



El Hombre y la Máquina

ISSN: 0121-0777

maquina@uao.edu.co

Universidad Autónoma de Occidente

Colombia

Mejía, Diego Armando; Torres Chávez, Ivaldo; Díaz, Jorge Luis
Comparación de algoritmos MPPT aplicados a un conversor SEPIC en sistemas
fotovoltaicos

El Hombre y la Máquina, núm. 45, julio-diciembre, 2014, pp. 44-55

Universidad Autónoma de Occidente

Cali, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47838946006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

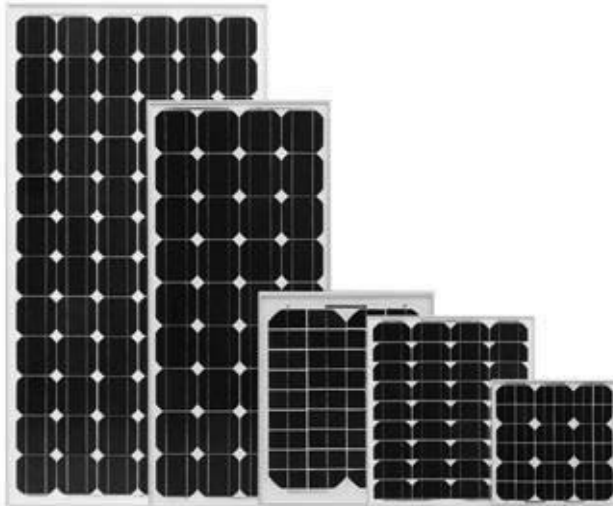
Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Comparación de algoritmos MPPT aplicados a un conversor SEPIC en sistemas fotovoltaicos

DIEGO ARMANDO MEJÍA*
IVALDO TORRES CHÁVEZ**
JORGE LUIS DÍAZ**



Resumen

A partir del conocimiento que se tiene del agotamiento de los recursos convencionales (productos fósiles) para el futuro (petróleo, carbón y gas), la necesidad de reducir las emisiones de gases nocivos en la atmósfera y las preocupaciones sobre el cambio climático, surgen los incentivos para el uso de energía renovable y un gran interés por este tema (el cual se ha incrementado, en gran medida, en el marco del protocolo de Kyoto). El presente trabajo aborda el estudio y la aplicación de diferentes técnicas para el seguimiento del punto de máxima potencia en los módulos fotovoltaicos (MPPT). Estos se acoplaron a un convertidor de topología SEPIC (Single-Ended Primary-Inductance Converter) para controlar el aumento o disminución de la tensión producida por los mismos, usando un microcontrolador de bajo coste de adquisición que desarrolla los códigos de la técnica de control MPPT. En los resultados, finalmente, se presentan las simulaciones para probar la teoría expuesta y un prototipo experimental

(*) Grupo de investigación Logos y maestría en Controles Industriales, Facultad de Ingenierías y Arquitecturas, Universidad de Pamplona. Km 1 vía a Bucaramanga, Pamplona, Colombia.

(**) Maestría en Controles Industriales, Facultad de Ingenierías y Arquitecturas, Universidad de Pamplona. Km. 1 vía a Bucaramanga, Pamplona, Colombia.

Fecha de recepción: 28/11/2014 - Fecha de aceptación: 02/02/2015.

Resumen

A partir del conocimiento que se tiene del agotamiento de los recursos convencionales (productos fósiles) para el futuro (petróleo, carbón y gas), la necesidad de reducir las emisiones de gases nocivos en la atmósfera y las preocupaciones sobre el cambio climático, surgen los incentivos para el uso de energía renovable y un gran interés por este tema (el cual se ha incrementado, en gran medida, en el marco del protocolo de Kyoto). El presente trabajo aborda el estudio y la aplicación de diferentes técnicas para el seguimiento del punto de máxima potencia en los módulos fotovoltaicos (MPPT). Estos se acoplaron a un convertidor de topología SEPIC (Single-Ended Primary-Inductance Converter) para controlar el aumento o disminución de la tensión producida por los mismos, usando un microcontrolador de bajo coste de adquisición que desarrolla los códigos de la técnica de control MPPT. En los resultados, finalmente, se presentan las simulaciones para probar la teoría expuesta y un prototipo experimental construido en el laboratorio con el fin de comprobar la eficacia de las técnicas de control.

Palabras clave: energías renovables, algoritmos MPPT, paneles fotovoltaicos, convertidor DC/AC, SEPIC, potencia.

Abstract

With knowledge of the depletion of conventional fossil resources for future product (oil, coal and gas), the need to reduce emissions of harmful gases in the atmosphere and concerns about climate change, incentives for the use of renewable energy and the great interest in this issue which has greatly increased within the framework of the Kyoto protocol. This paper talks about the study and application of different techniques the maximum power point tracking of PV modules (MPPT). Photovoltaic modules are coupled to a SEPIC (single-ended primary-inductance converter) converter topology to control the increase or decrease in the voltage produced using a low cost

microcontroller in which the codes of MPPT control technique develops. In the results, the simulations to test the exposed theory and an experimental prototype are presented. Constructed in the laboratory to test the effectiveness of control techniques.

Keywords: renewable energy, MPPT algorithms, photovoltaic panels, DC/AC, SEPIC, power.

1. Introducción

Las ERNC son todas las energías renovables (solar, eólica, biomasa, entre otras), con excepción de la energía hidroeléctrica, pues esta tiene fuertes impactos ambientales al utilizar grandes embalses artificiales que hacen desaparecer ecosistemas completos, según lo publicado en el informe *The Water-Energy Nexus Strategic Considerations for Energy Policy-Makers* (2014).

Recientemente, el gobierno de Colombia sancionó la Ley 1715 de 2014, para incorporar el uso de energías renovables al sistema energético que usa el país, proyectando así la creación de un Fondo de Energías Renovables y Gestión Eficiente. La nueva Ley establece el marco legal y los instrumentos necesarios para la promoción y aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, así como para el fenómeno de la inversión, la investigación y desarrollo de tecnologías limpias para la producción de energía; la eficiencia energética y la respuesta de la demanda en el marco de la política energética nacional. Además, se establecen incentivos para inversión en generación de energías no convencionales. La ley sancionada busca también establecer planes de acción para fomentar el aprovechamiento energético de la biomasa agrícola y forestal, los residuos sólidos que no sean susceptibles de reutilización y reciclaje, el recurso eólico en proyectos de generación en zonas no interconectadas (ZNI), y el potencial de la geotermia y la energía solar (Ministerio de Minas y Energía, 2014).

Teniendo en cuenta este contexto y marco legal, el cual traerá incentivos tributarios y arancelarios, el país empezará a explorar fuentes de energías nuevas y renovables, minimizando la dependencia del carbón, el petróleo y la energía dada por el fluido del agua.

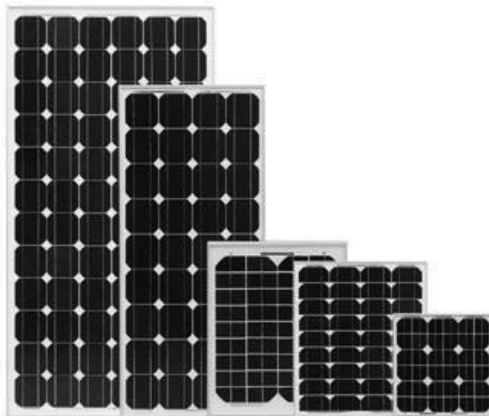
La necesidad de desarrollar técnicas que permitan el uso más eficiente del suministro de energía de los paneles fotovoltaicos es evidente y el presente trabajo tiene como objetivo estudiar y poner en práctica diferentes técnicas de MPPT (seguimiento del punto de máxima potencia) para los sistemas de inversores DC/DC que utilicen convertidor SEPIC.

2. Composición del sistema fotovoltaico

2.1 Módulos fotovoltaicos

El efecto fotovoltaico se produce por materiales semiconductores caracterizados por la presencia de bandas de energía donde se permite la presencia de electrones y otra totalmente “vacía” (banda de conducción). Las células fotovoltaicas se fabrican, en su mayoría, con silicio (Si), y este puede consistir en monocristalino, policristalino o cristales de silicio amorfo. Una unidad de base de la célula individual de un sistema fotovoltaico produce solo una pequeña energía eléctrica, que está, típicamente, entre 1W y 3W, con una tensión inferior a 1V. Los módulos más comerciales están compuestos de 36 células de silicio cristalino, conectados en serie, y cuanto mayor sea el módulo, mayor será la potencia y corriente disponible (Pereda, 2005); así se ilustra en la Figura 1.

Figura 1. Módulos fotovoltaicos



Fuente: www.instalacionenergiasolar.com.

La característica de un módulo fotovoltaico se da, generalmente, por su potencia máxima (Pmax). Debido a esto, dicho valor solo se considera el más importante cuando se trata de caracterizar un módulo en particular. Sin embargo, hay otros parámetros que también

tienen la funcionalidad de la misma y que se deben considerar, que son:

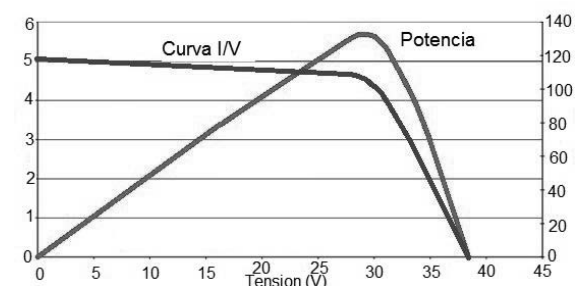
Tensión de circuito abierto (Voc): es la tensión máxima en los terminales del módulo PV cuando no hay carga conectada a la misma. Su valor es proporcionado por el fabricante para condiciones dadas de temperatura y de radiación.

La corriente de cortocircuito (Icc): la corriente máxima que el panel puede proporcionar, en determinadas condiciones de temperatura y radiación, cuando la tensión en sus terminales es nula y, por lo tanto, el poder es también cero.

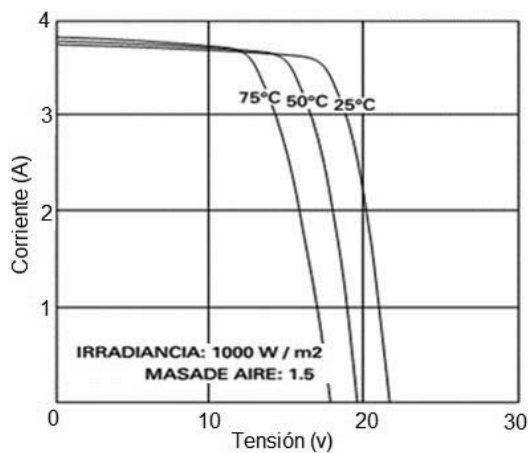
Punto de máxima potencia (MPP): en un panel fotovoltaico, para una condición climática dada, solo hay un punto de la curva I x V en la que la potencia máxima puede lograrse. Este punto corresponde al producto de la tensión Pmax y la corriente Pmax.

La Figura 2 muestra los parámetros mencionados anteriormente, y en las figuras 3 y 4 se muestran las curvas características para una instalación fotovoltaica (KD135SX-UPU) –módulo de Kyocera–. De la Figura 3 se puede decir que cuanto mayor sea la temperatura, menor será la tensión en los terminales del módulo, cambiando, por lo tanto, el punto de máxima potencia. En la Figura 4 se aprecia un cambio en la intensidad de la irradiación solar que causa variación en la corriente de salida para cualquier valor de la tensión. La corriente y la irradiancia varían en proporción directa. La tensión se mantiene (Orbegozo & Arivilca, 2010; Santos, Gallo & Ribeiro, 2010).

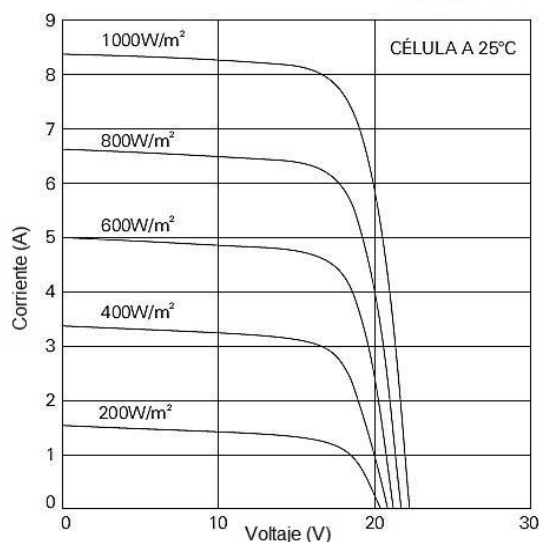
Figura 2. Curvas de características del panel fotovoltaico



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Curva característica I-V a diferentes temperaturas

Fuente: www.kyocerasolar.com/assets/001/5169.pdf.

Figura 4. Curva característica I-V cambio de la irradianción solar y variación en la corriente de salida

Fuente: www.kyocerasolar.com/assets/001/5169.pdf.

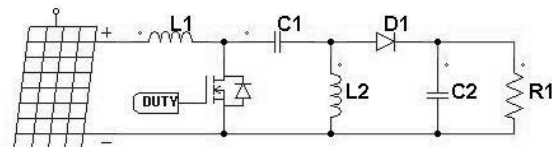
2. 2 Etapa DC/DC - Convertidor SEPIC

El convertidor de DC-DC utilizado es de topología SEPIC (Single-Endedprimary-Inductance Converter). Este tiene la posibilidad de elevar, mantener o disminuir el nivel de tensión en la salida del convertidor, sin invertir la polaridad a la salida (Olalla, Queinnec, Levya & El Aroudi, 2011).

El funcionamiento en estado estable para la topología SEPIC, en un periodo de conmutación, es el siguiente: cuando el transistor Q se encuentra encendido, el diodo D se polariza en inversa y no conduce durante el intervalo DT. En

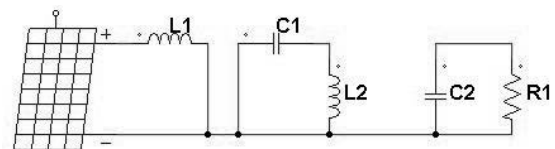
este periodo de tiempo, el inductor L almacena energía, el capacitor de salida se descarga a través de la resistencia de carga R, y la energía almacenada en el capacitor C se transfiere al inductor L (Figura 5).

Cuando el transistor se apaga, el diodo se polariza en directa, y a la vez conduce, permitiendo que la energía almacenada en los inductores L1 y L2 se transfiera a la resistencia de carga, cargando al capacitor de salida con un voltaje positivo; y en este mismo intervalo de tiempo D2Ts, el capacitor C1 se carga al voltaje de entrada V_p . En el intervalo D3Ts ni el transistor ni el diodo conducen, presentándose así una tercera malla de trabajo.

Figura 5. Circuito SEPIC

Fuente: elaboración propia.

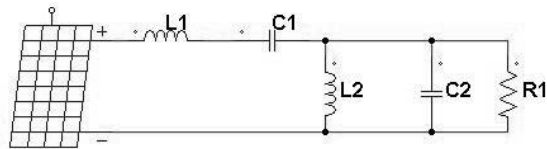
Durante este periodo de trabajo, el transistor es activado, obteniendo el circuito equivalente que se muestra en la Figura 6. Durante este proceso, el inductor L1 es cargado con la tensión de la fuente de entrada, mientras que el inductor L2 es cargado con la energía almacenada por el condensador C1. Adicionalmente, la carga se encuentra aislada de la tensión de entrada y es alimentada con la energía almacenada en el condensador de salida C2:

Figura 6. Circuito equivalente cuando el transistor está activado

Fuente: elaboración propia.

El siguiente paso es analizar el momento en el que el transistor está apagado, obteniendo el circuito que se muestra en la Figura 7. Durante este momento, las corrientes a través de los inductores L1 y L2 actúan como fuentes de corriente, obligando al diodo a polarizarse en forma directa (Coelho, Concer & Martins, 2010).

Figura 7. Circuito equivalente cuando el transistor está desactivado



Fuente: elaboración propia.

3. Técnicas de MPPT

Debido a la no linealidad de la relación entre los parámetros de salida de las células fotovoltaicas –causados por las variaciones climáticas (radiación solar y temperatura)–, se utiliza la técnicas de extracción de potencia máxima (MPPT), la cual es necesaria para maximizar la producción de electricidad en un sistema fotovoltaico y aumentar la eficiencia global del sistema (Chiu, 2010)

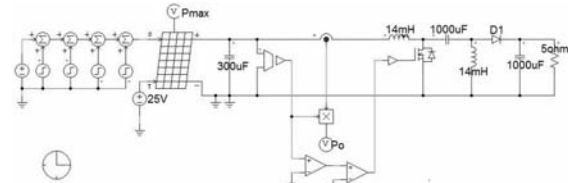
Como se observa en las Figuras 3 y 4, la corriente y la tensión generada en un módulo fotovoltaico son altamente dependientes de la radiación solar diaria y la temperatura ambiente, y exhiben un comportamiento no lineal, lo que hace necesario aplicar técnicas de control que sean capaces de realizar el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en cualquier condición de irradiación o temperatura (Kasa, Iida & Majumdar, 2002; Nogushi & Matsumoto, 2003).

3.1 Método de voltaje constante

La técnica está destinada a mantener la tensión constante del módulo solar V_{PV} , en un valor de referencia $V_{pv(ref)}$. Por lo tanto, para una temperatura constante, el punto de máxima potencia se mueve horizontalmente; es decir, para cualquier valor de la radiación, el voltaje que asegura la máxima transferencia de potencia es prácticamente el mismo y está delimitado dentro de un pequeño rango. Sin embargo, cuando hay variaciones en la temperatura de la celda, la tensión MPP se cambia considerablemente, pues, dado que ya no coincide con el valor de referencia inicial, esto hace que el módulo opere fuera del MPP. En la implementación analógica de este método, la tensión del módulo es leída por un sensor de voltaje y se compara con la tensión de referencia. De esta comparación resulta en un error, y de ahí se pasa por el modulador PWM,

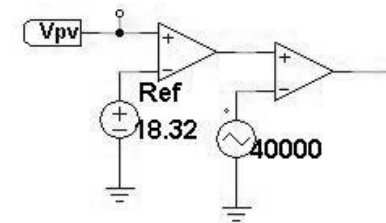
generando el ciclo de trabajo que activará el convertidor de conmutación (Carrijo, Ferreira, Guimarães & Camacho, 2010; Afonso, 2009).

Figura 8. Circuito SEPIC con algoritmo de voltaje constante



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Circuito comparador aplicado al método de voltaje constante



Fuente: elaboración propia.

3.2 Método Perturbación & Observación (P&O)

En este método, los valores instantáneos de tensión y corriente en el módulo, $V_{PV}(n)$, $I_{PV}(n)$, se utilizan para medir la potencia seguida por la ecuación:

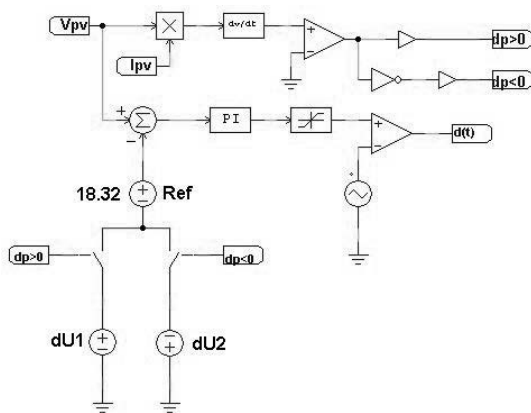
$$P_{PV}(n) = V_{PV}(n) \cdot I_{PV}(n) \quad (1)$$

La potencia en este momento se compara con la calculada anteriormente ($n-1$), donde se extrae la variación de energía entre los dos instantes de tiempo [$\Delta P_{PV} = P_{PV}(n) - P_{PV}(n-1)$]. Las variaciones de potencia positiva significan que la perturbación en la tensión de ΔV_{PV} contribuye a aumentar la potencia, por lo que la próxima actualización ΔV_{PV} se llevará a cabo con el mismo signo. Una vez encontrado el MPP, la siguiente actualización dirigirá un ΔP_{PV} negativo, por lo cual la perturbación se da lo contrario.

No obstante, la técnica P&O ofrece problemas dinámicos que indican el tamaño del tiempo o paso que se utiliza para calcular el ciclo de trabajo, lo que se interpreta en las

gráficas como oscilaciones alrededor del punto de funcionamiento. Cuando la perturbación es grande, el sistema alcanza el régimen con mayor velocidad, pero con las oscilaciones de tensión más altas en todo el punto óptimo. Sin embargo, cuando este paso es pequeño y el sistema se vuelve más lento, proporciona una menor variación en el voltaje del módulo alrededor del MPP (Afonso, 2009; Zakipour & Salimi 2011; Montagner, Maccari & Oliveira, 2010).

Figura 10. Circuito aplicado en el método P&O hecho en PSIM

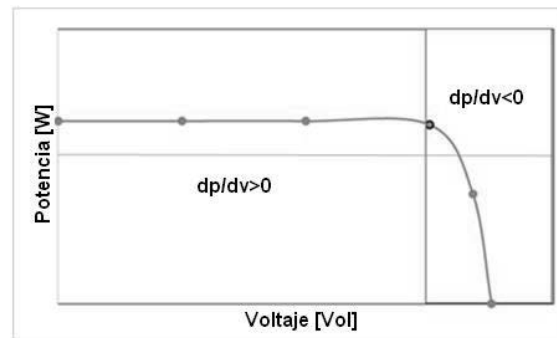
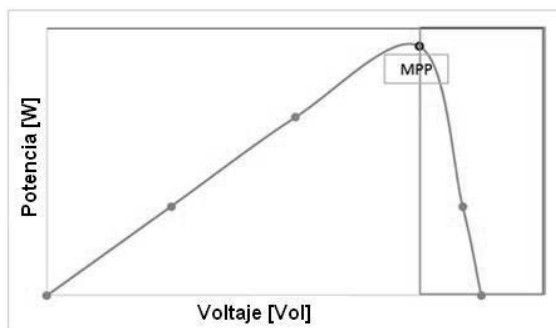


Fuente: elaboración propia.

3. 3 Método de conductancia incremental

Este método se basa en la observación del punto de máxima potencia: la derivada de la potencia con respecto al cero de la tensión del módulo, como se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Gráficos de potencia y derivada de la potencia con respecto a la tensión de los módulos fotovoltaicos



Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, el punto de máxima potencia se puede obtener siguiendo la Ecuación (2).

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \rightarrow \frac{d(V_{pv} I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + \left[\frac{d(I_{pv})}{dV_{pv}} \right] V_{pv} =$$

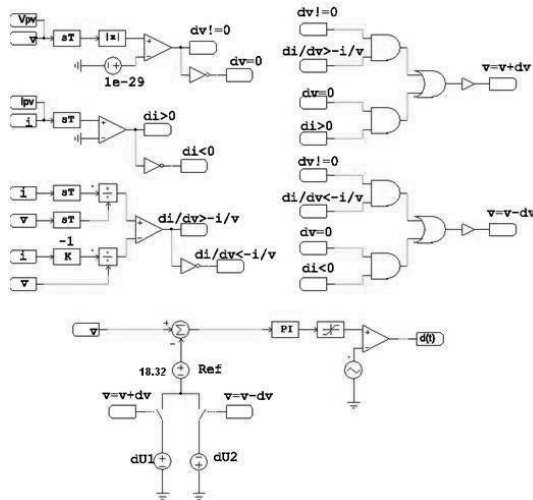
$$I_{pv}(n) + \left[\frac{I_{pv}(n) - I_{pv}(n-1)}{V_{pv}(n) - V_{pv}(n-1)} \right] V_{pv}(n) = 0 \quad (2)$$

Luego se tiene que $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$, quedando:

$$\frac{I_{pv}(n)}{V_{pv}(n)} + \frac{d(I_{pv})}{dV_{pv}} = 0 \rightarrow \frac{d(I_{pv})}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}(n)}{V_{pv}(n)} \quad (3)$$

Así, cuanto más lejos del sistema MPP está funcionando, mayor es la dP_{pv}/dV_{pv} . Este atributo permite el cálculo de un incremento variable en el ciclo de trabajo, lo que significa que en situaciones dinámicas el sistema necesitará un seguimiento de alta velocidad aliada a las oscilaciones de baja cuando se golpea el régimen. Por tal motivo, el principal objetivo es ajustar la tensión del módulo, de manera que el sistema siempre opere en $dP_{pv}/dV_{pv}=0$ (Andrea, Gules, Romanelli & Pinto, 2010; Oliveira & Peres, 2014).

Este método proporciona un buen rendimiento en los cambios rápidos que reporta la temperatura de radiación y el panel solar, con menos errores que en el método de P&O (Afonso, 2009).

Figura 12. Implementación del método de conducción incremental diseñada en PSIM

Fuente: elaboración propia.

4. Diseño del convertidor DC/DC SEPIC

El controlador de carga MPPT tiene un voltaje nominal de 12v que permite un potencial de alimentación nominal hasta de 25w; es decir que se podrá conectar al prototipo un módulo fotovoltaico con voltaje nominal de 12v y potencia nominal inferior a 25w.

Tabla 1. Especificaciones eléctricas de panel solar EXMORK 25W

| | |
|---|--------------------------------|
| Potencia máxima | 25w |
| Voltaje nominal (Vn) | 12v |
| Voltaje a circuito abierto (Voc) | 21.5 v +/-0.5v |
| Voltaje en la punta de máxima potencia (Vmpp) | 17.5 v +/-0.5v |
| Corriente de corto circuito (Isc) | 1.57 A +/- 0.1A |
| Corriente en el punto de máxima potencia (Impp) | 1.43 A +/- 0.1 ^a |
| Variación de potencia | 5% |

Fuente: elaboración propia.

Para el dimensionamiento de los inductores y los capacitores L1, L2, C1 y C2, se deben asumir los valores críticos de estos elementos en las peores condiciones posibles, con el fin de que se obtengan los máximos valores de inductancias y capacitancias para que soporten las diferentes

corrientes y voltajes del sistema, y que cumplan las especificaciones del controlador.

L1 se obtiene mediante:

$$L_1 \geq \frac{E\delta}{f\Delta I_1} \quad (4)$$

Donde E=17.5v. Este debe ser el máximo voltaje que proporciona el módulo fotovoltaico; por lo tanto, se asume que es igual al voltaje en el punto de máxima potencia (Vmpp), ya que el objetivo del control MPPT es obtener el Vmpp y la máxima corriente en el punto de máxima potencia (Impp) del panel FV, para cualquier radiación solar.

El circuito debe trabajar a una alta frecuencia (f=40khz) de conmutación, porque las fórmulas que permiten el cálculo de los elementos del convertidor se obtuvieron asumiendo las formas de onda de los voltajes y corrientes lineales. Y esto implica una alta frecuencia de conmutación del circuito.

$\Delta I_1 = I_{mpp} \times (\% \Delta I_1)$, donde la corriente de la componente ondulatoria pico a pico de corriente ΔI_1 , se puede ver en la Figura 14. La corriente en el punto de máxima potencia (Impp) se escoge para la mínima radiación solar del funcionamiento del sistema, y como el consumo del controlador es de 140mA, se asume un valor de Impp=100 mA. El ΔI_1 se obtiene multiplicando la corriente Impp por el porcentaje del rizado de corriente, el cual se estima de 10 %.

$$\Delta I_1 = 100mA * 0.1 = 0.01A \quad (5)$$

Por tal razón,

$$L_1 \geq \frac{17.5V \times 0.5}{40kHz \times 0.01A} = 21.8mH \quad (6)$$

Teniendo en cuenta que entre mayor capacitancia se obtiene un menor rizado, y considerando el valor de referencia de C_1 , se asume un valor para

$$C_1 = C_2 = 1000\mu f$$

Para el dimensionamiento de interruptor Q_1 , en primer lugar, se debe escoger el tipo de semiconductor. Existen dos buenas opciones como

son: los MOSFET y los IGBT. Para este fin se escogieron los MOSFET, debido a la relación desempeño-costeo, tal y como se muestra en la Figura 13.

Figura 13. MOSFET



Fuente: elaboración propia.

El MOSFET escogido es el IRF540N con característica de funcionamiento como se presenta en la Tabla 2. Dentro de la selección de este dispositivo, se destaca el manejo directo de su Gate mediante una señal PWM generada por un microcontrolador o por un integrado 555.

Tabla 2. Característica de funcionamiento del MOSFET IRF540

| | |
|---------|---------|
| VDSS | 100 Vol |
| RDS(on) | 44 mΩ |
| ID | 33 Amp |

Fuente: Data Sheet Mosfet IRF540.

El diodo a usar en este tipo circuitos tipo SEPIC debe soportar voltajes superiores a 25V y una corriente máxima de 2.5 Amp, y, además, trabajar a alta frecuencia de conmutación (como los que presenta los diodos Schottky), que debe tener recuperación rápida en los tiempos de conmutación acorde con la señal que controla el MOSFET (PWM). Para este trabajo, se ha optado por el diodo Schottky MBR340, el cual soporta 40V y una corriente de 3A.

El capacitor C_{in} filtra la señal de voltaje que alimenta el SEPIC, generada por el sistema fotovoltaico, que varía como consecuencia de la incidencia solar. Esta señal debe tener poco rizado, lo que justifica la selección de un capacitor con una alta impedancia ($1000\mu f$) de entrada que soporte la máxima tensión que genera el sistema fotovoltaico ($V_{oc} = 21.5V$) (Zakipour & Salimi, 2011; Andrea, Gules, Romaneli & Pinto 2010).

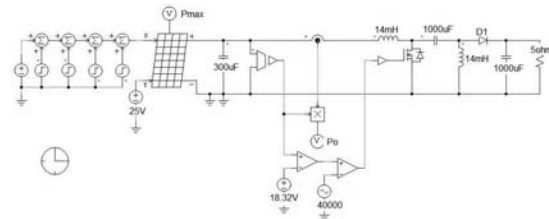
5. Simulación de los diferentes algoritmos de control MPPT en el circuito SEPIC

Para la simulación de los diferentes métodos de MPPT estudiados, se usó la plataforma PSIM y la herramienta "C_BLOCK". En la etapa de análisis experimental, este código será transferido al microcontrolador para la implementación del sistema.

5.1 Análisis del método voltaje constante

Es un método muy simple que asume el hecho de que tanto la variación de temperatura como la radiación solar son insignificantes y que una referencia constante de voltaje es una aproximación aceptable.

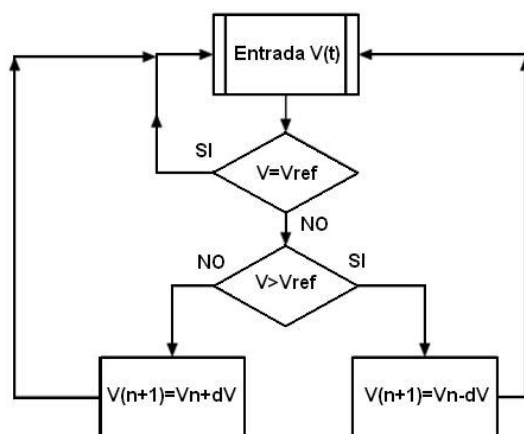
Figura 14. Configuración circuito SEPIC usado para método de voltaje constante diseñado con PSIM



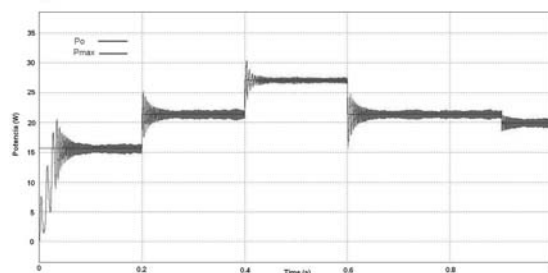
Fuente: elaboración propia.

La técnica de voltaje constante consiste en mantener el módulo en un valor de referencia de tensión (que corresponde a la tensión de salida en el punto de máxima potencia). Por esto, para una temperatura constante, el punto de máxima potencia se mueve horizontalmente; es decir, para cualquier valor de la radiación, el voltaje que asegura la máxima transferencia de potencia es prácticamente el mismo y está delimitado dentro de un pequeño rango. Sin embargo, cuando hay variaciones en la temperatura de la celda, la tensión MPP cambia considerablemente, pues ya no coincide con el valor de referencia cambiando el punto de operación de MPP.

En la implementación analógica de este método, la tensión del módulo es leído por un sensor de voltaje y se compara con la tensión de referencia. De esta comparación resulta el error, el cual se pasa por el modulador PWM, generando el ciclo de trabajo que activará el convertidor de conmutación.

Figura 15. Diagrama de flujo del método voltaje constante

Fuente: elaboración propia.

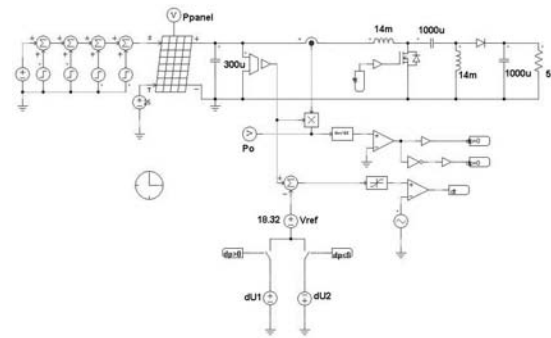
Figura 16. Comparación de la potencia ideal del panel vs. potencia extraída con el método de voltajes constantes a temperatura constante

Fuente: elaboración propia.

Analizando la Figura 16, se observa que el método funciona de acuerdo con la teoría, es decir, siguiendo la potencia ideal simulada; sin embargo, hay un rizado considerable.

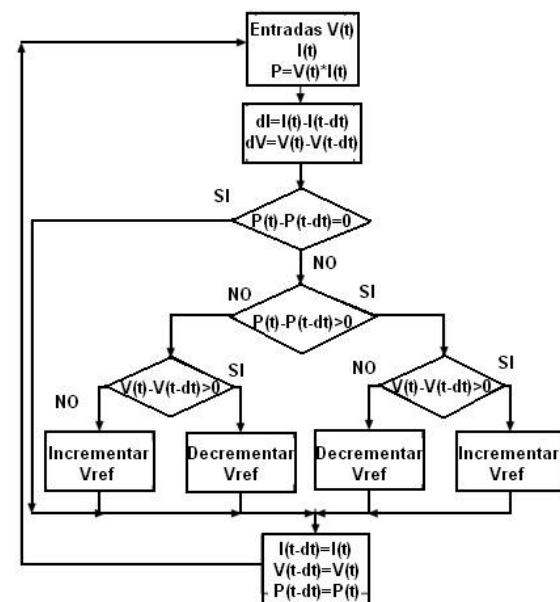
5.2 Análisis del método Perturbación y Observación (P&O)

Es el método MPPT más empleado, por su sencillez y facilidad de implementación. En general, el proceso consiste en medir los valores actuales de voltaje y corriente del panel para calcular la potencia que está entregando. Este valor de potencia se compara con el valor calculado anteriormente y se toma la decisión respecto al aumento o disminución del voltaje de referencia. El algoritmo funciona del modo que se presenta en la Figura 17.

Figura 17. Configuración circuito SEPIC usado para método P&O diseñado con PSIM

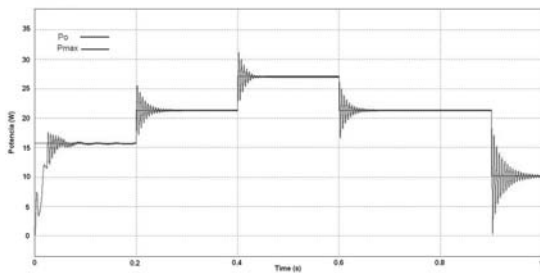
Fuente: elaboración propia.

A pesar de ser más compleja que la técnica anterior, el P&O tiene problemas de parpadeo alrededor del punto de funcionamiento. Cuando la perturbación es grande, el sistema alcanza el régimen con mayor velocidad, pero con las oscilaciones de tensión más altas en todo el punto óptimo. No obstante, cuando este paso es pequeño, el sistema se vuelve más lento y proporciona una menor variación en el voltaje del módulo alrededor del MPP.

Figura 18. Diagrama de flujo del método P&O diseñado en este trabajo

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Comparación de potencia ideal del panel vs. potencia extraída con el método P&O a temperatura constante



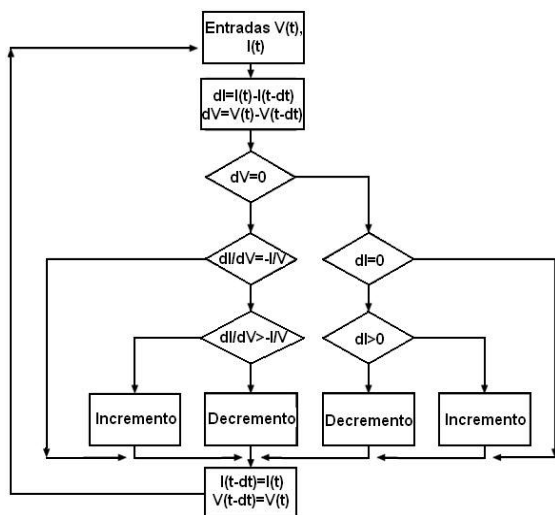
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 19, se observa que el método P&O funciona adecuadamente y sigue la señal de potencia ideal; también se observa una disminución considerable del rizado.

5.3 Análisis del método conductancia incremental

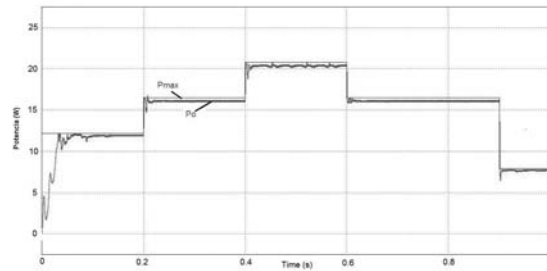
Este algoritmo fue propuesto por Hussein (1995) con el fin de corregir algunos problemas del algoritmo P&O. A diferencia de P&O, el algoritmo de conductancia incremental se detiene cuando alcanza el punto óptimo y se detecta cuando se producen cambios en el punto de operación. De este modo se eliminan las oscilaciones alrededor de dicho punto.

Figura 20. Diagrama de flujo del método de conductancia incremental



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Comparación de la potencia ideal del panel vs. potencia extraída con el método de conductancia incremental a temperatura constante



Fuente: elaboración propia.

6. Comparativo de los algoritmos MPPT

El algoritmo de voltaje constante se trata de un método fijo que trabaja según los datos suministrados por el panel solar. Se caracteriza por no tolerar los cambios de temperatura, ya que esta genera un cambio en el punto de operación de MPP.

El algoritmo de P&O se trata de un método iterativo de aproximación en el que se van tomando medidas de corriente y tensión para calcular la potencia. Si la potencia es constante, se siguen realizando dichas medidas. En el caso de que la potencia se incremente o disminuya, se chequea la variación de tensión, y en función de su dirección se varía la tensión –aumentándola o disminuyéndola–. Para moverse a lo largo de la curva de la célula buscando el MPP, se utiliza un convertidor CC-CC SEPIC.

Para el método de conductancia incremental, la pendiente que tiene la derivada de la corriente con respecto a la tensión, es utilizada para obtener MPP ($dI/dU = -I/U$). Entonces, cuando la tensión varía hacia valores mayores o menores, el tiempo de la potencia cambia, y si esta aumenta, se continúa variando la tensión en la misma dirección. Lo mismo ocurre en sentido contrario cuando la potencia disminuye.

Al comparar los tres métodos, se puede decir que el método de conductancia incremental (Figura 23) resulta ser el más óptimo, toda vez que estabiliza de forma más rápida y no presenta oscilaciones sobre el punto MPP.

7. Conclusiones

En este trabajo se presenta el estudio y validación de las diferentes técnicas de control MPPT (seguimiento del punto de máxima potencia) para extraer la máxima potencia de los módulos fotovoltaicos. Por tanto, se realizaron los análisis teóricos y computacionales para determinar las características de rendimiento de las técnicas de MPPT. En este escenario, las técnicas de control MPPT fueron implementadas en la plataforma computacional PSIM.

En la técnica de voltaje constante se presenta un error derivado de la comparación de la señal tomada en el sistema por un sensor de voltaje y la comparación con la tensión de referencia, la cual genera oscilaciones considerables alrededor del máximo punto de potencia. También en esta técnica se puede concluir que, debido a que las medidas dependen de las medidas de voltajes y estas son constantes, el punto de máxima potencia se mueve en sentido horizontal en la curva de tensión; sin embargo, cuando hay sobrecalentamiento y exceso de temperatura, se presentan variaciones del punto de máxima potencia.

En la técnica P&O pudo comprobarse que la señal obtenida tiene oscilaciones (parpadeo) en torno al punto de funcionamiento, dado que, cuando la perturbación es grande, el sistema alcanza el régimen de mayor velocidad. Los rizados en esta técnica se atenúan a medida que el algoritmo ajusta y establece el máximo punto de potencia. Este tiempo de estabilización depende de la capacidad de recuperación del diodo, y, en el caso del MOSFET, de la variación de la señal obtenida.

Se concluye que la técnica de conductancia incremental tiene una velocidad de respuesta óptima, frente a condiciones dinámicas como los cambios de irradiancia solar; condiciones impuestas usualmente por el clima, las nubes y las horas de operación.

Agradecimientos

El autor Diego Mejía agradece el apoyo y acompañamiento por parte del grupo de investigación Logos de la Universidad de Pamplona.

Referencias

- Afonso, D. A. D. (2009). *Modelação e Controlo Analógico de um Sistema de Microgeração a Energia Solar*. Dissertação de Mestrado.
- Andrea, C. Q., Gules, R., Romaneli, E. F. R., Pinto J. O. P. & Gonçalves R. C. (Setembro, 2010). Sistema de Rejeição de Distúrbio e Rastreamento H2 e H Aplicado a Conversor Boost Usando LMIs. No XVIII Congresso Brasileiro de Automatica, 12 a 16 de setembro de 2010 - Bonito/MS.
- Carrijo, D. R., Ferreira, R. S., Guimarães, S. C. & Camacho, J. R. (Setembro, 2010). Uma Proposta de Técnica de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência de um Pannel Fotovoltaico. No XVIII Congresso Brasileiro de Automatica, 12 a 16 de setembro de 2010 - Bonito/MS.
- Chiu, C. S. (Dezembro, 2010). T-S Fuzzy Maximum Power Point Tracking Control of Solar Power Generation Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25, 4.
- Coelho, R. F., Concer, F. M. & Martins, D. C. (Setembro, 2010). Estudo Comparativo Entre Conversores Estáticos Operando como Rastreadores de Máxima Potência em Sistemas Fotovoltaicos. No XVIII Congresso Brasileiro de Automatica, 12 a 16 de setembro de 2010 - Bonito/MS.
- Kasa, N., Iida T. & Majumdar, G. (Abril, 2002). Robust Control for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic System. No Power Conversion Conference Conference, 2 a 5 de abril de 2002 - Osaka/Japão.
- Ministerio de Minas y Energía - Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014. Mayo/2014. Bogotá: Diario Oficial.
- Montagner, V. F., Maccari, L. A. & Oliveira, R. C. L. F. (Setembro, 2010). Design and Experimental Validation of a Robust H2 Controller Applied to a Boost Converter. No XVIII Congresso Brasileiro de Automatica, 12 a 16 de Setembro de 2010 - Bonito/MS.
- Nogushi, T. & Matsumoto, H. (Setembro, 2003). Maximum Power Point Tracking Method of Photovoltaic System Using Only Single Current Sensor. No 10th European Conference on Power Electronics and Applications, 2 a 4 de Setembro de 2003 - Toulouse/França.

Olalla, C., Queinnec, I., Levya R. & El Aroudi, A. (2011). Robust Optimal Control of Billinear DC-DC Converters. *Control Engineering Practice*, 19, 688 -699.

Oliveira, R. C. L. F. & Peres P. L. D. (2014). Análise de Controle de Sistemas Lineares por Meio de Desigualdades Matriciais Lineares. *SBA do XVIII Congresso Brasileiro de Automática*.

Orbegozo, C. & Arivilca, R. (2010). Manual Técnico para instalaciones domiciliarias. *Green Energy Consultoría y Servicios SRL*.

Pereda Soto, I. (2005). Celdas Fotovoltáicas en Generación Distribuida. Santiago de Chile: Universidad Católica de Chile.

Santos, P., Gallo, C. A. & Ribeiro, E. R. (Setembro, 2010). Análise das Associações de Módulos Fotovoltáicos Sobreavolados. No XVIII Congresso Brasileiro de Automatica, 12 a 16 de Setembro de 2010 - Bonito/MS.

Zakipour, A. & Salimi, M. (Dezembro, 2011). On Backstepping Controller Design in Buck-Boost DC-DC Converter. No Congresso ICEECE 2011, Dezembro de 2011.