

## ANÁLISIS DE PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS POR MODO DESLIZANTE EN UN SISTEMA DE CONVERSIÓN FOTOVOLTAICO

F.D. BIANCHI<sup>1</sup>

H.DE BATTISTA<sup>2</sup>

R.J. MANTZ<sup>3</sup>

*LEICI, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP)  
CC91, 1900 La Plata, Argentina. Tel-Fax: (54) (221) 425 9306*

**Palabras clave:** Modo deslizante, Sistemas de No-Mínima Fase, Planificación de trayectoria, Sistemas de conversión fotovoltaico

### Resumen

Se estudia el comportamiento de un sistema de conversión fotovoltaico en el contexto de la teoría de los sistemas de estructura variable. Se combinan conceptos de control por modo deslizante con el de sistemas planos, para el diseño de superficies de control que aseguren comportamientos dinámicos estables en todos los puntos de operación. Se evitan así, dinámicas inestables debidas a las características no lineales y de fase no mínima del sistema. Se discute el problema de planificación y regulación de una salida auxiliar como un medio seguro del control de la potencia generada. Se presentan resultados de simulación.

### 1. Introducción

La teoría de sistemas operando en régimen deslizante aporta herramientas de análisis que permiten interpretar de una manera simple los sistemas convencionales que han sido empleados por mucho tiempo, comprender rápidamente sus limitaciones y potencialmente aportar soluciones más eficientes. Es por ello que en la literatura se encuentran numerosos artículos que abordan el análisis del comportamiento de sistemas electrónicos operando en régimen deslizante (Sira-Ramírez, 1987; Malesani *et al*, 1995; Nicolas *et al*, 1996; Hung *et al*, 1993). En este contexto, el objetivo del presente trabajo es el análisis del comportamiento de un sistema de conversión fotovoltaico en el marco de la teoría de control por modo deslizante.

El comportamiento de las celdas solares es altamente dependiente de la radiación solar y de la temperatura. A los efectos de controlar la potencia generada por la celda solar debe ajustarse su tensión de manera de operar en un punto apropiado de su curva tensión-corriente. Existen numerosas configuraciones de sistemas de conversión fotovoltaico que emplean diversos convertidores dc-dc para el control del punto de operación de la celda solar (Synman and Elsin, 1992; Elsin *et al*, 1997).

Usualmente, el objetivo es controlar la tensión de la celda de manera de lograr el seguimiento del punto de

potencia máxima, y obtener así máximo rendimiento de conversión. Sin embargo, en sistemas aislados de red, y en casos en que la demanda de la carga es menor a la máxima potencia disponible, puede ser deseable regular potencia a un valor menor al máximo, evitando así sobrecargas.

Debido a las características particulares de las celdas solares, y a los convertidores involucrados, el sistema a controlar resulta no lineal, presentando un comportamiento de fase no mínima en cierta región de trabajo. La regulación por modo deslizante de una salida de fase no mínima da lugar a dinámicas escondidas inestables. A los efectos de sobrellevar este inconveniente, se analiza el empleo de conceptos del control por modo deslizante (Utkin, 1977; Sira-Ramírez, 1988; Hung *et al*, 1993) combinados con los de sistemas planos (Fliess *et al*, 1995; Sira-Ramírez, 1996) para diseñar superficies de deslizamiento que aseguren estabilidad en toda la región de trabajo de la celda solar.

Se analiza la aplicación de técnicas de planificación de trayectoria (Fliess *et al*, 1995; Sira-Ramírez and Fliess, 1998) al problema de regulación. A partir de la planificación de trayectorias de una salida auxiliar, se logra controlar la evolución de la salida del sistema de conversión fotovoltaico entre dos valores dados en forma segura. Se muestran resultados por simulación.

<sup>1</sup> Doc. Aux., Fac. Ing. UNLP. Bec. Entrenamiento CICpBA

<sup>2</sup> Prof. Adj., Fac. Ing. UNLP. Bec. Perfeccionamiento CONICET

<sup>3</sup> Prof. Tit., Fac. Ing. UNLP. Investigador CICpBA

## 2. Control por modo deslizante

Sea un sistema

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \cdot u \\ \sigma = h(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (1)$$

donde  $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^n$ ,  $\sigma \in \mathcal{R}$ ,  $u \in \mathcal{R}$ , y  $f, g$  y  $h$  funciones suaves.

Si se aplica una transformación difeomórfica  $\varphi(\mathbf{x})$ :

$$\begin{bmatrix} \sigma \\ \mathbf{x}_r \end{bmatrix} = \varphi(\mathbf{x}) \quad (2)$$

al sistema (1), resulta:

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = L_f h(\varphi^{-1}(\sigma, \mathbf{x}_r)) + L_g h(\varphi^{-1}(\sigma, \mathbf{x}_r)) \cdot u \\ \dot{\mathbf{x}}_r = \mathbf{a}(\sigma, \mathbf{x}_r) + \mathbf{b}(\sigma, \mathbf{x}_r) \cdot u \end{cases} \quad (3)$$

A los efectos de forzar al sistema a alcanzar la superficie  $S = \{\mathbf{x} \in \mathcal{R}^n / h(\mathbf{x}) = 0\}$  en el espacio de estados, y luego mantenerse en su entorno, la acción de control debe obedecer la siguiente ley de conmutación:

$$u = \begin{cases} u_{\max} & \text{si } (L_g h) \times \sigma \leq 0 \\ u_{\min} & \text{si } (L_g h) \times \sigma > 0 \end{cases} \quad (4)$$

Este modo de operación, en el cual el estado del sistema es forzado a evolucionar en el entorno de una superficie debido a una acción de control discontinua, es llamado régimen deslizante. Es condición necesaria para su existencia que se satisfaga la condición de transversalidad  $L_g h \neq 0$ , es decir que el sistema (1) sea de grado relativo 1 (Sira-Ramírez, 1988).

La acción de control equivalente es la acción de control continua ficticia necesaria para que el sistema se deslice sobre la superficie  $S$  (Utkin, 1977; Sira-Ramírez, 1988). Para su cálculo se considera que:

$$\begin{cases} \sigma = 0 \\ \dot{\sigma} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

De (3) y (5), la acción de control equivalente queda determinada por

$$u_{eq}(\mathbf{x}_r) = - \frac{L_f h(\varphi^{-1}(0, \mathbf{x}_r))}{L_g h(\varphi^{-1}(0, \mathbf{x}_r))} \quad (6)$$

La condición necesaria y suficiente para que pueda establecerse el régimen deslizante es:

$$u_{\min} < u_{eq} < u_{\max} \quad (7)$$

La dinámica ideal de deslizamiento coincide con la dinámica cero del sistema (1). En consecuencia, es condición necesaria para el establecimiento de un régimen deslizante con dinámica estable, que el sistema (1) sea de fase mínima. Dicha dinámica se determina a partir de (3), (5) y (6) reemplazando  $u$  por la  $u_{eq}$ :

$$\dot{\mathbf{x}}_r = \mathbf{a}(0, \mathbf{x}_r) + \mathbf{b}(0, \mathbf{x}_r) \cdot u_{eq}(\mathbf{x}_r) \quad (8)$$

### 2.1. Sistemas diferencialmente planos

Se dice que un sistema es diferencialmente plano cuando existe una salida, real o ficticia, llamada salida plana, que es una función diferencial del estado del sistema (es decir, es función del estado y de un número finito de sus derivadas), con la propiedad adicional de que el estado, la salida original y las entradas son funciones diferenciales de la salida plana (Fliess *et al.*, 1995; Sira-Ramírez, 1996).

Los sistemas SISO diferencialmente planos son linealizables mediante transformación de estados y redefinición estática de la variable de control. Suponiendo que el sistema (1) es plano, la salida plana  $y_p = h_p(\mathbf{x})$  es de grado relativo  $n$ , es decir satisface:

$$L_g h_p = L_g L_f h_p = \dots = L_g L_f^{n-2} h_p = 0 \text{ y } L_g L_f^{n-1} h_p \neq 0.$$

Luego, al aplicar al sistema (1) la transformación

$$\mathbf{z} = \varphi_p(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} h_p(\mathbf{x}) \\ L_f h_p(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ L_f^{n-1} h_p(\mathbf{x}) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

resulta

$$\begin{cases} \mathbf{z} = [y_p \ \dot{y}_p \ \dots \ y_p^{(n-1)}]^T \\ \dot{y}_p^{(n)} = L_f^n h(\varphi_p^{-1}(\mathbf{z})) + L_g L_f^{n-1} h(\varphi_p^{-1}(\mathbf{z})) \cdot u \end{cases} \quad (10)$$

Debido a que el sistema (10) tiene grado relativo  $n$  ( $n > 1$ ), no puede forzarse a la salida plana a alcanzar su valor de referencia  $y_p^*$  en tiempo finito mediante un control discontinuo. Sin embargo, puede proponerse una

superficie de deslizamiento tal que la salida plana tienda asintóticamente al valor  $y_P^*$ :

$$\sigma_P = y_P^{(n-1)} + \sum_{i=1}^{n-2} \alpha_{i+1} \cdot y_P^{(i)} + \alpha_1 \times (y_P - y_P^*) = 0 \quad (11)$$

Esta superficie satisface la condición de transversalidad:  $L_g \sigma_P = L_g L_f^{n-1} h_p \neq 0$ . La dinámica ideal de deslizamiento queda determinada por las ganancias  $\alpha_i$ , y es completamente independiente de la dinámica del sistema a lazo abierto. Por esto, mediante la regulación de la salida plana puede resolverse de manera indirecta el problema de regulación de una salida de fase no mínima (Sira-Ramírez and Fliess, 1998).

### 2.2. Planificación de trayectorias

La propiedad de poder expresar al estado del sistema y sus entradas como funciones de la salida plana y de un número finito de sus derivadas sin necesidad de integrar ecuaciones diferenciales resulta extremadamente útil para plantear estrategias de planificación de trayectorias. En efecto, a partir de una planificación de la salida, las trayectorias del estado y del control se deducen inmediatamente (Fliess *et al.*, 1995). La estrategia de control por seguimiento de trayectorias tiene por objetivo alcanzar un estado final  $x(T)$  a partir de un estado inicial  $x(t_0)$  en forma controlada a lo largo de una trayectoria preestablecida.

Si el sistema (1) es plano, tanto el estado  $x$  como la entrada  $u$  son funciones de la salida plana y sus derivadas:

$$x = \Phi_P^{-1}(z) = \Phi(y_P, \dot{y}_P, \dots, y_P^{(n-1)}) \quad (12)$$

$$u = \Psi(y_P, \dot{y}_P, \dots, y_P^{(n-1)}, y_P^{(n)}) \quad (13)$$

Luego, tanto las condiciones iniciales  $x(t_0)$ , como las finales  $x(T)$  establecen relaciones sobre las derivadas de las salidas planas  $y_P$ , hasta un orden  $(n-1)$ :

$$\begin{cases} x(t_0) = \Phi(y_P(t_0), \dot{y}_P(t_0), \dots, y_P^{(n-1)}(t_0)) \\ x(T) = \Phi(y_P(T), \dot{y}_P(T), \dots, y_P^{(n-1)}(T)) \end{cases} \quad (14)$$

Luego es suficiente con encontrar una curva en el espacio de las  $y_P$ , con  $t \in [t_0, T]$ ,  $t \rightarrow y_P^*(t)$  tal que se satisfagan las restricciones anteriores. El seguimiento asintótico de una trayectoria de referencia  $y_P^*(t)$  puede lograrse mediante un control por modo deslizante sobre una superficie:

$$\sigma_P = y_P^{(n-1)} - y_P^{*(n-1)}(t) + \sum_{i=0}^{n-2} \alpha_{i+1} \cdot (y_P^{(i)} - y_P^{*(i)}(t)) = 0 \quad (15)$$

La acción de control equivalente puede obtenerse directamente a partir de (13) y de (15). A los efectos de evitar que el sistema abandone el régimen deslizante (ver ec. (7)), deben planificarse trayectorias suaves de la salida plana.

### 3. Sistema de conversión fotovoltaico

Las celdas solares tienen una característica tensión - corriente altamente no lineal y dependiente de la radiación solar y la temperatura, como puede verse en las Figs. 1 y 2. Dicha característica responde a la siguiente expresión:

$$i_s = I_{ph} - I_o \left( \exp\left(\frac{v_C}{v_T}\right) - 1 \right) \quad (16)$$

donde:

$$I_{ph} = I_{scr} + \frac{k_i (298 - T) \lambda}{100} \quad (17)$$

$$I_o = I_{or} \left( \frac{T}{302.8} \right)^3 \exp\left( \frac{q E_{GO}}{Bk} \left( \frac{1}{302.8} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (18)$$

$$v_T = \frac{q}{kBT} \quad (19)$$

- $i_s$  [A]: corriente entregada por la celda.
- $I_{ph}$  [A]: corriente debida a la radiación.
- $I_o$  [A]: corriente de saturación inversa de la juntura PN.
- $I_{scr}$  [A]: corriente de corto circuito de la celda a 25°C y 100mW/cm<sup>2</sup>.
- $k_i$  [A/°C]: Coeficiente de temperatura de la corriente de corto circuito (0.0017).
- $\lambda$  [mW/cm<sup>2</sup>]: potencia radiación solar.
- $T$  [°K]: temperatura.
- $I_{or}$  [A]: corriente de saturación inversa de la juntura PN para la temperatura de referencia.
- $E_{GO}$  [eV]: tensión de Band gap de la juntura (1.1 para el Si).
- $v_C$  [V]: tensión en la celda.
- $k$  [Nm/°K]: constante de Boltzmann (1.3805x10<sup>-23</sup>).
- $q$  [C]: carga de un electrón (1.6x10<sup>-19</sup>).

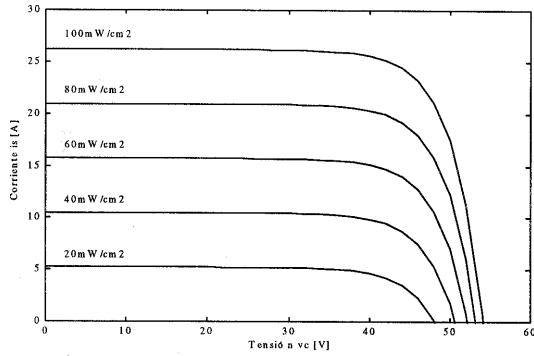


Fig.1 Característica V-I para distintos valores de radiación solar

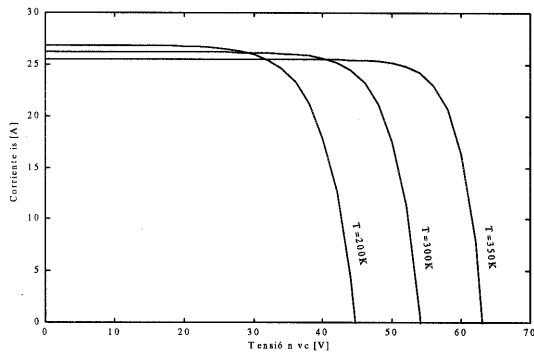


Fig.2 Característica V-I para distintos valores de temperatura

En la Fig. 3, se ilustra una característica tensión – potencia típica de las celdas solares. Esta curva presenta un máximo de potencia a un valor de tensión que depende también de la radiación solar y la temperatura. A menudo, el objetivo de control es trabajar en este punto de operación a los efectos de maximizar la potencia generada. Para ello, la tensión de la celda debe controlarse en función de las variaciones de radiación solar y temperatura. En otros casos, el objetivo de control puede ser el de regular la potencia de generación (por

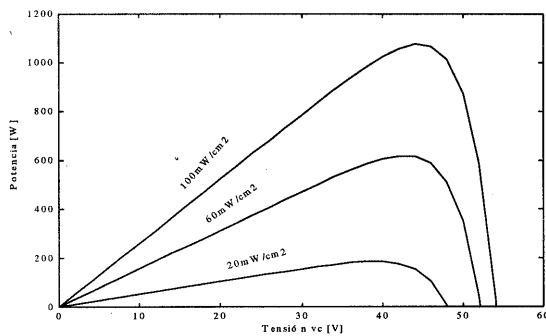


Fig.3 Característica tensión-potencia para distintos valores de radiación solar

debajo de la potencia máxima) a los efectos de satisfacer una determinada demanda de carga, evitando que las baterías se sobrecarguen.

Habitualmente, se interpone entre la celda solar y la carga un convertidor dc-dc. El punto de operación de la celda se controla a través del ciclo de trabajo del convertidor.

El sistema fotovoltaico sobre el cual se centra el presente análisis consiste en un conjunto de celdas solares, baterías y una fuente dc-dc reductora, como se muestra en la Fig. 4.

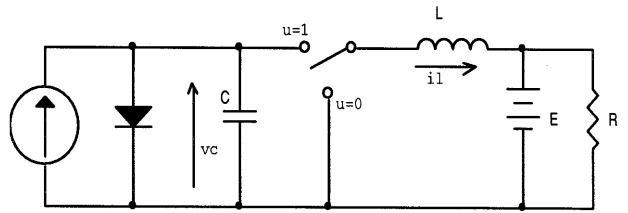


Fig.4 Sistema fotovoltaico con fuente dc-dc reductora

Las ecuaciones de estado que describen al sistema son las siguientes:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{v_C}{L} \cdot u - \frac{E}{L} \\ \frac{dv_C}{dt} = \frac{i_s}{C} - \frac{i_L}{C} \cdot u \end{cases} \quad (20)$$

La acción de control  $u$  toma el valor  $u_{m\acute{a}x}=1$  o  $u_{m\acute{i}n}=0$  según la posición de la llave. El sistema pertenece a la clase de sistemas descritos por la ec. (1), donde:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [x_1 \quad x_2]^T = [i_L \quad v_C]^T \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}) &= \left[ \begin{matrix} -\frac{E}{L} & \frac{i_s(x_2)}{C} \end{matrix} \right]^T \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) &= \left[ \begin{matrix} \frac{x_2}{L} & -\frac{x_1}{C} \end{matrix} \right]^T \end{aligned} \quad (21)$$

#### 4. Control por modo deslizante de la tensión de la celda solar

Como se mencionó, a través del control de la tensión se puede lograr que la celda opere con el máximo rendimiento de conversión. A fin de controlar la tensión de la celda por modo deslizante, se considera la siguiente superficie de conmutación:

$$\sigma = h(x) = v_C - V = 0 \quad (22)$$

donde  $V$ , función de la radiación y temperatura, es la tensión de celda correspondiente al punto óptimo de funcionamiento.

La condición necesaria para la existencia del modo deslizante sobre la superficie:

$$L_g h = [0 \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} \frac{v_C}{L} \\ -\frac{i_L}{C} \end{bmatrix} = -\frac{i_L}{C} \neq 0 \quad (23)$$

se satisface para  $i_L \neq 0$ .

Luego, la acción de control equivalente queda bien definida y se puede determinar a partir de (6):

$$u_{eq} = -\frac{L_f h}{L_g h} = \frac{i_s(v_C)}{i_L} = \frac{i_s(V)}{i_L} \quad (24)$$

La condición necesaria y suficiente para la existencia de modo deslizante (7), resulta entonces  $0 \leq i_s \leq i_L$ . Esta restricción coincide con el rango de funcionamiento de la fuente conmutada reductora. El ciclo de trabajo de la fuente en estado estacionario, considerando que no existe disipación de potencia es:

$$i_s \cdot v_C = E \cdot i_L \Rightarrow \delta = \frac{E}{v_C} = \frac{i_s}{i_L} \quad (25)$$

Luego, el ciclo de trabajo, acotado entre 0 y 1, coincide con la  $u_{eq}$ :

A los efectos de establecer si el modo deslizante es estable, se debe determinar la dinámica cero del sistema. Ésta se obtiene de reemplazar la  $u_{eq}$  en las ecuaciones del sistema:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{u_{eq} \cdot V}{L} - \frac{E}{L} = \frac{i_s(V) \cdot V}{i_L \cdot L} - \frac{E}{L} \quad (26)$$

El sistema en régimen deslizante presenta un único punto de equilibrio,

$$i_L = \frac{V}{E} i_s(V) \quad (27)$$

El análisis de la  $di_L/dt$  en función de  $i_L$  permite determinar que dicho punto es un punto de equilibrio estable, es decir que el sistema presenta un comportamiento de fase mínima en toda la región de operación de la celda.

## 5. Control por modo deslizante de la potencia generada

En casos en que se desea satisfacer una determinada carga, puede plantearse un control por modo deslizante de la potencia suministrada por el sistema de conversión fotovoltaico. Si se considera que la tensión en la batería es constante, esta potencia es proporcional a la corriente  $i_L$ . Entonces la superficie a considerar en este caso es la siguiente:

$$\sigma = h(x) = i_L - I = 0 \quad (28)$$

La condición de transversalidad:

$$L_g h = [1 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} \frac{v_C}{L} \\ -\frac{i_L}{C} \end{bmatrix} = \frac{v_C}{L} \neq 0 \quad (29)$$

se cumple siempre que  $v_C \neq 0$

La acción de control equivalente se obtiene de (6):

$$u_{eq} = \frac{E}{v_C} \quad (30)$$

y coincide con el ciclo de trabajo de la fuente. La condición necesaria y suficiente (7) resulta entonces:

$$0 \leq E \leq v_C \quad (31)$$

Por último, reemplazando la acción de control equivalente en las ecuaciones del sistema se obtiene la dinámica de los ceros.

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_s}{C} - \frac{E \cdot I}{v_C \cdot C} \quad (32)$$

Esta dinámica, siempre que la potencia suministrada  $P_E = E \cdot I$  sea menor a la máxima (ver Fig. 3), presenta dos puntos de equilibrio, uno de ellos es estable y el otro no. Los puntos de equilibrio ubicados a la derecha del punto de máxima potencia son estables, mientras que los puntos ubicados a la izquierda son inestables. Por lo tanto, el sistema presenta un comportamiento de fase mínima (modo deslizante estable) en una región, y de fase no mínima (modo deslizante inestable) en otra.

## 6. Control indirecto de la potencia de la celda

Como fue mencionado anteriormente, mediante la regulación de una salida ficticia  $y_p$  con grado relativo  $n$ , si existe, se puede resolver el problema de regulación de la salida de fase no mínima. Esto puede lograrse planteando una superficie de deslizamiento de manera

que la salida ficticia siga en forma asintótica a un valor de referencia  $y_p^*$ , que se corresponde con la potencia de referencia.

Para el caso analizado la energía almacenada en la fuente es la salida  $y_p$  con grado relativo 2, igual al orden del sistema:

$$y_p = h_p(x) = 0.5 \cdot (L \cdot i_L^2 + C \cdot v_C^2) \quad (33)$$

Es decir, satisface

$$\begin{cases} L_g h = [Lx_1 & Cx_2] \cdot \begin{bmatrix} x_2/C \\ -x_1/L \end{bmatrix} = 0 \\ L_f L_g h \neq 0 \end{cases} \quad (34)$$

Suponiendo variaciones de temperatura lentas, pueden calcularse:

$$\dot{y}_p = v_C \cdot i_s - E \cdot i_L \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_p = & \frac{E^2}{L} + \frac{I_{scr} + k_i(T-298)}{100} \dot{\lambda} - \frac{i_s v_C I_o e^{(v_C/v_T)}}{v_T C} \\ & + \frac{i_s^2}{C} + u \left[ \frac{E v_C}{L} - \frac{i_s v_C I_o e^{(v_C/v_T)}}{v_T C} - \frac{i_L i_s}{C} \right] \end{aligned} \quad (36)$$

Debido a la presencia de la exponencial en la ecuación de la celda los estados no pueden expresarse en función de la salida y sus derivadas en forma explícita. No obstante, la acción de control se puede expresar en forma explícita en función de los estados, de la salida  $y_p$  y sus derivadas. Así la acción de control se puede obtener de la (35) y la (36):

$$u = \frac{\ddot{y}_p - \frac{E^2}{L} + \frac{i_s v_C I_o e^{(v_C/v_T)}}{v_T C} - \frac{i_s^2}{C}}{\frac{i_s v_C I_o e^{(v_C/v_T)}}{v_T C} - \frac{E v_C}{L} - \frac{i_L i_s}{C}} \quad (37)$$

Como el sistema es de grado relativo  $n=2$ , la superficie de deslizamiento (11) resulta:

$$\sigma_p = \dot{y}_p + \alpha \times (y_p - y_p^*) = 0 \quad (38)$$

El sistema fotovoltaico operando en modo deslizante sobre esta superficie, presenta una dinámica lineal y estable en toda la región de trabajo, gobernada por la constante  $\alpha$  de la superficie de conmutación. La acción

de control equivalente se obtiene luego de despejar la  $\ddot{y}_p$  de  $\dot{\sigma}_p = 0$  y reemplazarla en (37).

### 6.1. Planificación de trayectoria.

Se pueden aplicar las técnicas de planificación de trayectorias para pasar, en un tiempo determinado, de un valor de energía almacenada a otro, y en consecuencia, de un valor de potencia generada a otro. Las curvas de Bezier o B-splines son particularmente útiles para prescribir una trayectoria interpolante adecuada. Estas funciones derivables  $\varphi(t, t_0, t_f)$  son tales que

$$\begin{cases} \varphi(t_0, t_0, t_f) = 0 \\ \varphi(t_f, t_0, t_f) = 1 \end{cases}, \quad (39)$$

con derivadas iniciales, en  $t_0$ , y finales, en  $t_f$ , fijas.

A partir de la curva de Bezier elegida se obtiene la trayectoria deseada de la salida ficticia  $y_p$ :

$$y_p^*(t) = y_p(t_0) + (y_p(t_f) - y_p(t_0)) \cdot \varphi(t, t_0, t_f) \quad (40)$$

El seguimiento asintótico de la trayectoria de referencia se logra a través de un régimen deslizante sobre una superficie (15), que para el sistema de segundo orden bajo análisis resulta:

$$\sigma_p = (\dot{y}_p(t) - \dot{y}_p^*(t)) + \alpha \times (y_p(t) - y_p^*(t)) = 0 \quad (41)$$

La acción de control equivalente puede obtenerse de manera similar a la sección anterior.

$$u_{eq} = \frac{\ddot{y}_p^* + \alpha(\dot{y}_p^* - \dot{y}_p) - \frac{E^2}{L} + \frac{i_s v_C I_o e^{(v_C/v_T)}}{v_T C} - \frac{i_s^2}{C}}{\frac{i_s v_C I_o e^{(v_C/v_T)}}{v_T C} - \frac{E v_C}{L} - \frac{i_L i_s}{C}} \quad (42)$$

### 6.2. Resultados de simulación

Los resultados obtenidos por simulación corresponden a una celda solar cuyas características tensión-corriente y tensión-potencia se muestran en las Figs. 1, 2 y 3. Se considera una radiación solar de  $100 \text{ mW/cm}^2$  y una temperatura de 300K. La tensión de batería es  $E=12\text{V}$ .

Se ha considerado como objetivo el control de potencia. Se planifica la trayectoria de la energía almacenada en la fuente a los efectos de pasar, de manera segura, de un punto de operación a otro, ambos en la región de fase no mínima. Dichos puntos corresponden a

valores inicial y final de corriente de carga  $i_L(t_0)=43.6A$  y  $i_L(t_f)=86.6A$  respectivamente. Mediante un control por modo deslizante (ec. (41)), se logra un seguimiento asintótico de la trayectoria de referencia.

En la Fig. 5a se han graficado la trayectoria deseada y la energía almacenada, observándose que el control por modo deslizante asegura un correcto seguimiento. A su vez, la Fig. 5b muestra la corriente de carga  $i_L$ , cuyos valores inicial y final son los deseados. Finalmente, en la Fig. 5c, se muestra la evolución de la tensión de la celda solar. Se observa que mediante la regulación de la salida auxiliar (energía almacenada), es posible regular la potencia generada en la región de no mínima fase en forma segura.

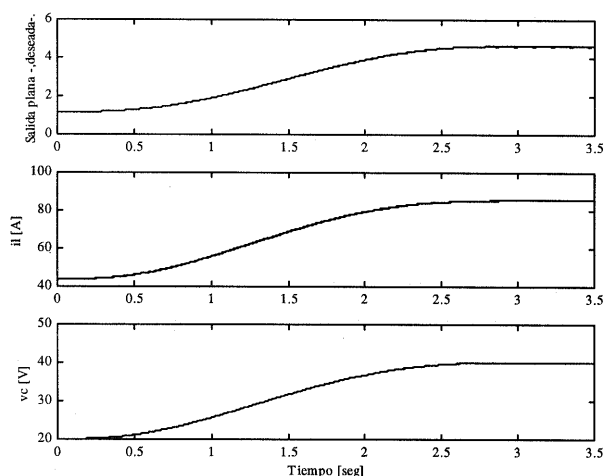


Fig.5 a) Energía almacenada (línea continua) y referencia (línea punteada). b) Corriente de carga. c) Tensión de la celda.

## 7. Conclusiones

Se ha estudiado el comportamiento de un sistema de conversión fotovoltaico en el contexto de la teoría de los sistemas de estructura variable. La potencialidad de las herramientas empleadas para el análisis pone en evidencia, en forma sencilla, el compromiso existente entre los objetivos de control y dinámicas escondidas inestables en determinadas regiones de trabajo. La selección de la superficie deslizante a partir de conceptos de salidas planas permite sobrellevar los problemas de estabilidad. La planificación de trayectorias y su regulación por modo deslizante demuestra ser un medio eficiente para regular la potencia generada en forma segura.

## Referencias

- Nicolas B., M.Fadel and Y.Chéron, "Robust Control of Switched Power Converters via Sliding Mode". *ETEP*, vol. 6, 1996, pp. 413-418.
- Sira-Ramirez H., "Sliding motions in bilinear switched networks". *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, vol. 34, 1987, pp. 919-933.
- Malesani L., L.Rossetto, G.Spiazzi and P.Tenti, "Performance Optimization of Cuk Converters by Sliding Mode Control". *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 10, 1995, pp. 302-310.
- Hung J. Y., W.Gao and J.C.Hung, "Variable Structure Control: A Survey". *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 40, 1993, pp. 2-22.
- D.B.Synman and J.Elsin, "Analysis and Experimental Evaluation of a New MPPT Converter Topology for PV Installations". *IECON'92*, San Diego, USA. November 9-13, 1992, pp. 542-547.
- J.Elsin, M.S.Wolf, D.B.Synman and W.Swiegers, "Integrated Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Converter". *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 44, 1997, pp. 769-773.
- M.Fliess, J.Lévine, P.Martin and P.Rouchon, "Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples". *Int. J. Control*, vol. 6, 1995, pp. 1327-1361.
- H.Sira-Ramirez and M.Fliess, "Regulation of Non-minimum Phase Outputs in a PVTOL Aircraft". *Conference on Decision and Control*, Tampa, USA. December 13-15, 1998.
- Sira-Ramirez H., "Differential Geometrics Methods in Variable Structure Systems". *Int. J. Control*, vol. 48, 1988, pp. 1359-1390.
- Utkin V.Y., "Variable Structure Systems with Sliding Modes". *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 22, 1977, pp. 212-222.
- Sira-Ramirez H., "On the sliding mode of multivariable nonlinear systems". *Int. J. Control*, vol. 64, 1996, pp. 745-765.