

Maximum Power Point Tracking Control for a Photovoltaic System

Laura Zimmermann Soto* Itzel Contreras Carmona**
Belem Saldivar*** Otniel Portillo-Rodríguez**

* *Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, 21 Sur St.No.
1103, Barrio de Santiago. Puebla, Puebla. C.P. 72410*

** *Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de
México, Instituto Literario No. 100 Ote., 50130 Toluca, Mexico*

*** *Departamento de Control Automático, CINVESTAV-IPN, Av.
Instituto Politécnico Nacional 2508, Mexico City 07360, Mexico
(e-mail: belem.saldivar@cinvestav.mx)*

Abstract: The use of renewable energy has experienced significant growth as part of efforts to reduce fossil fuel consumption. Mexico, due to its geographical location, holds significant potential for solar energy development. However, this valuable resource remains underutilized, largely due to the low efficiency of photovoltaic panels. To meet user demand for power, implementing a power converter and control algorithms is essential. This article focuses on the implications of not having a voltage converter and analyzes the performance of various controllers applied to the Maximum Power Point tracking problem. Specifically, it examines Proportional Integral Derivative control, first-order sliding mode control, and Super Twisting sliding mode control under abrupt and smooth changes in temperature and irradiance. The objective is to determine the most efficient and reliable control strategy for solving the stated problem.

Keywords: Photovoltaic system, Maximum Power Point Tracking, PID Control, Sliding Mode Control.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de energías renovables es una tendencia que va en aumento debido a la necesidad de disminuir el uso de energías fósiles causantes de la emisión de gases de efecto invernadero. Las energías limpias son más rentables para el medio ambiente y aumentan el desarrollo económico.

México cuenta con una gran perspectiva para desarrollar energía solar, debido a su ubicación geográfica (Becerra-Pérez et al., 2021). Sin embargo, este recurso ilimitado no es aprovechado. Una de las razones es la baja eficiencia de los paneles fotovoltaicos (PV) no solo comparada con el combustible fósil convencional, sino también con otras fuentes de energía renovable como la eólica o la hidroeléctrica (Eltamaly and Abdelaziz, 2020). Para que los paneles solares brinden la potencia máxima posible, es necesario considerar la implementación de un convertidor de voltaje y diseñar un algoritmo de control (Bendib et al., 2015). La interfaz más sencilla entre un panel y un bus de voltaje DC es un diodo. Sin embargo, debido a que el voltaje de los paneles solares depende de la

temperatura y la irradiancia, el circuito debe completarse con componentes capaces de poner en corto circuito o desconectar el panel si la carga no puede absorber la potencia disponible (Rekioua and Matagne, 2012).

El convertidor “Boost” aumenta el voltaje y disminuye la corriente proporcionada (Eltamaly and Abdelaziz, 2020). Este es usado comúnmente en sistemas fotovoltaicos como interfaz entre el panel y la carga, haciendo posible el seguimiento del punto de máxima potencia (MPP, por sus siglas en inglés *Maximum Power Point*). Entre las aplicaciones que los emplean se pueden mencionar la carga de baterías, fuentes de alimentación de aparatos electrónicos, entre otros (Contreras et al., 2023).

Para que un convertidor de voltaje resuelva adecuadamente la tarea del seguimiento del MPP, es necesario implementar una estrategia de control. Los métodos de control más comúnmente utilizados para este propósito son: Perturbación y Observación (P&O), Conductancia Incremental (CI), Particle Swarm Optimization, Ant Colony Optimization, Algorithm Firefly, Simulated Annealing, algoritmo beta modificado, algoritmo de búsqueda de

* Proyecto apoyado por el CONACYT en el año 2023.

Fibonacci modificado y el control por modos deslizantes (Contreras-Carmona, 2023).

En este artículo se analizará el desempeño de distintos controladores aplicados a este problema: control Proporcional Integral Derivativo (PID), control por modos deslizantes (SMC, por sus siglas en inglés *Sliding Mode Control*) de primer orden y SMC Super Twisting (ST). Los controladores serán puestos a prueba en condiciones tanto constantes como variantes de irradiancia y temperatura.

2. EFICIENCIA DEL PANEL FOTOVOLTAICO

El término fotovoltaico se refiere a la conversión de luz a electricidad por medio de la absorción de fotones de luz y liberación de electrones cargados. El elemento básico de estos generadores es el panel o módulo PV.

En este artículo se considera el sistema mostrado en la Figura 1 que consta de un módulo PV y una carga constante. Como interfaz entre estos elementos se considera un convertidor Boost. El sistema incluye también un controlador encargado de mantener la potencia en su punto máximo. En este artículo se considera el panel Renesola America JC250 M.

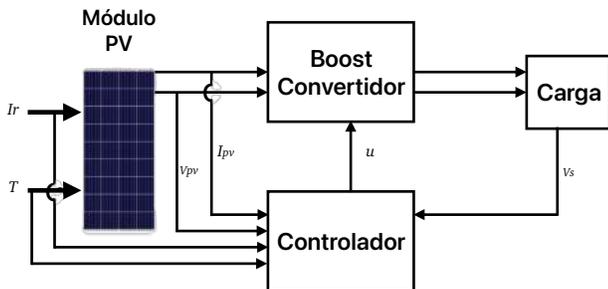


Fig. 1. Diagrama del sistema PV

La nomenclatura usada se muestra en la Tabla 1.

La potencia que genera el panel está dada por (Rekioua and Matagne, 2012):

$$P_{pv} = V_{pv} I_{pv}$$

Este valor de potencia es positivo siempre que en la curva de corriente-voltaje ($I_{pv} - V_{pv}$) se encuentre entre el punto de circuito abierto y el de corto circuito (véanse las Figuras 2 y 3), entonces, se puede establecer que:

$$0 < V_{pv} < V_{oc}$$

Bajo las condiciones estándar de temperatura e irradiancia ($T = 25^{\circ}C$, $I_r = 1000W/m^2$), la potencia máxima teórica del panel es de $250W$ (véanse las Figuras 2 y 3), lo que coincide con el valor indicado en la ficha de datos del fabricante.

Tabla 1. Nomenclatura

P_{pv}	Potencia en el PV
I_o	Corriente de saturación
q	Carga de un electrón
N_s	Celdas en serie
k_b	Constante de Boltzman
A	Factor ideal
I_{ph}	Corriente generada por la luz
V_{pv}	Voltaje en el PV
I_{pv}	Corriente en el PV
V_{oc}	Voltaje circuito abierto
I_{sc}	Corriente en corto circuito
I_{MPP}	Corriente en el Punto Máximo de Potencia
V_{MPP}	Voltaje en el Punto Máximo de Potencia
T	Temperatura
I_r	Irradiancia

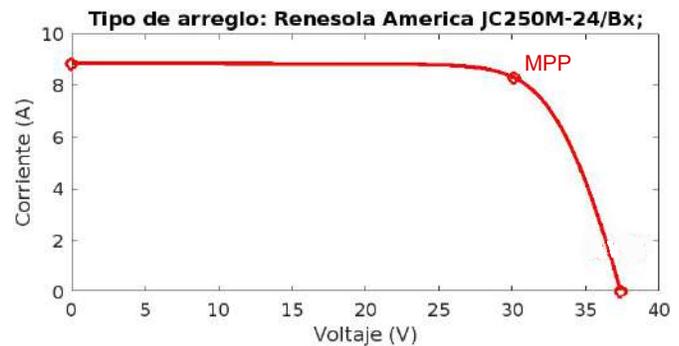


Fig. 2. Curva de corriente-voltaje del panel de Renesola America JC250M-24/Bx

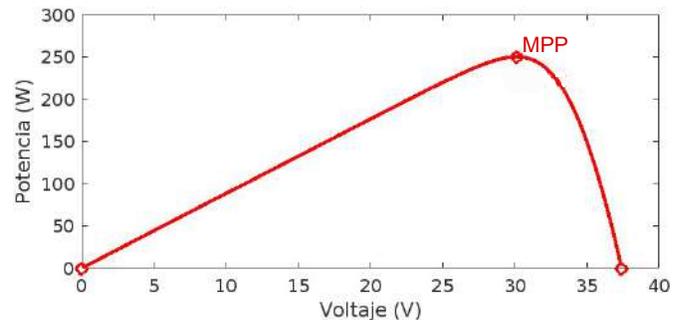


Fig. 3. Curva de potencia-voltaje del panel de Renesola America JC250M-24/Bx

Para indagar en la necesidad de implementar y controlar un convertidor de voltaje, se realizó la simulación del panel conectado directamente a una resistencia de 12Ω (sin un convertidor como interfaz), obteniendo una potencia de $106.807W$. Por consiguiente, al comparar la potencia útil contra la potencia máxima teórica se puede afirmar que el panel presenta una eficiencia del 42.73% .

Para que el panel fotovoltaico entregue un valor cercano a la potencia máxima teórica, es necesario modular la corriente o el voltaje en las terminales del panel fotovoltaico

a través una impedancia variable y controlable entre el panel y la carga. Para este propósito, en este artículo se considera un convertidor Boost. En la siguiente sección se examina el rendimiento de tres estrategias de control que tienen el objetivo de seguir el MPP.

3. ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA

En esta sección se analiza el desempeño de las estrategias de control: PID, SMC de primer orden y Super Twisting para resolver la tarea del seguimiento del MPP.

La Figura 4 muestra el diagrama del convertidor Boost considerado en el sistema PV.

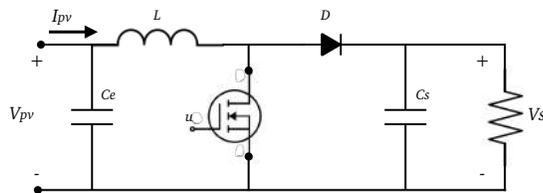


Fig. 4. Configuración de un convertidor de voltaje Boost

Las estrategias de control propuestas se basan en el modelo matemático que describe las dinámicas del convertidor Boost definido por las ecuaciones diferenciales (Sira-Ramírez, 2015):

$$\begin{aligned} \frac{dI_{pv}}{dt} &= \frac{V_{pv}}{L} - \frac{(1-u)V_s}{L} \\ \frac{dV_s}{dt} &= \frac{(1-u)I_{pv}}{C_s} - \frac{V_s}{RC_s} \end{aligned} \quad (1)$$

donde L denota la inductancia y C la capacitancia. La resistencia R representa una carga constante conectada al sistema, mientras que el voltaje de entrada del convertidor corresponde en este caso al voltaje suministrado por el panel fotovoltaico V_{pv} mientras que V_s representa el voltaje de salida del convertidor. La entrada de control u representa el conmutador (*switch*) que se encarga de administrar la frecuencia y el ciclo de trabajo de operación.

El objetivo de control es lograr el seguimiento del MPP en condiciones variantes de irradiancia y temperatura. Esta tarea puede traducirse en el problema clásico de seguimiento de trayectorias predefinidas, donde se busca que la corriente en el panel fotovoltaico (I_{pv}) coincida con la corriente en el MPP (I_{MPP}) (Contreras-Carmona, 2023). Entonces, el error de seguimiento se define como:

$$e(t) = I_{pv} - I_{MPP}$$

La corriente en el panel fotovoltaico puede determinarse a partir de la siguiente ecuación (Rekioua and Matagne, 2012; Gil, 2019):

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

En Contreras-Carmona (2023), empleando técnicas de regresión, se presenta una caracterización de la evolución de la corriente en el punto de máxima potencia en términos de la irradiancia. Se determinó que para el panel Renesola America JC250 M existe una relación entre I_{MPP} e I_r definida por:

$$I_{MPP} = -0.002116 + 0.008239I_r \quad (2)$$

Así, la trayectoria de referencia para resolver el objetivo planteado se define mediante la ecuación (2).

Control Proporcional Integral Derivativo

Al combinar la acción de control proporcional, la acción de control integral y la de control derivativa surge el control PID definido por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

donde K_p , K_i y K_d corresponden a la ganancia proporcional, integral y derivativa, respectivamente.

Control por modos deslizantes

El control por modos deslizantes implica una etapa importante que corresponde a la elección de la superficie de deslizamiento. En este caso, la superficie se elige como: $S(t) = e(t) = I_{pv} - I_{MPP}$.

El control por modos deslizantes consta de dos términos u_{eq} y u_{s_i} , siendo respectivamente el control equivalente y el control de conmutación:

$$u = u_{eq} + u_{s_i}, \quad i \in \{1, 2\}$$

El control de conmutación se encarga de conducir al estado del sistema hacia la superficie de deslizamiento. Una vez que la trayectoria de estado alcanza la superficie de deslizamiento ($S(t) = 0$), el controlador equivalente se encarga de mantenerla evolucionando indefinidamente sobre esta superficie. Entonces, u_{eq} debe garantizar que para $S(t) = 0$, $\dot{S}(t) = 0$, esto es,

$$\dot{S}(t) = \dot{I}_{pv} - \dot{I}_{MPP} = 0$$

Considerando la Ecuación (1), se tiene:

$$\dot{S}(t) = \frac{V_{pv}}{L} - \frac{(1-u_{eq})V_s}{L} - \dot{I}_{MPP} = 0$$

Por lo que, para garantizar $\dot{S}(t) = 0$, u_{eq} debe elegirse como (Kchaou et al., 2017):

$$u_{eq}(t) = 1 - \frac{V_{pv}}{V_s} + \frac{L}{V_s} \dot{I}_{MPP} \quad (3)$$

Tanto como para el SMC de primer orden como para el Super Twisting, el control equivalente está dado por (3).

- **Primer orden.** El control de conmutación u_{s1} se define como (Shtessel et al., 2014):

$$u_{s1} = -\rho \text{sign}(S)$$

donde ρ es la ganancia del controlador SMC de primer orden.

- **Super twisting.** El control de conmutación u_{st} se define como (Boufassa et al., 2015; Contreras et al., 2023):

$$u_{s2} = -\lambda |S|^{1/2} \text{sign}(S) - \gamma \int \text{sign}(S)$$

donde λ y γ son las ganancias del controlador SMC Super Twisting.

Análisis de convergencia y estabilidad de los algoritmos de SMC pueden consultarse en Shtessel et al. (2014).

4. SIMULACIONES NUMÉRICAS

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones numéricas considerando tres diferentes escenarios de operación.

1. Condiciones constantes de temperatura e irradiancia $T = 25^\circ C$, $I_r = 1000 W/m^2$.
2. Variaciones suaves (función senoidal) de temperatura e irradiancia.
3. Variaciones abruptas (función escalón) de temperatura e irradiancia.

En los escenarios 2 y 3, la temperatura varía entre $23^\circ C$ y $25^\circ C$, y la irradiancia entre $950 W/m^2$ y $1000 W/m^2$.

Es importante mencionar que, en general, en la práctica, la irradiancia y la temperatura varían de manera gradual, lo que es consistente con los escenarios de operación 1 y 2. Sin embargo, en el caso de la presencia de sombras, se pueden producir variaciones abruptas, por lo que se propone analizar el desempeño de los algoritmos de control bajo las condiciones descritas en el escenario 3.

Los valores considerados para las ganancias de los algoritmos de control y los valores de los parámetros del sistema se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de las ganancias y parámetros del sistema

Ganancia	Valor	Parámetro	Valor
K_p	-0.1	R	12Ω
K_i	-0.9	C_s	$470\mu F$
K_d	-14.4467	L	$10mH$
ρ	2×10^{-6}	C_e	$330\mu F$
λ	0.1	F	$45KHz$
γ	0.01		

En la Figura 5 se muestra la potencia generada por el sistema fotovoltaico en el escenario de condiciones constantes de temperatura e irradiancia cuando se consideran

los diferentes algoritmos de control: PID, SMC de primer orden (1° Ord) y SMC Super Twisting (ST).

La Tabla 3 muestra los valores de potencia generada y eficiencia correspondientes al sistema en lazo cerrado con las estrategias de control propuestas, considerando el escenario de operación 1. El porcentaje de eficiencia se calcula tomando en cuenta la potencia máxima teórica con respecto a la potencia máxima en estado estacionario generada con los diferentes algoritmos de control.

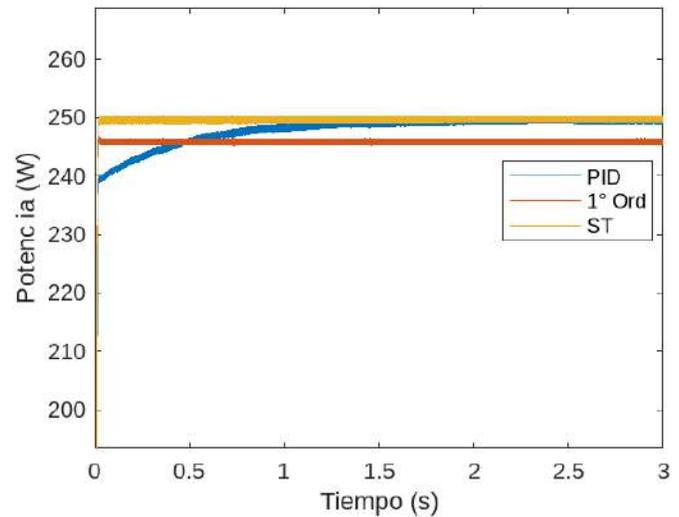


Fig. 5. Potencia generada por el sistema PV considerando condiciones constantes de temperatura e irradiancia.

Tabla 3. Potencia y eficiencia del sistema

Algoritmo de control	Potencia (W/m^2)	Eficiencia
PID	249.42	99.77%
1° Orden	245.83	98.33%
ST	249.65	99.86%

En la práctica, se presentan variaciones suaves en las condiciones de temperatura e irradiancia. Para representar un escenario con estas características, se consideran las siguientes funciones:

$$I_r(t) = 975 + 25 \sin 4t$$

$$T(t) = 24 + \sin 4t$$

La Figura 6 ilustra las variaciones consideradas de temperatura e irradiancia. La evolución de la potencia generada con los algoritmos de control se muestra en la Figura 7.

Por último, se presentan los resultados de la simulación en la que se consideran cambios abruptos en las condiciones de temperatura e irradiancia. Estas variaciones se representan las funciones escalón mostradas en la Figura 8.

Los resultados obtenidos para el caso de variaciones abruptas de temperatura e irradiancia se muestran en la Figura 9.

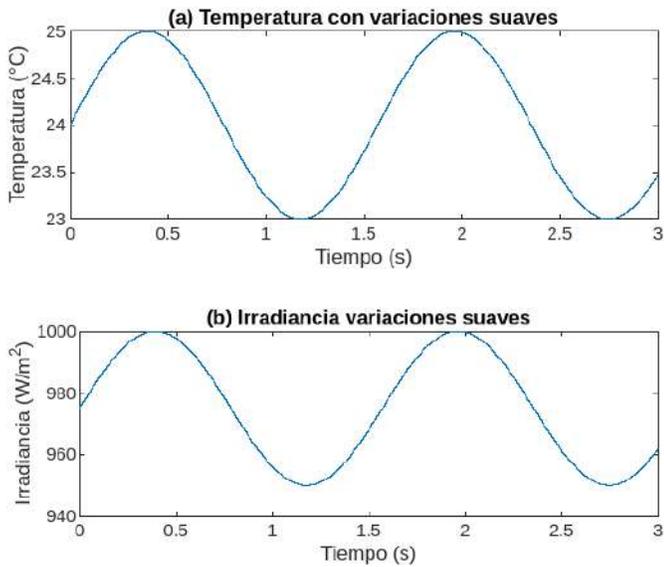


Fig. 6. (a) Temperatura (b) Irradiancia

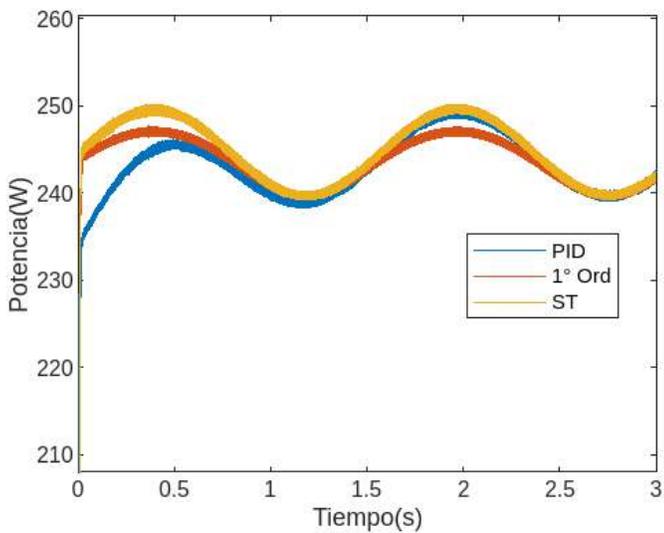


Fig. 7. Potencia generada por el sistema PV considerando variaciones suaves de irradiancia y temperatura

De los resultados mostrados en esta sección podemos notar que el control del convertidor de voltaje es útil para incrementar la eficiencia del panel fotovoltaico.

En el primer escenario, siendo T e I_r constantes, se mostró que el algoritmo que tiene el mejor desempeño es el ST, debido a la rapidez de convergencia y el valor de potencia generado. Siendo el control PID el que presenta un tiempo de convergencia mayor aunque logra una eficiencia similar a la del ST. Por otra parte, el tiempo de convergencia que presenta el control de primer orden es menor en comparación con el PID pero mayor con respecto al ST.

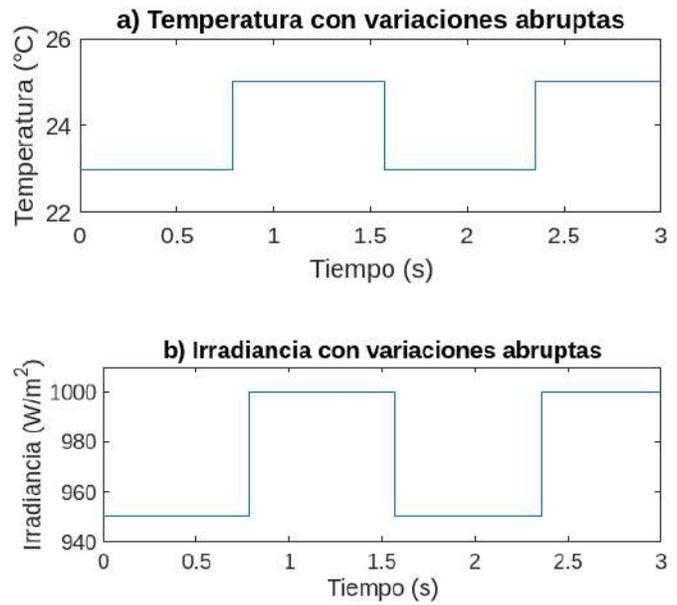


Fig. 8. (a) Temperatura (b) Irradiancia

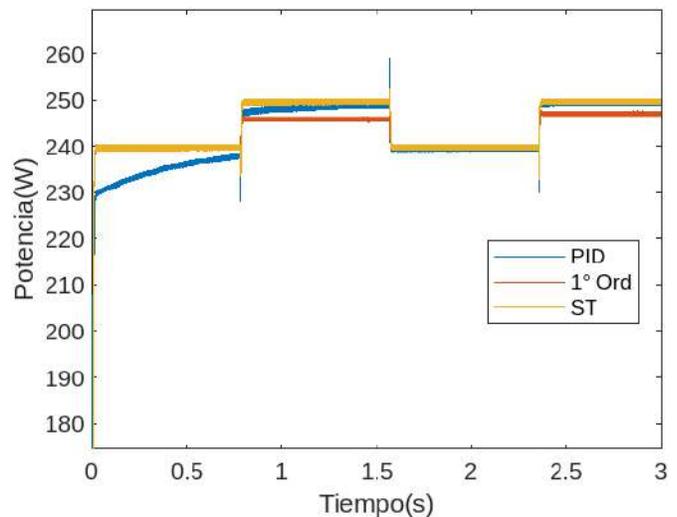


Fig. 9. Potencia generada por el sistema PV considerando variaciones abruptas de irradiancia y temperatura

En el segundo escenario, que considera variaciones suaves de T e I_r , se puede observar que el algoritmo ST presenta un tiempo de convergencia menor en comparación con las otras dos técnicas y además permite generar un valor más cercano a la potencia máxima teórica. El algoritmo SMC de primer orden también presenta un tiempo de convergencia aceptable, pero la potencia generada es menor en comparación con la que se genera con el ST. Como en el caso anterior, el PID presenta el mayor tiempo de convergencia.

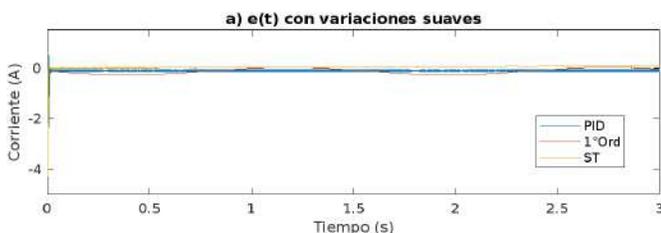
En el tercer escenario, en donde los cambios de T e I_r son abruptos, se observa lo siguiente. El algoritmo ST

permite adaptarse mejor a las alteraciones repentinas de irradiancia y temperatura, presentando un tiempo de convergencia menor con respecto a las otras dos técnicas. Con el algoritmo SMC de primer orden, aunque presenta un tiempo de convergencia aceptable, se genera una potencia menor en comparación con la que se genera con los otros dos algoritmos (véanse los intervalos de 1 a 1.5 s y 2.5 a 3 s en la Figura 9). Con el algoritmo PID se obtienen valores de potencia similares a los que se obtienen con el algoritmo ST pero el tiempo de convergencia es mucho mayor.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se presentó un análisis comparativo de tres estrategias de control para resolver la tarea del seguimiento del MPP en un sistema PV. Se mostró que con el control de un convertidor de potencia es posible aumentar la eficiencia del sistema PV de 42.73% a más de 98%, llegando incluso a una eficiencia del 99.86% con el algoritmo ST. Además, el algoritmo que presentó menor tiempo de convergencia, adaptándose adecuadamente a los cambios de temperatura e irradiancia es el ST. El algoritmo SMC de primer orden también presenta un tiempo de convergencia corto, pero genera menores valores de potencia. El control PID permite generar una potencia cercana a la que se obtiene con el ST pero el tiempo de convergencia es mayor.

La Figura 10 muestra la evolución del error de seguimiento definido en la Sección 3 correspondiente a las tres técnicas de control analizadas. La Figura 10 (a) presenta el escenario de variaciones suaves de irradiancia y temperatura, mientras que la Figura 10 (b) muestra el caso de variaciones abruptas. Note que con el algoritmo ST se obtiene para ambos casos la señal de error más cercana al cero. Por lo que puede concluirse que el desempeño de esta técnica es superior en comparación con el controlador PID y el SMC de primer orden, en términos de la potencia máxima generada.



En general, los tres algoritmos presentaron un desempeño similar en cada uno de los escenarios de operación considerados. En trabajos futuros, se pretende explorar nuevas técnicas y compararlas con los algoritmos estudiados en este artículo, con el objetivo de identificar las estrategias más adecuadas para resolver el problema planteado. Además se propone analizar el efecto de las sombras parciales en el panel y desarrollar pruebas experimentales.

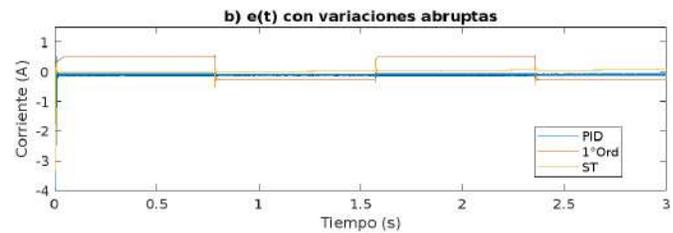


Fig. 10. (a) Error considerando variaciones suaves de irradiancia y temperatura (b) Error considerando variaciones abruptas de irradiancia y temperatura

REFERENCIAS

- Becerra-Pérez, L., González-Díaz, R., and Villegas-Gutiérrez, A. (2021). La energía solar fotovoltaica, análisis costo beneficio de los proyectos en México. *Revista Internacional del Desarrollo Regional Sustentable*, 5(2), 600–623.
- Bendib, B., Belmili, H., and F., K. (2015). A survey of the most used mppt methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 637–648.
- Boufassa, 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.
- Contreras, I., Saldivar, B., Portillo, O., Ramírez, V., and Gil, L. (2023). Super twisting sliding mode control for the maximum power point tracking in a photovoltaic system under partial shading. In *Congreso Nacional de Control Automático 2023*. Acapulco, Guerrero, México.
- Contreras-Carmona, I. (2023). *Diseño de control para el seguimiento del punto de máxima potencia en un sistema fotovoltaico en condiciones de sombra no uniforme*. Master's thesis, Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería, Mexico.
- Eltamaly, A.M. and Abdelaziz, A.Y. (2020). *Modern maximum power point tracking techniques for photovoltaic energy systems*. Springer Nature Switzerland AG.
- Gil, L. (2019). *Control de Convertidores para aplicaciones fotovoltaicas*. Ph.D. thesis, Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ingeniería, Mexico.
- 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.
- Rekioua, D. and Matagne, E. (2012). *Optimization of photovoltaic power systems: modelization, simulation and control*. Springer, London, U.K.
- Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., and Levant, A. (2014). *Sliding mode control and observation*. Birkhäuser, New York, USA.
- Sira-Ramírez, H. (2015). *Sliding mode control: The delta-sigma modulation approach*. Birkhäuser, Basel, Switzerland.