

# Super Twisting Sliding Mode Control for the Maximum Power Point Tracking in a Photovoltaic System Under Partial Shading<sup>\*</sup>

Itzel Contreras Carmona<sup>\*</sup> Belem Saldivar<sup>\*\*</sup>  
Otniel Portillo Rodriguez<sup>\*</sup>  
V́ctor Manuel Raḿrez Rivera<sup>\*\*\*,\*\*\*\*</sup> Leopoldo Gil Antonio<sup>†</sup>

<sup>\*</sup> *Facultad de Ingenieŕa, Universidad Aut3noma del Estado de M3xico, Instituto Literario No. 100 Ote., 50130 Toluca, Mexico*

<sup>\*\*</sup> *Departamento de Control Autom3tico, CINVESTAV-IPN, Av. Instituto Polit3cnico Nacional 2508, Mexico City 07360, Mexico*

<sup>\*\*\*</sup> *Departamento de Enerǵa Renovable, Centro de Investigaci3n Científica de Yucat3n (CICY), Yucat3n, M3xico*

<sup>\*\*\*\*</sup> *Investigadoras e Investigadores por M3xico Conahcyt, Ciudad de M3xico C.P. 03940, Mexico*

<sup>†</sup> *TecNM: Tecnol3gico de Estudios Superiores de Jocotitl3n. Carretera Toluca-Atlacomulco km 44.8, Ejido de San Juan y San Agustín Jocotitl3n, Mexico*

---

**Abstract:** One of the most popular renewable energy sources is photovoltaic energy; however, its main drawback is the low conversion efficiency. Optimal system operation requires efficient tracking of the maximum power point representing the maximum energy that can be extracted from the photovoltaic system. One of the main problems is the presence of partial shadows. In this scenario, the system's power presents multiple peaks; a robust control technique is required to properly track the Global Maximum Power Point (GMPP). This paper proposes using a Sliding Mode Controller (SMC) for the GMPP tracking which is a robust strategy for coping with changing environmental conditions and partial shadows. Numerical simulation results show the effectiveness of the proposal.

*Keywords:* Photovoltaic system, Maximum Power Point Tracking, Partial Shading, Sliding Mode Control.

---

## 1. INTRODUCCI3N

La enerǵa fotovoltaica ha recibido mucha atenci3n como fuente de enerǵa renovable. En vista de la creciente demanda de enerǵa fotovoltaica en el sector industrial y dom3stico, optimizar la generaci3n de este tipo de enerǵa es un tema de significativa importancia cuyos principales objetivos son mejorar la eficiencia del sistema y reducir el n3mero de paneles solares necesarios para una demanda de carga específica.

La cantidad de enerǵa fotovoltaica que puede generarse depende de la irradiancia, la temperatura y la impedancia de carga en el sistema. Un aspecto importante que debe considerarse es la presencia de sombras parciales que obstaculizan el funcionamiento apropiado del sistema.

En este sentido, para realizar un eficiente seguimiento del punto de m3xima potencia global (GMPP), se requiere de una t3cnica robusta de control. Algunas de las t3cnicas m3s populares reportadas en la literatura para el seguimiento del punto de m3xima potencia son: Perturbaci3n y Observaci3n (P&O), Conductancia Incremental (CI), Particle Swarm Optimization (Lodhi et al. [2017]), Ant Colony Optimization (Sawant et al. [2016]), Algorithm Firefly (Farzaneh et al. [2018]), Simulated Annealing (Shenbagaramalakshmi and Punitha [2017]), algoritmo beta modificado (Li et al. [2017]), algoritmo de b3squeda de Fibonacci modificado (Pati and Sahoo [2016]), y el control por modos deslizantes (SMC) (Montoya et al. [2016]).

Debido a las característicās no lineales del sistema y del convertidor de potencia, la aplicaci3n de controladores no

<sup>\*</sup> Proyecto apoyado por el CONACYT en el ańo 2023.

lineales para el seguimiento de trayectorias representa una solución para el problema del seguimiento del GMPP.

En este trabajo se aborda el problema a través de la aplicación del algoritmo de control conocido como Super Twisting SMC, su principal ventaja es que no requiere información sobre la derivada temporal de la variable de deslizamiento como en Ruiz et al. [2010], además reduce el chattering que genera el modo deslizante de primer orden y garantiza una mayor precisión sin generar un ciclo de trabajo aleatorio como se realiza en los algoritmos bio-inspirados (Sawant et al. [2016], Farzaneh et al. [2018]). La superficie de deslizamiento empleada se relaciona con las características de la curva de potencia-voltaje en el punto de máxima potencia de tal forma que, cuando las trayectorias del sistema converjan a esta superficie, se alcance el punto de máxima potencia. La estrategia de control debe garantizar esta convergencia en tiempo finito.

Mediante simulaciones numéricas, se evalúa el desempeño de la estrategia Super Twisting SMC en el seguimiento del GMPP, considerando la presencia de sombras parciales incidiendo en el panel. Además, se presentan los resultados de simulaciones numéricas del sistema empleando las técnicas clásicas P&O y CI. Lo anterior permite resaltar la superioridad del método Super Twisting SMC en presencia de sombras.

## 2. MODELO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

El sistema fotovoltaico genera electricidad directamente de la luz solar a través de un proceso electrónico que aparece naturalmente en los semiconductores. Los electrones de los semiconductores son liberados por la energía solar y pueden inducirse a viajar a través de un circuito eléctrico, ya sea para suministrar energía a dispositivos eléctricos o para enviar electricidad a la red (Kota and Bhukya [2019]).

Nomenclatura			
$I_r$	Irradiancia solar	$P_{pv}$	Potencia del panel
$q$	Carga de un electrón	$P_s$	Potencia de salida
$k_b$	Constante de Boltzmann	$T$	Temperatura del panel
$I_o$	Corriente de saturación	$A$	Factor ideal
$N_s$	Celdas en serie	$u$	Señal de control de entrada
$I_{ph}$	Corriente generada por la luz	$V_{pv}$	Voltaje del panel
$I_{pv}$	Corriente del panel	$V_s$	Voltaje de salida

Tabla 1. Nomenclatura del sistema fotovoltaico

La corriente de salida del panel fotovoltaico puede describirse como (Gil [2019]):

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o \left[ \exp \left( \frac{qV_{pv}}{N_s k_b T A} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

La nomenclatura puede consultarse en la Tabla 1. De la Ecuación (1), se puede despejar  $V_{pv}$ , obteniendo:

$$V_{pv} = \frac{N_s k_b T A}{q} \ln \left( \frac{I_{ph} + I_o - I_{pv}}{I_o} \right) \quad (2)$$

La Figura 1 muestra un diagrama esquemático de los elementos del sistema fotovoltaico considerado. Note que se emplea un convertidor Boost para controlar la potencia que entrega el sistema.

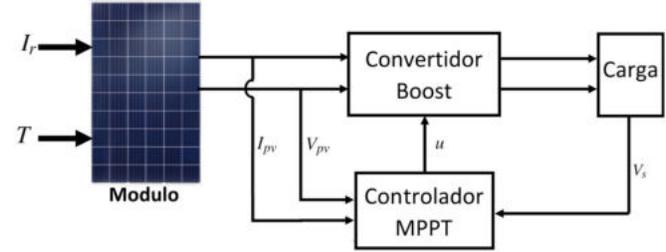


Fig. 1. Diagrama del sistema fotovoltaico analizado.

Los convertidores de potencia DC-DC son ampliamente utilizados en sistemas de generación de energía fotovoltaica como etapa de adaptación entre el panel y la carga. El convertidor Boost permite elevar el voltaje  $V_{pv}$  utilizando un circuito relativamente sencillo con el cual se garantiza su operación en el modo de conducción continua (Meza et al. [2018]). La topología del circuito se presenta en la Figura 2, donde  $V_{pv}$  es el voltaje de entrada y  $V_s$  es el voltaje de salida. Se asume que la corriente del inductor es igual a la corriente del sistema fotovoltaico  $I_{pv}$ .

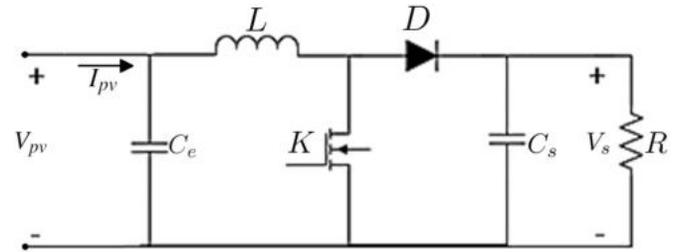


Fig. 2. Topología del convertidor Boost.

Los componentes  $R$ ,  $L$ ,  $C_e$ ,  $C_s$ , son, respectivamente, la carga del convertidor, la inductancia, la capacitancia de entrada y la capacitancia de salida. La dinámica del convertidor se describe mediante un modelo que combina las ecuaciones resultantes de la activación y desactivación del interruptor  $u$  (entrada de control). El modelo está descrito por (Sira-Ramirez and Silva-Ortigoza [2006]):

$$\frac{dI_{pv}}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} - \frac{(1-u)V_s}{L} \quad (3)$$

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{(1-u)I_{pv}}{C_s} - \frac{V_s}{RC_s} \quad (4)$$

El modelo (3)-(4) puede representarse como:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

$$y = Cx$$

donde:  $x = [x_1 \ x_2]^T = [I_{pv} \ V_s]^T$ ,  $u \in [0, 1]$  y  $C = [0 \ 1]$ .

### 3. SUPER TWISTING SMC PARA EL SEGUIMIENTO DEL GMPP

La técnica SMC es una estrategia de control no lineal derivada de la teoría de sistemas de estructura variable que se introdujo originalmente en (Utkin [1977]). Debido a sus múltiples ventajas, tales como una implementación simple, robustez y buena respuesta dinámica, esta técnica se ha aplicado con éxito a los convertidores DC-DC.

Para establecer la superficie de deslizamiento, se toma en cuenta que, en el punto de máxima potencia, se satisface (Kchaou et al. [2017]):

$$\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} = 0, \quad (5)$$

y considerando que  $P_{pv} = V_{pv}I_{pv}$ , se tiene:

$$\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} = V_{pv} \left( \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} + \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \right) \quad (6)$$

En vista de (5) y (6), la superficie de deslizamiento se define como (Chiu et al. [2012]):

$$S(x) = \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} + \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (7)$$

En este sentido, cuando  $S(x) = 0$  la Ecuación (5) se satisface, es decir, se alcanza el punto de máxima potencia.

El control por modos deslizantes consta de dos términos:  $u_{eq}$  (control equivalente) y  $u_{st}$  (control de conmutación):

$$u = u_{eq} + u_{st}, \quad (8)$$

$$u_{eq} = 1 - \frac{V_{pv}}{V_s},$$

$$u_{st} = -\lambda |S|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S) - \Upsilon \int \text{sign}(S), \quad (9)$$

donde  $\lambda$  y  $\Upsilon$  son parámetros de diseño (véanse Mamarelis et al. [2013], Evangelista et al. [2012]).

Note que para la implementación de este controlador se requiere tener acceso a los valores de  $I_o$ ,  $N_s$ ,  $k_b$  y  $A$ , los cuales pueden consultarse en las especificaciones técnicas que provee el fabricante del panel fotovoltaico. Además se requiere tener acceso a  $V_{pv}$ ,  $I_{pv}$ ,  $V_s$  y  $T$ , para lo cual se emplean sensores.

Para establecer las condiciones de estabilidad del sistema fotovoltaico se considera la función candidata de Lyapunov:  $V(x) = \frac{1}{2} S^2(x)$ . La estabilidad se puede garantizar si la derivada de la función de Lyapunov es negativa. Note que  $\dot{V} = S\dot{S}$ , donde  $\dot{S} = \frac{\partial S}{\partial x} \dot{x}$ . Puesto que  $\frac{\partial S}{\partial x_2} = 0$ , entonces:

$$\dot{S} = \frac{\partial S}{\partial x_1} \dot{x}_1 = \frac{\partial S}{\partial I_{pv}} \left( -\frac{V_s}{L}(1-u) + \frac{V_{pv}}{L} \right) \quad (10)$$

El primer factor de (10) puede expresarse como:

$$\frac{\partial S}{\partial I_{pv}} = \frac{\partial}{\partial I_{pv}} \left[ \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} + \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \right] \quad (11)$$

Note que, considerando  $I_{pv}$  definida en (1), se tiene:

$$\frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} = -\frac{q}{N_s k_b T A} I_o \exp \left( \frac{q V_{pv}}{N_s k_b T A} \right) \quad (12)$$

y sustituyendo  $V_{pv}$  definida en (2) se obtiene:

$$\frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} = -\frac{q}{N_s k_b T A} I_o \left( \frac{I_{ph} + I_o - I_{pv}}{I_o} \right)$$

Así, el primer término de (11) se puede escribir como:

$$\frac{\partial}{\partial I_{pv}} \left[ \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} \right] = \frac{\partial}{\partial I_{pv}} \left[ -\frac{q(I_{ph} + I_o - I_{pv})}{N_s k_b T A} \right] = \frac{q}{N_s k_b T A}$$

Del segundo término de la Ecuación (11), se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial I_{pv}} \left[ \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \right] = \frac{1}{V_{pv}} - \frac{I_{pv}}{V_{pv}^2} \frac{\partial V_{pv}}{\partial I_{pv}}$$

Entonces,

$$\frac{\partial S}{\partial I_{pv}} = \frac{q}{N_s k_b T A} + \frac{1}{V_{pv}} - \frac{I_{pv}}{V_{pv}^2} \frac{\partial V_{pv}}{\partial I_{pv}} \quad (13)$$

Considerando la expresión de  $V_{pv}$  definida en (2) se tiene:

$$\frac{\partial V_{pv}}{\partial I_{pv}} = -\frac{N_s k_b T A}{q(I_{ph} + I_o - I_{pv})}$$

Sustituyendo esta última expresión en (13), resulta en:

$$\frac{\partial S}{\partial I_{pv}} = \frac{q}{N_s k_b T A} + \frac{1}{V_{pv}} + \frac{I_{pv}}{V_{pv}^2} \frac{N_s k_b T A}{q(I_{ph} + I_o - I_{pv})}$$

En vista de la definición de  $I_{pv}$  dada en (1), siempre se cumple que  $I_{ph} + I_o - I_{pv} > 0$ , así,  $\frac{\partial S}{\partial I_{pv}} > 0$ . En vista de (10), y, sustituyendo  $u$  definido en (8), se tiene:

$$\dot{S} = \frac{\partial S}{\partial I_{pv}} \left( \frac{V_s}{L} \left( -\lambda |S|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S) - \Upsilon \int \text{sign}(S) \right) \right)$$

Entonces, la derivada de la función de Lyapunov es:

$$\dot{V} = S\dot{S} = S \frac{\partial S}{\partial I_{pv}} \frac{V_s}{L} \left( -\lambda |S|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S) - \Upsilon \int \text{sign}(S) \right) \quad (14)$$

donde  $\frac{\partial S}{\partial I_{pv}} > 0$ ,  $\frac{V_s}{L} > 0$ . Note que si  $S > 0$ , entonces, el último factor de (14) es negativo, así  $\dot{V} < 0$ . Si  $S < 0$ , entonces, el último factor de (14) es positivo, lo que implica que en este caso también  $\dot{V} < 0$ . Lo anterior garantiza la estabilidad del sistema.

### 4. SIMULACIONES NUMÉRICAS

Para el desarrollo de simulaciones numéricas se considera el panel fotovoltaico Renesola JC250<sup>®</sup> cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 2. El método numérico que se utiliza es el método Dormand-Prince de la familia Runge-Kutta, con un paso fijo de  $1e^{-6}$  s. La Tabla 3

muestra los valores numéricos de los parámetros del convertidor Boost. Estos valores se calcularon con base en el voltaje y la corriente entregados por el panel fotovoltaico, así como la carga que se le aplica al sistema, en este caso se toma una carga resistiva.

Parámetro	Valor numérico
$I_r$	$1000 \text{ W/m}^2$
$I_o$	$1.9164 \times 10^{-9} \text{ A}$
$R_s$	$0.29835 \Omega$
$N_s$	60 celdas
$k_b$	$1.38 \times 10^{-23}$
q	$1.6 \times 10^{-19}$
A	1.1

Tabla 2. Especificaciones del panel JC250 Renesola®

Parámetro	Valor numérico
Resistencia	$12 \Omega$
Capacitancia de salida	$470 \mu\text{F}$
Frecuencia de operación PWM	45kHz
Inductancia	10 mH
Capacitancia de entrada	$330 \mu\text{F}$

Tabla 3. Parámetros del convertidor Boost

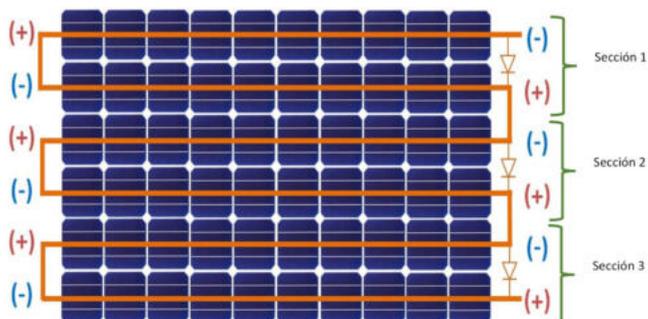


Fig. 3. División en 3 secciones de un panel fotovoltaico.

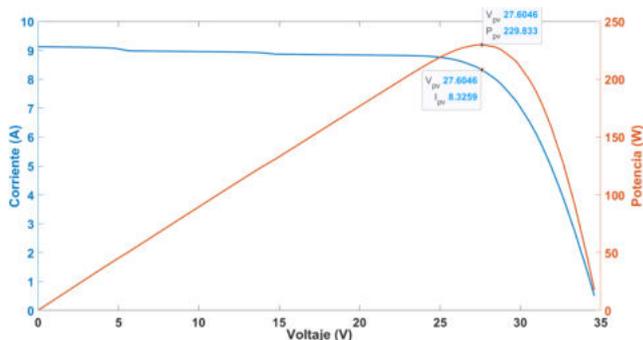
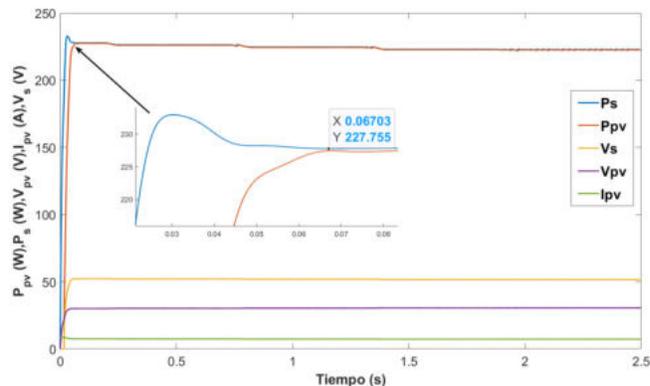


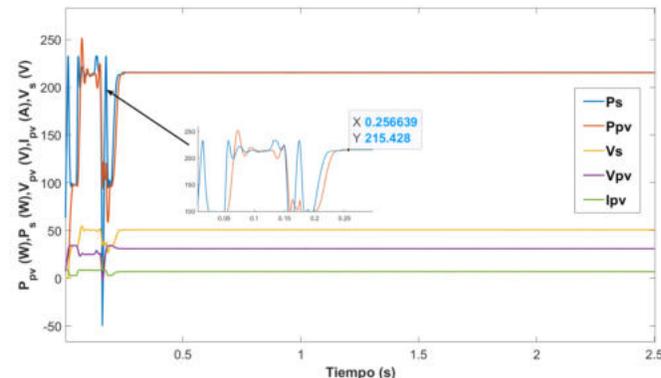
Fig. 4. Curvas de corriente-voltaje y potencia-voltaje correspondiente al Caso 1. GMPP: 229.833 W.

En los experimentos que se describen a continuación, se considera que el panel está dividido en tres secciones,

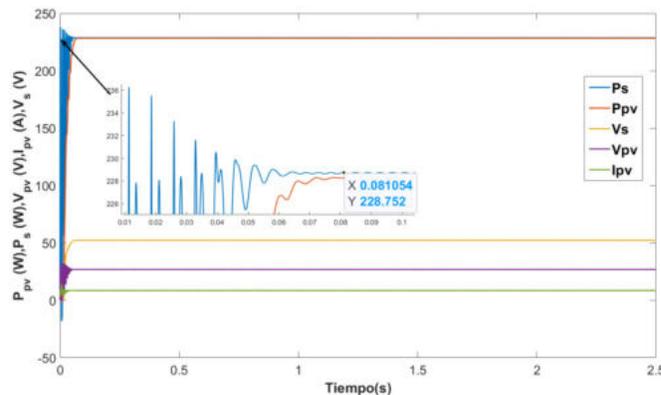
como se muestra en la Figura 3. En cada una de las secciones se asumen diferentes valores de temperatura e irradiancia para representar la obstrucción de luz solar provocada por la presencia de sombras.



((a)) Perturbación y Observación



((b)) Conductancia Incremental



((c)) Super Twisting SMC

Fig. 5. Caso 1. (a) P&O, (b) CI, (c) SMC.

Las simulaciones se realizaron en MATLAB-Simulink®. Para la implementación de la superficie de deslizamiento se emplean las Ecuaciones (7)-(12). Las ganancias del control de conmutación ( $u_{st}$ ) definido en la Ecuación (9)

se eligen como:  $\lambda = 0.1$  y  $\Upsilon = 0.01$  (Bouafassa et al. [2015]).

Para evaluar el desempeño del algoritmo de control Super Twisting SMC en el seguimiento del GMPP en presencia de sombras, se desarrollan simulaciones y se compara con las técnicas clásicas P&O y CI. La descripción de la operación de estos algoritmos puede consultarse en Andrea et al. [2010].

Se consideran los tres casos descritos a continuación.

**Caso 1:** Se considera una irradiancia uniforme de  $1000 \text{ W/m}^2$ , mientras que la temperatura de cada sección está dada por:

- Sección 1 =  $25^\circ\text{C}$
- Sección 2 =  $40^\circ\text{C}$
- Sección 3 =  $60^\circ\text{C}$

La Figura 4 muestra la curva de potencia-voltaje correspondiente a las condiciones de operación descritas en el Caso 1. Se identifica que la máxima potencia es  $229.83 \text{ W}$ .

La Figura 5 muestra los resultados de las simulaciones numéricas efectuadas bajo las condiciones descritas en el Caso 1, empleando los algoritmos P&O, CI y Super Twisting SMC. En esta figura se puede identificar la evolución de las variables  $P_s$ ,  $P_{pv}$ ,  $V_s$ ,  $V_{pv}$  e  $I_{pv}$ .

Como se puede observar en la Figura 5(c), con el algoritmo Super Twisting SMC la potencia entregada por el panel fotovoltaico mantiene un valor de  $228.75 \text{ W}$ , cercano a la potencia máxima global indicada en la Figura 4 ( $229.833 \text{ W}$ ). Note que con el algoritmo P&O, la potencia inicia en un valor cercano al esperado ( $227.76 \text{ W}$ ) pero disminuye progresivamente a lo largo del tiempo (véase la Figura 5(a)), mientras que en el caso del algoritmo CI, el valor de la potencia se mantiene por debajo de éste (en  $215.43 \text{ W}$ ).

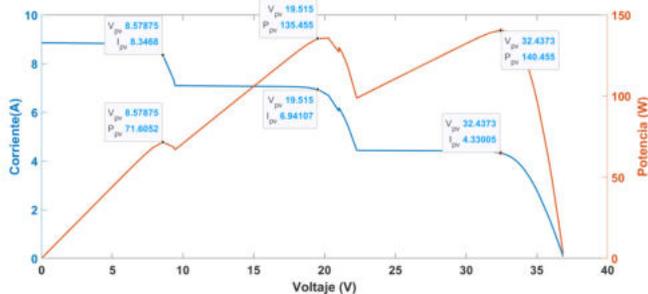
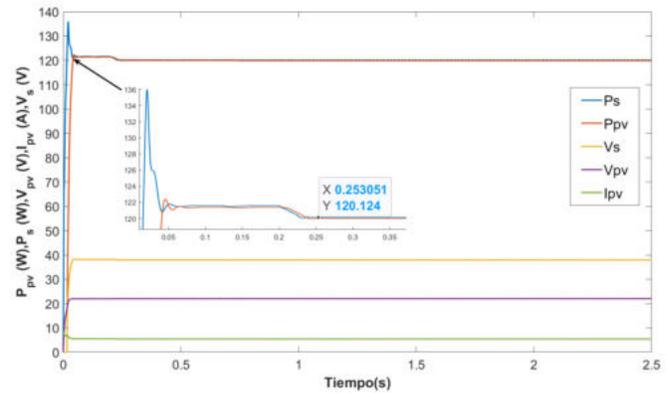


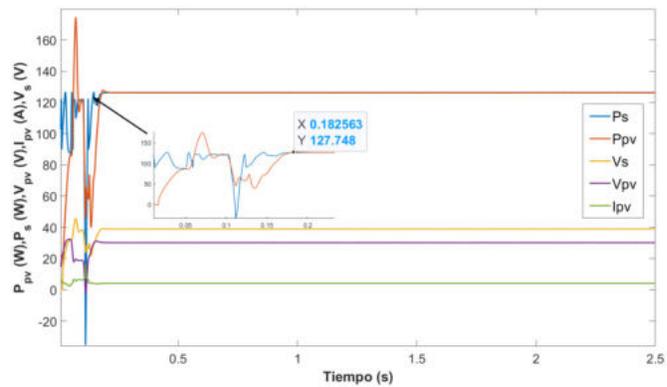
Fig. 6. Curvas de corriente-voltaje y potencia-voltaje correspondiente al Caso 2. GMPP:  $140.455 \text{ W}$ .

**Caso 2:** Se considera una temperatura uniforme de  $25^\circ\text{C}$ , mientras que la irradiancia en cada sección está dada por:

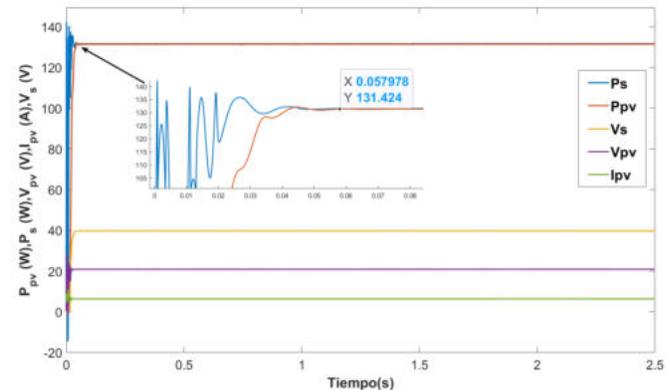
- Sección 1 =  $1000 \text{ W/m}^2$
- Sección 2 =  $800 \text{ W/m}^2$
- Sección 3 =  $500 \text{ W/m}^2$



((a)) Perturbación y Observacion



((b)) Conductancia Incremental



((c)) Super Twisting

Fig. 7. Caso 2. (a) P&O, (b) CI, (c) SMC.

En la Figura 6 se muestra la curva de potencia-voltaje correspondiente a las condiciones de operación descritas en el Caso 2. Note que se generan dos puntos máximos locales ( $71.60 \text{ W}$  y  $135.455 \text{ W}$ ) y uno global ( $140.455 \text{ W}$ ).

La Figura 7 muestra los resultados de las simulaciones desarrolladas bajo las condiciones descritas en el Caso 2. Como se observa en la Figura 7(c), con el algoritmo SMC es posible generar una potencia más cercana al GMPP.

Con los algoritmos P&O y CI, la potencia entregada es de 120.12 W y 127.75 W, respectivamente (véanse las Figuras 7(a) y 7(b)), mientras que con el algoritmo SMC se obtiene una potencia de 131.42 W.

**Caso 3:** Para este caso se consideran diferentes irradiancias y temperaturas en las 3 secciones del panel, como se indica a continuación.

- Sección 1=25°C y 1000 W/m<sup>2</sup>
- Sección 2=40°C y 800 W/m<sup>2</sup>
- Sección 3=60°C y 500 W/m<sup>2</sup>.

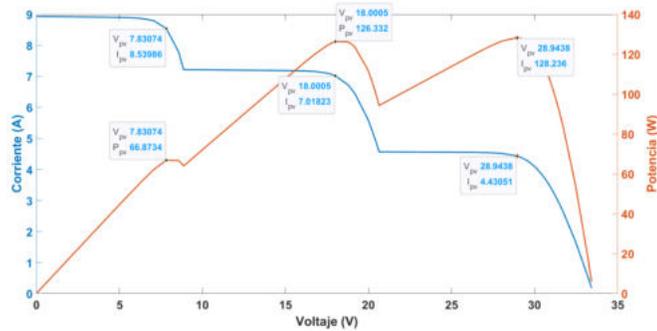


Fig. 8. Curvas de corriente-voltaje y potencia-voltaje correspondiente al Caso 3. GMPP: 128.236 W.

En la Figura 8 se muestran los puntos de máxima potencia generados bajo las condiciones descritas en el Caso 3. Se tienen dos puntos máximos de potencia locales (66.87 W y 126.33 W) y uno global (128.236 W).

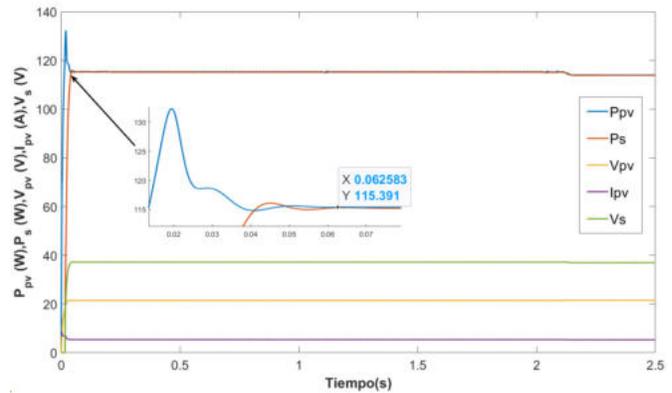
La Figura 9 muestra los resultados de las simulaciones numéricas empleando los algoritmos P&O, CI y Super Twisting SMC. En la figura se observa la evolución de las variables  $P_s$ ,  $P_{pv}$ ,  $V_s$ ,  $V_{pv}$  e  $I_{pv}$ .

En la Figura 9(c) se puede observar que la potencia entregada por el panel cuando se emplea el algoritmo SMC es de 124.27 W, mientras que con los algoritmos P&O y CI, es de 115.37 W y 123.07 W, respectivamente (véanse las Figuras 9(a) y 9(b)). Por lo que, como en los casos anteriores, con el algoritmo SMC se logra una potencia más cercana al GMPP.

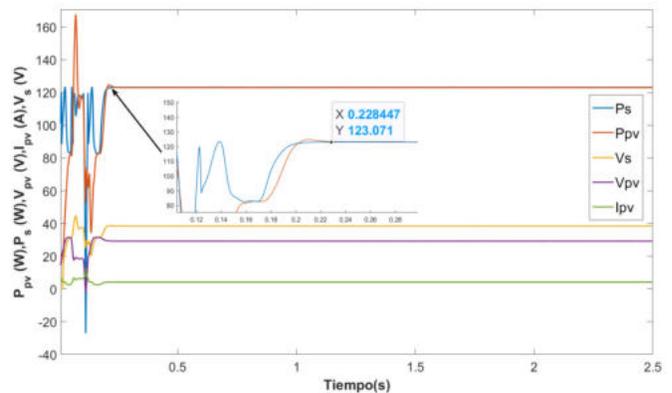
Es importante mencionar que el chattering inherente al método SMC no tiene efectos significativos en la señal de  $I_{pv}$ .

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

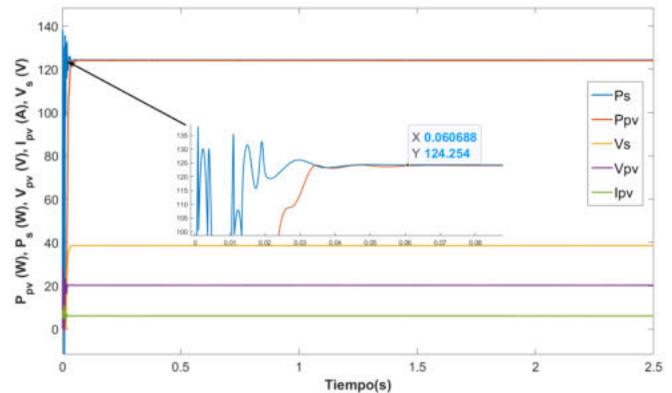
Los resultados de las simulaciones ilustran el desempeño del algoritmo Super Twisting SMC en contraste con el de los algoritmos P&O y CI. Es notorio que los algoritmos clásicos presentan un tiempo de respuesta mayor. Además, a pesar de que con los tres algoritmos se generan oscilaciones, las que se generan con el método



((a)) Perturbación y Observación



((b)) Conductancia Incremental



((c)) Super Twisting

Fig. 9. Caso 3. (a) P&O, (b) CI, (c) SMC.

CI son de mayor magnitud, sobre todo al inicio de la operación. Es importante mencionar que, en los tres casos analizados, el algoritmo Super Twisting SMC permite generar una potencia más cercana al GMPP.

Como trabajo futuro se plantea el diseño de diferentes superficies de deslizamiento con el fin de mejorar la respuesta del algoritmo Super Twisting SMC. La idea consiste en diseñar la superficie de deslizamiento de tal

forma que el problema se traduzca en resolver la tarea de seguimiento de trayectorias clásico. Las trayectorias de referencia para seguir el GMPP podrían determinarse a través de técnicas de regresión o redes neuronales. La implementación del algoritmo de control en un prototipo experimental está contemplada también como trabajo futuro.

## REFERENCES

- Andrea, C.Q., Gules, R., Romaneli, E.F.R., Pinto, J.n.P., and Gonçalves, R.C. (2010). Sistema de rejeicao de disturbio e rastreamento  $H_{\infty}$  e  $H_2$  aplicado ao conversor boost usando LMIs. In *Research Article Presented in XVIII Brazilian Congress of Automatics*, 2010.
- Bouafassa, A., Rahmani, L., and Mekhilef, S. (2015). Design and real time implementation of single phase boost power factor correction converter. *ISA transactions*, 55, 267–274.
- Chiu, C.S., Ouyang, Y.L., and Ku, C.Y. (2012). Terminal sliding mode control for maximum power point tracking of photovoltaic power generation systems. *Solar Energy*, 86(10), 2986–2995.
- Evangelista, C., Puleston, P., Valenciaga, F., and Fridman, L.M. (2012). Lyapunov-designed super-twisting sliding mode control for wind energy conversion optimization. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 60(2), 538–545.
- Farzaneh, J., Keypour, R., and Khanesar, M.A. (2018). A new maximum power point tracking based on modified firefly algorithm for pv system under partial shading conditions. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 3, 1–13.
- Gil, L. (2019). *Control de Convertidores para aplicaciones Fotovoltaicas*. Ph.D. thesis, Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ingeniería; México.
- Kchaou, A., Naamane, A., Koubaa, Y., and M'sirdi, N. (2017). Second order sliding mode-based mppt control for photovoltaic applications. *Solar Energy*, 155, 758–769.
- Kota, V.R. and Bhukya, M.N. (2019). A novel global mpp tracking scheme based on shading pattern identification using artificial neural networks for photovoltaic power generation during partial shaded condition. *IET Renewable Power Generation*, 13(10), 1647–1659.
- Li, X., Wen, H., Hu, Y., Jiang, L., and Xiao, W. (2017). Modified beta algorithm for gmptt and partial shading detection in photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(3), 2172–2186.
- Lodhi, E., Shafqat, R.N., Kerrouche, K., and Lodhi, Z. (2017). Application of particle swarm optimization for extracting global maximum power point in pv system under partial shadow conditions. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 5(3), 223–229.
- Mamarelis, E., Petrone, G., and Spagnuolo, G. (2013). Design of a sliding-mode-controlled sepic for pv mppt applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(7), 3387–3398.
- Meza, H.A., García, J.L.M., and Mora, S.S. (2018). Estrategias de control mppt aplicadas en un convertidor dc/dc tipo boost para sistemas fotovoltaicos. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 2(30), 102–108.
- Montoya, D.G., Paja, C.A.R., and Giral, R. (2016). Maximum power point tracking of photovoltaic systems based on the sliding mode control of the module admittance. *Electric Power Systems Research*, 136, 125–134.
- Pati, A.K. and Sahoo, N. (2016). A new approach in maximum power point tracking for a photovoltaic array with power management system using fibonacci search algorithm under partial shading conditions. *Energy Systems*, 7(1), 145–172.
- Ruiz, L., Beristáin, J., Sosa, I., and Hernández, J. (2010). Estudio del algoritmo de seguimiento de punto de máxima potencia perturbar y observar. *Revista de ingeniería eléctrica, electrónica y computación*, 8(1), 17–23.
- Sawant, P.T., Lbhattachar, P.C., and Bhattar, C. (2016). Enhancement of pv system based on artificial bee colony algorithm under dynamic conditions. In *2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 1251–1255. IEEE.
- Shenbagaramalakshmi, S. and Punitha, K. (2017). Soft computing technique based mppt algorithms for photovoltaic system. *Int J Adv Res Electr Electron Instrum Engg*, 6(1), 131–139.
- Sira-Ramirez, H.J. and Silva-Ortigoza, R. (2006). *Control design techniques in power electronics devices*. Springer Science & Business Media.
- Utkin, V.I. (1977). Variable structure systems with sliding modes. *IEEE Transactions on Automatic control*, 22(2), 212–222.