=1:length(Rs)%n variará con r
                        error=0;
                        for i=1:length(Vs)
                            ln(i)=0;
```

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

```

        g(i) = lpv(k)-Io(m)*(exp((Vs(i)+ln(i)*Rs(s))/(Vt*n(r)))-1)-
(Vs(i)+ln(i)*Rs(s))/Rp(t)-ln(i);
        errorp=abs(Is(i)-g(i));
        error=error+errorp;

    end
    errora=error/length(Vs);
    if errora<errorr
        errorr=errora;
        pr=pr+1;
        posc=[k m s t r];
        lpv(cont)=lpv(posc(1));
        log(cont)=lo(posc(2));
        Rsg(cont)=Rs(posc(3));
        Rpg(cont)=Rp(posc(4));
        ng(cont)=n(posc(5));
        mlpv=[-0.125 -0.00625 0 0.00625 0.125]+lpv(posc(1)); %Malla
pequeña para lpv
        mlo=[-2.5e-07 -1.25e-07 0 2.5e-07 1.25e-07 ]+lo(posc(2)); %Malla
pequeña para lo
        mRs=[-0.05 -0.025 0 0.025 0.05 ]+Rs(posc(3)); %Malla pequeña para
Rs
        mRp=[-123.75 -61.875 0 123.75 61.875]+Rp(posc(4)); %Malla
pequeña para Rp
        mn=[-0.25 -0.125 0 0.125 0.25]+n(posc(5)); %Mala pequeña para n
        figure (2)
        plot(Vs,Is,'b')
        hold on
        plot(Vs,g,'r')
        hold off
        figure (1)
        plot(glpv,lpv(posc(1)),'rx')
        plot(glo,lo(posc(2)),'rx')
        plot(gRs,Rs(posc(3)),'rx')
        plot(gRp,Rp(posc(4)),'rx')
        plot(gn,n(posc(5)),'rx')
        hold on
        pause(0.001)
    end
end
end
end
end
end
end
%%reduce malla grande

```

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

```

for i=1:length(Rs)
    if Ipv(i)<Ipv(posc(1))
        Ipv(i)=Ipv(i)+sMIpv;
    else
        Ipv(i)=Ipv(i)-sMIpv;
    end

    if Io(i)<Io(posc(2))
        Io(i)=Io(i)+sMlo;
    else
        Io(i)=Io(i)-sMlo;
    end

    if Rs(i)<Rs(posc(3))
        Rs(i)=Rs(i)+sMRs;
    else
        Rs(i)=Rs(i)-sMRs;
    end

    if Rp(i)<Rp(posc(4))
        Rp(i)=Rp(i)+sMRp;
    else
        Rp(i)=Rp(i)-sMRp;
    end

    if n(i)<n(posc(5))
        n(i)=n(i)+sMn;
    else
        n(i)=n(i)-sMn;
    end
end
cont=cont+1;
%%Evalua malla pequeña
for k=1:length(mlpv)%Ipv variará con k
    for m=1:length(mlpv)%Io variará con m
        for s=1:length(mlpv)%Rs variará con s
            for t=1:length(mlpv)%Rp variará con t
                for r=1:length(mlpv)%n variará con r
                    error=0;
                    for i=1:length(Vs)
                        ln(i)=0;
                        g(i) = Ipv(k)-Io(m)*(exp((Vs(i)+ln(i)*Rs(s))/(Vt*n(r)))-1)-
(Vs(i)+ln(i)*Rs(s))/Rp(t)-ln(i);

                        errorp=abs(ls(i)-g(i));
                        error=error+errorp;
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

```

        end
        errora=error/length(Vs);
        if errora<errorr
            errorr=errora
            posc=[k m s t r];
            pt=pt+1;
            lpg(cont)=mlpv(posc(1));
            log(cont)=mlo(posc(2));
            Rsg(cont)=mRs(posc(3));
            Rpg(cont)=mRp(posc(4));
            ng(cont)=mn(posc(5));
            mlpv=[-0.125 -0.00625 0 0.00625 0.125]+lpg(posc(1)); %Malla
pequeña para lpg
            mlo=[-2.5e-07 -1.25e-07 0 2.5e-07 1.25e-07 ]+lo(posc(2)); %Malla
pequeña para lo
            mRs=[-0.05 -0.025 0 0.025 0.05 ]+Rs(posc(3)); %Malla pequeña para
Rs
            mRp=[-123.75 -61.875 0 123.75 61.875]+Rp(posc(4)); %Malla
pequeña para Rp
            mn=[-0.25 -0.125 0 0.125 0.25]+n(posc(5)); %Malla pequeña para n
            figure (2)
            plot(Vs,ls,'b')
            hold on
            plot(Vs,g,'r')
            hold off
            pause(0.001)
        end
    end
end
end
end
end
end

cont2=cont2+1;
%%Reduce malla pequeña
for i=1:length(mlpv)
    if mlpv(i)<mlpv(posc(1))
        mlpv(i)=mlpv(i)+smlpv;
    else
        mlpv(i)=mlpv(i)-smlpv;
    end

    if mlo(i)<mlo(posc(2))
        mlo(i)=mlo(i)+smlo;
    else
        mlo(i)=mlo(i)-smlo;
    end
end

```

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

```
end

if mRs(i)<mRs(posc(3))
mRs(i)=mRs(i)+smRs;
else
mRs(i)=mRs(i)-smRs;
end

if mRp(i)<mRp(posc(4))
mRp(i)=mRp(i)+smRp;
else
mRp(i)=mRp(i)-smRp;
end

if mn(i)<mn(posc(5))
mn(i)=mn(i)+smn;
else
mn(i)=mn(i)-smn;
end
end

modelo(1)=lpvg(end)
modelo(2)=log(end)
modelo(3)=Rs(end)
modelo(4)=Rp(end)
modelo(5)=ng(end)

end
```

Algoritmo de optimización para el MPPT en C en un bloque de C Block de PSIM®

```
#include <Stdlib.h>
#include <String.h>
#include <time.h>

int g_nInputNodes=1;
int g_nOutputNodes=1;
int g_nStepCount=0;
float Mpart = 0;
double Partv, Partvmp;
double Part, Partp, Dg;
float Voc =18.6;
float Loops = 1;
float Preal;
float Mpartg=0;
float Lop=0;
float P =0;
float i;
double Pmax, Pmaxa, Preal_old;
double Va=0, Vm, Vp=0;
float j, k;
float ch;
float Ta=1e-5;
double Pmp=0.1, Pp=0, Prueba; //Paso malla pequeña
float t_old=0;
```

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

```
double *Mat, *Matp;
g_nInputNodes = nInputCount;
g_nOutputNodes = nOutputCount;
// In case of error, uncomment next two lines. Set *pnError to 1 and copy Error
message to szErrorMsg
/*pnError=1;
strcpy(szErrorMsg, "Place Error description here.");
Part =5;
Partp=5;
Pmax=0;
Pmaxa=0;
Mat=(double*)malloc(Part*sizeof(double));
Matp=(double*)malloc(50*sizeof(double));
Partv=Voc/Part;
Part=Part-1;
j=0;
k=0;
ch=0;
    for(i=0;i<=Part;i++)
    {
        Mat[i]=Partv*i+Partv;
    }

Partvmp=Partp/5; //Voltage partículas malla pequeña
g_nStepCount++;
```

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

```
Preal = in[0];

if(ch==0)
{

    if(Preal>Preal_old)
    {
        Preal_old=Preal;
        Vm=Va;
    }

    if(t-t_old>Ta)
    {
        Va=Va+Voc/Part;
        if(Va>Voc)
        {ch=1;
        Va=Vm;
        }
        t_old=t;
    }

if(Va>Voc)
Va=Voc;
if(Va<0)
Va=0;

out[0]=Va;
}
```

**Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de
potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control
multi-modelo**

```
////////////////////////////////////  
if(ch==1)  
{  
  
    if(Preal>Preal_old)  
    {  
        Preal_old=Preal;  
        Vm=Va;  
    }  
    if(t-t_old>Ta)  
    {  
        Va=Vm-5*Pmp+Pp;  
        Pp=Pp+Pmp;  
        if(Va>Vm+Pmp*15)  
        {ch=2;}  
        t_old=t;  
    }  
  
    if(Va>Voc)  
    Va=Voc;  
    if(Va<0)  
    Va=0;  
  
    out[0]=Va;
```

**Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de
potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control
multi-modelo**

```
}

if(ch==2)
{
out[0]=Vm;
    if(t-t_old>Ta)
    {t_old=t;}
    if(abs(Preal-Preal_old)>6)
    {
    Preal_old=0;
    Va=0;
    Pp=0;
    Vm=0;
    Va=0;
    ch=0;
    }
}

out[1]=ch;
```

BIBLIOGRAFÍA

- Accarino, J., Petrone, G., Ramos-Paja, C. a., & Spagnuolo, G. (2013). Symbolic algebra for the calculation of the series and parallel resistances in PV module model. *4th International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, ICCEP 2013*, 62–66. <http://doi.org/10.1109/ICCEP.2013.6586967>
- Adly, M. (2011). An Optimized Fuzzy Maximum Power Point Tracker for Stand Alone Photovoltaic Systems : Ant Colony Approach. *IEEE*, (D), 113–119.
- Alabedin, a. M. Z., El-Saadany, E. F., & Salama, M. M. a. (2011). Maximum power point tracking for Photovoltaic systems using fuzzy logic and artificial neural networks. *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1–9. <http://doi.org/10.1109/PES.2011.6039690>
- Alajmi, B. N., Ahmed, K. H., Finney, S. J., & Williams, B. W. (2011). Fuzzy-Logic-Control Approach of a Modified Hill-Climbing Method for Maximum Power Point in Microgrid Standalone Photovoltaic System. *IEEE*, 26(4), 1022–1030. <http://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2090903>
- Amrouche, B., Guessoum, A., & Belhamel, M. (2012). A simple behavioural model for solar module electric characteristics based on the first order system step response for MPPT study and comparison. *Applied Energy*, 91(1), 395–404. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.09.036>
- Arulmurugan, R., & Suthanthira Vanitha, N. (2013). Intelligent fuzzy MPPT controller using analysis of DC to DC novel buck converter for photovoltaic energy system applications. *2013 International Conference on Pattern Recognition, Informatics and Mobile Engineering*, (2), 225–231. <http://doi.org/10.1109/ICPRIME.2013.6496477>
- Bastidas-Rodriguez, J.D. Petrone, G. Ramos, C.A. Spagnuolo, G. (2014). Parameter calculation of photovoltaic modules using a genetic algorithm (pp. 19–22).
- Batzelis, E. I., Routsolias, I. a., & Papathanassiou, S. a. (2014). An explicit pv string model based on the lambert w function and simplified mpp

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

- expressions for operation under partial shading. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(1), 301–312.
<http://doi.org/10.1109/TSTE.2013.2282168>
- Besheer, A. H., & Adl, M. Y. (2012). Ant Colony System Based PI Maximum Power Point Tracking for Stand Alone Photovoltaic System. *IEEE*, 693–698.
- Bhatnagar, P., & Nema, R. K. (2013). Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 224–241.
<http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.011>
- Bianconi, E., Calvente, J., Giral, R., Mamarelis, E., Petrone, G., Ramos-Paja, C. A., ... Vitelli, M. (2013). Perturb and Observe MPPT algorithm with a current controller based on the sliding mode. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 44(1), 346–356.
<http://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.07.046>
- Chekired, F., Mellit, a., Kalogirou, S. a., & Larbes, C. (2014). Intelligent maximum power point trackers for photovoltaic applications using FPGA chip: A comparative study. *Solar Energy*, 101, 83–99.
<http://doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.026>
- Chen, L., Tsai, C., Lin, Y., Lai, Y., & Member, S. (2010). A Biological Swarm Chasing Algorithm for Tracking the PV Maximum Power Point, 25(2), 484–493.
- Chin, C. S., Neelakantan, P., Yoong, H. P., Yang, S. S., & Teo, K. T. K. (2011). Maximum Power Point Tracking for PV Array Under Partially Shaded Conditions. *2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, 72–77. <http://doi.org/10.1109/CICSyN.2011.27>
- Chiu, C.-S. (2010). T-S Fuzzy Maximum Power Point Tracking Control of Solar Power Generation Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(4), 1123–1132.
<http://doi.org/10.1109/TEC.2010.2041551>

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

- Conditions, P., Koutroulis, E., & Blaabjerg, F. (2012). A New Technique for Tracking the Global Maximum Power Point of PV Arrays Operating Under. *IEEE*, 2(2), 184–190.
- Energía, M. de minas y. (2010). Ministerio de minas y energía.pdf.
- Energía, R. de C. M. de M. y. (2013). Proyección de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia.
- Farivar, G M, M. (2012). An Improved FLC Algorithm for Tracking Maximum Power Point in Photovoltaic Systems. *IEEE*, 342–347.
- Fu, Q., & Tong, N. (2012). Research on MPPT Technique in Photovoltaic Power Generation System. *2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*, 394–398. <http://doi.org/10.1109/ICCSEE.2012.346>
- Gao, L., Dougal, R. A., & Member, S. (2009). Parallel-Connected Solar PV System to Address Partial and Rapidly Fluctuating Shadow Conditions Parallel-Connected Solar PV System to Address Partial and Rapidly Fluctuating Shadow Conditions. *IEEE*, 56, 1548–1556.
- Gonzalez, D., Carrejo, C., & Ci, R. M. P. P. R. (2013). Predictive Control of a Photovoltaic Dc / Dc Converter.
- Gonzalez Montoya, D., Ramos, C., & Giral, R. (2015). Improved design of sliding mode controllers based on the requirements of MPPT techniques. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 8993(JANUARY), 1–1. <http://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2397831>
- Hu, J., Zhang, J., & Wu, H. (2009a). A novel MPPT control algorithm based on numerical calculation for PV generation systems. *2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 3, 2103–2107. <http://doi.org/10.1109/IPEMC.2009.5157746>
- Hu, J., Zhang, J., & Wu, H. (2009b). A novel MPPT control algorithm based on numerical calculation for PV generation systems. *2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 3, 2103–2107. <http://doi.org/10.1109/IPEMC.2009.5157746>

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

- Iowa, F. A., Standard, R. F., Announcements, I., Energy, C., Drops, S., Lowest, R., & Since, L. (2015). Renewable Energy News & Information.
- Ishaque, K., & Salam, Z. (2011). A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model. *Solar Energy*.
- Ishaque, K., & Salam, Z. (2013). A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 475–488. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.032>
- Ishaque, K., Salam, Z., Amjad, M., & Mekhilef, S. (2012). An Improved Particle Swarm Optimization (PSO)–Based MPPT for PV With Reduced Steady-State Oscillation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(8), 3627–3638. <http://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2185713>
- Ishaque, K., Salam, Z., Mekhilef, S., & Shamsudin, A. (2012). Parameter extraction of solar photovoltaic modules using penalty-based differential evolution. *Applied Energy*, 99, 297–308. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.017>
- Ishaque, K., Salam, Z., & Taheri, H. (2011). Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(2), 586–594. <http://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.09.023>
- Ishaque, K., Salam, Z., Taheri, H., & Shamsudin, A. (2011). A critical evaluation of EA computational methods for Photovoltaic cell parameter extraction based on two diode model. *Solar Energy*, 85(9), 1768–1779. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.015>
- Ishaque, K., Salam, Z., Taheri, H., & Syafaruddin. (2011). Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(7), 1613–1626. <http://doi.org/10.1016/j.simpat.2011.04.005>
- Jiang, L. L., Maskell, D. L., & Patra, J. C. (2013a). A novel ant colony optimization-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under partially shaded conditions. *Energy and Buildings*, 58, 227–236. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.001>

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

- Jiang, L. L., Maskell, D. L., & Patra, J. C. (2013b). Parameter estimation of solar cells and modules using an improved adaptive differential evolution algorithm. *Applied Energy*, 112, 185–193. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.004>
- Jiang, L. L., Maskell, D. L., & Patra, J. C. (2013c). Parameter estimation of solar cells and modules using an improved adaptive differential evolution algorithm. *Applied Energy*, 112, 185–193. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.004>
- Jiang, L. L., Nayanisiri, D. R., Maskell, D. L., & Vilathgamuwa, D. M. (2013). A simple and efficient hybrid maximum power point tracking method for PV systems under partially shaded condition. *IEEE Industrial Electronics Society*, 1513–1518. <http://doi.org/10.1109/IECON.2013.6699357>
- Jie, L., & Ziran, C. (2011). Research on the MPPT algorithms of photovoltaic system based on PV neural network, 1851–1854.
- K, G., S, G., & T, S. (2013). Design of Intelligent Solar Power System Using PSO Based MPPT with Automatic Switching between ON grid and OFF Grid ALGORITHM. *International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electrics (IJETEE)*, 1(1), 95–97.
- Kang, S., Ko, J., Choi, J., Jang, M., Mun, J., Lee, J., & Chung, D. (2011). A Novel MPPT Control of photovoltaic system using FLC algorithm. *ICROS'11 International Conference on Control, Automation and Systems.*, 434–439.
- Kish, G. J., Lee, J. J., & Lehn, P. W. (2012). Modelling and control of photovoltaic panels utilising the incremental conductance method for maximum power point tracking. *IET Renewable Power Generation*, 6(4), 259. <http://doi.org/10.1049/iet-rpg.2011.0052>
- Lin, W.-M., Hong, C.-M., & Chen, C.-H. (2011). Neural-Network-Based MPPT Control of a Stand-Alone Hybrid Power Generation System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(12), 3571–3581. <http://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2161775>
- Liu, Y., Li, M., Ji, X., Luo, X., Wang, M., & Zhang, Y. (2014). A comparative study of the maximum power point tracking methods for PV systems.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

Energy Conversion and Management, 85, 809–816.
<http://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.049>

Mahammad, A. K., Saon, S., & Chee, W. S. (2013). Development of Optimum Controller based on MPPT for Photovoltaic System during Shading Condition. *Procedia Engineering*, 53, 337–346.
<http://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.044>

Mamarelis, E., Petrone, G., & Spagnuolo, G. (2014). A two-steps algorithm improving the P&O steady state MPPT efficiency. *Applied Energy*, 113, 414–421.
<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.022>

Martinez Salamero, L., Cid-Pastor, a., El Aroudi, a., Giral, R., & Calvente, J. (2009). Modelado y Control de Convertidores Conmutados Continua-Continua: Una perspectiva Tutorial. *Revista Iberoamericana de Automática E Informática Industrial RIAI*, 6(4), 5–20.
[http://doi.org/10.1016/S1697-7912\(09\)70104-9](http://doi.org/10.1016/S1697-7912(09)70104-9)

Masoum, M. A. S., & Member, S. (2008). Voltage and Current Based MPPT of Solar Arrays under Variable Insolation and Temperature Conditions. *IEEE*, (2).

Molina, M. G., Mercado, P. E., & Juan, S. (2008). Estrategia de control para maximizar la potencia extraída de aerogeneradores de velocidad variable conectados a la red eléctrica. *Avances En Energía Renovable Y Medio Ambiente*, 12, 65–72.

Moradi, M. H., & Reisi, A. R. (2011). A hybrid maximum power point tracking method for photovoltaic systems. *Solar Energy*, 85(11), 2965–2976.
<http://doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.036>

Nguyen, D. D., & Lehman, B. (2009). Performance evaluation of solar photovoltaic arrays including shadow effects using neural network. *IEEE*, 3357–3362. <http://doi.org/10.1109/ECCE.2009.5316451>

Nguyen, T. L., Low, K., & Member, S. (2010). A Global Maximum Power Point Tracking Scheme Employing DIRECT Search Algorithm for Photovoltaic Systems. *IEEE*, 57(10), 3456–3467.

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

- Papaioannou, I. T., & Purvins, A. (2012). Mathematical and graphical approach for maximum power point modelling. *Applied Energy*, 91(1), 59–66. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.09.005>
- República, L. (2013). Colombia, un mercado con potencial en energía solar | La República.
- Salam, Z., Ahmed, J., & Merugu, B. S. (2013a). The application of soft computing methods for MPPT of PV system: A technological and status review. *Applied Energy*, 107, 135–148. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.008>
- Salam, Z., Ahmed, J., & Merugu, B. S. (2013b). The application of soft computing methods for MPPT of PV system: A technological and status review. *Applied Energy*, 107, 135–148. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.008>
- Sayal, A. (2012). MPPT Techniques for Photovoltaic System under Uniform Insolation and Partial Shading Conditions. *IEEE*, (2).
- Solar, B. (1997). MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules. Retrieved from <http://www.sandia.gov/pv/docs/PDF/KINGREL.PDF> <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Photovoltaic+module+and+array+performance+characterization+methods+for+all+system+operating+conditions#0>
- Soon, J. J., Low, K., & Member, S. (2012). Photovoltaic Model Identification Using Particle Swarm Optimization With Inverse Barrier Constraint. *IEEE*, 27(9), 3975–3983.
- Taheri, H., Salam, Z., & Ishaque, K. (2010). A Novel Maximum Power Point Tracking Control of Photovoltaic System Under Partial and Rapidly Fluctuating Shadow Conditions Using Differential Evolution. *IEEE*, (Isiea), 82–87.
- Taheri, S., Taheri, H., Salam, Z., Ishaque, K., & Hemmatjou, H. (2012). Modified Maximum Power Point tracking (MPPT) of grid-connected PV system under partial shading conditions. *2012 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 1–4. <http://doi.org/10.1109/CCECE.2012.6334835>

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

- Tang, L., Xul, W., Zengl, C., Member, S., & Member, S. (2012). One Novel Variable Step-Size MPPT Algorithm for Photovoltaic Power Generation. *IEEE*, 5750–5755.
- Trejos, A., Gonzalez, D., & Ramos-Paja, C. A. (2012). Modeling of step-up grid-connected photovoltaic systems for control purposes. *Energies*, 5(6), 1900–1926. <http://doi.org/10.3390/en5061900>
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R. (2009). Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), 1198–1208. <http://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>
- Xiao, W., Elnosh, A., Khadkikar, V., & Zeineldin, H. (2011). Overview of maximum power point tracking technologies for photovoltaic power systems. *IEEE Industrial Electronics Society*, 3900–3905. <http://doi.org/10.1109/IECON.2011.6119946>
- Zagrouba, M., Sellami, a., Bouaïcha, M., & Ksouri, M. (2010a). Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms: Application to maximum power extraction. *Solar Energy*, 84(5), 860–866. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2010.02.012>
- Zagrouba, M., Sellami, a., Bouaïcha, M., & Ksouri, M. (2010b). Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms: Application to maximum power extraction. *Solar Energy*, 84(5), 860–866. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2010.02.012>
- Zhang, J., & Guo, F. (2009). The Study in Photovoltaic Control System Based on FPGA. *2009 International Conference on Research Challenges in Computer Science*, 172–173. <http://doi.org/10.1109/ICRCCS.2009.51>
- Zhang, Q., Hu, C., Chen, L., Amirahmadi, A., Kutkut, N., Shen, Z. J., & Batarseh, I. (2014). A center point iteration MPPT Method with application on the frequency-modulated LLC microinverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(3), 1262–1274. <http://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2262806>
- Zhang, W. D., & Sun, Y. X. (1996). Modified Smith Predictor for Controlling Integrator/Time Delay Processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 35(8), 2769–2772. <http://doi.org/10.1021/ie950664v>

Metodología para optimizar el seguimiento del máximo punto de potencia de los generadores fotovoltaicos usando técnicas de control multi-modelo

Zhou, L., Chen, Y., Guo, K., & Jia, F. (2011). New Approach for MPPT Control of Photovoltaic Chaotic Search. *IEEE*, 26(4), 1038–1048.

Publicaciones que ha generado este trabajo

Artículo 1: Estimación de los parámetros de un modelo de una celda fotovoltaica utilizando un algoritmo de optimización de búsqueda de patrones, presentado y aceptado en la revista Ingenio Magno, Issn 2145-9282.

Artículo 2: Estimación de los parámetros de un modelo de una celda fotovoltaica usando un algoritmo de optimización Improved Pattern Search, Artículo en proceso de publicación.

Artículo 3: Análisis de la estabilidad de un convertidor buck multicelular de dos celdas, presentado, aceptado y publicado en la revista MUTIS, 2014, Issn 2256-1498.

Artículo 4: Comparación de algoritmos de optimización en la búsqueda del MPP de un PV, Artículo en proceso de publicación.