

## **ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE ALGORITMOS DE CONTROL PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED ELÉCTRICA**

**M. G. Molina<sup>1</sup>, P. E. Mercado<sup>1</sup>, P. E. Wiernes**

Instituto de Energía Eléctrica (IEE) – Universidad Nacional de San Juan (UNSJ)

Av. Libertador San Martín Oeste 1109, J5400ARL, San Juan, Argentina

Web: <http://www.iee-unsj.org/>, Tel. 54-264-4226444, Fax 54-264-4210299, E-mail: [mgmolina@iee-unsj.edu.ar](mailto:mgmolina@iee-unsj.edu.ar)

**RESUMEN:** Este trabajo investiga la efectividad de los métodos de seguimiento del punto de máxima potencia (SPMP) de sistemas solares fotovoltaicos (FV) más utilizados en la actualidad. Para ello se proponen modelos detallados de los paneles solares FV y del sistema electrónico de acondicionamiento de potencia utilizado para la conexión con la red eléctrica. El sistema completo se simula usando SimPowerSystems de MATLAB/Simulink, el cual cuenta con librerías específicas para la modelación de dispositivos electrónicos de potencia y algoritmos de control avanzados. Entre los métodos de SPMP estudiados se destacan: “Perturbación y Observación” (PyO) y “Conductancia Incremental” (CondInc). Las características tanto de estado estacionario como transitorias de cada algoritmo de control se analizan en profundidad y se comparan utilizando un índice de desempeño energético propuesto. A partir de esto, se demuestra que el SPMP de tipo CondInc presenta el mejor desempeño dinámico y reduce notablemente los problemas de oscilaciones que surgen con la aplicación del algoritmo PyO ante bruscas variaciones de los factores climáticos.

**Palabras clave:** Conductancia Incremental, Convertidor de CC/CC Elevador de Tensión, Inversor Fuente de Tensión, Perturbación y Observación, Seguidor del Punto de Máxima Potencia, Sistema Fotovoltaico.

### **INTRODUCCIÓN**

En los últimos años se han presentado problemas relacionados con factores energéticos (crisis petrolera), ecológicos (cambio climático) y de demanda eléctrica (alta tasa de crecimiento) a nivel mundial. Estas dificultades, lejos de encontrar soluciones efectivas, se encuentran en continuo aumento, lo cual lleva a plantear la necesidad de alternativas tecnológicas para asegurar, por un lado el suministro adecuado y de calidad de la energía eléctrica y por el otro, el ahorro y el uso eficiente de los recursos naturales preservando el medio ambiente.

Una de estas alternativas tecnológicas es generar energía eléctrica lo más cerca posible del lugar de consumo, precisamente como se hacía en los albores de la industria eléctrica, pero incorporando ahora las ventajas de la tecnología moderna y el respaldo eléctrico de la red del sistema eléctrico para compensar cualquier requerimiento adicional de energía eléctrica. A esta modalidad de generación eléctrica se la conoce como Generación In-Situ, Generación Dispersa, o Generación Distribuida, y representa un cambio en el paradigma de la generación de energía eléctrica centralizada. Aquí es donde se afianza la idea de utilizar tecnologías que utilicen fuentes de energía renovable, ilimitada y que no generen contaminación ambiental, como son los sistemas de generación fotovoltaicos (FV). Esta idea se ve reforzada por el Protocolo de Kyoto sobre el cambio climático que brinda un mecanismo internacional de descontaminación para reducir las emisiones contaminantes al medio ambiente ofreciendo incentivos económicos para contribuir a la mejora de la calidad ambiental regulando la contaminación generada por procesos productivos. De esta forma, generadores de energía limpia pueden vender los bonos de carbono que obtienen por el uso de energías renovables no contaminantes y reducir así aún más los costos de instalación de esta tecnología. Argentina cuenta en gran parte de su territorio nacional con un muy buen recurso solar, haciendo altamente factible la generación FV.

Los elevados costos de los paneles solares fotovoltaicos imponen la necesidad de operar continuamente los módulos FV en el punto de máxima potencia (PMP) independientemente de los factores climáticos y de la carga. Esto asegura una operación óptima y eficiente de todo el sistema FV. Como es bien conocido, la máxima potencia producida por una celda solar depende de su temperatura y de la radiación solar absorbida, los cuales representan factores climáticos impredecibles, de forma tal que es necesario un seguimiento continuo del punto de máxima potencia. Además, para sistemas FV acoplados a la red se requiere del uso de convertidores estáticos de potencia de alta eficiencia para inyectar potencia activa en el sistema eléctrico con el objetivo de descongestionar la red y de mejorar la calidad de suministro, entre otros factores.

Durante años se han desarrollado diferentes métodos de control para el seguimiento del PMP (Applebaum 1987; Khouzam, 1990; Saied et al. 1991; Alghuwainem, 1994; Won et al. 1994; Enslin, 1997; Hiyama et al. 1995a; Hiyama et al. 1995b; Hua, et al., 1998; Santos et al. 2006). Entre ellos, algunos métodos controlan las características del módulo FV para adaptarse a condiciones particulares de carga (Applebaum 1987; Khouzam, 1990; Saied et al. 1991; Alghuwainem, 1994). Asimismo, Enslin (1997) propuso un SPMP con conmutación suave para obtener la óptima eficiencia del sistema FV. Por otra parte, se utilizaron redes neuronales para el seguimiento del PMP y algoritmos de control con lógica difusa (Hiyama et al. 1995a;

---

<sup>1</sup> Investigador CONICET.

Hiyama et al. 1995b, Won et al. 1994). Otro tipo de seguimiento del PMP se basa en el ajuste continuo de la carga vista por el sistema FV para encontrar el PMP. Esta técnica puede llevarse a cabo por medio de elementos discretos y sensores; sin embargo, el uso de microprocesadores o de procesadores digitales de señales (DSP) tiene la ventaja adicional de flexibilidad y simplicidad de aplicación con diferentes tipos de sistemas FV (Hua, et al., 1998; Santos et al. 2006). La eficiencia de esta técnica depende del algoritmo que realiza el seguimiento del PMP a través de la adquisición de varias mediciones del sistema (tensión, corriente y potencia).

Entre todas las técnicas descritas anteriormente, principalmente las basadas en control digital y DSP han captado la atención de los investigadores debido a la buena combinación de flexibilidad, precisión y simplicidad. De éstos últimos, sobresalen por su utilidad dos algoritmos de SPMP, el método de "Perturbación y Observación" (PyO) (Hua, et al., 1998) y el método de "Conductancia Incremental" (CondInc) (Hussein et al. 1995).

De acuerdo con estas consideraciones, este trabajo investiga en detalle la efectividad de estos dos algoritmos de control a través de simulaciones llevadas a cabo utilizando SimPowerSystems de MATLAB/Simulink, el cual cuenta con librerías específicas para la modelación de dispositivos electrónicos de potencia y algoritmos de control avanzados. Para ello se proponen modelos detallados de los paneles solares fotovoltaicos (FV) y del sistema electrónico de acondicionamiento de potencia utilizado para la conexión con la red eléctrica. Las características tanto de estado estacionario como transitorio de cada algoritmo de control se analizan en profundidad y se comparan usando un índice de desempeño energético propuesto que tiene en cuenta estos dos rasgos.

## MODELO DE LA CELDA/SISTEMA FOTOVOLTAICO

Un sistema solar FV está compuesto por celdas solares elementales, las cuales se construyen básicamente de un material semiconductor de juntura p-n que convierte directamente la radiación solar en corriente continua utilizando el efecto fotovoltaico. La Figura 1.a describe el bien conocido circuito eléctrico equivalente de una celda solar FV constituido por una fuente de corriente generada por luz, una resistencia no lineal de la juntura p-n modelada por un diodo, una resistencia intrínseca paralela y una resistencia intrínseca serie.

Las celdas solares individuales FV se agrupan en unidades de mayor potencia conocidas como módulos o sistemas FV, los cuales se combinan en serie y en paralelo para proveer los valores deseados de corriente y de tensión. El circuito equivalente de las celdas solares agrupadas en paralelo,  $N_p$  y en serie,  $N_s$  se muestra en la Figura 1.b. La ecuación característica corriente-tensión  $I-V$  que describe el comportamiento eléctrico de este generador FV se muestra a continuación (Angrist, 1971):

$$I_A = N_p I_F - N_p I_S \left\{ \exp \left[ \frac{q}{AkT} \left( \frac{V_A}{N_s} + \frac{I_A R_S}{N_p} \right) \right] - 1 \right\} - \frac{N_p}{R_p} \left( \frac{V_A}{N_s} + \frac{I_A R_S}{N_p} \right), \quad (1)$$

donde:

- $I_A$ : corriente de salida del sistema FV
- $V_A$ : tensión de salida del sistema FV
- $I_F$ : foto corriente de la celda solar
- $I_S$ : corriente de saturación inversa de diodo
- $q$ : carga de un electrón,  $1,60217733 \cdot 10^{-19}$  C
- $A$ : factor de idealidad de la juntura p-n, entre 1 y 5
- $k$ : constante de Boltzmann,  $1,380658 \cdot 10^{-23}$  J/K
- $T$ : temperatura de la celda en K
- $R_S$ : resistencia intrínseca serie de la celda
- $R_p$ : resistencia intrínseca paralelo o derivación de la celda

La corriente de saturación inversa de la celda solar,  $I_S$  varía con la temperatura de acuerdo con la Ecuación 2:

$$I_S = I_{RS} \left[ \frac{T}{T_R} \right]^3 \exp \left[ \frac{qE_G}{Ak} \left( \frac{1}{T_R} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (2)$$

donde:

- $T_R$ : temperatura de referencia de la celda solar en K, típicamente 298,15 K (25 °C)
- $I_{RS}$ : corriente de saturación inversa de la celda solar para la temperatura de referencia
- $E_G$ : energía de la banda prohibida del semiconductor de la celda solar

La foto corriente,  $I_F$  de la celda solar depende de la radiación solar y de la temperatura como sigue:

$$I_F = [I_{SC} + k_T (T - T_R)] \frac{S}{S_R}, \quad (3)$$

donde:

- $I_{SC}$ : corriente de corto circuito de la celda para niveles de temperatura y radiación de referencia
- $k_T$ : coeficiente de temperatura de corriente de corto circuito
- $S$ : radiación solar en  $W/m^2$
- $S_R$ : radiación solar de referencia, generalmente  $1000 W/m^2$

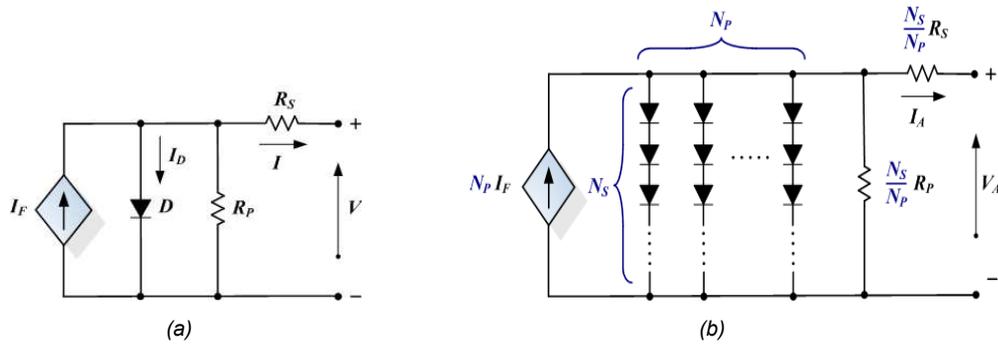


Figura 1: Modelo equivalente de una celda/sistema FV, (a) celda solar, (b) sistema fotovoltaico.

Como puede derivarse claramente a partir del modelo matemático descrito por las Ecuaciones 1 a 3, el sistema FV exhibe una curva característica  $I-V$  y  $P-V$  altamente no lineal, dependientes de la radiación solar y de la temperatura. Este modelo se implementó en el programa de simulación MATLAB/Simulink (The MathWorks Inc., 2005), para el caso de un sistema FV real de 250 W, compuesto por 5 módulos FV monocristalinos BP250/1 de alta eficiencia (BP Solar) de 50 W, utilizando Toolboxes específicos y funciones de usuario. En el modelo se adoptaron valores a partir de las especificaciones técnicas dadas por el fabricante y se consideraron constantes las resistencias intrínsecas, las cuales se midieron a partir del ensayo de cada módulo fotovoltaico. Se utilizó simulación en tiempo discreto, con tiempo de muestreo de  $5 \mu s$ , para reducir el tiempo de cálculo respecto de la simulación en tiempo continuo y además compatibilizar con la modelación detallada de los dispositivos electrónicos de potencia que se realizó posteriormente.

Las Figuras 2.a y 2.b muestran las curvas características de corriente-tensión y potencia-tensión de salida del sistema FV, respectivamente, obtenidas a partir de simulaciones realizadas para diferentes niveles de radiación solar y temperatura de celda. Como puede observarse, el sistema FV presenta un PMP que divide la curva característica de  $I-V$  de salida en dos partes: la parte izquierda se define como una región de fuente de corriente en donde la corriente de salida se aproxima a un valor constante, y la parte derecha es una región de fuente de tensión en donde la tensión de salida varía dentro de un cierto rango. Puesto que el PMP cambia con variaciones de radiación y temperatura, se requiere un ajuste continuo de la tensión en los terminales del sistema para proveer la máxima potencia generada a la carga. Además, considerando que para aplicaciones acopladas a la red eléctrica las cargas suministradas por los sistemas FV operan con una tensión constante, es necesario encontrar el PMP de la celda solar independientemente de la tensión de la carga. Como resulta evidente a partir de las Figuras 2.a y 2.b, el punto de operación óptimo del sistema FV, es decir el PMP, describe una trayectoria para diferentes condiciones de radiación y de temperatura. De este modo queda definido el lugar del PMP para diferentes condiciones climáticas, y de esta forma los valores máximos y mínimos de tensión en los terminales del sistema FV.

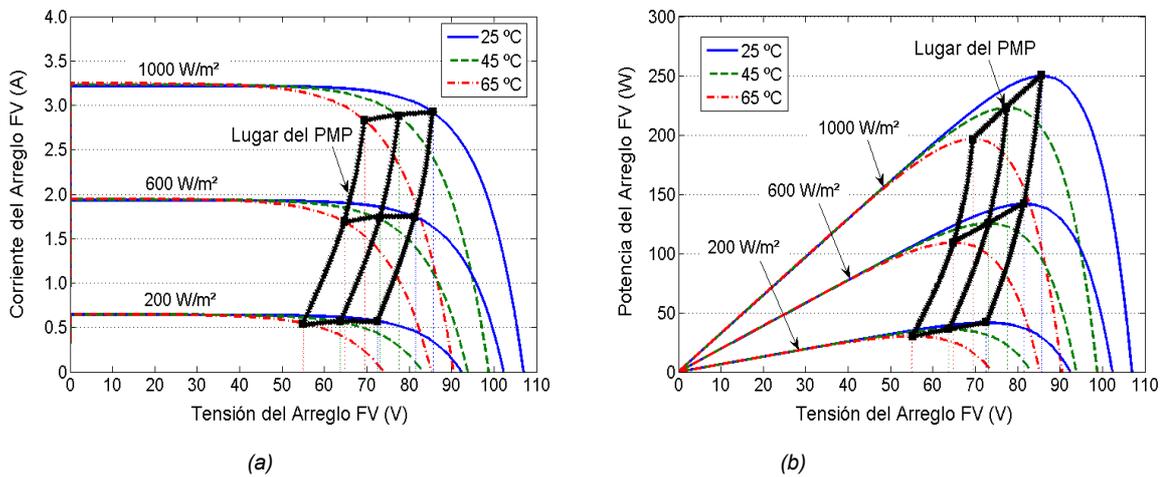


Figura 2: Curvas características de un sistema de 5 módulos FV BP 250/1 conectados en serie, obtenidas por simulación para varios niveles de temperatura de celda y radiación solar, (a) curva  $I-V$ , (b) curva  $P-V$ .

Resulta evidente a partir de las figuras anteriores la influencia de ambos factores climáticos sobre las características  $I-V$  y  $P-V$  de salida. La temperatura de la celda solar demuestra tener mayor influencia en la posición del PMP y por ende en la eficiencia energética del sistema FV que la radiación solar, pero experimentalmente los resultados revelan que la velocidad de los cambios es mucho mayor para el caso de la radiación solar que para el de la temperatura de la celda.

En la Tabla 1 se presentan las especificaciones técnicas de los módulos FV BP250/1 de alta eficiencia de 50 W dadas por el fabricante para condiciones de prueba estándar con irradiancia solar de  $1000 \text{ W/m}^2$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura de módulo. Estos valores se comparan con los datos obtenidos a partir de las mediciones realizadas experimentalmente y los datos provenientes de la simulación realizada.

Módulo BP 250	Datos provistos por el fabricante	Datos medidos	Datos simulados
Potencia máxima nominal, Pmax (W)	50	49.93	49.71
Tensión en el punto de Pmax (V)	17	17.15	17.23
Corriente en el punto de Pmax (A)	2.94	2.91	2.89
Corriente de cortocircuito (A)	3.22	3.2	3.18
Tensión a circuito abierto (V)	21.20	21.32	21.4

Tabla 1: Comparación de especificaciones técnicas del panel BP250 utilizado con valores medidos y simulados

## CONVERTIDOR DE CORRIENTE CONTINUA A CORRIENTE CONTINUA (CC/CC) TIPO INCREMENTAL

Para aplicaciones FV acopladas a la red, han sido estudiadas a nivel mundial principalmente dos topologías de hardware para el SPMP, conocidas como sistemas FV de una etapa y de dos etapas. En este trabajo, se ha seleccionado el sistema de conversión de energía FV de dos etapas porque ofrece un grado de libertad adicional en la operación del sistema FV cuando se compara con la configuración de un nivel. Generalmente, esto se consigue a expensas de una leve disminución de la eficiencia global del sistema por razón de tener que conectar dos etapas en cascada. De esta forma, incluyendo un convertidor de CC/CC o troceador entre el sistema FV y el inversor conectado a la red eléctrica, como se muestra en la Figura 3, es posible alcanzar simultáneamente varios objetivos de control con la operación del sistema FV. Teniendo en cuenta la integración del sistema FV con el inversor fuente de tensión (VSI en inglés) de tres niveles presentado por Molina y Mercado (2006), se estudia en este trabajo el desempeño del sistema FV-SPMP conectado a la red.

El convertidor de CC/CC está constituido por un Transistor Bipolar de Compuerta Aislada (IGBT)  $T_b$  que funciona como llave principal de potencia en una topología incremental unidireccional estándar que emplea una inductancia almacenadora de energía  $L_b$ , un diodo rectificador  $D_b$  y un capacitor de filtrado  $C$ . El convertidor está conectado al sistema FV previamente modelado a través de un capacitor de filtrado  $C_A$  que permite reducir el ripple de alta frecuencia generado por la conmutación de los transistores. La salida del convertidor de CC/CC se conecta a la barra de CC del VSI propuesto.

El esquema de control simplificado en coordenadas  $dq$  del sistema FV completo acoplado a la red se describe en la Figura 4. El propósito principal de este controlador es de transferir la máxima potencia del sistema solar FV a la red eléctrica de distribución. Este objetivo se lleva a cabo usando la salida de la señal de potencia generada por el bloque seguidor del PMP ( $P_r$ ) para producir una referencia de corriente directa ( $i_{dr}^*$ ) al controlador de corriente del inversor VSI. Se agrega una contribución adicional a la referencia de corriente directa ( $i_{dr}^*$ ) a fin de regular la tensión de la barra de CC ( $V_d$ ) en un valor constante por medio de un controlador proporcional integral (PI). Esto se logra forzando un intercambio reducido de potencia activa con la red eléctrica para compensar las pérdidas del bobinado del transformador y de los IGBTs del inversor. Como el intercambio de potencia reactiva no es considerado en este caso, la referencia de corriente reactiva  $i_{dr}$  se fija en 0. Es importante destacar que el modelo matemático simplificado en espacio de estados del inversor VSI en el marco  $dq$  no se describe en este trabajo y se detalla en profundidad en Molina y Mercado (2006). A partir de este modelo se generan los pulsos de control de los IGBTs del inversor VSI.

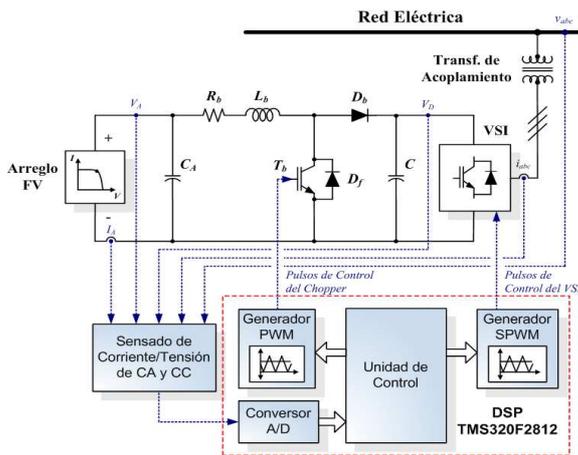


Figura 3: Circuito eléctrico del convertidor de CC/CC de un sistema FV conectado a una red trifásica.

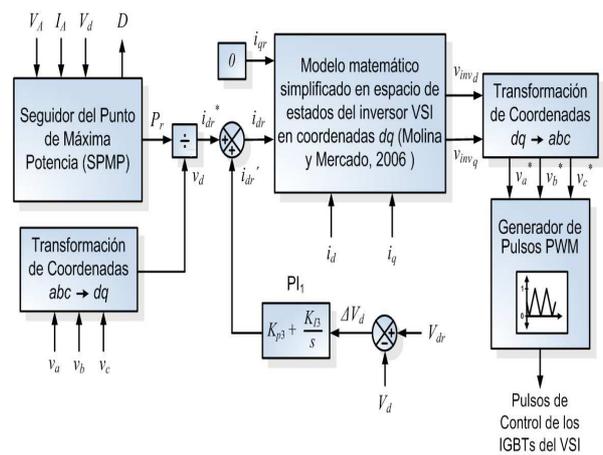


Figura 4: Esquema de Control del sistema FV conectado a una red trifásica.

El convertidor de CC/CC produce una tensión de salida pulsada (chopeada) generada a través de técnicas de control por modulación de ancho de pulso (PWM), y de esta forma controla la relación de tensión de CC media entre la entrada y la salida tendiente a adaptar continuamente la característica del generador FV con la impedancia equivalente presentada por la barra de CC del inversor VSI. Las relaciones de tensión y de corriente de estado estacionario del convertidor de CC/CC incremental operando en modo de conducción continua de corriente se describen a través de las Ecuaciones 4 y 5 como sigue:

$$V_d = \frac{V_A}{(1-D)}, \quad (4)$$

$$I_d = (1-D)I_A, \quad (5)$$

donde:

- $D$ : Ciclo de trabajo del convertidor de CC/CC
- $I_A$ : Corriente de salida del sistema FV
- $V_A$ : Tensión de salida del sistema FV
- $I_d$ : Corriente de la barra de CC (del lado del inversor)
- $V_d$ : Tensión de la barra de CC (del lado del inversor)

## ALGORITMOS DE CONTROL PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA

El seguimiento del punto de máxima potencia implica que el sistema FV se opere siempre en la máxima relación de tensión/corriente de salida. La simulación del sistema FV proporciona medios flexibles para analizar y comparar el rendimiento de diferentes algoritmos de SPMP cuando se opera bajo condiciones climáticas específicas. De aquí en adelante, se discuten los métodos de control de SPMP principales, como lo es el método de “Perturbación y Observación” (PyO) y el método de “Conductancia Incremental” (CondInc).

### A. Algoritmo de Perturbación y Observación (PyO)

Los algoritmos de PyO son ampliamente usados por su estructura simple y las pocas variables que se precisan medir, como se muestra en la Figura 5. El algoritmo opera perturbando periódicamente (incrementando o decrementando) la tensión  $V_A$  en los terminales del sistema FV por medio del ciclo de trabajo del convertidor y luego comparando la potencia de salida  $P_A$  del sistema FV, con la potencia del ciclo previo de perturbación  $P_p$ . Si la potencia actual medida es mayor que la del ciclo anterior, la perturbación continuará en la misma dirección en el próximo ciclo, caso contrario la dirección de la perturbación se invertirá en el próximo ciclo. Esto significa que la tensión en los terminales del sistema FV se ve perturbada en cada ciclo del SPMP a intervalos de muestreo  $T_S$ ; por lo tanto una vez alcanzado el PMP, el algoritmo PyO oscilará alrededor de este punto resultando una pérdida de potencia del sistema FV, especialmente en casos donde las condiciones atmosféricas son constantes o varían lentamente. Caso contrario, cuando las condiciones del entorno cambian rápidamente, por ejemplo como resultado del movimiento de las nubes, se verifica que el algoritmo de PyO se desvía del PMP (Hussein et al., 1995). Este algoritmo puede operar equivocadamente en estos casos debido al hecho de que no es capaz de distinguir las variaciones de la potencia de salida del sistema FV causadas por el ciclo de trabajo de aquellas causadas por la desviación de la radiación solar.

Según lo descrito por Femia et al. (2004), se demuestra que los efectos negativos asociados con la utilización del algoritmo de SPMP tipo PyO pueden ser significativamente reducidos si la magnitud de las perturbaciones del ciclo de trabajo  $\Delta D$  y el intervalo de muestreo  $T_S$  son modificadas según el comportamiento dinámico del convertidor de CC/CC empleado para realizar el seguimiento del PMP.

### B. Algoritmo de Conductancia Incremental (CondInc)

Con el propósito de solucionar los problemas mencionados anteriormente de los métodos de PyO, Hussein et al. (1995) propusieron el algoritmo de Conductancia Incremental (CondInc), el cual sigue el PMP del sistema FV usando un procedimiento diferente. El método se basa en el hecho de que en el PMP, la derivada de la potencia de salida del sistema FV con respecto de la tensión es cero. Así, la tensión del sistema FV puede ser regulada cercana a la tensión en el PMP midiendo la conductancia incremental,  $dI/dV$ , y la conductancia  $I/V$ .

El algoritmo, el cual se resume en la Figura 6, comienza su ciclo obteniendo los valores actuales ( $A$ ) y previos ( $P$ ) de  $I$  y  $V$ , esto es  $I_A$ ,  $V_A$  e  $I_P$  y  $V_P$  respectivamente; luego usando estas mediciones se aproximan los cambios incrementales como:  $dI \approx I_A - I_P$  y  $dV \approx V_A - V_P$ . Posteriormente, se lleva la comparación principal entre  $dI/dV$  y  $-I/V$  como se describe en la Ecuación 6.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \approx I + V \frac{\Delta I}{\Delta V}, \quad (6)$$

$$\frac{dP}{dV} = 0, \text{ en el PMP} \quad (7)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0, \text{ a la izquierda del PMP} \quad (8)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0, \text{ a la derecha del PMP} \quad (9)$$

El resultado del cálculo de las Ecuaciones 6 a 9, determinará la dirección del cambio requerido en el control de la tensión variable y por lo tanto del ciclo de trabajo  $D$  del convertidor de CC/CC de manera de llevar la tensión del sistema FV hacia el PMP.

Este algoritmo tiene la ventaja de reducir al mínimo la oscilación alrededor del PMP en estado estacionario que presenta la utilización del algoritmo de PyO. Sin embargo, la desventaja de este algoritmo es la complejidad para diseñar el controlador.

Aunque esta desventaja no es un problema para las aplicaciones FV acopladas a la red actuales, que implementan todos los esquemas de control a través de un controlador digital de tipo DSP.

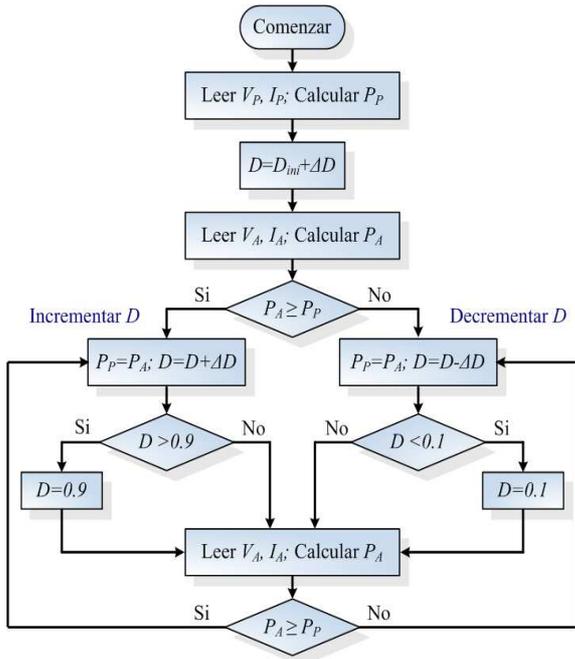


Figura 5: Diagrama de flujo del algoritmo PyO.

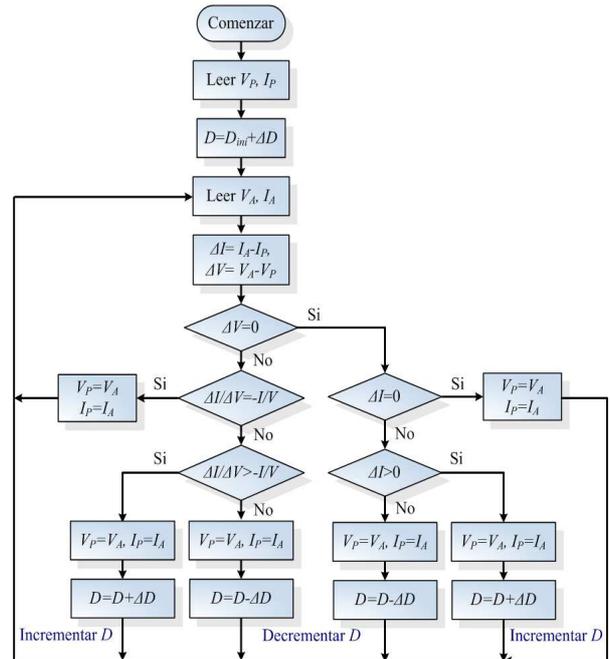


Figura 6: Diagrama de flujo del algoritmo CondInc.

## RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DIGITAL

Tanto la características de estado estacionario como de estado transitorio de los algoritmos de control de SPMP descritos previamente se estudian en esta sección. En este sentido, para comparar el rendimiento de estos algoritmos, se propone una evaluación basada en la eficiencia de cada método para extraer la máxima potencia del sistema FV. La eficiencia energética  $\eta_{e,FV}$  de los algoritmos relativa a la máxima potencia teórica disponible del sistema FV,  $P_{PMP}$  puede calcularse usando la Ecuación 10 como sigue:

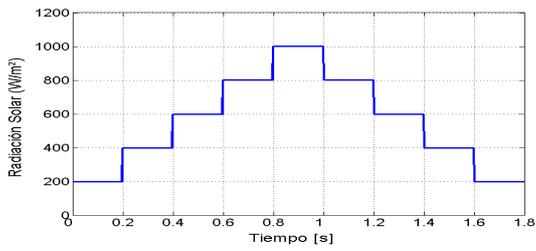
$$\eta_{e,FV} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_A dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{PMP} dt}, \quad (10)$$

Las Figuras 7 a 9 muestran los resultados de la evaluación del desempeño de los algoritmos de SPMP ante variaciones escalonadas de la radiación solar con una temperatura de celda razonablemente constante de 25°C. La Figura 7 presenta el caso sin SPMP, es decir se deja constante el ciclo de trabajo del convertidor de CC/CC (ver Figura 7b) de forma tal de fijar una tensión aproximadamente constante en el sistema FV. Esta tensión se adopta cercana al PMP en condiciones estándar de operación. Como puede observarse, ante las variaciones en la radiación solar incidente descritas en la Figura 7a, el sistema FV genera una potencia proporcional cercana a la máxima potencia disponible solo en el caso cercano a las condiciones estándar de operación. Para niveles de radiación menores, se produce una diferencia mayor entre la potencia realmente generada por los módulos y la máxima potencia disponible para dichas condiciones climáticas (ver Figura 7c), aumentando la relación  $P_a/P_{max}$  (ver Figura 7d).

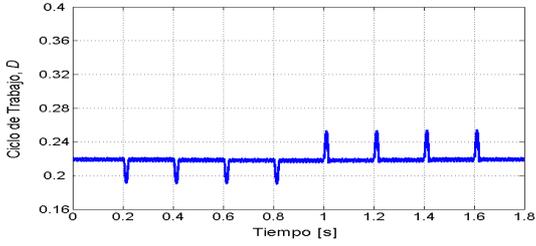
En el caso descrito por la Figura 8, el cual incorpora el algoritmo de SPMP tipo PyO, se modula el ciclo de trabajo del convertidor de CC/CC de forma tal de seguir las variaciones de potencia máxima de sistema FV provocadas por las variaciones en la radiación solar incidente (ver Figura 8b). Como puede observarse en este caso, la potencia generada por los módulos se acerca notablemente a los valores máximos disponibles (ver Figura 8c), lo cual reduce el error de potencia medido a través de la relación  $P_a/P_{max}$  (ver Figura 8d) respecto del caso sin SPMP (Figura 7). Sin embargo, ocurren algunos errores de seguimiento y oscilaciones especialmente con grandes niveles de radiación y en el arranque.

El método de SPMP tipo CondInc presentado en la Figura 9 demuestra ser superior al método PyO en el seguimiento del PMP del sistema FV. La precisión en el seguimiento del PMP es mayor que el caso previo y las oscilaciones se reducen considerablemente (ver Figuras 9b y 9c). El error de potencia medido a través de la relación  $P_a/P_{max}$  (ver Figura 9d) disminuye sensiblemente respecto del caso PyO (Figura 7), lo cual mejora la eficiencia total del sistema.

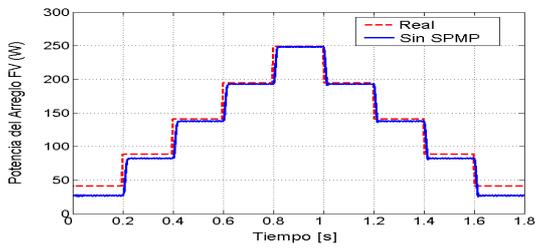
En la Tabla 2, se presenta un resumen de la eficiencia energética alcanzada con cada método de SPMP. Como es apreciable, hay un incremento en la eficiencia alcanzada por el algoritmo de SPMP tipo CondInc debido a su capacidad de superar los inconvenientes presentados por los algoritmos tipo PyO, especialmente durante el seguimiento ante cambios climáticos rápidos y además consigue minimizar las oscilaciones alrededor del PMP.



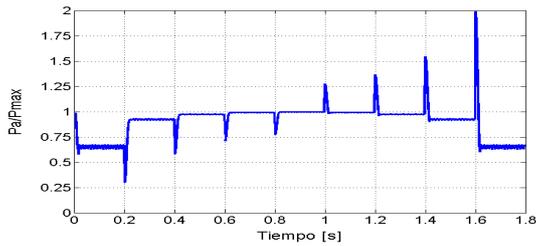
(a)



(b)

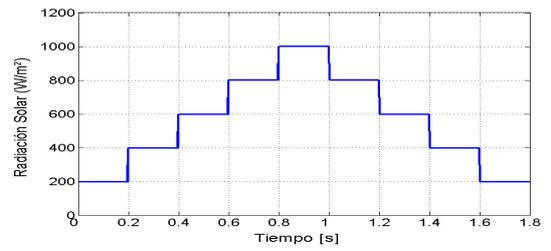


(c)

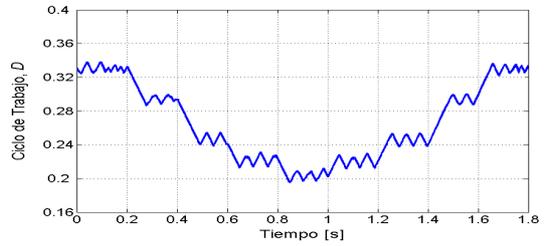


(d)

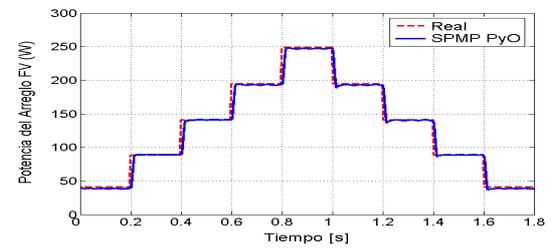
Figura 7: Resultados de la simulación sin algoritmo de SPMP (Tensión del Sistema FV Constante).



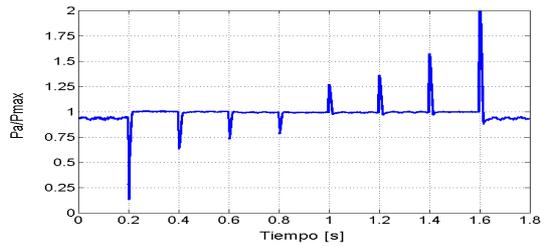
(a)



(b)

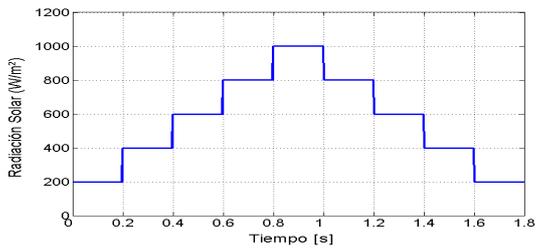


(c)

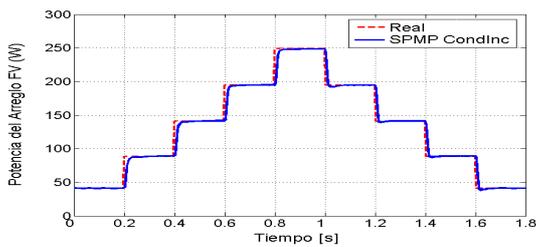


(d)

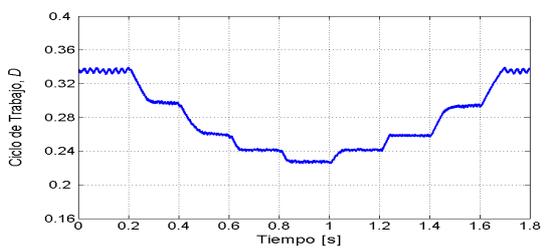
Figura 8: Resultados de la simulación con el algoritmo de SPMP de PyO.



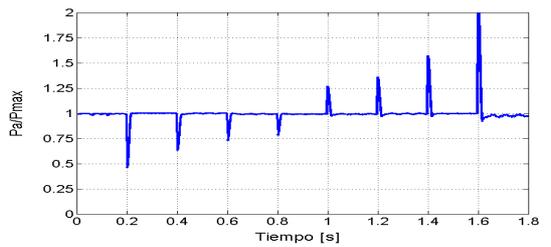
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 9: Resultados de la simulación con el algoritmo de SPMP de CondInc.

Algoritmo SPMP	Eficiencia del SPMP, $\eta_{e.FV}$ (%)
Sin SPMP (Tensión del Sistema FV Constante)	63.24
P&O	96.02
CondInc	97.45

Tabla 2: Comparación de la eficiencia energética obtenida a partir de diferentes técnicas de SPMP

## CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un estudio de la efectividad de los métodos de seguimiento del punto de máxima potencia (SPMP) de sistemas solares fotovoltaicos (FV) más utilizados en la actualidad, ante cambios en las condiciones climáticas. Para ello se propusieron modelos detallados del sistema completo FV y se simuló en forma discreta usando MATLAB/Simulink. Los resultados obtenidos a partir de dichas simulaciones digitales muestran claramente la importancia de utilizar algoritmos de SPMP para maximizar el aprovechamiento de los módulos FV. Asimismo, se destaca la mejor eficiencia de la técnica de conductancia incremental (CondInc) con una eficiencia promedio cercana al 98% en el seguimiento de la máxima potencia disponible del sistema FV para el ejemplo presentado. Debido a que el algoritmo fue desarrollado para aplicaciones FV acopladas a la red que típicamente usan un controlador digital para implementar el control (hoy en día un DSP), puede observarse que no son necesarios requisitos de hardware adicionales. Esto hace que el algoritmo CondInc sea más conveniente que otros debido a que presenta el mejor desempeño dinámico y reduce notablemente los problemas de oscilaciones que surgen con la aplicación del algoritmo PyO ante bruscas variaciones de los factores climáticos.

## REFERENCIAS

- Alghuwainem S. M. (1994). Matching of a DC motor to a photovoltaic generator using a step-up converter with a current locked loop. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 9, 1, 192-198.
- Angrist S. W. (1971). *Direct energy conversion*. 2ª edición. Allyn and Bacon, Boston.
- Applebaum J. (1987). The quality of load matching in a direct coupling photovoltaic system. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2, 4, 534-541.
- Enslin J., Wolf M. S., Snyman D. B. y Sweigers W. (1997). Integrated photovoltaic maximum power point tracking Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 44, 769-773.
- Femia N., Petrone G., Spagnuolo G. y Vitelli M. (2004). Increasing the efficiency of P&O MPPT by converter dynamic matching. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings*, 1-8.
- Hiyama T., Kouzuma S. y Imakubo T. (1995a). Identification of optimal operation point of PV modules using neural network for real time maximum power tracking control. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 10, 3, 360-367.
- Hiyama T., Kouzuma S., Imakubo T. y Ortmeier T. H. (1995b). Evaluation of neural network based real time maximum power tracking controller for PV system. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 10, 3, 543-548.
- Hua C., Lin J. y Shen C. (1998). Implementation of a DSP controlled photovoltaic system with peak power tracking. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 45, 1, 99-107.
- Hussein K. H., Muta I., Hoshino T. y Osakada M. (1995). Maximum photovoltaic power tracking: An algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. *Proceedings of IEE Generation, Transmission and Distribution*, 10, 1, 59-64.
- Khouzam K. Y. (1990). Optimum load matching in direct-coupled photovoltaic power systems - application to resistive loads. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2, 265-271.
- Molina M. G. y Mercado P. E. (2006). Control design and simulation of DSTATCOM with energy storage for power quality improvements. *IEEE/PES Transmission and Distribution C&E Lat. 2006 Proceeding*, 01-07.
- Saied M. M., Hanafy A. A., El-Gabaly M. A. y Sharaf A. M. (1991). Optimal design parameter for a PV array coupled to a DC motor via a DC-DC transformer. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 6, 593-598.
- Santos J. L., Antunes F. y Cicero-Cruz A. C. (2006). A maximum power point tracker for PV systems using a high performance boost converter. *Solar Energy* 80, 772-778.
- The MathWorks Inc. (2005). *SimPowerSystems for use with MATLAB/Simulink, User's Guide, Version 4*, Natick, MA.
- Won C. Y., Kim D. H. y Kim S. C. (1994). A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy Controller. *Power Electronic Specialist Conference Proceedings*, 396-403.

## ABSTRACT

This work investigates the effectiveness of the algorithms for maximum power point tracking (MPPT) of photovoltaic (PV) solar systems more used at present. To this aim, detailed models of the PV solar modules and electronic power conditioning system used for connection to the electric grid are proposed. The whole PV system is simulated by using SimPowerSystems of MATLAB/Simulink, which has specific libraries for modeling power electronic devices and advanced control algorithms. Among the MPPT methods studied, "Perturbation and Observation" (P&O) and "Incremental Conductance" (IncCond) stand out. Both the steady-state and transient characteristics of each control algorithm are fully analyzed and compared by using a proposed energy performance index. As a result, it is demonstrated that the IncCond algorithm presents the best dynamic performance and reduces notably the problems of oscillations that emerge with the application of P&O algorithm in cases of abrupt variations of the climatic factors.

**Keywords:** DC-DC Boost Converter, Digital Signal Processing, Incremental Conductance, Maximum Power Point Tracker, Perturbation and Observation, Photovoltaic System, Voltage Source Inverter.