



ALTERNATIVA DE CONTROL POR MODO DESLIZANTE PARA SEGUIMIENTO ROBUSTO DE LA MÁXIMA POTENCIA FOTOVOLTAICA*

J. García Clúa¹, R. J. Mantz², H. De Battista³.

Laboratorio de Electrónica Industrial, Control e Instrumentación (LEICI).

Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata.

CC 91 (1900). La Plata. Tel./Fax (0221)425-9306. e-mail: jose.garciaclua@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN: En el presente trabajo se propone un método de seguimiento de máxima potencia basado en conceptos de sistemas de estructura variable para sistemas de conversión de energía fotovoltaica. A partir del análisis de las características de las celdas solares operando bajo diferentes radiaciones y temperaturas se propone una caracterización de la región de operación de máxima eficiencia de conversión a través de rectas parametrizadas en la temperatura de los paneles. Esta caracterización permite plantear una estrategia de control que fuerza al convertidor electrónico a operar sobre dichas rectas garantizando el seguimiento del punto de máxima potencia fotovoltaica. El sistema de control diseñado combina la rapidez de seguimiento propia de los diseños basados en modelos y la robustez y simplicidad de los controles por modo deslizante.

Palabras clave: Convertidor fotovoltaico, seguimiento del punto de máxima potencia, modos deslizantes.

INTRODUCCION

Los sistemas de conversión fotovoltaicos constituyen una opción atractiva para favorecer el suministro de energía en regiones aisladas de la red eléctrica. Dado que su desempeño es altamente dependiente de las condiciones atmosféricas y su costo aún sigue siendo elevado, requieren de controles que garanticen un alto rendimiento de conversión. El punto de operación de las celdas fotovoltaicas se puede ajustar para maximizar su eficiencia a través de la adecuada conmutación de los dispositivos electrónicos de los convertidores de corriente (Garelli et al., 2002). En la literatura existen numerosas técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT: *Maximum Power Point Tracking*). En general tales estrategias de control cumplen este objetivo evitando la medición de la radiación. Esto trae aparejado un compromiso entre la efectividad de las distintas propuestas y la simplicidad en la implementación de las mismas. Una línea de trabajo está orientada a MPPTs basados en modelo, la cual complementa el conocimiento de las celdas con ajustes individuales y muchas veces con la medida de la temperatura, la cual es sencilla y económica (Mutoh et al., 2002). La mayor ventaja de un sistema MPPT basado en modelo es su rapidez de seguimiento (Tarik Duru, 2006). Dentro de esta línea de trabajo se encuadra la presente propuesta.

El trabajo se organiza de la siguiente forma. Primero se analizan las características $P-V$ de un panel fotovoltaico genérico para distintos valores de radiación y temperatura. Del análisis surge que los puntos de máxima generación pueden agruparse en curvas que, en el rango de operación, pueden aproximarse con buena precisión por rectas cuyas abscisas y pendientes son funciones lineales de la temperatura. El estudio previo sirve de base para proponer un control por estructura variable para el convertidor. El mismo permite que el convertidor a lazo cerrado emule un dispositivo que tiene como característica de funcionamiento las rectas citadas. La operación por modo deslizante (De Battista y Mantz, 2002) del control de estructura variable propuesto suma a las ventajas propias de los sistemas MPPT basados en modelo, la simplicidad de implementación y robustez características de estos modos de operación (Utkin et al., 1999; Bianchi et al., 2004). Por último se presentan resultados de simulación que muestran el desempeño del control propuesto para distintos valores de radiación, temperatura y energía inicial.

ANÁLISIS DE LA CARACTERÍSTICA P-V DE UN PANEL FOTOVOLTAICO

El comportamiento eléctrico de un panel fotovoltaico, arreglo de n_p módulos en paralelo constituidos por n_s celdas en serie, lo caracteriza su corriente de salida i_s y su tensión v_s , que cumplen la siguiente ecuación (Kim, 2006):

$$i_s = n_p I_{ph}(\lambda, T) - n_p I_{rs}(T) \left\{ \exp \left[\frac{q}{AkT} \left(\frac{v_s + i_s R_s}{n_s} + \frac{i_s R_s}{n_p} \right) \right] - 1 \right\} - \frac{n_p}{R_{sh}} \left(\frac{v_s + i_s R_s}{n_s} + \frac{i_s R_s}{n_p} \right) \quad (1)$$

¹ UNLP - CONICET

² UNLP- CICpBA

³ UNLP - CONICET

*Este trabajo fue financiado por ANPCyT (11-14111/04), CONICET, (PIP 5532/05), CICpBA (Res.044/06) y UNLP

donde

- I_{ph} es la corriente generada por radiación solar λ en cada celda,
- I_{rs} es la corriente inversa de saturación de su juntura pn ,
- R_s es su resistencia en serie,
- R_{sh} es su resistencia en paralelo,
- A es el factor de idealidad de la juntura,
- k es la constante de Boltzmann,
- T es la temperatura en Kelvin,
- q es la carga del electrón.

Dado que la potencia entregada por el panel se calcula como $p_s = i_s \cdot v_s$, la dependencia de la máxima potencia con la radiación es evidente, como se puede apreciar en la figura 1 (De Battista y Mantz, 2002). Allí se representan cinco características $P-V$ (potencia-tensión), cada una correspondiente a una radiación específica λ , dentro del rango $[200-1000]$ W/m^2 y temperatura constante de valor $T=25^\circ C$. Se nota que la curva que contiene los puntos de potencia máxima (v_{smx}, P_{smx}) puede aproximarse, con buena precisión desde el punto de vista de la potencia generada, con una recta en un amplio rango de radiaciones (de hecho, en el más importante). Aquí, se ha elegido la que presenta error nulo en los extremos del intervalo de radiaciones $[400-1000]$ W/m^2 . El error máximo que implica la operación de las celdas fotovoltaicas sobre puntos de la recta en lugar de hacerlo sobre la curva de máxima potencia es menor al 0,05 %.

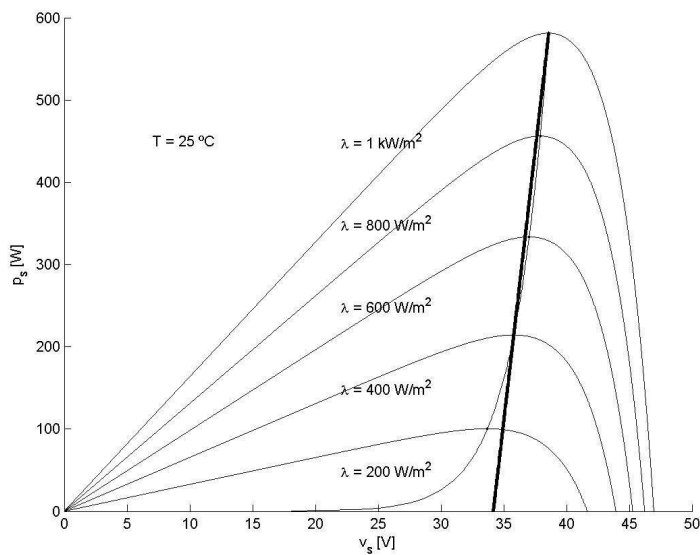


Figura 1: Curvas $P-V$ del panel solar para $T=25^\circ C$ y $\lambda=200, 400, 600, 800$ y 1000 W/m^2 .

Haciendo lo mismo con las características $P-V$ de distintas temperaturas, se obtiene la familia de rectas que se muestra en la figura 2.

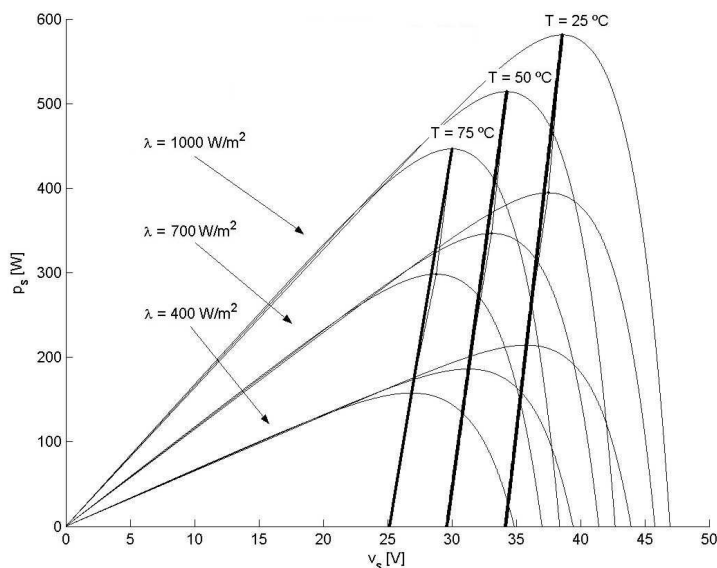


Figura 2: Curvas $P-V$ del panel solar para $T=25-50-75$ $^\circ C$ y $\lambda = 400, 700$ y 1000 W/m^2 .

La ecuación general que describe a todas ellas es:

$$y = m(T)(x - x_0(T)) \quad (2)$$

donde $y = p_s$, $x = v_s$, m es la pendiente y x_0 la abscisa cuando $y = 0$. La dependencia de la temperatura de estos dos últimos parámetros se analiza para el rango [25-75] °C con incrementos de 2,5 °C. En la figura 3 se grafica la dependencia de m y x_0 con la temperatura. De la evaluación de la figura surge que dicha dependencia es prácticamente lineal. Luego se proponen las siguientes ecuaciones:

$$m(T) = a \cdot (T - T_0) + m(T_0) \quad (3)$$

$$x_0(T) = b \cdot (T - T_0) + x_0(T_0) \quad (4)$$

donde

- $a = -0,8 \text{ W/V}^\circ\text{C}$,
- $b = -0,18 \text{ V}^\circ\text{C}$,
- $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$,
- $m(T_0) = 0,13 \text{ kW/V}$,
- $x_0(T_0) = 34 \text{ V}$.

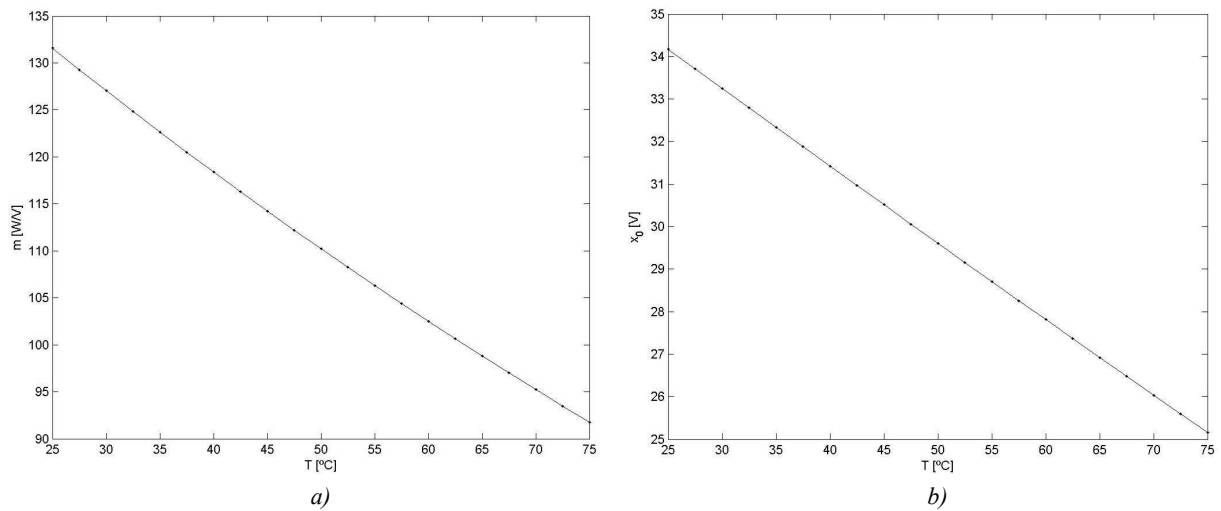


Figura 3: Curvas de pendiente m (a) y abscisa x_0 (b) en función de T para el rango [25-75] °C.

CONTROL DEL CONVERTIDOR POR ESTRUCTURA VARIABLE

En la figura 4 se presenta el circuito equivalente de un sistema de conversión de energía fotovoltaica. A la izquierda se representa el panel solar mediante un dipolo de corriente de salida i_s y tensión v_s que cumple con las características obtenidas en la sección anterior. El diodo D_1 es el diodo de bloqueo del panel solar. A continuación sigue un convertidor DC-DC del tipo reductor, cuya finalidad es ajustar el punto de operación del panel solar. La tensión del capacitor v_C y la corriente del inductor i_L pueden considerarse los estados del sistema x_1 y x_2 respectivamente. La corriente i_L alimenta una carga genérica en paralelo con un banco de baterías, modelado por una fuente de tensión, que constituye el medio de almacenamiento. Por tanto la potencia de salida es $p_0 = i_L E$.

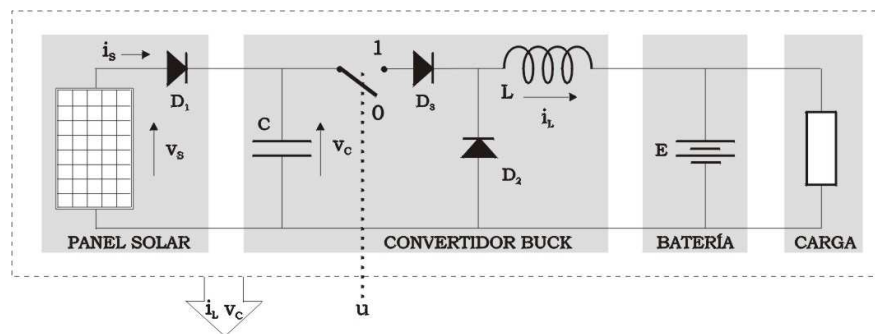


Figura 4: Circuito equivalente de un sistema de conversión de energía fotovoltaica.

La llave en serie con un diodo, modelo simplificado de un transistor operando en corte y saturación, permite seleccionar entre dos modos de operación a través de la señal de control u . Cuando $u = 0$ la llave se abre y cuando $u = 1$ la llave se cierra.

Las siguientes ecuaciones describen la dinámica de los estados para los dos valores posibles de u .

$$u = 0: \begin{cases} L \dot{i}_L = -E \operatorname{sgn}(i_L) \\ C \dot{v}_c = i_s(v_c) \end{cases} \quad (5)$$

$$u = 1: \begin{cases} L \dot{i}_L = (-E + v_c) \operatorname{sgn}(i_L) \\ C \dot{v}_c = i_s(v_c) - i_L \end{cases} \quad (6)$$

donde $\operatorname{sgn}(\cdot)$ es la unidad para argumentos positivos y cero en caso contrario.

En la figura 5 a) y b) se muestran los diagramas de las trayectorias de estados que se obtienen con cada posición de la llave. Se hace notar el carácter no lineal de ambas dinámicas manifestado en la existencia de múltiples puntos de equilibrio y ciclos límite. Las trayectorias que evolucionan sobre los ejes son forzadas por el corte de los diodos D_i correspondientes.

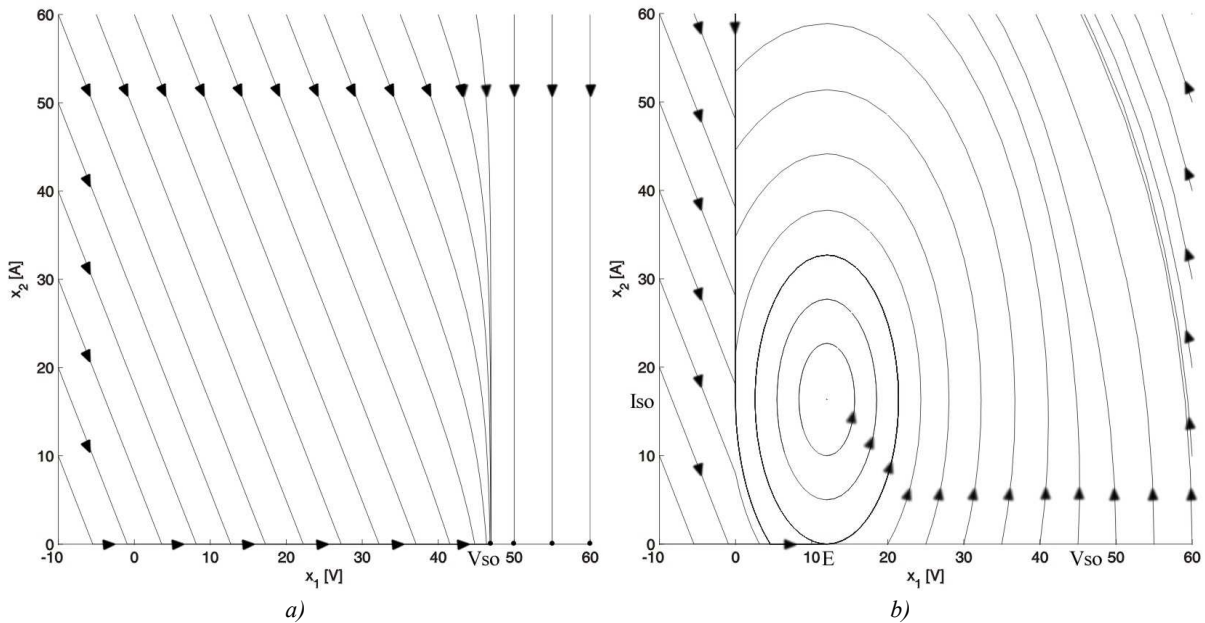


Figura 5: Diagramas de trayectorias de estados para (a) $u=0$ y (b) $u=1$ siendo $\lambda=1 \text{ kW/m}^2$ y $T=25^\circ\text{C}$.

El objetivo de los controles por estructura variable consiste en establecer una ley de conmutación entre ambos espacios que lleve todas las trayectorias a una región de interés. En este trabajo se propone como ley de conmutación una función de los estados que se aproxima a la región donde se ubican los máximos de potencia del panel solar: las rectas parametrizadas descritas por (1). Despejando esta ecuación a izquierda y reemplazando las variables v_s y p_s por v_c e i_L/E respectivamente se obtiene:

$$S(x, T) = \frac{i_L}{E} - m(T)(v_c - x_0(T)) = 0 \quad (7)$$

El control de estructura variable es el responsable de observar el estado x del sistema fotovoltaico y evaluar en función de éste y de la temperatura T el valor de S y así ajustar la posición de la llave que lleva los estados a $S = 0$. La figura 6 muestra un diagrama esquemático del lazo cerrado implementado por el control propuesto.

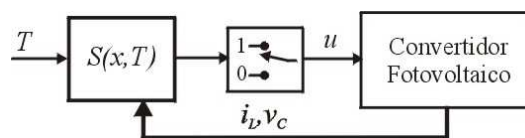


Figura 6: Control del convertidor por estructura variable que lleva los estados del sistema a la superficie deslizante $S=0$.

La recta $S=0$ separa el espacio de estados en dos subespacios: uno donde $S > 0$ y otro donde $S < 0$. El control se encarga de determinar qué dinámica actúa en cada subespacio para que las trayectorias alcancen la región $S(x)=0$, denominada “superficie deslizante”. Existen métodos analíticos desarrollados en la teoría de control por modo deslizante que básicamente estudian la dirección de las trayectorias respecto de la superficie deslizante. La figura 5 permite realizar esto gráficamente. Hacia la izquierda de la superficie deslizante ($S > 0$) las trayectorias que tienden a $S=0$ son las que genera el modo $u=0$. Hacia la derecha de la superficie ($S < 0$) las trayectorias que tienden a S son únicamente las que genera el modo $u=1$.

Existen herramientas formales de software que permiten verificar el alcance de $S=0$ para un conjunto de condiciones iniciales, modelando el sistema completo como un autómata híbrido (Lygeros et al., 2003). La herramienta CHECKMATE (Chutinan y Krogh, 2003) posibilita simular autómatas híbridos contruidos con la interfaz gráfica SIMULINK y verificar la especificaciones introducidas mediante m-files. Utilizando dicho programa se simularon las trayectorias de estados del convertidor de energía fotovoltaico correspondientes a una región de análisis determinada y se verificó que todas alcanzan la superficie deslizante $S=0$.

En la figura 7 se representa el diagrama de las trayectorias simuladas del convertidor fotovoltaico realimentado. Se observa que la selección de u en función del signo de S produce la alcanzabilidad predicha con la verificación. Para distintos estados iniciales todas las trayectorias alcanzan la superficie $S=0$. El modo deslizante se establece cuando no sólo alcanzan la superficie sino que permanecen en ella, es decir, existe una porción de la superficie que es invariante. Allí todas las trayectorias evolucionan hacia un punto de equilibrio, que corresponde a la potencia máxima del panel solar. Intuitivamente este hecho se puede inferir analizando lo que ocurre en el capacitor cuando la potencia de salida y la del panel no coinciden. Cuando la primera es inferior a la segunda, la tensión del capacitor x_1 se encuentra a la izquierda del punto de equilibrio. La potencia excedente del panel carga al capacitor y x_1 aumenta, acercando la trayectoria al punto de equilibrio. Cuando la potencia de salida supera la del panel, que equivale a que x_1 se encuentre a derecha del punto de equilibrio, el capacitor necesariamente se descarga en la salida. Esto lleva a que x_1 disminuya y se acerque al punto de equilibrio. En este punto necesariamente la potencia de salida tiene que igualar a la del panel, es decir $p_S = i_L E$ o $i_L = p_S / E$.

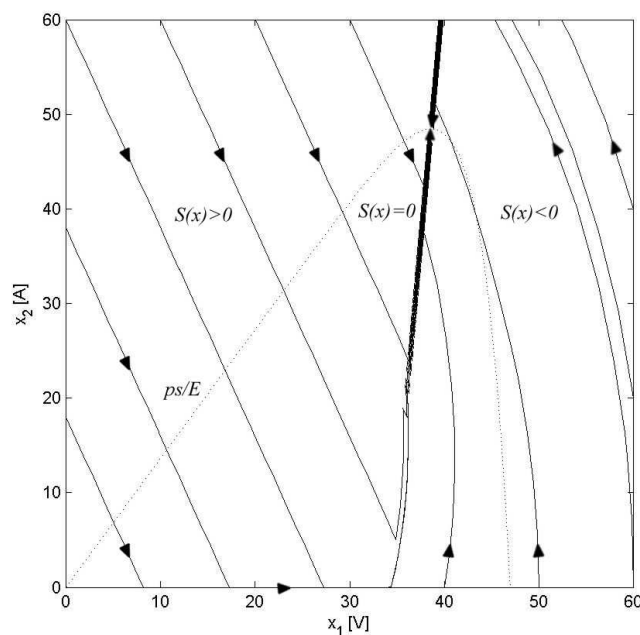


Figura 7: Diagrama de trayectorias de estados del convertidor fotovoltaico controlado con $S(x)$ para $\lambda=1 \text{ kW/m}^2$ y $T=25^\circ\text{C}$.

RESULTADOS DE LA SIMULACION.

En esta sección se presentan resultados de simulación con el fin de verificar el desempeño del control por estructura variable propuesto. Como se mencionó, el objetivo de la presente propuesta es diseñar el control del convertidor que garantice el seguimiento de los puntos de máxima transferencia de potencia ante cambios de radiación y temperatura. A los efectos de la interpretación conceptual del modo de funcionamiento se han supuestos cambios abruptos de estas variables.

En la figura 8 se observa una trayectoria en el plano v_C-p_0 que permite evaluar dos situaciones correspondientes a los tramos AB y BC. El primer tramo (AB) corresponde al alcance del punto de máxima generación a partir de una condición inicial arbitraria (0 V, 360 W). Durante este transitorio se supone que la radiación y temperatura son constantes y de valor $\lambda_1=1 \text{ kW/m}^2$ y $T_1=25^\circ\text{C}$ respectivamente. Por lo tanto la superficie $S_1=0$ es única. Se verifica la alcanzabilidad de la superficie (punto A') y que una vez alcanzada la trayectoria evoluciona "deslizándose" por ella verificando su característica invariante. El estado estacionario se alcanza cuando los estados convergen al punto B. La curva $p_S(\lambda_1, T_1)$ en línea punteada permite determinar que allí la potencia máxima ha sido alcanzada.

El segundo tramo (BC) de la trayectoria de la figura 8, permite evaluar el seguimiento ante un cambio de las condiciones ambientales. Efectivamente, luego de alcanzarse el estado estacionario se produce un salto abrupto en la radiación y temperatura a los valores $\lambda_2=400 \text{ W/m}^2$ y $T_2=50^\circ\text{C}$. Instantáneamente cambia la curva de potencia del panel solar y la superficie deslizante pasa a ser S_2 . La trayectoria evoluciona entonces hacia la nueva superficie verificándose la alcanzabilidad (punto B') y otra vez se establece el modo deslizante. Finalmente se llega al equilibrio coincidente con la máxima potencia del panel para las nuevas condiciones. Las curvas de la figura 9 muestran la evolución de las variables v_C , p_0 y p_S en correspondencia con la trayectoria de la figura 8, a su vez facilitan la comprensión del análisis de estabilidad

bosquejado en la sección anterior. En la superficie S_1 la potencia de salida resulta menor a la de la celda, por lo que v_c es creciente como consecuencia de la carga del capacitor hasta que alcanza el estado estacionario en que $p_0=p_s$. En la superficie S_2 se puede hacer un análisis similar.

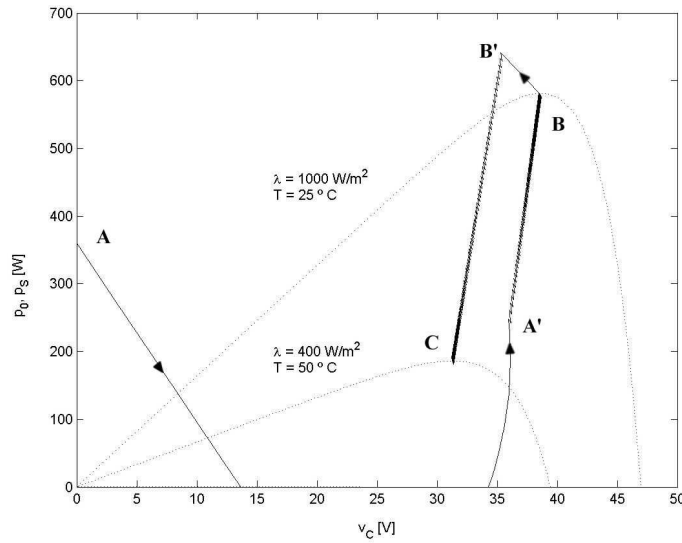


Figura 8: Trayectoria (v_c, p_s) del sistema controlado para salto abrupto de (λ, T) : $(1 \text{ kW/m}^2, 25^\circ\text{C}) \rightarrow (400 \text{ W/m}^2, T=50^\circ\text{C})$.

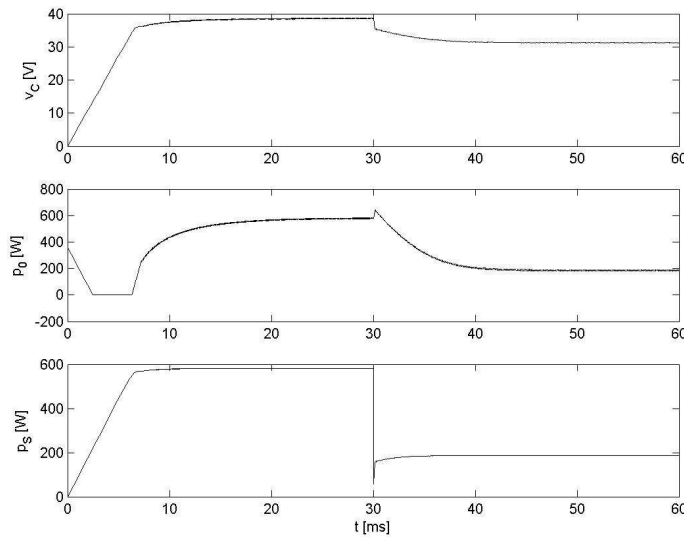


Figura 9: Variables v_c , p_0 y p_s en función del tiempo para salto abrupto (λ, T) : $(1 \text{ kW/m}^2, 25^\circ\text{C}) \rightarrow (400 \text{ W/m}^2, T=50^\circ\text{C})$.

CONCLUSIONES.

En este trabajo se ha presentado una nueva estrategia de control para seguir puntos de máxima generación en sistemas fotovoltaicos. Del estudio de las características $P-V$ de los paneles solares se desprende que a temperatura constante el lugar geométrico de los puntos de máxima generación para distintas radiaciones solares puede aproximarse con buena precisión por una recta. Por otra parte los cambios en la temperatura producen el desplazamiento y cambio de pendiente de estas rectas, siendo ambos efectos aproximadamente lineales con la temperatura. Este hecho sirve de base para la presente propuesta de control de conmutación de los dispositivos electrónicos del convertidor. La misma presenta dos etapas. La primera garantiza que ante cualquier condición inicial o perturbación las variables del convertidor alcanzan estas rectas. La alcanzabilidad ha sido evaluada a partir de análisis de trayectorias y del soporte de programas para el diseño de control híbrido. En la segunda, una vez garantizada la convergencia y las propiedades invariantes de estas superficies de control, consideraciones físicas permiten garantizar la convergencia a los puntos de máxima generación para distintas condiciones ambientales. Simulaciones ponen en evidencia la efectividad del control propuesto. En un futuro inmediato se prevé la corroboración práctica de dichos resultados mediante el desarrollo y prueba del sistema de control diseñado.

REFERENCIAS

Bianchi F., De Battista H. y Mantz R. (2004). On the stability of DC-to-DC converters in photovoltaic systems undergoing sliding motions. International Journal of Systems Science 35, 11, 637-647.

- Chutinan A. y Krogh B. H. (2003). Computacional techniques for hybrid system verification. IEEE Transactions on Automatic Control, 48, 1, 64-75.
- De Battista H. y Mantz R. J. (2002). Variable structure control of a photovoltaic energy converter. IEE Proceedings, Control Theory Application 149, 4, 303-310.
- Garelli F., De Battista H. y Mantz R. J. (2002). Dinámica de convertidores CC-CC en aplicaciones fotovoltaicas. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, ASADES, 6, 1, 04.01-04.06.
- Kim, I. (2006). Robust maximum power point tracker using sliding mode controller for the three-phase grid-connected photovoltaic system. Solar Energy, en prensa, disponible online.
- Lygeros J., Johansson K. H., Sismic S. N., Zhang J. y Sastry S. S. (2003) Dynamical Properties of Hybrid Automata. IEEE Transactions on Automatic Control, 48, 1, 2-17.
- Mutoh N., Matuo T., Okada, K. y Sakai M. (2002). Prediction-data-based maximum-power-point-tracking method for photovoltaic power generation systems. IEEE Power Electronics. Special. Conf., 1489-1494.
- Tarik Duru H. (2005). A maximum power tracking algorithm based on $I_{mpp} = f(P_{max})$ function for matching passive and active loads to a photovoltaic generator. Solar Energy, 80, 7, 812-822.
- Utkin V. I., Guldner J. and Shi J. (1999). Sliding Modes Control in Electromechanical Systems. 1ª edición. 231-269. Taylor & Francis. London.

ABSTRACT

This paper deals with the design of a maximum power tracker for photovoltaic energy systems using variable structure concepts. Based on the analysis of the P-V curves of the photovoltaic cells, the set of maximum power points defined by different atmospheric conditions of insolation and temperature is described by a family of lines parameterized by the temperature. Then, a new model-based switching control strategy for the electronic converter is proposed. This control strategy forces the converter behavior to emulate a device with operating points on the parametric lines previously obtained. The designed control system combines the attractive properties of model-based ones and the robustness and simplicity of sliding mode control.

Keywords: photovoltaic systems, maximum power point tracker, variable structure control.