

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN ALGORITMO DE CONTROL DE POTENCIA
DE SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICOS BASADO EN LA TÉCNICA
P&O - MPPT (PERTURB AND OBSERVE MAXIMUM POWER POINT TRACKING)**

**ERWIN ALEXANDER VARGAS BERNAL
JOSE LUIS DUARTE CARRASCAL**



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

2015

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN ALGORITMO DE CONTROL DE POTENCIA
DE SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICOS BASADO EN LA TÉCNICA
P&O - MPPT (PERTURB AND OBSERVE MAXIMUM POWER POINT TRACKING)**

ERWIN ALEXANDER VARGAS BERNAL

JOSE LUIS DUARTE CARRASCAL

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros Electricistas

Director

JAVIER ENRIQUE SOLANO MARTÍNEZ

Ingeniero Electricista, Ph.D

Codirector

JOHN EDINSON ARCHILA VALDERRAMA

Ingeniero Electrónico

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

2015

*Dice Sartre que cada hombre es lo que hace con lo que hicieron de él, es por eso que ésta meta no se hubiera alcanzado sin el apoyo incondicional de mi madre, Martha Bernal. Gracias mamá por todo lo que hiciste por mí, he sido testigo de tus enormes esfuerzos y los trabajos que has pasado en medio de las dificultades, para que hoy me convierta en Ingeniero Electricista.
Este logro no es mío, sino tuyo.*

*A mi hermano Wilmer Vargas, los dos hemos aprendido juntos a afrontar la vida, y ha estado conmigo en las buenas y en las malas.
Conviértete en un gran ejemplo para tu hija.*

A mi abuela Mercedes, mis tías, y demás miembros de mi familia que me han colaborado y acompañado en este largo trayecto.

A todos los miembros del club “el garaje”, con quienes compartí las mejores experiencias en mi vida universitaria.

A mi compañero de trabajo de grado y al director del mismo, por su entrega en la realización de este proyecto.

A todas y cada una de las personas que han aportado a mi aprendizaje de vida, es dedicado este trabajo de grado.

Erwin Alexander Vargas Bernal.

A Dios, por darme una segunda oportunidad para seguir luchando por este gran reto, guiándome siempre por el camino del bien.

A mi mami querida, Zorayda Carrascal, por apoyarme incondicionalmente durante el trasegar de mi vida, inclusive en los momentos más difíciles, buscando siempre lo mejor para sus bebés.

A mi papá, Rafael Duarte, por enseñarme a pescar en el mar de la vida y que nada es gratis, todo requiere esfuerzo y dedicación.

A mis hermanos, Lala, peyo y Juancho, sin su apoyo nada de esto habría sido posible.

A mis bebés, Ariana y Aylin, por su cariño mostrado en mis escasas visitas.

A mi dulce Karol Melissa, quien ha sabido dar equilibrio a mi falta de cordura.

A todos mis amigos, en especial los de “el garaje”, por el apoyo colaborativo; ¡vos sabés!

Jose Luis Duarte Carrascal.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. OBJETIVO GENERAL	16
1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. DESCRIPCIÓN DE TÉCNICAS DE CONTROL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	17
2.1. MÉTODO DE LA TABLA DE CONSULTA (LOOK-UP TABLE METHOD).	17
2.2. MÉTODO GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN VOLTAJE (VOLTAGE BASED PHOTOVOLTAIC GENERATOR METHOD).....	17
2.3. MÉTODO GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN CORRIENTE (CURRENT BASED PHOTOVOLTAIC GENERATOR METHOD).....	18
2.4. MÉTODO GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN VOLTAJE UTILIZANDO CELDAS DE PRUEBA (VOLTAGE BASED PHOTOVOLTAIC GENERATOR METHOD USING TEST CELL).....	18
2.5. EL MPP A TRAVÉS DE UN PARÁMETRO DE SALIDA (THE MPP VIA OUTPUT PARAMETER).....	18
2.6. MÉTODO DE CONDUCTANCIA INCREMENTAL INC (INCREMENTAL CONDUCTANCE METHOD).	18
2.7. MÉTODO DE CONTROL DE LÓGICA DIFUSA (FUZZY LOGIC CONTROL)	19
2.8. MÉTODO DE REDES NEURONALES (NEURAL NETWORK).....	19
2.9. P&O MPPT.....	19
3. PERTURBAR Y OBSERVAR EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (P&O MPPT)	20

3.1. P&O MPPT BÁSICO	20
3.2. IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB Y EN MATLAB SIMULINK.	23
3.2.1 Evaluación del MPPT a condiciones estáticas de irradiancia y temperatura.....	24
3.2.2 Influencia de la variación de ΔV en el MPPT	28
3.3. P&O MPPT MEJORADO.....	32
4 SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA.	36
4.1 REPRESENTACIÓN MACROSCÓPICA ENERGÉTICA	36
4.2 EMR DEL SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO.....	38
4.3 VARIACIÓN DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS	38
4.3.1 Condición climática 1.....	39
4.3.2 Condición climática 2.....	45
4.3.3 Condición climática 3.....	47
5. CONCLUSIONES.....	50
6. RECOMENDACIONES.....	52
REFERENCIAS.....	53
BIBLIOGRAFÍA	56
ANEXOS.....	57

LISTADE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Característica P-V de un módulo fotovoltaico.....	20
Figura 2. Diagrama de flujo técnica P&O MPPT.	22
Figura 3. Característica P-V de un módulo fotovoltaico. (a) Diferentes valores de irradiancia a temperatura constante. (b) Diferentes valores de temperatura a irradiancia constante.	23
Figura 4. Diagrama en Matlab/Simulink del algoritmo P&O MPPT.	24
Figura 5. Características I-V panel SHELL SM55, T = 25 °C.	25
Figura 6. Curva P-V con MPPT G= 1000 W/m ² y T=25 °C, Inicio en zona A.....	26
Figura 7. Curva P-I con MPPT G= 1000 W/m ² y T=25 °C, inicio en zona A.....	26
Figura 8. Característica P-V con MPPT, G= 1000 W/m ² y T=25 °C. Inicio en zona B.....	27
Figura 9. Característica P-I con MPPT, G= 1000 W/m ² y T=25 °C. Inicio en zona B.....	27
Figura 10. Característica V-t MPPT Básico: a) $\Delta V=1$ V; b) $\Delta V=0.1$ V.	29
Figura 11. Característica P-V MPPT Básico, $\Delta V=1$ V; a) vista general; b) zoom zona MPP.	30
Figura 12. Característica P-V MPPT Básico, $\Delta V=0.1$ V; a) vista general; b) zoom zona MPP.	30
Figura 13. Diagrama de flujo técnica P&O MPPT Mejorado.	32
Figura 14. Característica V-t MPPT mejorado.....	33
Figura 15. Característica P-V MPPT Mejorado. (a) Vista general; (b) Zoom zona MPP.	35
Figura 16. Bloques de asignación del formalismo EMR.	37

Figura 17. EMR del sistema de generación implementado.	38
Figura 18. Característica P-t para la condición climática 1.	39
Figura 19. Cambio en característica P-t en condición climática 1. (a) Cambio de 0 a 1000 W/m ² . (b) Cambio de 1000 a 200 W/m ²	40
Figura 20. Característica V-t para la condición climática 1.	41
Figura 21. Característica V-t para el transitorio de la condición climática 1.	42
Figura 22. Característica P-V. Condición climática 1.	43
Figura 23. Oscilación alrededor del MPP. (a) G=1000 W/m ² . (b) G=200 W/m ²	44
Figura 24. Característica P-t para la condición climática 2.	45
Figura 25. Característica V-t. Condición climática 2.	46
Figura 26. Característica P-V. Condición climática 2.	46
Figura 27. Característica P-t. Condición climática 3.	47
Figura 28. Característica V-t. Condición climática 3.	48
Figura 29. Característica P-V. Condición climática 3.	49

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
A. MODELOS EN MATLAB DEL ALGORITMO P&O MPPT, CAPÍTULO 3.....	58
A. 1 Comportamiento algoritmo P&O MPPT.....	58
A. 2 Curvas características I-V panel fotovoltaico SHELL SM55.....	58
A. 3 Inicio bloque MPPT.....	58
A. 4 Bloque algoritmo P&O MPPT básico.....	58
A. 5 Bloque algoritmo P&O MPPT mejorado.....	58
A. 6 Gráfica Tensión vs Tiempo para algoritmo P&O MPPT básico, $\Delta V = 1$ V.....	58
A. 7 Gráfica Tensión vs Tiempo para algoritmo P&O MPPT básico, $\Delta V=0.1$ V....	59
A. 8 Gráficas Potencia vs Tensión para algoritmo P&O MPPT básico, $\Delta V=1$ V... 59	
A. 9 Gráficas Potencia vs Tensión para algoritmo P&O MPPT básico, $\Delta V=0.1$ V 59	
A. 10 Gráfica Tensión vs Tiempo para algoritmo P&O MPPT mejorado.....	59
A. 11 Gráficas Potencia vs Tensión para algoritmo P&O MPPT mejorado.....	59
B. SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACION DE ENERGIA FOTVOLTAICA, CAPITULO 4.....	60
B. 1 Inicio sistema fotovoltaico.....	60
B. 2 Sistema fotovoltaico condición climática 1.....	60
B. 3 Sistema fotovoltaico condición climática 2.....	60
B. 4 Sistema fotovoltaico condición climática 3.....	60
B. 5 Gráficas Potencia vs Tiempo condición climática 1.....	61

B. 6 Gráficas Tensión vs Tiempo condición climática 1.....	61
B. 7 Gráficas Potencia vs Tensión condición climática 1.....	61
B. 8 Gráfica Potencia vs Tiempo condición climática 2.....	61
B. 9 Gráfica Tensión vs Tiempo condición climática 2.....	62
B. 10 Gráfica Potencia vs Tensión condición climática 2.....	62
B. 11 Gráfica Potencia vs Tiempo condición climática 3.....	62
B. 12 Gráfica Tensión vs Tiempo condición climática 3.....	62
B. 13 Gráfica Potencia vs Tensión condición climática 3.....	62
C. CÁLCULO DE LA MEJORA EN LA PRECISIÓN.....	63

RESUMEN

TÍTULO: MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN ALGORITMO DE CONTROL DE POTENCIA DE SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICOS BASADO EN LA TÉCNICA *P&O-MPPT* (*PERTURB AND OBSERVE MAXIMUM POWER POINT TRACKING*).*

AUTORES: ERWIN ALEXANDER VARGAS BERNAL**

JOSE LUIS DUARTE CARRASCAL**

PALABRAS CLAVE:

Micro-redes, sistema de generación fotovoltaica, celdas solares, irradiancia, control de sistemas eléctricos, MPPT, MPP.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo de grado es desarrollado en la modalidad de investigación y tiene como objetivo modelar, simular e implementar, mediante la herramienta computacional Matlab Simulink, un algoritmo de control de potencia de sistemas de generación fotovoltaicos basado en la técnica P&O-MPPT (perturb and observe maximum power point tracking, o en español: perturbar y observar el seguimiento del punto de máxima potencia). Se pretende que la investigación realizada contribuya con el estudio de micro-redes, llevado a cabo por el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL), adscrito a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), de la Universidad Industrial de Santander (UIS), utilizando este modelo como aporte al desarrollo del proyecto de creación de un laboratorio de integración energética, en el Parque Tecnológico Guatiguará del mismo claustro universitario.

Para la metodología de trabajo, se realiza una consulta de los métodos de control existentes y sus características en publicaciones científicas recientes, con el fin de comparar las diferentes alternativas investigadas y seleccionar la opción más adecuada conforme al desempeño y factibilidad de implementación. Posteriormente, se implementan modelos que permitan obtener simulaciones del sistema de control de potencia de un sistema de generación fotovoltaico mediante la técnica P&O MPPT. Se propone un algoritmo mejorado, con el fin de subsanar las deficiencias encontradas en las simulaciones para la generación de potencia.

Finalmente se simula un sistema de generación de energía mediante paneles fotovoltaicos, acoplando el algoritmo propuesto en este trabajo con el modelo de paneles desarrollado en un trabajo de grado que se realiza en paralelo, titulado: "Identificación e implementación de modelos PVP para simulación de un sistema de generación de energía fotovoltaica". Para validar el algoritmo de control, se presentan tres casos de simulación implementados en Matlab Simulink utilizando el formalismo de representación energética macroscópica (EMR).

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Javier Enrique Solano Martínez. Codirector: John Edinson Archila Valderrama.

ABSTRACT

TITLE: MODELING AND SIMULATION OF A CONTROL ALGORITHM OF PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION SYSTEMS BASED ON THE TECHNIQUE P&O-MPPT (PERTURB AND OBSERVE MAXIMUM POWER POINT TRACKING).*

AUTHORS: ERWIN ALEXANDER VARGAS BERNAL **
JOSE LUIS DUARTE CARRASCAL **

KEYWORDS:

Microgrids, photovoltaic generation system, solar cells, irradiance, electrical control systems, MPPT MPP.

DESCRIPTION

The present project is developed in the modality of research, and its principal object is model, simulate and implement by the computational tool Matlab Simulink, a control algorithm of photovoltaic power generation systems based on the P & O-MPPT technique (perturb and observe maximum power point tracking). It is expected the research that contributes the study of Microgrids, conducted by the Research Group of Power Systems (GISEL), attached to the School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications (E3T) of the Industrial University of Santander (UIS), using this model as an effort to the development of the project to create a laboratory for energy integration, in the Guatiguará Technology Park, that belongs to the same university.

To the work methodology, it is required the search of existing control methods and their characteristics in recent scientific publications, in order to compare the different investigated alternatives and select the most suitable option, according to the performance and feasibility of implementation. Subsequently, the simulation models to obtain the power control system of a photovoltaic generation system through the P&O MPPT technique is implemented. It is proposed an improved algorithm, in the interest of repair the faults in the simulations to the power generation.

Finally, a power generation system is simulated by photovoltaic panels, coupling the proposed algorithm in this work with the panel model developed with another project in parallel, named "Identification and implementation of pvp models for simulation of a photovoltaic system power generation". To validate the control algorithm, three cases of simulation in Matlab Simulink are implemented using the formalism of energy macroscopic representation (EMR).

* Bachelor thesis.

** Faculty of physico-mechanical engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Javier Enrique Solano Martínez. Codirector: John Edinson Archila Valderrama

INTRODUCCIÓN

El aumento de la demanda de energía origina sobrecargas, sobrecostos y disminución de la disponibilidad del sistema eléctrico. En el contexto nacional, Colombia es un país con graves problemas de cobertura para las regiones rurales apartadas, donde las energías alternativas presentan una opción factible para suplir las necesidades energéticas a nivel local. Una de las posibles soluciones a este problema, es implementar “micro-redes” basadas en energía solar, dado que en las zonas no interconectadas (ZNI) [1] existe un alto potencial energético presente en la radiación solar, según la UPME e IDEAM [2]. Sin embargo, la optimización en la producción de energía de estos sistemas se presenta como una de las dificultades para su máxima disponibilidad, una vez puesto en servicio el sistema.

Es por esto que el grupo de investigación GISEL de la E³T planea la construcción de un laboratorio de integración energética y micro-redes en las instalaciones del Parque Tecnológico de Guatiguará (Piedecuesta, Santander). Una de las etapas de proyecto es la simulación de una micro-red con diferentes fuentes de energía y almacenamiento de la misma. Este trabajo de grado contribuye con el control de potencia basado en la técnica de perturbación y observación del seguimiento del punto de máxima potencia (P&O-MPPT por sus siglas en inglés), para un sistema de generación fotovoltaica.

En este documento se realiza una revisión bibliográfica correspondiente a las diferentes metodologías de control existentes, con el fin de observar las características de cada una de ellas, para obtener posibles aportes a la técnica a usar. Los fabricantes de paneles presentan la curva “corriente vs tensión (I vs V)” para varios niveles de irradiancia; a partir de esta característica, se obtienen las curvas “Potencia vs Tensión (P vs V)” y “Potencia vs Corriente (P vs I), con las cuales se modela y simula un algoritmo de control de potencia, basado en la técnica mencionada. La validación del modelo de simulación se realiza con los datos del panel fotovoltaico Shell SM55 [3]. Se propone una mejora para el algoritmo descrito y se establecen sus ventajas con respecto al inicial.

Por último, se crean archivos en Matlab/Simulink que exponen el comportamiento del control sobre valores de P, V e I. Adicionalmente, se desarrolla un trabajo conjunto con [4], que busca acoplar este control a un conjunto de modelos de paneles solares y de electrónica de potencia, con otros modelos de micro-redes, mediante el uso de representación energética macroscópica (EMR, por sus siglas en inglés), para la validación del algoritmo propuesto [5].

1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar modelos sencillos (archivos .m, .mdl o similares) en Matlab-Simulink que permitan implementar y simular un algoritmo de control de potencia de sistemas de generación fotovoltaicos basado en la técnica P&O-MPPT (perturb and observe maximum power point tracking).

1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar la bibliografía de técnicas de control de potencia en los sistemas de generación fotovoltaicos.
- Implementar en Matlab una función que permita utilizar la técnica P&O-MPPT (perturb and observe maximum power point tracking) para el seguimiento del punto de máxima potencia en un sistema de generación fotovoltaico.
- Implementar en Matlab Simulink modelos (archivos .m, .mdl o similares) que permitan simular el sistema de control de potencia de un sistema de generación fotovoltaico.

2. DESCRIPCIÓN DE TÉCNICAS DE CONTROL DE SISTEMAS FOTVOLTAICOS

La generación fotovoltaica está ganando una creciente importancia como fuente de energía alternativa. En los sistemas de generación siempre se desea optimizar el costo de la producción de energía y como este no es un caso ajeno, existe prioridad en la búsqueda de métodos de control para generar la mayor cantidad de energía posible.

Varios estudios se han realizado con el fin de encontrar el punto de máxima potencia en sistemas de generación fotovoltaicos. Algunos de los métodos presentados en la literatura se muestran a continuación:

2.1. MÉTODO DE LA TABLA DE CONSULTA (LOOK-UP TABLE METHOD).

En este método, se miden los valores medios de la salida del panel fotovoltaico (tensión y corriente) y se comparan con los valores almacenados en una tabla en el sistema de control, que corresponden a la operación en el punto máximo. Para realizar esto, un controlador de tipo PI ajusta el ciclo de servicio del convertidor DC-DC de acuerdo a los valores preestablecidos de corriente y potencia. Cualquier cambio de la insolación o la carga resulta una perturbación del sistema sintonizado y el controlador PI de nuevo trae el sistema a su punto de funcionamiento óptimo. Aunque el sistema es simple, su desventaja es que requieren gran capacidad de memoria para almacenar los datos, y que estos se toman de un determinado panel fotovoltaico, haciendo que el sistema caiga en errores puesto que los datos recogidos no corresponden a los valores reales del sistema en uso [6]-[8].

2.2. MÉTODO GENERADOR FOTVOLTAICO BASADO EN VOLTAJE (VOLTAGE BASED PHOTOVOLTAIC GENERATOR METHOD).

Se encontró que la tensión en el punto MPP es linealmente proporcional a la tensión de circuito abierto ($V_{MPP} = k * V_{OC}$), donde la constante de proporcionalidad depende de las tecnologías de fabricación, tecnología de celdas solares, factor de llenado y de las condiciones meteorológicas, principalmente. Es difícil elegir un valor óptimo de la constante, sin embargo se han tomado valores de entre 0,65 a 0,8 para módulos fotovoltaicos poli-cristalinos [9].

El método consiste en medir la tensión de circuito abierto mediante la desconexión de la carga, con cierta frecuencia; luego se calcula el valor de tensión en el punto

MPP, y el voltaje de funcionamiento se ajusta al punto de tensión máxima. Este proceso se repite periódicamente [9]. Su desventaja es que hay que interrumpir la operación del sistema, trayendo consigo pérdidas de potencia.

2.3. MÉTODO GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN CORRIENTE (CURRENT BASED PHOTOVOLTAIC GENERATOR METHOD).

Es similar al método anterior, dado que también existe una relación lineal entre la corriente en el MPP y la corriente de cortocircuito ($I_{MPP} = k_2 * I_{SC}$). Así mismo, tiene la misma desventaja, ya que se debe desconectar la carga para poner los terminales de salida en corto circuito [9].

2.4. MÉTODO GENERADOR FOTOVOLTAICO BASADO EN VOLTAJE UTILIZANDO CELDAS DE PRUEBA (VOLTAGE BASED PHOTOVOLTAIC GENERATOR METHOD USING TEST CELL).

Es similar a los métodos descritos en 2.2. y 2.3., excepto en que se usa una celda de prueba adicional (celda piloto), a la cual se le aplica las técnicas, dependiendo de si se trabaja con valores de tensión y/o corriente, evitando así la desconexión de la carga. La desventaja está en que se debe asumir que el comportamiento en corriente y tensión de la celda de prueba es idéntico a las usadas en el generador fotovoltaico; si la suposición es incorrecta, no se extrae la máxima potencia [10].

2.5. EL MPP A TRAVÉS DE UN PARÁMETRO DE SALIDA (THE MPP VIA OUTPUT PARAMETER).

Este método utiliza uno de los parámetros de salida del generador, ya sea tensión o corriente, en vez de usar ambos en la entrada del mismo (salida del panel fotovoltaico) [11], [12].

2.6. MÉTODO DE CONDUCTANCIA INCREMENTAL INC (INCREMENTAL CONDUCTANCE METHOD).

Este método establece que la razón de cambio entre la potencia y la tensión cambia de acuerdo se mueva el MPP, con lo cual, la tensión en bornes del generador se puede ajustar de acuerdo al mismo. La principal ventaja de este algoritmo es que ofrece un buen resultado en condiciones atmosféricas que cambian rápidamente. Tiene como inconveniente que requiere circuito de control complejo [13]-[15].

2.7. MÉTODO DE CONTROL DE LÓGICA DIFUSA (FUZZY LOGIC CONTROL)

Los controladores de lógica difusa tienen las ventajas de trabajar con entradas imprecisas, sin necesidad de un modelo matemático preciso, y la manipulación de no linealidades. Opera básicamente mediante el cambio de variables numéricas por variables lingüísticas, manipulando así las entradas como las salidas [16], [17].

2.8. MÉTODO DE REDES NEURONALES (NEURAL NETWORK)

Este Este método funciona mediante tres capas: de entrada, ocultas y de salida. Las variables de entrada son los parámetros del generador fotovoltaico. La salida es normalmente una o varias señales de referencia, como una señal de ciclo de trabajo utilizado para conducir el convertidor de energía para operar en o cerca del MPP. El punto de trabajo se acerca a la MPP o se aleja del MPP dependiendo de los algoritmos utilizado por la capa oculta y que tan bien la red neuronal ha sido diseñada [18].

2.9. P&O MPPT.

Se trata de un método iterativo de obtención del punto de máxima potencia (MPP), el cual mide las características del generador fotovoltaico, y luego perturba el punto de operación en una dirección determinada. Si la energía proveniente del generador fotovoltaico aumenta, esto significa que el punto de funcionamiento se ha movido hacia el MPP y, por lo tanto, la tensión de funcionamiento debe seguir siendo perturbada en la misma dirección; de lo contrario, el punto de funcionamiento se ha alejado del MPP y la dirección de la perturbación de la tensión de funcionamiento debe invertirse [19]-[24].

Con base en lo anterior, este es el método escogido para realizar el control del seguimiento del punto de máxima potencia, objeto de este trabajo de grado. Según la bibliografía [19], esta técnica es una de las más utilizadas por su fácil implementación.

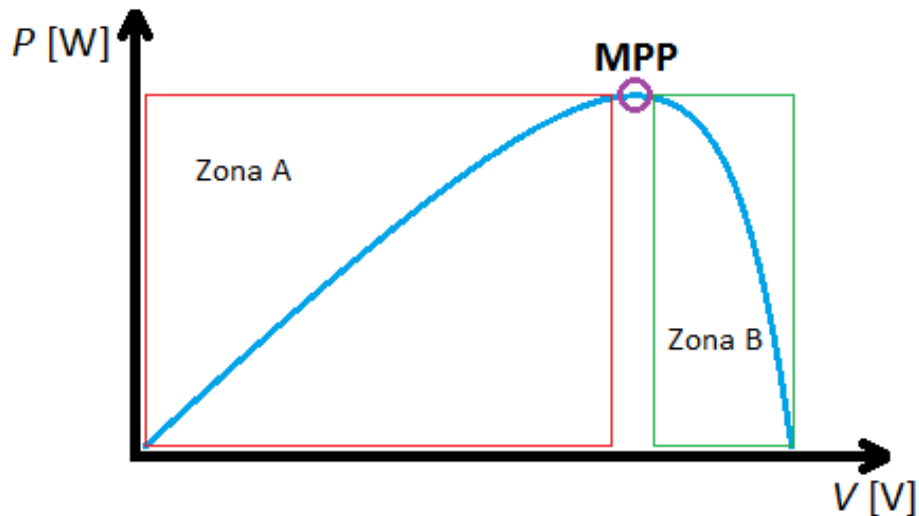
3. PERTURBAR Y OBSERVAR EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (P&O MPPT)

Según la descripción dada en el numeral 2.9, esta es la metodología más utilizada por los autores consultados para realizar el control del seguimiento del punto de máxima potencia en un sistema fotovoltaico. En este capítulo se estudia en detalle la técnica correspondiente a P&O MPPT y se propone una mejora al método básico.

3.1. P&O MPPT BÁSICO

Para comprender su funcionamiento, es necesario observar el plano P-V que se muestra en la Figura 1. La gráfica se divide en tres partes, la *Zona A* donde la pendiente de la curva es positiva, el *MPP*, y la *Zona B* donde la pendiente es negativa.

Figura 1. Característica P-V de un módulo fotovoltaico.



Para la Zona A, la expresión matemática de la pendiente se observa en la ecuación 1.

$$\frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} > 0 \rightarrow \frac{dP}{dV} > 0 \quad (1)$$

Donde I y V son la corriente y la tensión que entrega un módulo fotovoltaico, y P es la potencia generada.

El MPP se alcanza cuando se logra la ecuación 2.

$$\frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} = 0 \rightarrow \frac{dP}{dV} = 0 \quad (2)$$

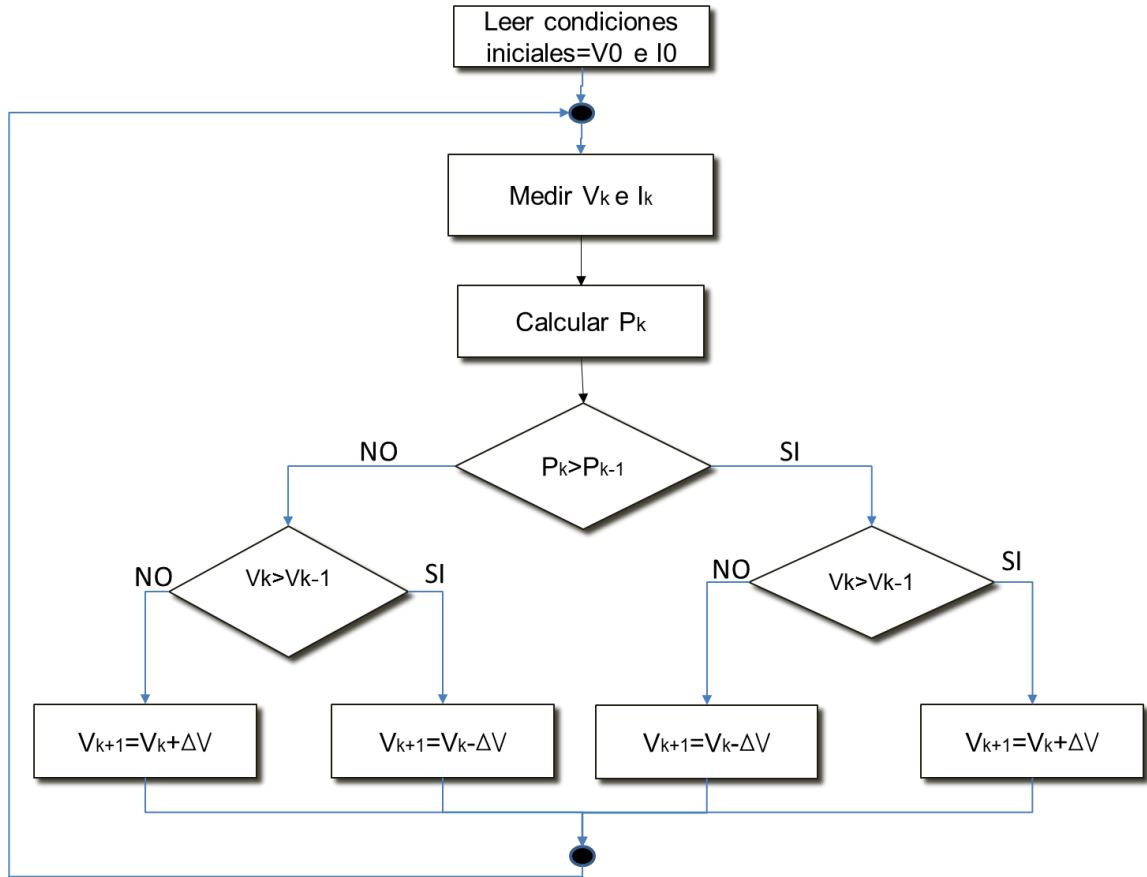
Al contrario de la Zona A, la Zona B se caracteriza por la expresión 3

$$\frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} < 0 \rightarrow \frac{dP}{dV} < 0 \quad (3)$$

Entonces, si el punto de funcionamiento se encuentra dentro de la zona A, la tensión debe perturbarse en sentido positivo, es decir, aumentando la tensión en pasos de ΔV , hasta que la potencia llega al MPP (o lo más cercano posible); pero si se encuentra en la zona B, se debe perturbar en sentido negativo, disminuyendo el voltaje en pasos de ΔV hasta que la potencia llegue al MPP. La forma de identificar en qué zona se encuentra el punto de operación es perturbando en sentido positivo al inicio del proceso y si la potencia aumenta, se dice que el punto de operación se encuentra en la zona A; de lo contrario, se encuentra en la zona B.

Esta técnica de control también puede ser implementada manipulando la corriente que proviene del módulo fotovoltaico. Sin embargo, los diferentes autores recomiendan manipular el voltaje, ya que sin importar qué tipo de convertidor se use, se pretende mantener una tensión estable a la salida del sistema de generación. El diagrama de flujo del algoritmo de control se presenta en la Figura 2 [20].

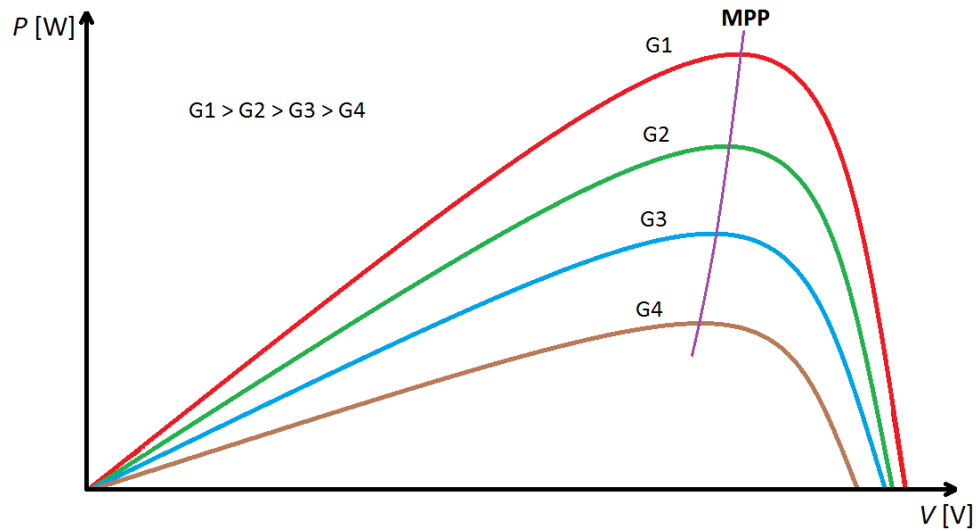
Figura 2. Diagrama de flujo técnica P&O MPPT.



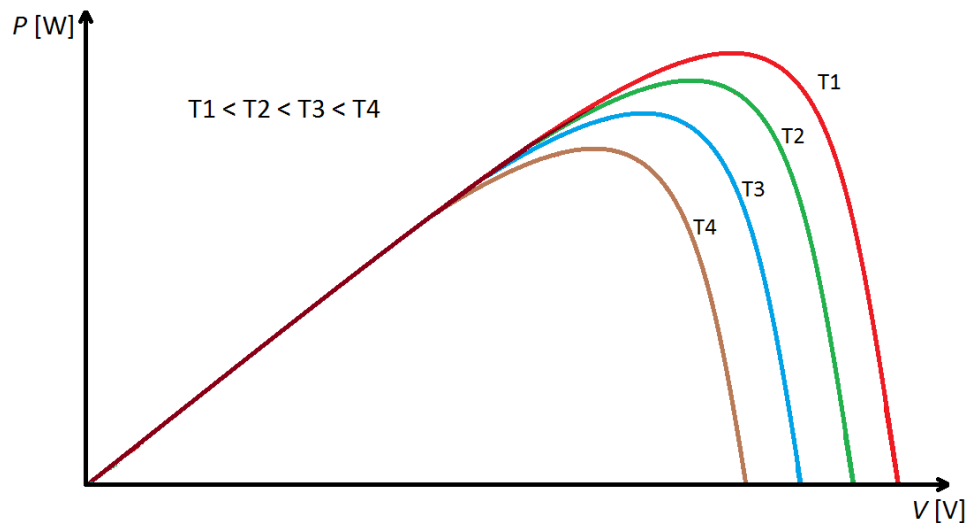
Como la tensión y la corriente generadas por un módulo fotovoltaico dependen de la temperatura (T) y la irradiancia (G) aplicadas a este, la característica P-V no se mantiene constante, cambia conforme varíen estas características. Una vista de este cambio se puede apreciar en la Figura 3, en donde se observan diferentes curvas.

El algoritmo debe ser capaz de seguir el MPP conforme se cambie el nivel de irradiancia.

Figura 3. Característica P-V de un módulo fotovoltaico. (a) Diferentes valores de irradiancia a temperatura constante. (b) Diferentes valores de temperatura a irradiancia constante.



(a)



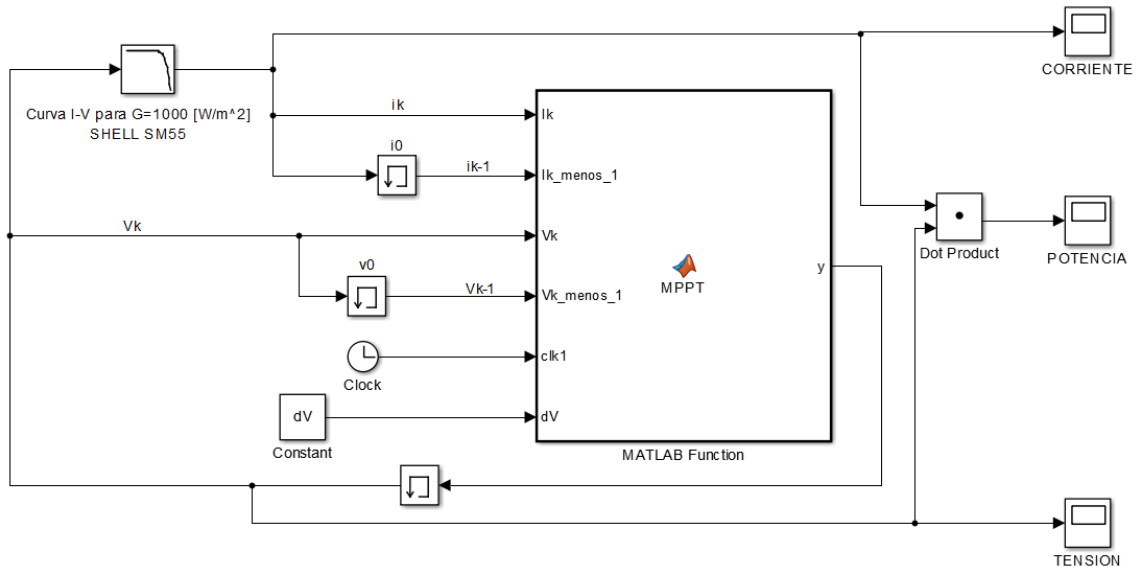
(b)

3.2. IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB Y EN MATLAB SIMULINK.

Uno de los requerimientos de este trabajo de grado es implementar el algoritmo de P&O-MPPT en Matlab Simulink; en este capítulo se lleva a cabo lo anterior. En la Figura 4, se muestra el diagrama de simulación desarrollado, donde se utiliza un bloque funcional “MATLAB-function” para representar el algoritmo, algunos registros

de memoria y un “Look up Table” en el que se encuentran los datos de la curva I vs V del panel Shell SM55 a una temperatura ambiente $T= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3].

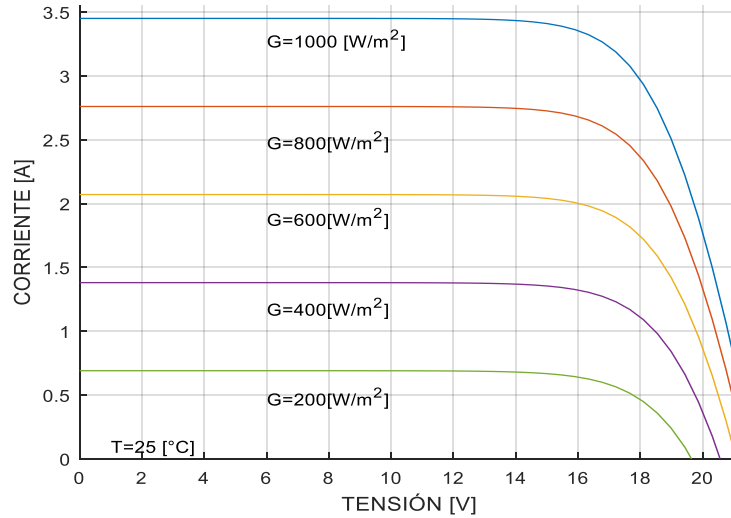
Figura 4. Diagrama en Matlab/Simulink del algoritmo P&O MPPT.



3.2.1 Evaluación del MPPT a condiciones estáticas de irradiancia y temperatura. Para evaluar el comportamiento del algoritmo P&O-MPPT, se utilizan los valores de tensión y corriente del panel utilizado. En la Figura 5, se muestra la característica I-V del panel para distintos valores de irradiancia.

La primera evaluación, se realiza partiendo de la zona A y se lleva a cabo el seguimiento del MPP, como se muestra en las Figura 5 y 6. De la misma manera, se evalúa el algoritmo partiendo de la zona B, tal como se ve en las Figuras 7 y 8. Estos seguimientos se efectúan a una irradiancia constante $G=1000\text{ W/m}^2$.

Figura 5. Características I-V panel SHELL SM55, T = 25 °C.



En la Figura 6, se parte de un punto en la zona A y se perturba la tensión aumentándola en un valor de ΔV , el algoritmo reconoce que la potencia aumenta en ese sentido, por tanto sigue perturbando la tensión en la misma dirección hasta lograr el MPP. Adicionalmente, se obtiene la curva de Potencia vs Corriente en la Figura 7, donde se muestra el respectivo seguimiento del MPP para las mismas condiciones. El seguimiento se realiza de manera inversa, dado que al perturbar en sentido positivo la tensión, se refleja una perturbación en sentido negativo en la corriente. La frecuencia de muestreo y operación utilizada en las diferentes simulaciones, es de 1 kHz.

Figura 6. Curva P-V con MPPT $G= 1000 \text{ W/m}^2$ y $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$, Inicio en zona A.

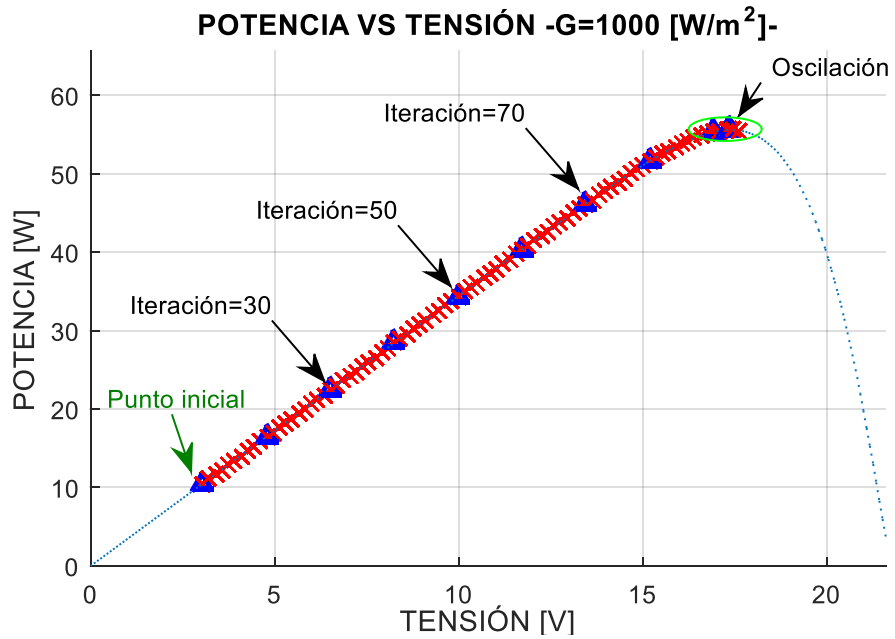
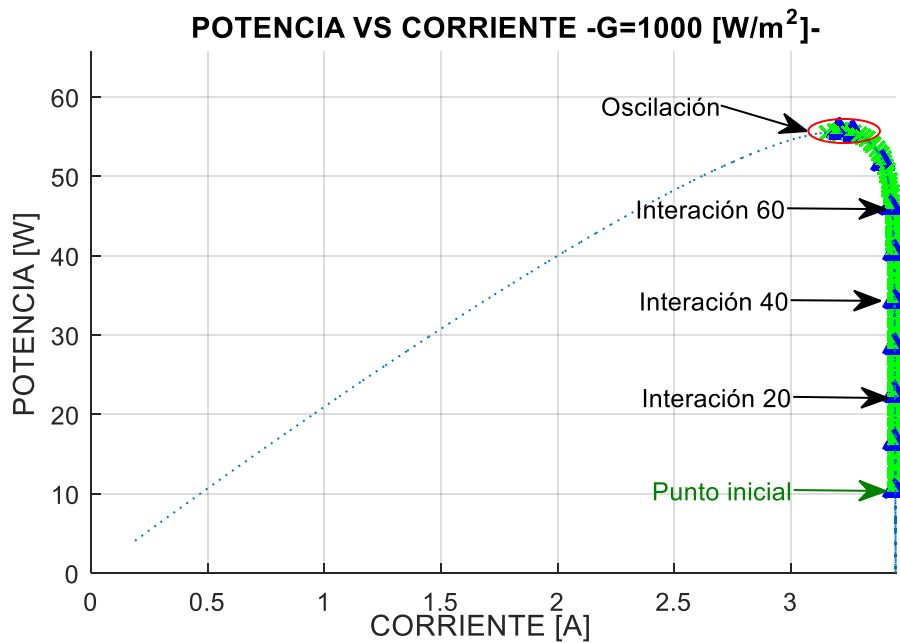


Figura 7. Curva P-I con MPPT $G= 1000 \text{ W/m}^2$ y $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$, inicio en zona A



Al simular el seguimiento del MPP iniciando en la zona B, se ejecuta el procedimiento de la misma manera (perturbando la tensión en sentido positivo), el algoritmo reconoce que en este sentido la potencia disminuye, por lo que

instantáneamente, cambia la dirección y comienza a perturbar la tensión en sentido negativo hasta alcanzar el MPP, tal como se ve en las Figuras 8 y 9 (características P-V y P-I, respectivamente).

Figura 8. Característica P-V con MPPT, $G= 1000 \text{ W/m}^2$ y $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$. Inicio en zona B

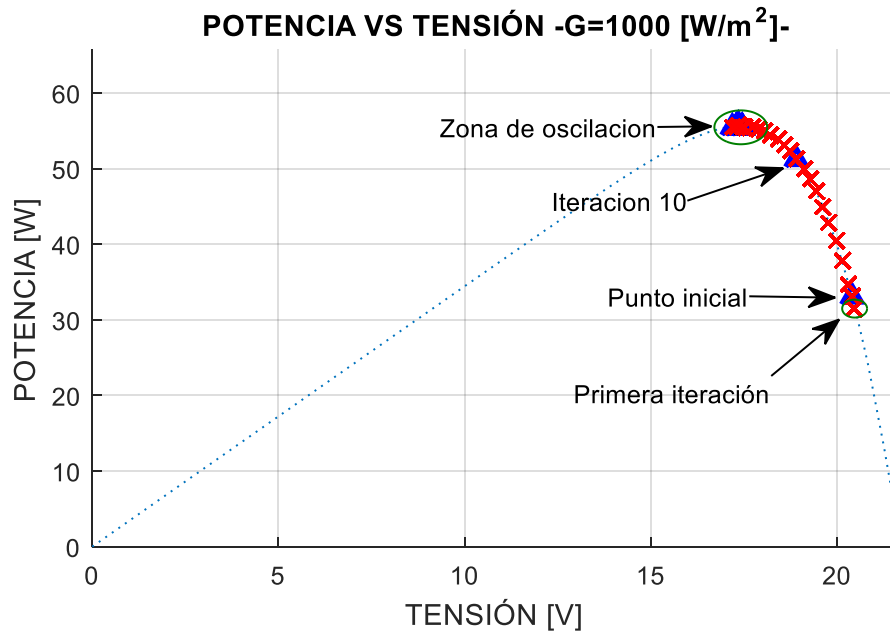
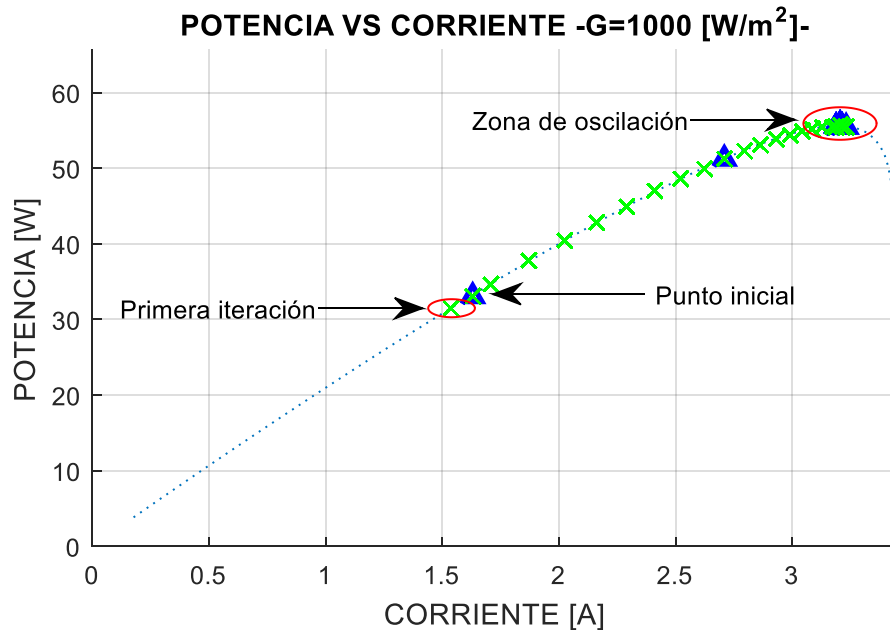


Figura 9. Característica P-I con MPPT, $G= 1000 \text{ W/m}^2$ y $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$. Inicio en zona B.



3.2.2 Influencia de la variación de ΔV en el MPPT Se ha identificado que al variar el valor del ΔV , los resultados para el MPPT cambian debido a la precisión con que se llega al MPP. Para analizar la influencia de la variación del ΔV en los resultados, se simulan dos escenarios en Matlab Simulink.

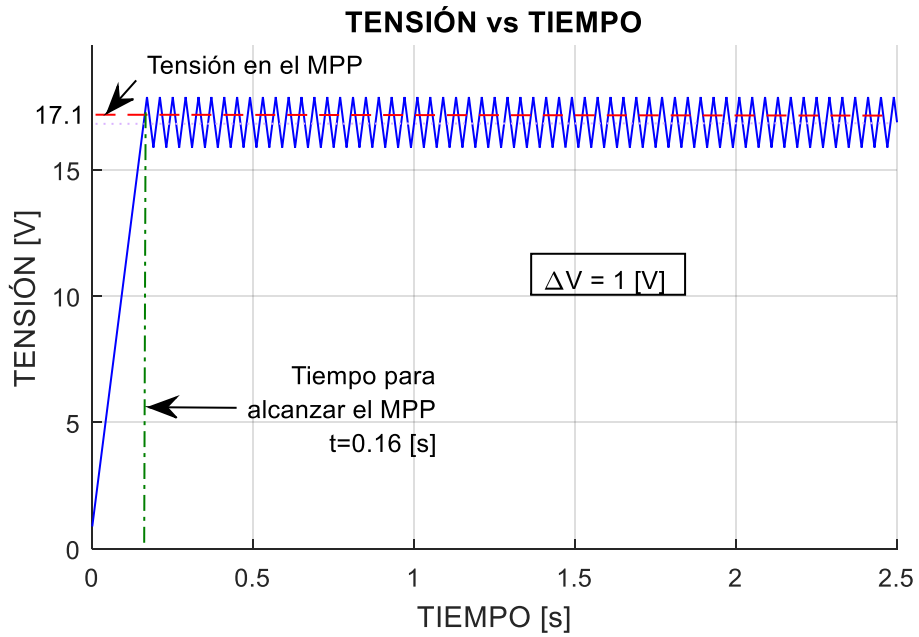
En el primer escenario, se trabaja con $\Delta V = 1 \text{ V}$ o ΔV_1 y en el segundo, $\Delta V = 0.1 \text{ V}$ o ΔV_2 (para este ejemplo).

La Figura 10 muestra el comportamiento Tensión vs. Tiempo del algoritmo para una irradiancia constante $G=1000 \text{ W/m}^2$ y $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$. En la Figura 10(a) se utiliza el valor ΔV_1 , alcanzando de manera rápida el MPP. Como el paso de perturbación es grande (1 V), el punto de operación presenta una oscilación considerable alrededor del MPP. Las oscilaciones no permiten el máximo aprovechamiento de energía disponible del panel fotovoltaico.

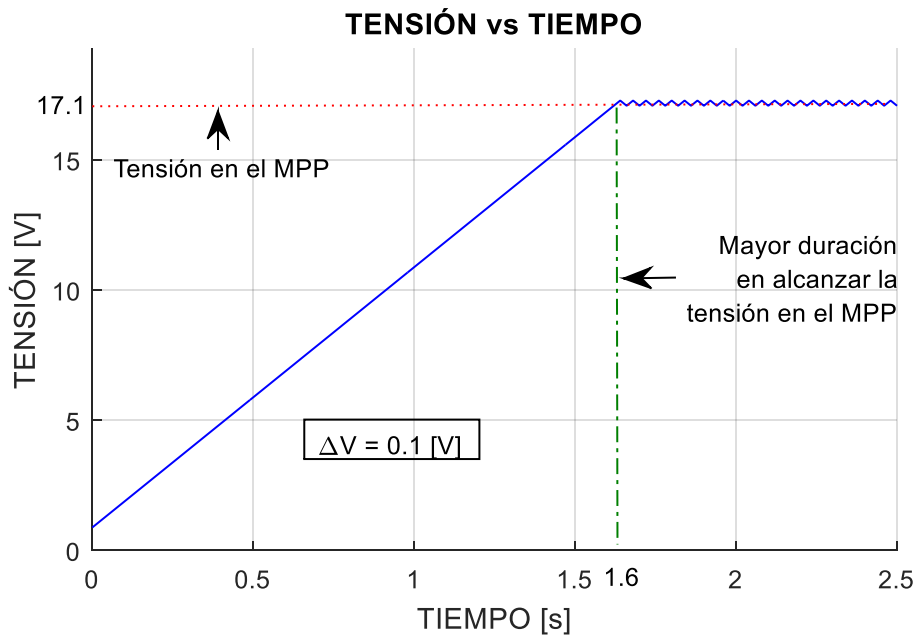
Por otra parte, para la Figura 10(b), el valor de la perturbación es ΔV_2 . Con este valor se logra una mayor precisión y por tanto un aumento en la eficiencia del panel solar; aunque tarda más tiempo en alcanzar dicho punto. Esto último, aumenta el tiempo de respuesta del algoritmo frente a cambios rápidos de irradiancia, disminuyendo así el rendimiento del sistema.

Para explicar lo anterior en la curva P-V, las Figuras 11 y 12 muestran la diferencia de la precisión que se logra al momento de alcanzar el MPP, de acuerdo al valor del ΔV . Para este caso, se logra una mejora de la precisión del 86,38%.

Figura 10. Característica V-t MPPT Básico: a) $\Delta V=1$ V; b) $\Delta V=0.1$ V.



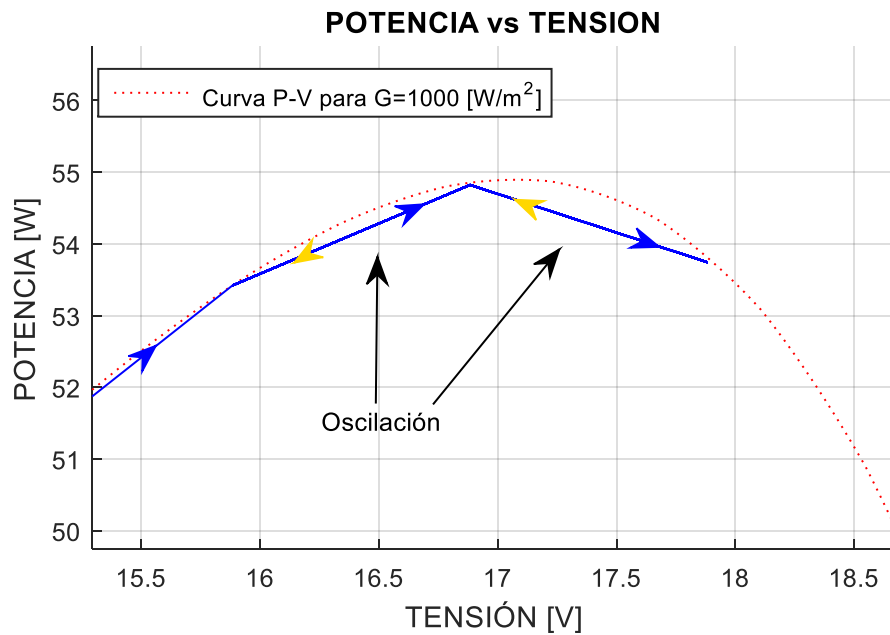
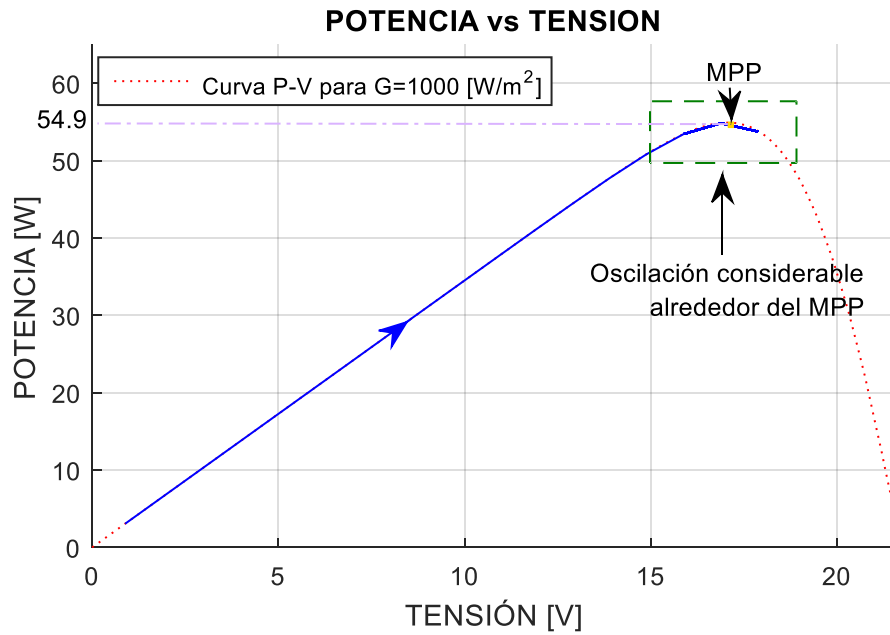
(a)



(b)

Para $\Delta V=1$ V Figura 11(a), la oscilación de potencia se da entre los valores 53.41 y 54.82 W; en la Figura 11(b), se presenta un acercamiento con el fin de visualizar con mayor precisión lo anterior.

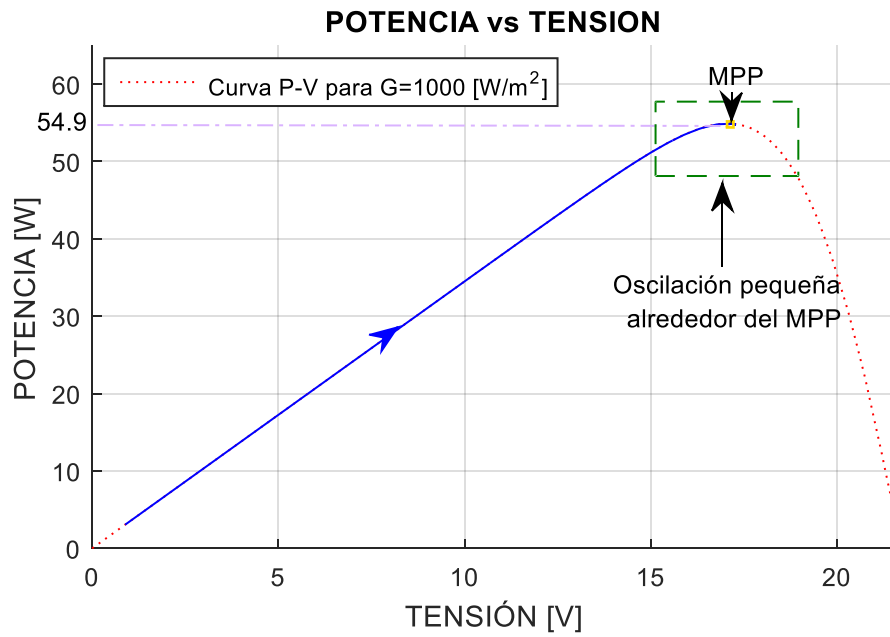
Figura 11. Característica P-V MPPT Básico, $\Delta V=1$ V; a) vista general; b) zoom zona MPP.



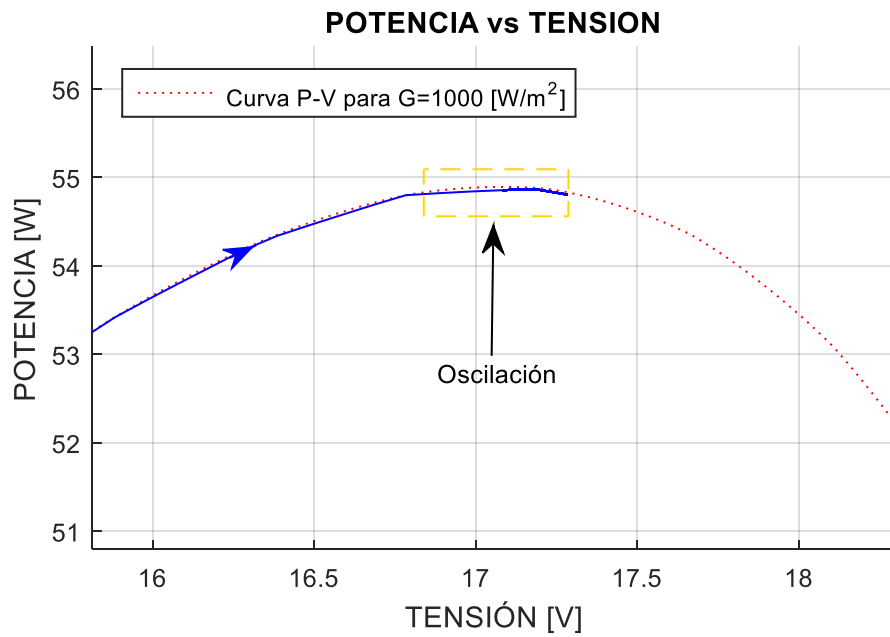
Por otro lado, en la Figura 12 se realiza el mismo análisis de la Figura 11, con la diferencia que en este caso, se emplea un valor de $\Delta V=0.1$ V. La Figura 12(b)

permite observar que la potencia generada está entre los valores de 54.87 y 54.81 W.

Figura 12. Característica P-V MPPT Básico, $\Delta V=0.1$ V; a) vista general; b) zoom zona MPP.



(a)



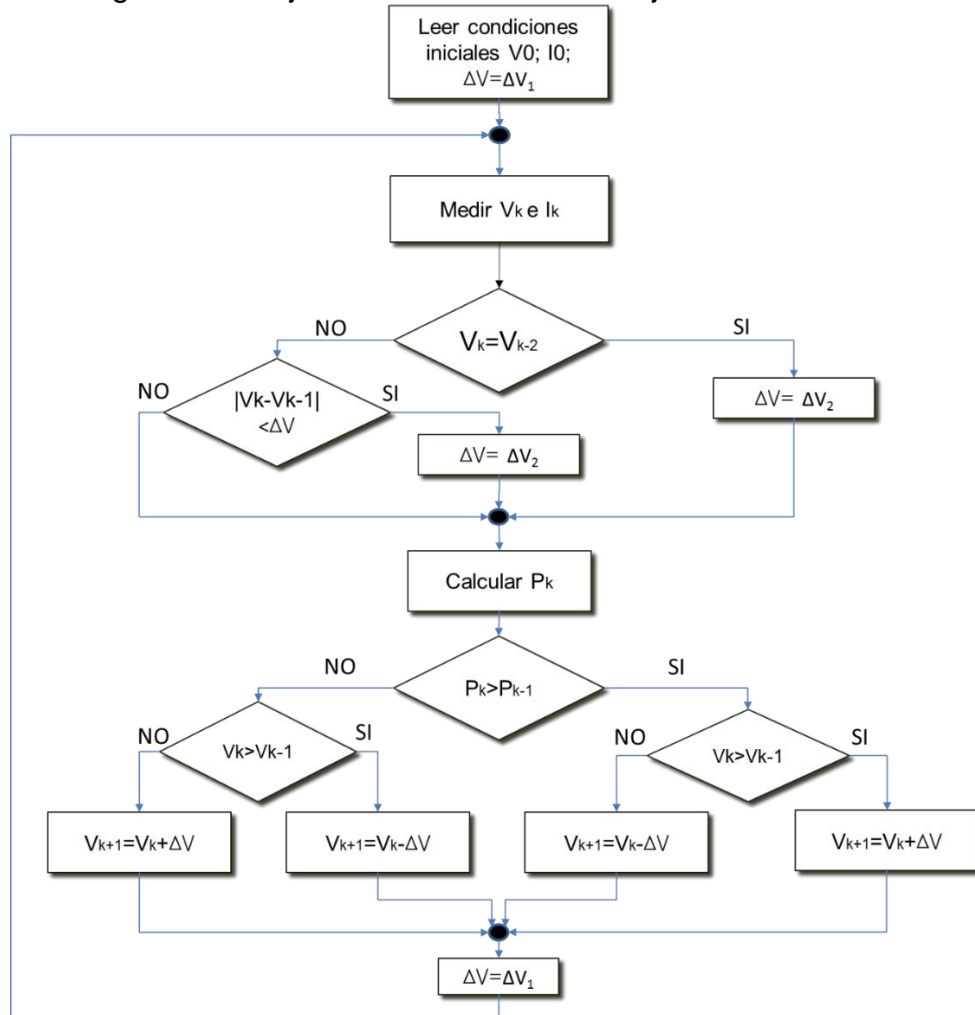
(b)

3.3. P&O MPPT MEJORADO.

Un inconveniente de la técnica P&O MPPT básico es que en estado estacionario, el punto de funcionamiento oscila alrededor del MPP dando lugar a la pérdida de una cierta cantidad de energía disponible. Varias mejoras del algoritmo P&O han sido propuestos con el fin de reducir el número de oscilaciones alrededor del MPP en estado estacionario, como en [21], [22].

Otra desventaja de este, es la disminución en la velocidad de respuesta del algoritmo para cambios en las condiciones atmosféricas y una baja eficiencia durante los días nublados, como se observa en el literal 3.2.2. Para solucionar dichos problemas, en este trabajo de grado se propone el algoritmo presentado en la Figura 13.

Figura 13. Diagrama de flujo técnica P&O MPPT Mejorado.



La mejora propuesta se basa en las ecuaciones (5) y (6).

$$\Delta V_1 \gg \Delta V_2 \quad (5)$$

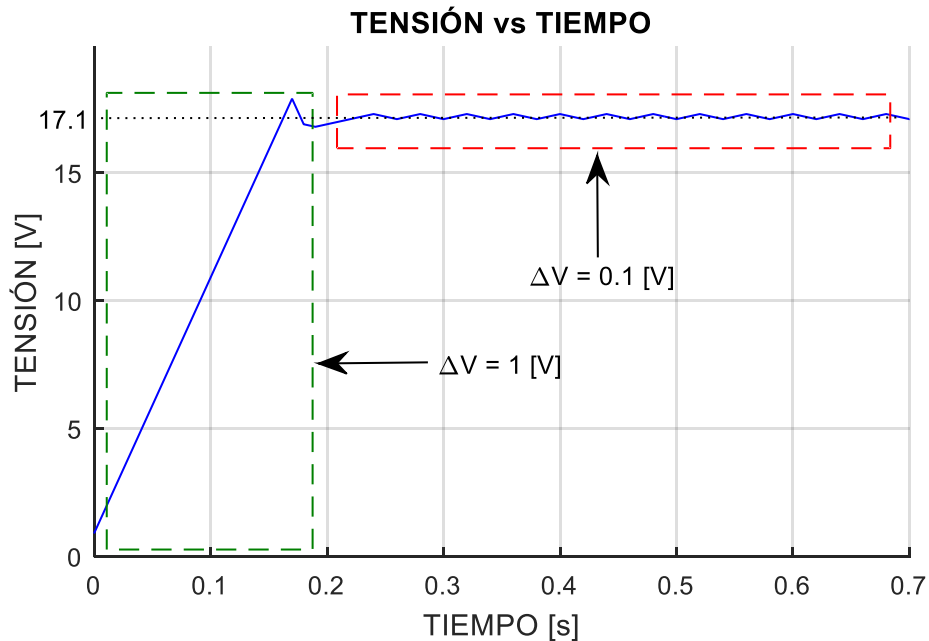
$$V_k = V_{k-2} \quad (6)$$

Inicialmente, se alcanza el MPP con un valor grande de ΔV_1 (por ejemplo 1 V), con el fin de llegar rápidamente a dicho punto. Una vez alcanzada la zona de oscilación, es decir, cuando V_{k-2} es igual V_k , el valor de ΔV , cambia a un valor pequeño ΔV_2 (por ejemplo 10 veces menor 0.1 V), para lograr una mayor precisión al obtener el MPP.

Asimismo, cuando se presenta un cambio de irradiancia, el ΔV debe cambiar a su valor inicial para que permita una respuesta rápida del algoritmo y alcanzar el nuevo MPP y así, garantizar un aprovechamiento máximo de la energía disponible.

La Figura 14 muestra el comportamiento Tensión vs Tiempo para una irradiancia constante $G=1000 \text{ W/m}^2$, en la cual se evidencia el efecto de la mejora cuando se ha alcanzado el MPP.

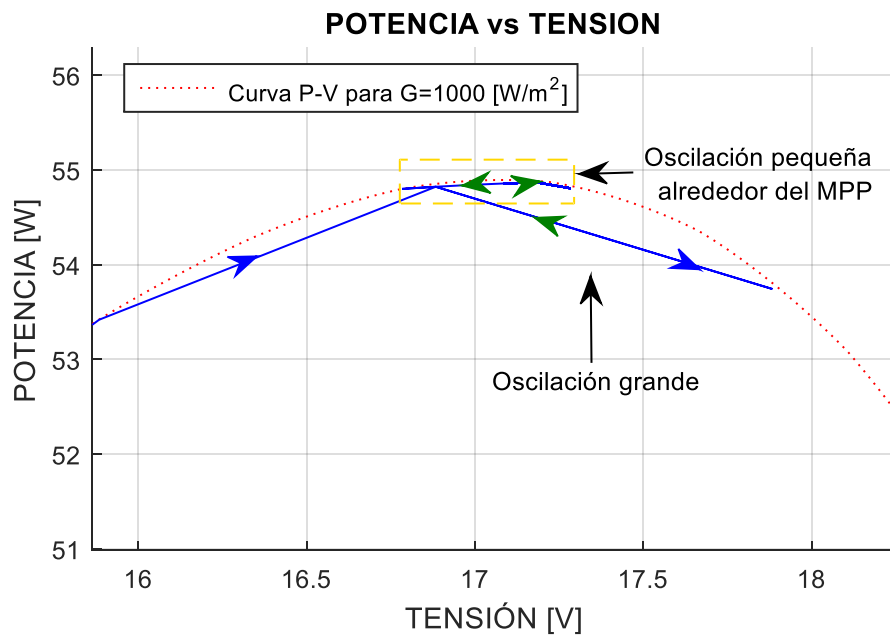
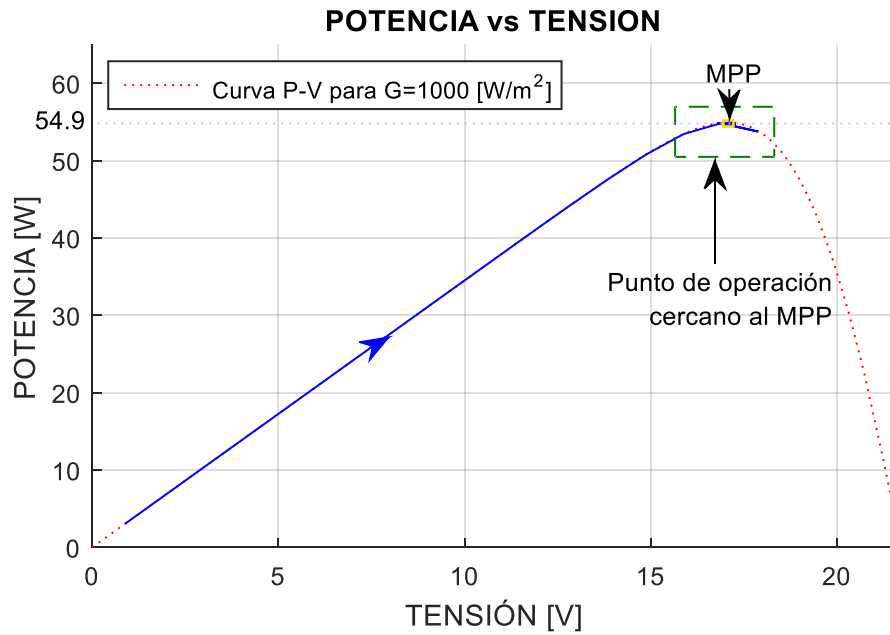
Figura 14. Característica V-t MPPT mejorado.



Adicionalmente, la Figura 15 muestra el comportamiento Potencia vs Tensión, en donde se observa la precisión del algoritmo al alcanzar el MPP. En la Figura 15(b), se puede apreciar en detalle el funcionamiento del algoritmo mejorado. Las flechas azules muestran el ascenso a la zona de oscilación, con un $\Delta V=1$ V. Una vez alcanzada dicha zona, ΔV toma el valor de 0.1 V, con el fin de oscilar más cerca del MPP, logrando una mayor precisión.

La verificación de esta mejora se muestra en el numeral 4.2, en donde a partir de tres condiciones climáticas distintas se logra un adecuado seguimiento del MPP de acuerdo a las características de operación, dentro de un sistema de generación fotovoltaica.

Figura 15. Característica P-V MPPT Mejorado. (a) Vista general; (b) Zoom zona MPP.



4 SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTVOLTAICA.

Para la simulación de un sistema fotovoltaico se utiliza el formalismo de representación macroscópica energética mediante bloques de Matlab/Simulink. Esto último, con el fin de realizar un análisis en estado estable del sistema para aplicaciones de dimensionamiento y gestión de energía. El sistema de generación de energía fotovoltaica, está conformado por los siguientes subsistemas: etapa de generación PV etapa de electrónica de potencia, sistema de control (objeto de este trabajo) y un barraje DC. La etapa de generación PV es estudiada e implementada en un proyecto de grado realizado en paralelo [4], la etapa de la electrónica de potencia y el barraje DC son modelados mediante elementos ideales.

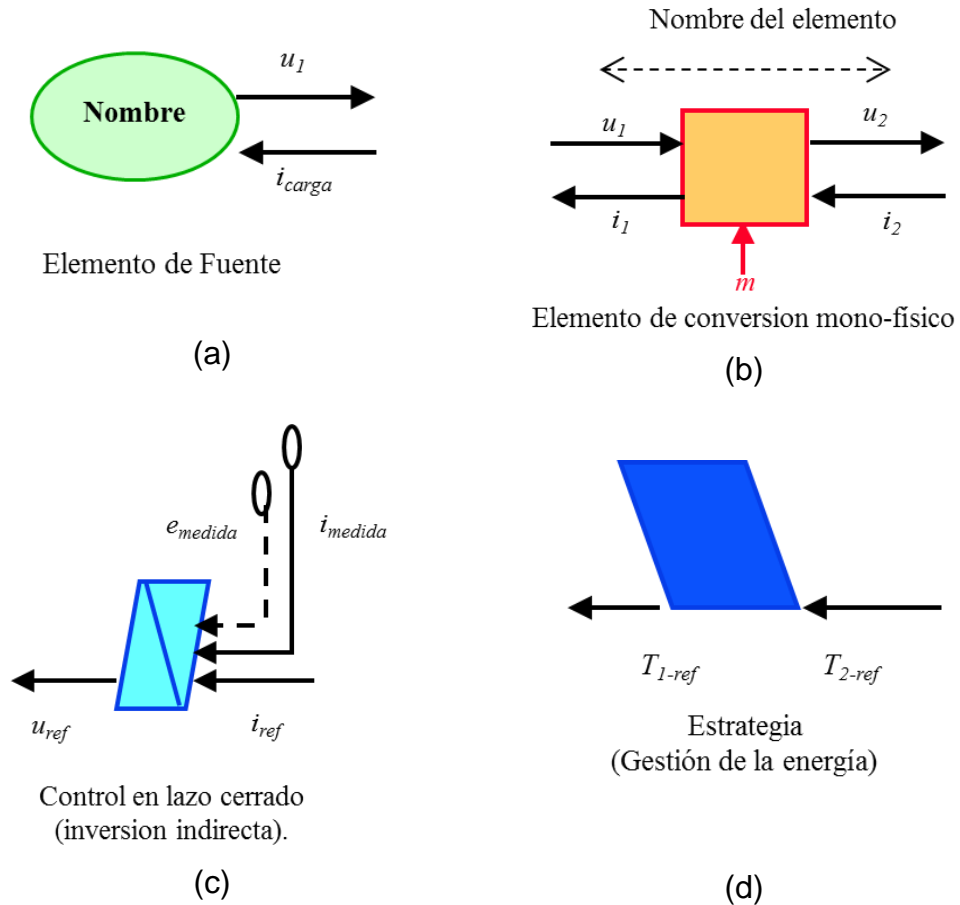
4.1 REPRESENTACIÓN MACROSCÓPICA ENERGÉTICA

A partir del año 2000, se ha venido implementando la Representación Energética Macroscópica (EMR, por sus siglas en inglés), para el desarrollo de investigaciones de unidades electromecánicas complejas. Esta descripción funcional es un formalismo gráfico y multi-físico que permite destacar las propiedades de cada subsistema y admite la comprensión de cada una por separado. [5].

Este formalismo utiliza distintos bloques para asignar funciones, asimismo sus respectivos colores describen las características del desempeño que cumplen. Una descripción de cada una de las funciones utilizadas en la Representación Macroscópica Energética se muestra en la Figura 16.

La EMR permite reemplazar cualquier bloque funcional (subsistema) y acoplarlo al sistema general sin tener que modificar la totalidad del conjunto, por ejemplo, si se desea cambiar el tipo de control actual (P&O MPPT) por cualquiera de los métodos mencionados en la sección 2, sencillamente se debe sustituir el bloque por el método deseado. Esto último es una ventaja importante, dado que permite nuevos estudios y propuestas para la mejoría de las técnicas existentes o invención de nuevas alternativas para el control de potencia de una celda de generación fotovoltaica.

Figura 16. Bloques de asignación del formalismo EMR.



Fuente: <http://www.emrwebsite.org/uploads/Fichiers/Libraries/memo-EMR-2013.pdf>

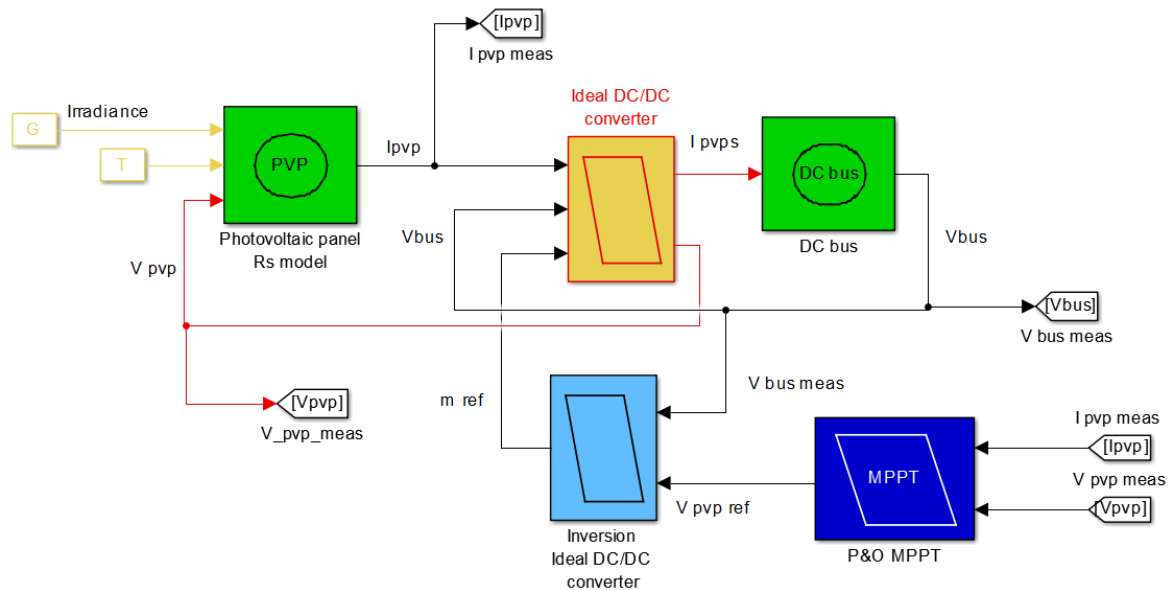
La Figura 16(a) representa una fuente o un sumidero de energía, bien sea de tipo mecánico, eléctrico, químico, nuclear, etc. La Figura 16(b) representa un elemento de conversión de una misma categoría física, como por ejemplo un transformador eléctrico, un reductor de velocidad (multiplicador de par), etc. Se puede observar que la Figura 16(c) es un control en lazo cerrado, en el caso de este trabajo de grado, representa el control para un convertidor DC/DC. Finalmente, la Figura 16(d) muestra un bloque de estrategia, el cual se utiliza, por ejemplo, para el seguimiento del punto de máxima potencia; este representa el ciclo de trabajo del convertidor controlado en el sistema.

4.2 EMR DEL SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO

Para la simulación del sistema de generación de energía fotovoltaica, se considera el modelo desarrollado en un trabajo de grado realizado en paralelo [4] y el panel fotovoltaico Shell SM55 [3]. En este modelo la curva I-V es variable y dependiente de G y T

En la Figura 17 se muestra la representación macroscópica del sistema de generación de energía fotovoltaica realizada en Matlab/Simulink, en el cual aparecen: una fuente de generación fotovoltaica [4], un convertidor ideal DC/DC, inversor ideal DC/DC, seguidor del punto máximo de potencia (MPPT), y la carga, un bus de tensión DC infinito representados por bloques.

Figura 17. EMR del sistema de generación implementado.



4.3 VARIACIÓN DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS

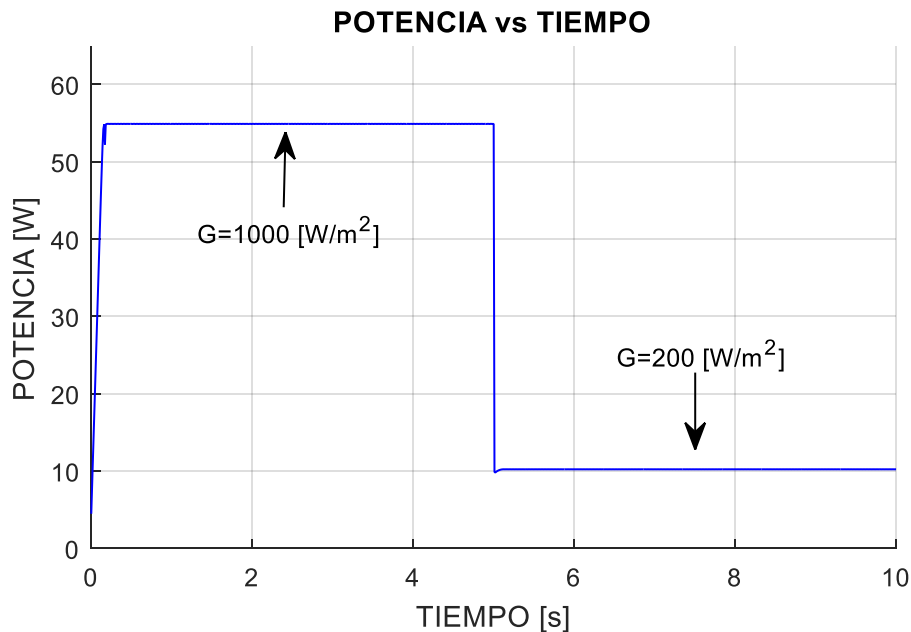
Para validar el modelo, se realiza la simulación de tres escenarios de condiciones climáticas, con el fin de observar el comportamiento de los diferentes parámetros del sistema, y mostrar el funcionamiento del algoritmo P&O MPPT dentro de la micro-red.

Tabla 1. Condiciones variables de irradiancia.

Condición climática	Valor de irradiancia W/m ²
1	Cambio rápido 1000-200
2	Cambio rápido de 200-1000-200-600-200
3	Cambio gradual durante horas del día: 6:00 am a 6:00 pm.

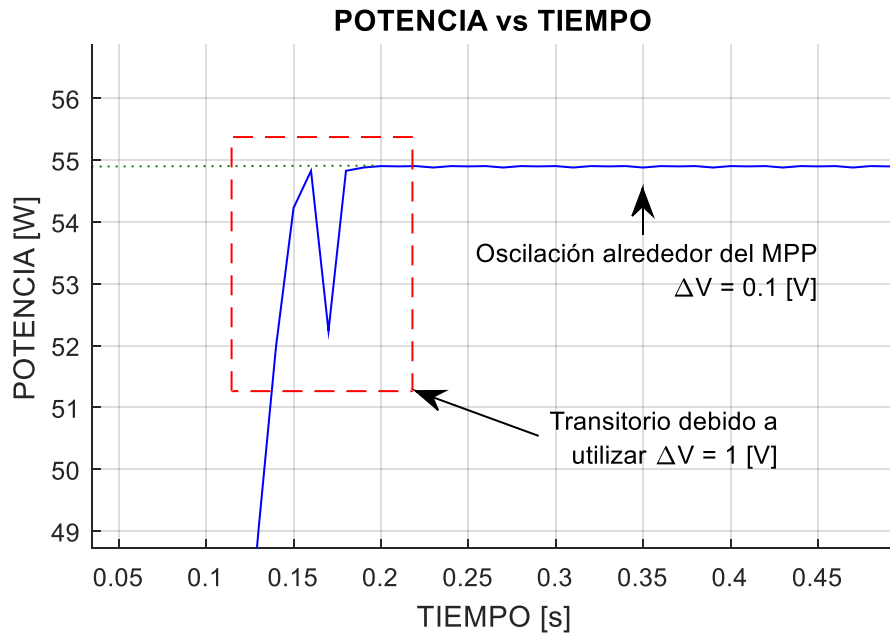
4.3.1 Condición climática 1. Para la primera condición, se toman valores de irradiancia de 1000 [W/m²] y temperatura de 25 [°C], y luego se induce un cambio rápido de irradiancia a 200 [W/m²]. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 18 a la 23.

Figura 18. Característica P-t para la condición climática 1.

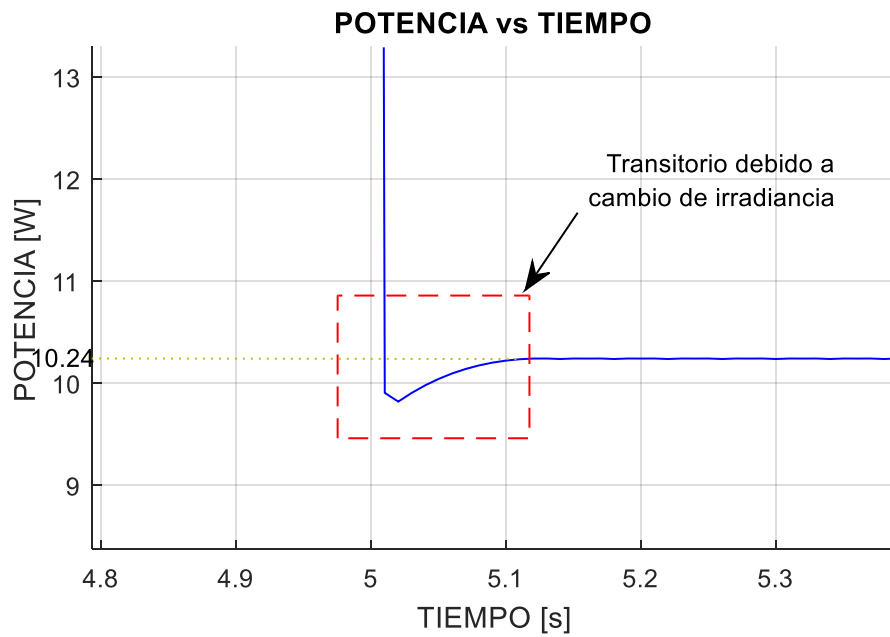


La Figura 18 evidencia el comportamiento de la potencia generada del sistema a través del tiempo, y su variación respecto a las condiciones de irradiancia. Si se realiza un acercamiento, como en la Figura 19, se aprecia como el punto de operación realiza el seguimiento a la potencia que debe entregar. El punto de operación se mantiene oscilando alrededor del MPP.

Figura 19. Cambio en característica P-t en condición climática 1. (a) Cambio de 0 a 1000 W/m². (b) Cambio de 1000 a 200 W/m².



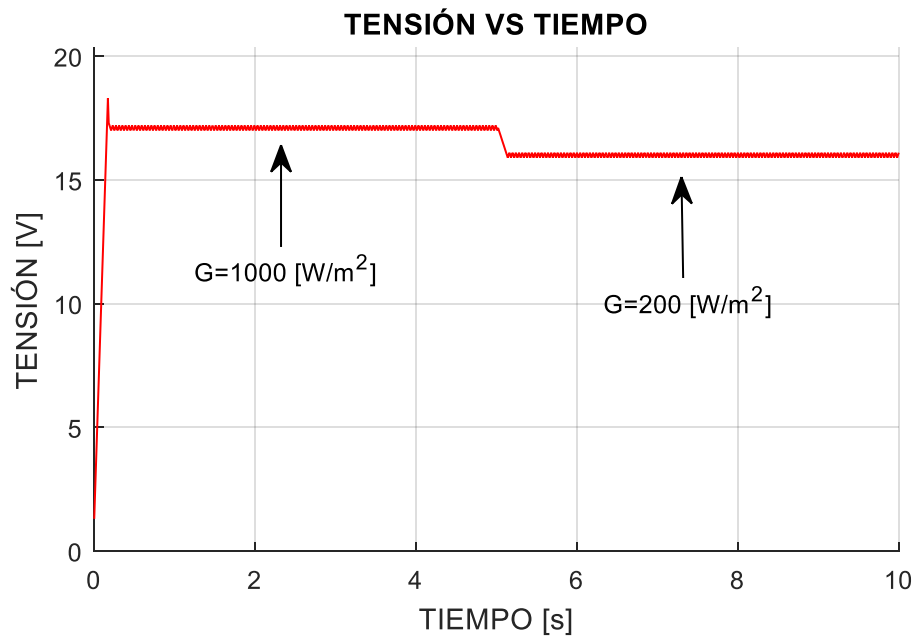
(a)



(b)

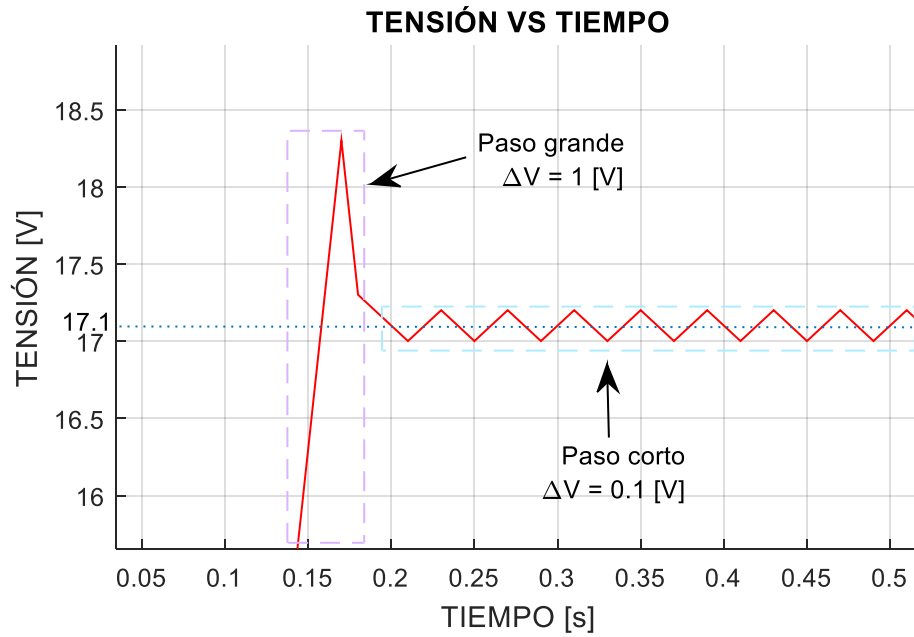
La característica de tensión vs tiempo tiene un comportamiento similar al observado en la Figura 18, dado que el punto de operación se mantiene oscilando alrededor del valor de tensión para el MPP; esto se observa en la Figura 20.

Figura 20. Característica V-t para la condición climática 1.

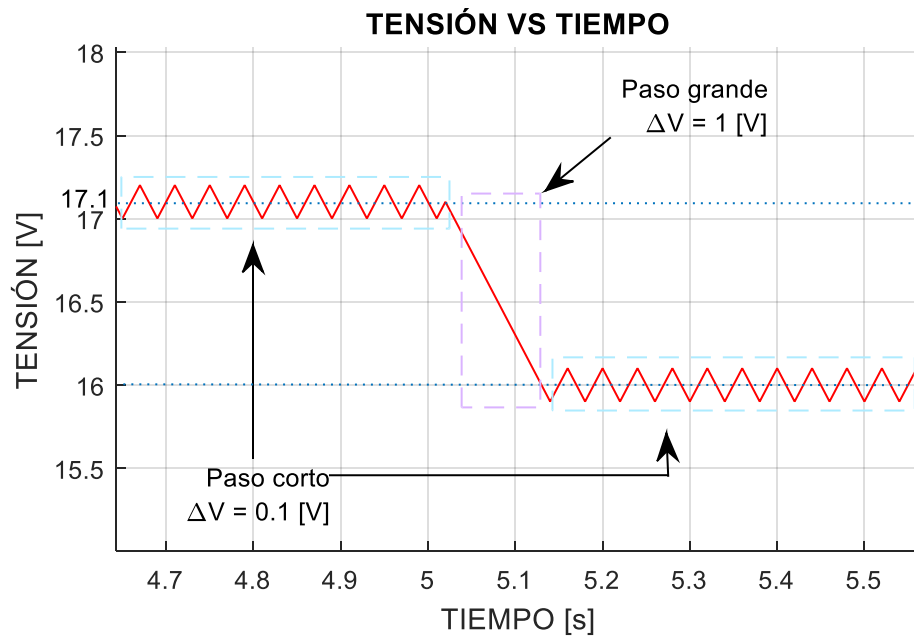


Si se hace un acercamiento a las regiones en donde sucede el cambio de irradiancia, se aprecia la perturbación debido a dicho fenómeno, tal y como se observa en la Figura 21.

Figura 21. Característica V-t para el transitorio de la condición climática 1.



(a)

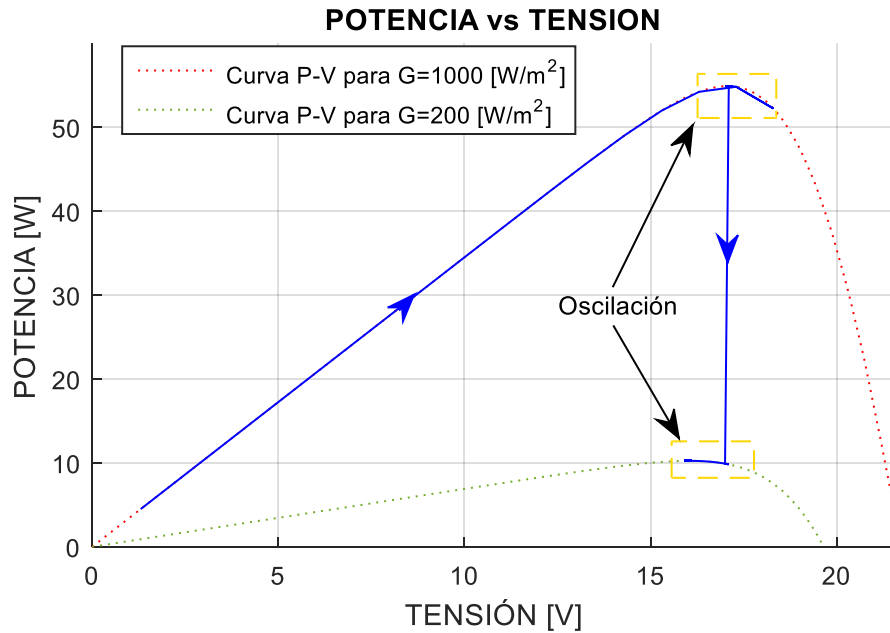


(b)

Al analizar la característica potencia vs tensión, que se muestra en la Figura 22, se observa que se alcanza el MPP, y al variar el nivel de irradiancia, el punto de

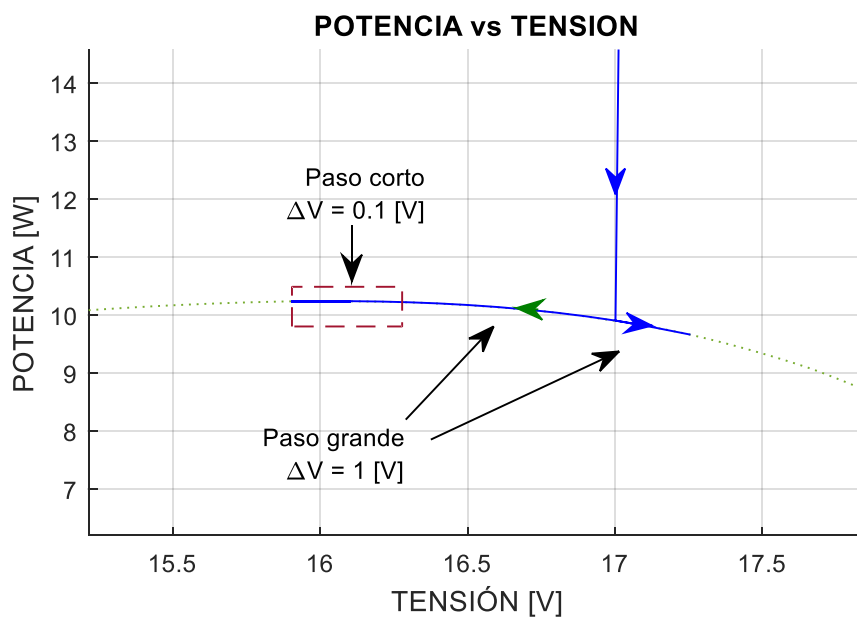
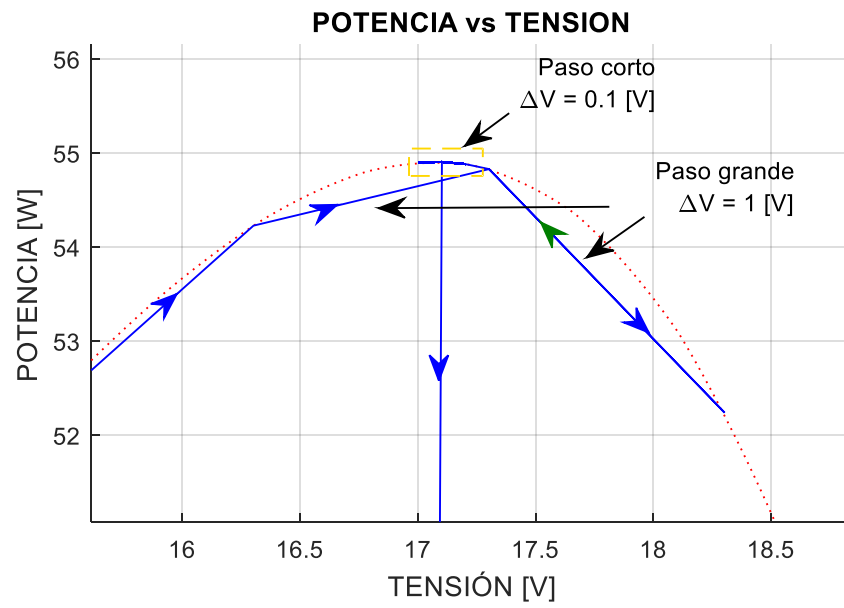
operación cambia rápidamente para poder entregar la máxima potencia disponible para cada intervalo de tiempo.

Figura 22. Característica P-V. Condición climática 1.



Para cada nivel de irradiación, el punto de operación oscila alrededor del MPP, inicialmente con el paso que trae al hacer el seguimiento, pero como se detecta que ha llegado al punto de máxima potencia, dicho paso cambia a un tamaño considerablemente menor (10 veces menor, para este ejemplo), para que se logre una mayor eficiencia en la potencia entregada. Lo anterior se evidencia en la Figura 23.

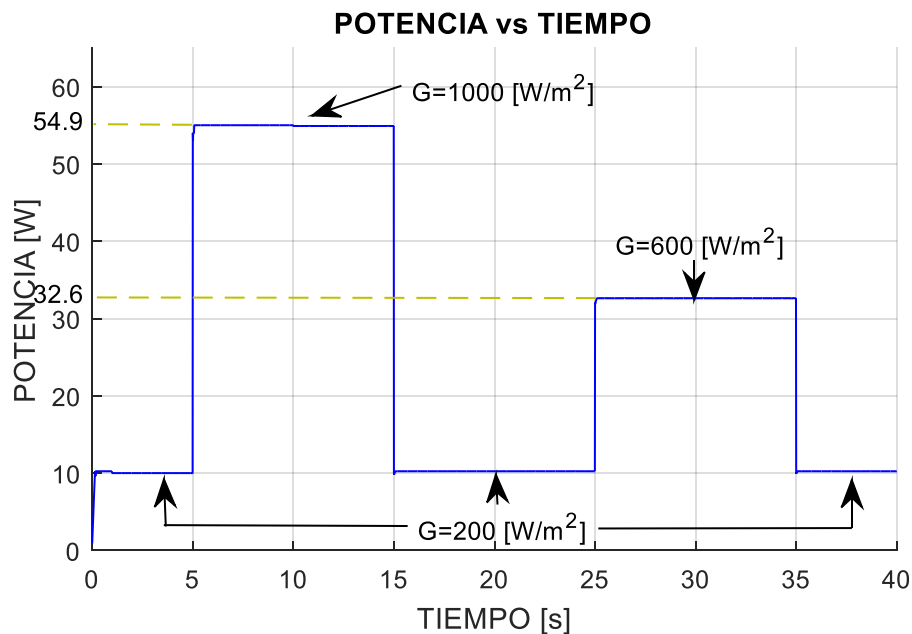
Figura 23. Oscilación alrededor del MPP. (a) $G=1000 \text{ W/m}^2$. (b) $G=200 \text{ W/m}^2$.



4.3.2 Condición climática 2. Para esta condición, se simularon tres cambios de irradiancia (1000 W/m^2 , 600 W/m^2 , 200 W/m^2), como representación de una serie de nubes, lo que afecta la entrega de potencia de la micro-red. El análisis es similar a como se realizó para la condición climática 1.

La Figura 24 muestra la característica Potencia vs. Tiempo, mientras que la Figura 25 muestra el comportamiento Tensión vs. Tiempo. Finalmente, se muestra la característica Potencia vs Tensión en la Figura 26.

Figura 24. Característica P-t para la condición climática 2.



Al igual que en las Figuras 18 y 19, en la Figura 24 se puede observar cómo cambia el punto de operación a medida que se está haciendo seguimiento al MPP. Asimismo, se muestra en la Figura 24 la variación de Potencia en el Tiempo.

La Figura 26 muestra la característica Potencia vs Tensión, en donde se observa claramente cómo el punto de operación busca al MPP propio, sin importar el nivel de irradiancia para el cual se está trabajando.

Figura 25. Característica V-t. Condición climática 2.

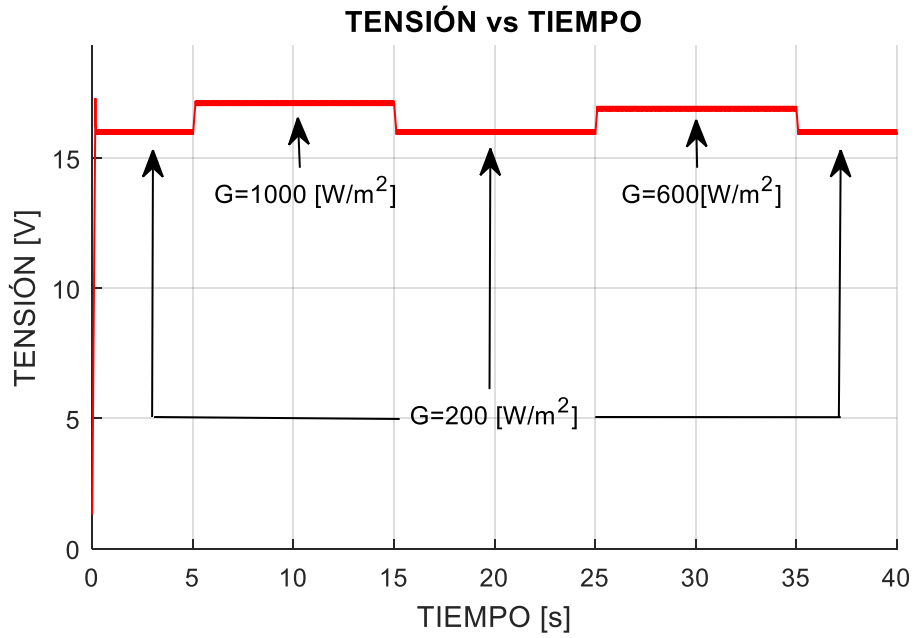
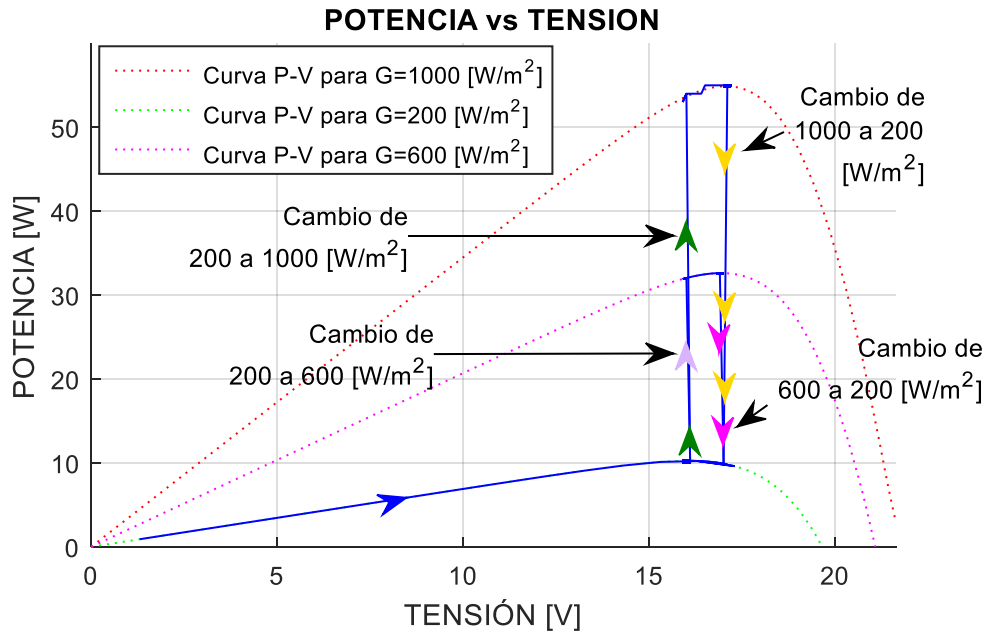


Figura 26. Característica P-V. Condición climática 2.

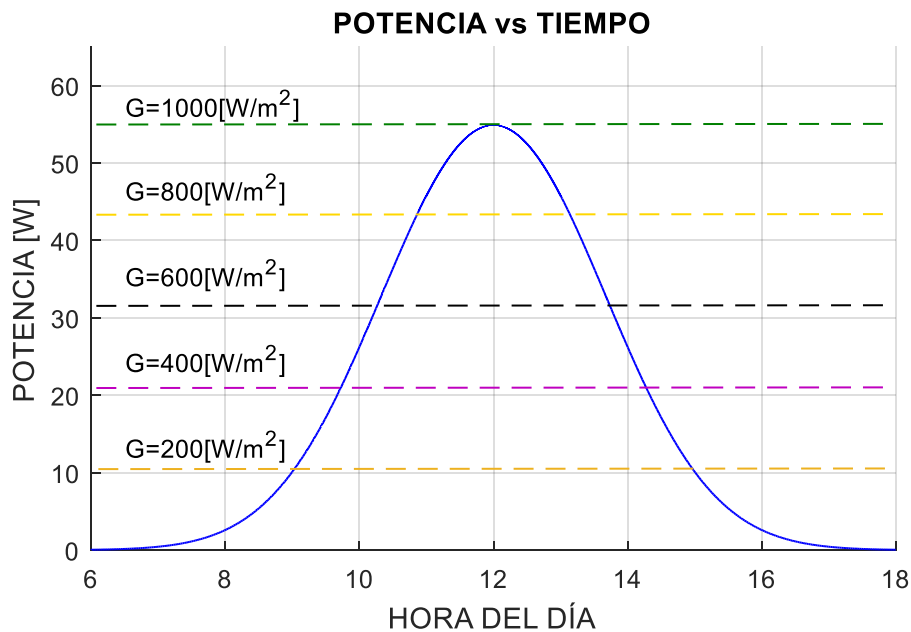


Para cada condición de irradiancia, el punto de operación oscila alrededor del MPP correspondiente, y cuando se presenta un cambio expedito de esta, rápidamente el punto de operación busca llegar al MPP de la próxima condición.

4.3.3 Condición climática 3. Para esta condición, se ha hecho un cambio continuo de irradiancia, desde 0 hasta 1000 W/m^2 , siguiendo una función Gaussiana, con el fin de simular el cambio climático que se presenta durante las 12 horas donde hay luz solar en el día.

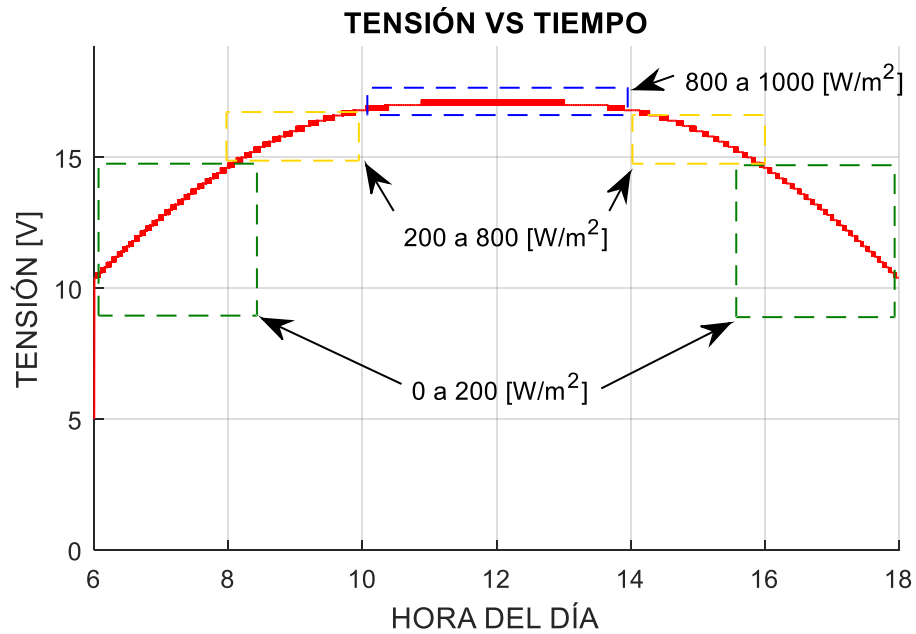
La Figura 27 muestra la variación de la Potencia generada en el Tiempo, verificando que esta es proporcional a la irradiancia que incide en cada instante en el sistema.

Figura 27. Característica P-t. Condición climática 3.



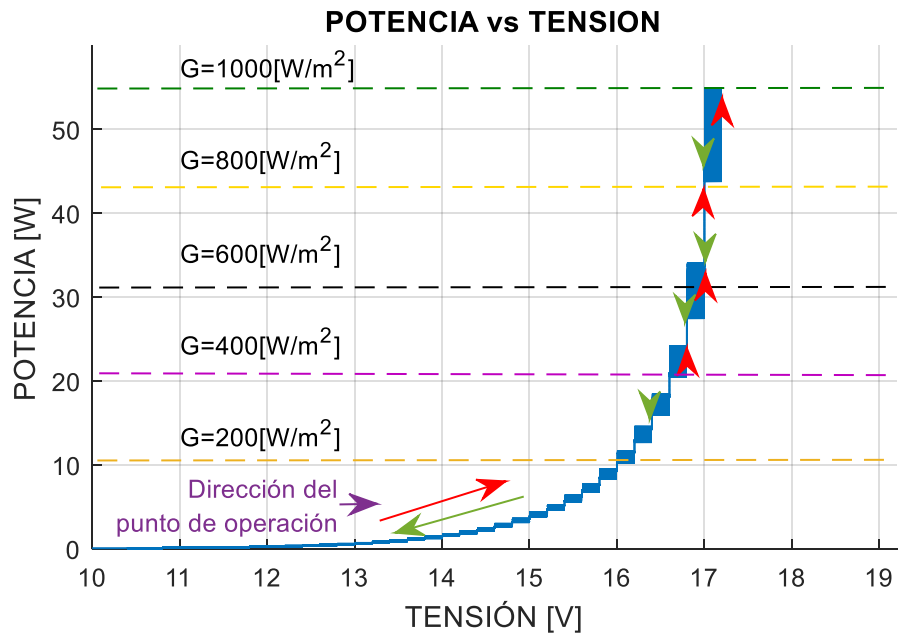
De igual manera, se puede apreciar en la Figura 28 cómo se realiza la variación de Tensión a medida que cambia la Irradiancia, para que el punto de operación se ubique en el MPP correspondiente. Para algunos valores de Irradiancia, el nivel de Tensión es casi constante, debido a que para que se dé el MPP de una Irradiancia a otra la tensión no varía considerablemente.

Figura 28. Característica V-t. Condición climática 3.



La característica Potencia vs Tensión demuestra que se está realizando un seguimiento al MPP para cada nivel de Irradiancia, sin importar que esta sea constante o variante en el Tiempo, que es lo que se presenta en la realidad. Dichas características se pueden observar en la Figura 29.

Figura 29. Característica P-V. Condición climática 3.



5. CONCLUSIONES

Al obtener la información necesaria para la implementación del sistema de control y realizar las diferentes simulaciones para observar el comportamiento del algoritmo P&O MPPT, se han alcanzado importantes resultados que servirán de apoyo al diseño de una micro-red de generación fotovoltaica, y al desarrollo del laboratorio de integración energética y micro-redes en las instalaciones del Parque Tecnológico de Guatimar. Las conclusiones más relevantes del análisis de los datos obtenidos, se indican a continuación:

- El P&O MPPT es un algoritmo de fácil implementación debido a que posee un funcionamiento iterativo que permite que el punto de operación alcance el punto de máxima potencia (MPP), con un tiempo dependiente de la frecuencia de muestreo. Al realizar el seguimiento del MPP utilizando el algoritmo básico [21]-[24], se presentan oscilaciones alrededor de dicho punto, con lo cual no se aprovecha al máximo la capacidad del módulo fotovoltaico, generando pérdidas de potencia.
- Al tomar un valor de ΔV (paso de tensión para realizar la perturbación) mucho menor al nivel de tensión de operación se logra una mayor precisión del MPP, pero con un tiempo de respuesta lento. Este hecho evidencia una dificultad en la operación del algoritmo cuando se presentan cambios rápidos en la irradiancia, debido a que el punto de operación no consigue llegar al MPP correspondiente.
- La propuesta de mejora del algoritmo que consiste en utilizar un ΔV variable, logra corregir algunos de los problemas del algoritmo básico obteniendo un aumento en la eficiencia del sistema, debido a que consigue que el punto de operación alcance el MPP de manera rápida y precisa, aun cuando las condiciones de irradiancia y temperatura fluctúen de forma drástica. Para el caso del simulado se logra mejorar la precisión en un 86,38% con respecto al caso base.
- El trabajo conjunto con [4] permite validar el algoritmo desarrollado, puesto que al ser acoplado con el modelo de panel fotovoltaico, la etapa de electrónica de potencia y la de carga, los resultados de potencia generada para cualquier condición climática, se ajustan a los valores esperados según la bibliografía [19]-[24].
- La representación macroscópica energética (EMR) permite integrar el control de potencia a diferentes sistemas de generación de energía, hecho que sirve de apoyo para las investigaciones que se realizan en torno a la problemática energética a nivel global.

- Con la EMR propuesta en este trabajo de grado, se deja abierta la posibilidad de realizar nuevas investigaciones y/o propuestas de mejora del algoritmo, que busquen adicionar nuevas metodologías de control de potencia con el fin de optimizar el modelo y ajustarlo con mayor precisión a las condiciones presentes en la realidad, por ejemplo: los métodos de control de lógica difusa, que particularmente no requieren de un modelo matemático muy preciso para su ejecución.
- Se espera que el trabajo desarrollado contribuya a los estudios realizados por los diferentes investigadores especializados en el tema de generación fotovoltaica, permitiendo el avance de la tecnología para esta área de la ingeniería, por lo que se han realizado las siguientes actividades:
 - I. Se realizó un poster para la “I jornada de investigación de micro-redes eléctricas” desarrollado por el grupo de investigación GISEL. UIS Bucaramanga, Diciembre de 2014.
 - II. Se sometió un paper para la conferencia “4th International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications” ICREGA’16 8-10 February 2016 Belfort, France.
Artículo: Model and control of a photovoltaic generation system based on energetic macroscopic representation
Autores: J. Solano, J.L. Duarte, E.A. Vargas, J. Cabrera, A.M. Jácome, M. Botero, J.M. Rey

6. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo de grado, se dan las siguientes recomendaciones:

- Investigar el funcionamiento del algoritmo cuando se presentan máximos locales y globales en la curva P-V, y de acuerdo con esto, si es necesario agregar una nueva mejora al algoritmo propuesto en este documento.
- Investigar el comportamiento del algoritmo, perturbando corriente en vez de tensión, comparando los resultados teniendo en cuenta las posibles dificultades que tendría la realización del control por medio de dicha magnitud.

REFERENCIAS

- [1] CADENA, Ángela. Acciones y retos para energización de las ZNI en el país [online]. Unidad de planeación minero energética UPME. Octubre 29 de 2012. [Citado Septiembre 12 de 2015]. Disponible en la World Wide Web: <http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/ckeditor_files/UPME_Simposio_IPSE_Oct2012.pdf>
- [2] Mapas de radiación solar global sobre una superficie plana. Atlas de Radiación Solar de Colombia [online]. Unidad de planeación minero energética UPME. [Citado Septiembre 15 de 2015]. Disponible en la World Wide Web: <http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/2-Mapas_Radiacion_Solar.pdf>
- [3] SHELL. Shell SM55 Photovoltaic Solar Module [online]. Shell solar product information sheet. [Citado Junio 23 de 2015]. Disponible en la World Wide Web: <http://www.solarcellsales.com/techinfo/docs/Shell_SM55.pdf>
- [4] CABRERA, Jhon y JÁCOME, Andrés. Identificación e implementación de modelos PVP para simulación de un sistema de generación de energía fotovoltaica. Trabajo de grado Ingeniero Electricista. Bucaramanga – Colombia. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2015.
- [5] UNIVERSITÉ DE LILLE1. Memo on the lecture about «Management of Energetic Systems» [online]. Energetic Macroscopic Representation (EMR). Diciembre de 2013. [Citado Agosto 11 de 2015]. Disponible en la World Wide Web: <<http://www.emrwebsite.org/uploads/Fichiers/Libraries/memo-EMR-2013.pdf>>
- [6] MALATHY, Sankar. RAMAPRABHA, Ramabadran. Maximum Power Point Tracking Based on Look Up Table Approach. En: Advanced Materials Research. Septiembre 04 de 2013. Vol 768, p. 124-130.
- [7] IBRAHIM, H. E. A. HOUSSINY, Faten F. ZEIN EL-DIN, Hussine M. EL-SHIBINI, Mostafa A. Microcomputer controlled buck regulator for maximum power point tracker for dc pumping system operates from photovoltaic system. En: IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings. Agosto 22-25 de 1999, Seoul, Korea.
- [8] TARIK DURU, H. A maximum power tracking algorithm based on $I_{mpp} = f(P_{max})$ function for matching passive and active loads to a photovoltaic generator. En: Solar Energy. Elsevier. 2006. Vol 80, p. 812-822.

- [9] DESAI, H.P. PATEL, H.K. Maximum Power Point Algorithm in PV Generation: An Overview. En: 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE. Noviembre 27-30 de 2007, Bangkok, p. 624-630.
- [10] DURAN, E. ANDUJAR, J. M. ENRIQUE, J. M. PEREZ-ORIA, J. M. Determination of PV Generator I-V/P-V Characteristic Curves Using a DC-DC Converter Controlled by a Virtual Instrument. En: Hindawi Publishing Corporation. International Journal of Photoenergy Volume 2012 (2012), Article ID 843185, 13 pages.
- [11] KASA, N. IIDA, T. IWAMOTO, Hideo. Maximum power point tracking with capacitor identifier for photovoltaic power system. En: Eighth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives. IEEE. Septiembre 18-19 de 2000, Londres, p. 130-135.
- [12] HOHM, D.P. ROPP, M.E. Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed. En: Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Septiembre 15-22 de 2000, Anchorage, p. 1699-1702.
- [13] LOKANADHAM, M. BHASKAR, K. Vijaya. Incremental Conductance Based Maximum Power Point Tracking (MPPT) for Photovoltaic System. En: International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). Marzo-Abril de 2012. Vol. 2, p. 1420-1424.
- [14] HUSSEIN, K.H. MUTA, I. HOSHINO, T. OSAKADA, M. Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. En: IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution. Enero de 1995. Vol. 142, p. 59-64.
- [15] YUSOF, Y. SAYUTI, S.H. ABDUL LATIF, M. WANIK, M.Z.C. Modelling and simulation of Maximum power point tracker for photovoltaic system. En: National Power & Energy Conference (PECon) Proceedings. IEEE. Noviembre 29-30 de 2004. Malasia, p. 88-93.
- [16] VEERACHARY, M. SENJYU, T. UEZATO, K. Neural-network-based maximum-power-point tracking of coupled-inductor interleaved-boost-converter-supplied PV system using fuzzy controller. En: IEEE Transactions on Industrial Electronics. Agosto de 2003. Vol. 50, p. 749-758.
- [17] DIAZ, N. LUNA, A. DUARTE, O. Improved MPPT short-circuit current method by a fuzzy short-circuit current estimator. En: IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Septiembre 19-22 de 2011. Phoenix, p. 211-218.

- [18] ZHANG, L. YUNFEI BAI. AL-AMOUDI, A. GA-RBF neural network based maximum power point tracking for grid-connected photovoltaic systems. En: International Conference on Power Electronics, Machines and Drives. Junio 4-7 de 2002, p. 18-23.
- [19] ESRAM, T. CHAPMAN, P.L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. En: IEEE Transactions on energy conversion. Junio 02 de 2007. Vol. 22, p. 439-449.
- [20] SERA, D. KEREKES, T. TEODORESCU, R. BLAABJERG, F. Improved MPPT Algorithms for Rapidly Changing Environmental Conditions. En: 12th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC). Agosto 30 – Septiembre 01 de 2006, p. 1614-1619.
- [21] FEMIA, N. PETRONE, G. SPAGNUOLO, G. VITELLI, M. Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. En: IEEE Transactions on Power Electronics. Julio 04 de 2005. Vol. 20, p. 963-973.
- [22] AHMED, J. SALAM, Z. An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency. En: Applied Energy. Elsevier. Julio 15 de 2015. Vol. 150, p. 97-108.
- [23] KOTTI, R. SHIREEN, W. Efficient MPPT control for PV systems adaptive to fast changing irradiation and partial shading conditions. En: Solar Energy. Elsevier. Abril de 2015. Vol. 114, p. 397-407.
- [24] MOHANTY, P. BHUVANESWARI, G. BALASUBRAMANIAN, R. DHALIWAL, N. K. MATLAB based modeling to study the performance of different MPPT techniques used for solar PV system under various Operating conditions. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier. Octubre de 2014. Vol. 38, p. 581-593.

BIBLIOGRAFÍA

CABRERA, Jhon y JÁCOME, Andrés. Identificación e implementación de modelos PVP para simulación de un sistema de generación de energía fotovoltaica. Trabajo de grado Ingeniero Electricista. Bucaramanga – Colombia. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2015.

FEMIA, N. PETRONE, G. SPAGNUOLO, G. VITELLI, M. Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. En: IEEE Transactions on Power Electronics. Julio 04 de 2005. Vol. 20, p. 963-973.

SERA, D. KEREKES, T. TEODORESCU, R. BLAABJERG, F. Improved MPPT Algorithms for Rapidly Changing Environmental Conditions. En: 12th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC). Agosto 30 – Septiembre 01 de 2006, p. 1614-1619.

SHELL. Shell SM55 Photovoltaic Solar Module [online]. Shell solar product information sheet. [Citado Junio 23 de 2015]. Disponible en la World Wide Web: <http://www.solarcellsales.com/techinfo/docs/Shell_SM55.pdf>

UNIVERSITÉ DE LILLE1. Energetic Macroscopic Representation (EMR) [online]. [Citado Agosto 11 de 2015]. Disponible en la World Wide Web: <<http://www.emrwebsite.org/>>

ANEXOS

A. MODELOS EN MATLAB DEL ALGORITMO P&O MPPT, CAPÍTULO 3

Para mostrar resultados en el capítulo 3, se han elaborado diferentes scripts en Matlab, con el fin de mostrar el comportamiento del algoritmo P&O MPPT. Así mismo, se ha realizado montajes en Simulink, para observar los parámetros eléctricos (tensión, corriente y potencia) controlados por el algoritmo. Estos archivos han sido creados bajo la versión 2015a.

ARCHIVO	DESCRIPCIÓN	PRODUCTO
COMPORTAMIENTO_ALGORITMO_MPPT.m	Script que permite observar cómo avanza el punto de operación de tensión, corriente y potencia, conforme es controlado por medio del algoritmo.	A1 Comportamiento algoritmo P&O MPPT.
CURVAS_SHELL_SM55.m	Se encuentra en el contenido del CD adjunto a este documento	A2 Curvas características I-V panel fotovoltaico SHELL SM55.
INICIO_MPPT.m	Archivo que permite guardar datos en el Workspace de Matlab, los cuales son necesarios para iniciar la simulación en Simulink de los bloques del algoritmo; por tal motivo, debe ejecutarse antes de comenzar dicho proceso.	A3 Inicio bloque MPPT
BLOQUE_MPPT_BASICO.slx	Montaje en Simulink que muestra resultados de potencia, tensión y corriente, con respecto al tiempo, utilizando la configuración básica del algoritmo.	A4 Bloque algoritmo P&O MPPT básico.
BLOQUE_MPPT_MEJORADO.slx	Montaje en Simulink que muestra resultados de potencia, tensión y corriente, con respecto al tiempo, utilizando la configuración mejorada del algoritmo propuesta en este documento.	A5 Bloque algoritmo P&O MPPT mejorado.
GRAFICA_V_T_MPPT_BASICO_1.m	Gráfica elaborada a partir de los datos obtenidos de tensión, con la simulación en Simulink del bloque algoritmo P&O MPPT básico.	A6 Gráfica Tensión vs Tiempo para algoritmo P&O

		MPPT básico, $\Delta V = 1 \text{ V}$.
GRAFICA_V_T_MPP T_BASICO_2.m	Gráfica elaborada a partir de los datos obtenidos de tensión, con la simulación en Simulink del bloque algoritmo P&O MPPT básico.	A7 Gráfica Tensión vs Tiempo para algoritmo P&O MPPT básico, $\Delta V=0.1 \text{ V}$.
GRAFICA_P_V_MP PT_BASICO_1.m GRAFICA_P_V_MP PT_BASICO_1_ZOO M.m	Gráficas elaboradas a partir de los datos obtenidos de tensión y corriente, con la simulación en Simulink del bloque algoritmo P&O MPPT básico. Una gráfica muestra la vista general de la característica, mientras que otra muestra un zoom realizado en la zona cercana al MPP.	A8 Gráficas Potencia vs Tensión para algoritmo P&O MPPT básico, $\Delta V=1 \text{ V}$.
GRAFICA_P_V_MP PT_BASICO_2.m GRAFICA_P_V_MP PT_BASICO_2_ZOO M.m	Gráficas elaboradas a partir de los datos obtenidos de tensión y corriente, con la simulación en Simulink del bloque algoritmo P&O MPPT básico. Una gráfica muestra la vista general de la característica, mientras que otra muestra un zoom realizado en la zona cercana al MPP.	A9 Gráficas Potencia vs Tensión para algoritmo P&O MPPT básico, $\Delta V=0.1 \text{ V}$.
GRAFICA_V_T_MPP T_MEJORADO.m	Gráfica elaborada a partir de los datos obtenidos de tensión, con la simulación en Simulink del bloque algoritmo P&O MPPT mejorado.	A10 Gráfica Tensión vs Tiempo para algoritmo P&O MPPT mejorado.
GRAFICA_P_V_MP PT_MEJORADO.m GRAFICA_P_V_MP PT_MEJORADO_ZO OM.m	Gráficas elaboradas a partir de los datos obtenidos de tensión y corriente, con la simulación en Simulink del bloque algoritmo P&O MPPT mejorado. Una gráfica muestra la vista general de la característica, mientras que otra muestra un zoom realizado en la zona cercana al MPP.	A11 Gráficas Potencia vs Tensión para algoritmo P&O MPPT mejorado.

B. SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACION DE ENERGIA FOTOVOLTAICA, CAPITULO 4.

Para mostrar resultados en el capítulo 4, se realizaron montajes en Simulink, siguiendo la representación energética macroscópica (EMR), de un sistema completo de generación fotovoltaica. Estos archivos han sido creados bajo la versión 2015a.

ARCHIVO	DESCRIPCIÓN	PRODUCTO
INICIO_SFV.m	Archivo que permite guardar datos en el Workspace de Matlab, los cuales son necesarios para iniciar la simulación en Simulink del sistema fotovoltaico; por tal motivo, debe ejecutarse antes de comenzar dicho proceso.	B1 Inicio sistema fotovoltaico
SFV_CONDICION_C LIMATICA_1.slx	Montaje en Simulink del sistema fotovoltaico, que muestra resultados de potencia, tensión y corriente, con respecto al tiempo, simulando con una función cuadrada las condiciones de irradiancia.	B2 Sistema fotovoltaico condición climática 1
SFV_CONDICION_C LIMATICA_2.slx	Montaje en Simulink del sistema fotovoltaico, que muestra resultados de potencia, tensión y corriente, con respecto al tiempo, simulando con dos funciones cuadradas las diferentes condiciones de irradiancia.	B3 Sistema fotovoltaico condición climática 2
SFV_CONDICION_C LIMATICA_3.slx	Montaje en Simulink del sistema fotovoltaico, que muestra resultados de potencia, tensión y corriente, con respecto al tiempo, simulando las condiciones de irradiancia mediante una función gaussiana, cuya expresión es: $f(t) = 1000e^{-\frac{0.5(t-10800)}{3000^2}}, t \text{ en segundos}$	B4 Sistema fotovoltaico condición climática 3

<p>GRAFICA_P_T_CONDICION_CLIMATICA_1.m GRAFICA_P_T_CONDICION_CLIMATICA_1_ZOOM_1.m GRAFICA_P_T_CONDICION_CLIMATICA_1_ZOOM_2.m</p>	<p>Gráficas elaboradas a partir de los datos obtenidos de potencia, con la simulación en Simulink del sistema fotovoltaico, para la condición climática 1. Una gráfica muestra la vista general de la característica, mientras que las dos siguientes muestran un zoom realizado en las zonas cercanas a los cambios de irradiancia.</p>	<p>B5 Gráficas Potencia vs Tiempo condición climática 1.</p>
<p>GRAFICA_V_T_CONDICION_CLIMATICA_1.m GRAFICA_V_T_CONDICION_CLIMATICA_1_ZOOM_1.m GRAFICA_V_T_CONDICION_CLIMATICA_1_ZOOM_2.m</p>	<p>Gráficas elaboradas a partir de los datos obtenidos de tensión, con la simulación en Simulink del sistema fotovoltaico, para la condición climática 1. Una gráfica muestra la vista general de la característica, mientras que las dos siguientes muestran un zoom realizado en las zonas cercanas a los cambios de irradiancia.</p>	<p>B6 Gráficas Tensión vs Tiempo condición climática 1.</p>
<p>GRAFICA_P_V_CONDICION_CLIMATICA_1.m GRAFICA_P_V_CONDICION_CLIMATICA_1_ZOOM_1.m GRAFICA_P_V_CONDICION_CLIMATICA_1_ZOOM_2.m</p>	<p>Gráficas elaboradas a partir de los datos obtenidos de potencia y tensión, con la simulación en Simulink del sistema fotovoltaico, para la condición climática 1. Una gráfica muestra la vista general de la característica, mientras que las dos siguientes muestran un zoom realizado en las zonas cercanas a los puntos de máxima potencia dados por los cambios de irradiancia. Se encuentran en el contenido del CD adjunto a este documento, con los nombres en su orden:</p>	<p>B7 Gráficas Potencia vs Tensión condición climática 1.</p>
<p>GRAFICA_P_T_CONDICION_CLIMATICA_2.m</p>	<p>Gráfica elaborada a partir de los datos obtenidos de potencia, con la simulación en Simulink del sistema fotovoltaico, para la condición climática 2.</p>	<p>B8 Gráfica Potencia vs Tiempo condición climática 2.</p>

GRAFICA_V_T_CONDICION_CLIMATICA_2.m	Gráfica elaborada a partir de los datos obtenidos de tensión, con la simulación en Simulink del sistema fotovoltaico, para la condición climática 2.	B9 Gráfica Tensión vs Tiempo condición climática 2.
GRAFICA_P_V_CONDICION_CLIMATICA_2.m	Gráfica elaborada a partir de los datos obtenidos de potencia y tensión, con la simulación en Simulink del sistema fotovoltaico, para la condición climática 2.	B10 Gráfica Potencia vs Tensión condición climática 2.
GRAFICA_P_T_CONDICION_CLIMATICA_3.m	Gráfica elaborada a partir de los datos obtenidos de potencia, con la simulación en Simulink del sistema fotovoltaico, para la condición climática 3.	B11 Gráfica Potencia vs Tiempo condición climática 3.
GRAFICA_V_T_CONDICION_CLIMATICA_3.m	Gráfica elaborada a partir de los datos obtenidos de tensión, con la simulación en Simulink del sistema fotovoltaico, para la condición climática 3.	B12 Gráfica Tensión vs Tiempo condición climática 3.
GRAFICA_P_V_CONDICION_CLIMATICA_3.m	Gráfica elaborada a partir de los datos obtenidos de potencia y tensión, con la simulación en Simulink del sistema fotovoltaico, para la condición climática 3.	B13 Gráfica Potencia vs Tensión condición climática 3.

C. CÁLCULO DE LA MEJORA EN LA PRECISIÓN.

Tomando la ecuación de desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \left[\sum_1^n (X_i - Xp)^2 \right]}$$

Donde,

n = número de datos,

X_i = valor del dato i ,

Xp = valor promedio.

Se obtuvieron los datos de potencia correspondientes a la oscilación alrededor del MPP para los dos casos de ΔV .

Para $\Delta V=1$ V, los valores son 53.4184 W, 54.8214 W y 53.7426 W.

Para $\Delta V=0.1$ V, los valores son 54.8050 W, 54.8677 W y 54.8559 W.

Para el valor promedio se utilizó un valor de 55 W, puesto que es la potencia nominal del panel Shell SM55.

Entonces:

$$\sigma_{\Delta V=1} = 1.4342 \text{ W}$$

y

$$\sigma_{\Delta V=0.1} = 0.1953 \text{ W}.$$

Finalmente, se calcula cuánto mejora $\sigma_{\Delta V=0.1}$ con respecto a $\sigma_{\Delta V=1}$ obteniendo un valor de 86.3827% de ganancia en la precisión.