

Improvement of Particle Swarm Optimization against Slow Variations of Environmental Conditions in Maximum Power Point Tracking

A. Martínez-Barbosa* J. H. Calleja-Gjumlich* G. V. Guerrero-Ramírez* E. Guerrero-Ramírez**

*TecNM/CENIDET, Interior Internado Palmira s/n, Cuernavaca, Morelos 62490, México

(e-mail: alberto.martinez19ea@cenidet.edu.mx, jorge.cg@cenidet.tecnm.mx, gerardo.gr@cenidet.tecnm.mx).

**Universidad Tecnológica de la Mixteca, Carretera a Acatlima km. 2.5 s/n, Huajuapán de León, Oaxaca 69000, México (e-mail: egerrero@mixteco.utm.mx).

Abstract: Particle Swarm Optimization (PSO) is an artificial intelligence technique applied to track the maximum power point of photovoltaic cells. It has been shown to be effective against irradiance and temperature variations, including partial shading condition. However, this technique suffers from unnecessary restarts as its threshold levels are adjusted. To overcome that situation, this document presents an improved PSO that focuses on the slow irradiance variations that trigger these thresholds. Comparative results between PSO, PSO combined with the Perturb and Observe (PSO-P&O) algorithm and the proposed PSO improvement technique are shown. As a result, the proposed improvement technique avoids unnecessary restarts of the original PSO without the steady-state oscillations around the maximum power point of the PSO-P&O.

Keywords: Maximum Power Point Tracking, Particle Swarm Optimization, Solar Photovoltaic Energy.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la energía solar ha tomado un gran interés para reemplazar a las fuentes de energía no renovables por su contraparte renovable a través de las celdas fotovoltaicas (Kannan y Vakeesan, 2016). Sin embargo, es bien conocido que las celdas fotovoltaicas son una fuente de energía de corriente directa (CD) que es no-lineal y depende de las condiciones ambientales (Fébba et al., 2018; Ruschel et al., 2021). Por ejemplo, en la Fig. 1 se muestra la dependencia en irradiancia de las celdas fotovoltaicas en la *curva voltaje contra potencia*. La figura muestra que si el nivel de irradiancia aumenta, entonces la potencia disponible de las celdas también aumenta.

En cada una de las curvas de la Fig. 1 se tiene un único punto de máxima potencia (MPP, por sus siglas en inglés *Maximum Power Point*). Al situarse sobre el MPP se logra la máxima cosecha de energía, por lo que se dedican esfuerzos de investigación para encontrar este punto al emplear este tipo de energía. Además, en muchos casos no se tienen las mismas condiciones en la superficie de un arreglo fotovoltaico, lo que provoca que la curva voltaje contra potencia presente varios MPP locales pero solamente un MPP global, tal como se muestra en la Fig. 2. A esta condición se le conoce como sombreado parcial de las celdas fotovoltaicas, lo que dificulta aún más la tarea de encontrar el MPP global.

Actualmente se han desarrollado una gran cantidad de técnicas para seguir el MPP, inclusive, también se tienen una gran cantidad de reseñas y comparativas entre ellas. Trabajos de este estilo se presentan en (Ahmad et al., 2019; Danandeh y Mousavi, 2018; Dhimish, 2019; Hanzaei et al., 2020; Motahhir et al., 2020), en donde muestran que las técnicas basadas en inteligencia artificial son las más efectivas, ya que

se enfocan en seguir el MPP global bajo la condición de sombreado parcial, condición en la cual la mayoría de las demás técnicas falla.

Una de las técnicas basadas en inteligencia artificial es la optimización por enjambre de partículas (PSO, por sus siglas en inglés *Particle Swarm Optimization*). El interés por la PSO se debe a que no tiene oscilaciones en estado estacionario alrededor del MPP, aprovechando al máximo la conversión de energía solar en energía eléctrica; otra ventaja es que se sobrepone a la condición de sombreado parcial con una cantidad relativamente baja de muestreos; dentro de las técnicas basadas en inteligencia artificial destaca que tiene la estructura más simple y efectiva; y es la más sencilla de implementar. Sin embargo, no tiene un método conveniente y

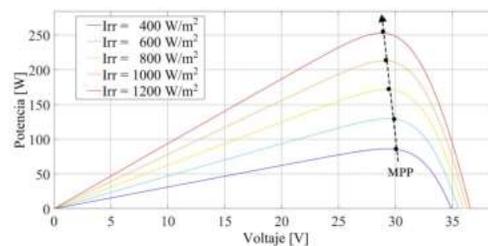


Fig. 1. Variación del MPP en función de la irradiancia.

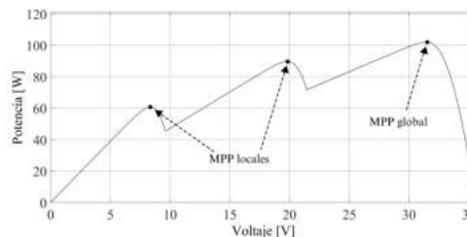


Fig. 2. Condición de sombreado parcial.

razonable para seleccionar los parámetros óptimos de diseño de esta técnica (Dileep y Singh, 2017; Ibrahim et al., 2019).

La PSO ha demostrado ser una técnica eficaz con la que se encuentra el MPP de las celdas fotovoltaicas, ya que responde rápidamente a los cambios en las condiciones ambientales y se sobrepone a la condición de sombreado parcial (Obukhov et al., 2020). Se han abordado mejoras a la técnica al variar dinámicamente sus parámetros (Babu et al., 2015; Martínez et al., 2021), combinarla con otras técnicas para aumentar la velocidad de búsqueda del MPP (Li et al., 2019; Ram y Rajasekar, 2017), o estableciendo patrones de búsqueda de la condición de sombreado parcial (Eltamaly et al., 2019). Cabe mencionar que estas mejoras están enfocadas en reducir el tiempo de búsqueda del MPP global, así que la mayoría de las pruebas efectuadas en estos trabajos se enfocan en cambios repentinos y bruscos de las condiciones ambientales con la intención de demostrar la efectividad de las modificaciones realizadas a la técnica.

Sin embargo, la PSO tiene inconvenientes durante las variaciones lentas de las condiciones ambientales que los trabajos anteriores no abordaron. Estas variaciones lentas producen reinicios innecesarios para seguir el MPP debido al propio diseño de la técnica. La manera principal de reducir este número de reinicios consiste en modificar sus parámetros para variar los umbrales admitidos, aunque esto provocaría que la energía cosechada disminuyera (Obukhov et al., 2020). Otra idea propuesta por Sundareswaran et al. (2015) ha sido combinar la PSO con el algoritmo Perturbar y Observar (llamándola PSO-P&O) una vez se encuentre el MPP global, permitiendo seguir el MPP ante las variaciones lentas. El problema de la PSO-P&O es que se presentan oscilaciones alrededor del MPP en estado estacionario, lo que es una clara desventaja.

Por lo tanto, este trabajo presenta una mejora a la técnica PSO en el comportamiento en estado estacionario bajo variaciones lentas de las condiciones ambientales o variaciones cercanas al MPP. En esta propuesta se evitan las complicaciones de modificar el valor de los parámetros de diseño de la PSO para aumentar los umbrales admitidos del MPP, evitando además las oscilaciones en estado estacionario alrededor del MPP de la técnica PSO-P&O. Además, otra ventaja de la propuesta de mejora es que prácticamente se mantiene una estructura tan simple como la PSO original.

El resto del documento se organiza de la siguiente manera: La segunda sección presenta el principio de funcionamiento de la PSO para seguir el MPP. La tercera sección aborda la propuesta de mejora sobre la PSO. La cuarta sección muestra los resultados de simulación comparando la PSO, la PSO-P&O y la propuesta de mejora de la PSO. Finalmente, la quinta sección presenta las conclusiones del trabajo.

2. OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS PARA SEGUIR EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA

La optimización por enjambre de partículas es una técnica metaheurística de optimización inteligente desarrollada por J. Kennedy y R. Eberhart (1995). Esta técnica contempla una

población de soluciones candidatas en un espacio de búsqueda, en donde a la población se le conoce como *enjambre* y a cada miembro de ella como *partícula*. Las partículas se mueven iterativamente en el espacio de búsqueda recordando su mejor posición individual y comunicándose entre ellas para conocer la mejor posición global colectiva. Como resultado, las partículas tienden a dirigirse a posiciones cada vez mejores durante el proceso de optimización hasta que el enjambre se acerca a un valor óptimo de la función a optimizar (también conocida como *función objetivo*).

La PSO se utiliza como técnica para seguir el punto de máxima potencia. En este caso, la función objetivo, $P_{pv}: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, es una maximización global tal que:

$$P_{pv}(d^*) \geq P_{pv}(d), \quad \forall d \in S \quad (1)$$

en donde $P_{pv}(d^*)$ es el máximo global que corresponde al MPP, d es el ciclo de trabajo promedio del convertidor electrónico de potencia asociado al sistema fotovoltaico, d^* es el ciclo de trabajo con el que se obtiene el MPP (llamado maximizador global), S es el espacio de búsqueda definido como $S = \{d \in \mathbb{R} : d_{min} \leq d \leq d_{max}\}$, con d_{min} y d_{max} como los ciclos de trabajo promedio mínimo y máximo permitidos en el convertidor (generalmente $d_{min} = 0$ y $d_{max} = 1$). La idea de la PSO es que la evaluación de todas las partículas se ubique cada vez más cerca del MPP y el proceso de optimización se detendrá hasta que se cumpla una condición de paro, estableciendo la partícula con mejor evaluación como el maximizador global d^* y su evaluación $P_{pv}(d^*)$ como el MPP (Martínez et al., 2021).

La Fig. 3 presenta el diagrama de flujo de la PSO para obtener el MPP considerando las siguientes etapas: **Inicialización.** Se define el tamaño del enjambre P , el umbral de la condición de paro ε y los coeficientes de inercia ω , aceleración cognitiva c_1 , y aceleración social c_2 . Se inicializa el número de iteración actual como $k \leftarrow 0$ y la posición inicial de las partículas $d_i[0]$ para $i = [1, \dots, P]$ con un valor fijo preestablecido o un valor aleatorio dentro del espacio de búsqueda S . Se asignan los valores de las velocidades de las partículas a cero, es decir, $\vec{v}_i[0] \leftarrow 0$ para $i = [1, \dots, P]$. Los mejores valores individuales y el mejor valor global deben tener inicialmente el peor valor posible, en este caso: $P_{pv_{best,i}} \leftarrow 0$ para $i = [1, \dots, P]$ y $P_{pv_{g_best}} \leftarrow 0$. Finalmente, se establece el índice inicial del enjambre en $i \leftarrow 1$. Un aspecto a tener en cuenta es el tamaño del enjambre P , ya que con cada partícula se va a evaluar la potencia de las celdas fotovoltaicas en tiempo real. Así que Obukhov et al. (2020) sugieren que el tamaño del enjambre sea $P < 10$, y trabajos como (Hayder et al., 2020; Li et al., 2019; Ram y Rajasekar, 2017) han mostrado que utilizar de tres a cinco partículas es lo más conveniente.

Evaluación de la función objetivo. La función objetivo $P_{pv}(d)$ se calcula a partir de la corriente $i_{pv}(d_i[k])$ y del voltaje $v_{pv}(d_i[k])$ de las celdas fotovoltaicas en la i -ésima partícula de la k -ésima iteración, tal como se muestra en (2).

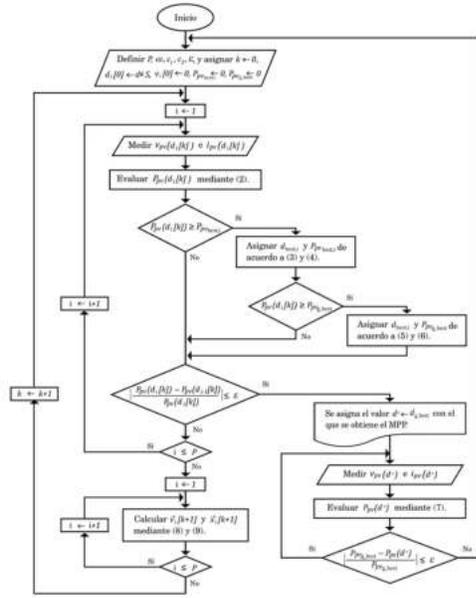


Fig. 3. Diagrama de flujo de la PSO.

Por lo tanto, se requiere medir estas señales antes de evaluar la función objetivo.

$$P_{pv}(d_i[k]) = v_{pv}(d_i[k]) i_{pv}(d_i[k]) \quad (2)$$

Asignación de los mejores valores individuales y globales.

Se va a comparar el valor de $P_{pv}(d_i[k])$ con la evaluación del mejor valor individual de la i -ésima partícula $P_{pv_{best,i}}$. Dependiendo de cuál valor sea el mayor, se va a establecer al mejor valor individual $d_{best,i}$ y su evaluación $P_{pv_{best,i}}$ como se muestra en (3) y (4), respectivamente. En caso de que el mejor valor individual sea el de la i -ésima partícula en la k -ésima iteración, entonces se va a realizar un proceso de comparación similar pero ahora contra la evaluación del mejor valor global $P_{pv_{g,best}}$. De igual manera, tras la comparativa se van a obtener los mejores valores globales de $d_{g,best}$ y $P_{pv_{g,best}}$, como se muestra en (5) y (6), respectivamente. Esta comparación se realiza para todas las partículas del enjambre, es decir, para $i = [1, \dots, P]$.

$$d_{best,i} \leftarrow \begin{cases} d_i[k], & \text{si } P_{pv}(d_i[k]) \geq P_{pv_{best,i}} \\ d_{best,i}, & \text{si } P_{pv}(d_i[k]) < P_{pv_{best,i}} \end{cases} \quad (3)$$

$$P_{pv_{best,i}} \leftarrow \begin{cases} P_{pv}(d_i[k]), & \text{si } P_{pv}(d_i[k]) \geq P_{pv_{best,i}} \\ P_{pv_{best,i}}, & \text{si } P_{pv}(d_i[k]) < P_{pv_{best,i}} \end{cases} \quad (4)$$

$$d_{g,best} \leftarrow \begin{cases} d_i[k], & \text{si } P_{pv}(d_i[k]) \geq P_{pv_{g,best}} \\ d_{g,best}, & \text{si } P_{pv}(d_i[k]) < P_{pv_{g,best}} \end{cases} \quad (5)$$

$$P_{pv_{g,best}} \leftarrow \begin{cases} P_{pv}(d_i[k]), & \text{si } P_{pv}(d_i[k]) \geq P_{pv_{g,best}} \\ P_{pv_{g,best}}, & \text{si } P_{pv}(d_i[k]) < P_{pv_{g,best}} \end{cases} \quad (6)$$

Revisión de la condición de paro. Se verifica si la condición de paro satisface los requerimientos de diseño del problema. Como se ha establecido, el MPP varía con las condiciones ambientales. Por lo tanto, esta condición de paro se divide en

dos: condición del MPP y la condición para iniciar una nueva búsqueda.

- En la condición del MPP se verifica que la evaluación de las potencias entre la partícula actual y la anterior sea menor al umbral ε . Si es menor al umbral, implica que se obtuvo el MPP y se asigna el ciclo de trabajo $d_{g,best}$ como el maximizador global d^* ; este valor de ciclo de trabajo promedio se mantendrá hasta que se cumpla la condición para iniciar una nueva búsqueda. En caso de que la evaluación sea mayor a ε , entonces se procederá a la etapa del cálculo de las nuevas velocidades y posiciones para después realizar una nueva iteración, incrementando el contador de iteraciones como $k \leftarrow k + 1$.
- En la condición para iniciar una nueva búsqueda las celdas fotovoltaicas se ubican en el MPP. Constantemente se evalúa que la potencia del maximizador global $P_{pv}(d^*)$, obtenida mediante (7) en cada periodo de muestreo t_s , y la potencia del mejor valor global $P_{pv_{g,best}}$ sean lo suficientemente diferentes para considerarse un cambio en las condiciones ambientales. Por lo tanto, en esta condición se verifica que la relación sea mayor al umbral ε . Si no lo es, el ciclo de trabajo no se modifica y se continuará evaluando la potencia del maximizador global en el próximo periodo de muestreo. Si se supera el umbral, entonces la PSO va reiniciar el proceso de optimización, con la idea de encontrar el nuevo MPP.

$$P_{pv}(d^*) = v_{pv}(d^*) i_{pv}(d^*) \quad (7)$$

Cálculo de las nuevas velocidades y posiciones. Se van a calcular la nueva velocidad $v_i[k + 1]$ y la nueva posición $d_i[k + 1]$ de las partículas para la siguiente iteración utilizando (8) y (9), respectivamente. Los cálculos de la posición y la velocidad se realizan para todas las partículas del enjambre P , considerando a los coeficientes ω , c_1 y c_2 y a los valores aleatorios $r_1, r_2 \in [0,1]$. Adicionalmente, se verifica que los nuevos valores cumplan con las restricciones de diseño impuestas y se encuentren dentro del espacio de búsqueda S .

$$v_i[k + 1] = \omega v_i[k] + c_1 r_1 (d_{best,i} - d_i[k]) \quad (8)$$

$$+ c_2 r_2 (d_{g,best} - d_i[k]) \quad (8)$$

$$d_i[k + 1] = d_i[k] + v_i[k + 1] \quad (9)$$

3. PROPUESTA DE MEJORA EN LA PSO EN EL COMPORTAMIENTO EN ESTADO ESTACIONARIO

En la condición para iniciar una nueva búsqueda de la Fig. 3, se supone que las celdas fotovoltaicas se ubican en el MPP y constantemente se evalúa si las condiciones han cambiado lo suficiente para reiniciar una nueva búsqueda. En la Fig. 4 se muestra un cambio repentino en la irradiancia, lo que provoca que la potencia se vea disminuida. Ante este caso, la condición para iniciar una nueva búsqueda es verdadera porque se superó el umbral ε . Lo anterior es un funcionamiento esperado porque ahora se va a buscar el MPP bajo las nuevas condiciones.

Sin embargo, ante variaciones lentas en las condiciones ambientales se presentan reinicios innecesarios. Por ejemplo, la Fig. 5 muestra una variación lenta de la irradiancia, lo que produce que en algún punto se supere el umbral ε y se reinicie la PSO en una nueva búsqueda. A pesar de que la PSO funciona como está programada, obviamente se está obteniendo un comportamiento no deseado porque el MPP de las nuevas condiciones se encuentra relativamente cerca del MPP anterior, lo que corresponde a un reinicio innecesario. Lo anterior representa un problema a tener en consideración, puesto que generalmente la dinámica de las condiciones ambientales es relativamente lenta durante el transcurso del día, lo que produce una cantidad considerable de reinicios innecesarios.

Una solución rápida a este inconveniente implica incrementar el valor del umbral ε para hacerlo más robusto frente a estas variaciones. El problema de aumentar a ε se refleja en el proceso de búsqueda del MPP global, ya que la potencia máxima de las celdas fotovoltaicas podría disminuir porque se incrementa el rango de tolerancia de la máxima potencia. Además, con esta solución rápida no se están evitando los reinicios innecesarios, aunque sí se están disminuyendo la cantidad de ellos. La solución propuesta por Sundareswaran et al. (2015) ha sido incluir el algoritmo Perturbar y Observar (P&O) una vez se encuentre el MPP mediante la PSO, así que el algoritmo P&O se encarga de las variaciones lentas en las condiciones ambientales, estableciendo una condición de reinicio para utilizar la PSO cuando la diferencia sea relativamente alta. Esta solución propuesta, llamada por los autores como PSO-P&O, permite responder ante variaciones rápidas y lentas de las condiciones ambientales, con la desventaja de incluir el software del algoritmo P&O y de añadir las oscilaciones en estado estacionario alrededor del MPP propias de este algoritmo.

Por lo tanto, la solución propuesta en este documento consiste en una nueva condición de búsqueda que incluya un segundo umbral ε_2 , tal como se muestra en la Fig. 6. Como resultado, en la Fig. 7 se tiene el diagrama de flujo de la PSO que incluye la mejora propuesta resaltada en color rojo. En este caso, cuando la diferencia entre la potencia en el MPP y la potencia actual sea mayor al umbral de mayor tolerancia ε_2 , entonces la PSO reinicie una nueva búsqueda tal como ocurre con el comportamiento original de la Fig. 3. La diferencia principal ocurre cuando únicamente se supera el umbral de menor tolerancia ε , ya que en este caso no se va a reiniciar la PSO, sino que se retoman las últimas posiciones de las partículas que, *a priori*, se encuentran relativamente cerca entre ellas y del maximizador global con el que se obtuvo el MPP. Esto implica que las partículas encontrarían más rápido el MPP bajo las nuevas condiciones, sin llegar a producirse los reinicios innecesarios.

Con esta solución la PSO realiza un seguimiento ante variaciones lentas de las condiciones ambientales, con las ventajas de que el cambio es relativamente sencillo y fácil de aplicar, y los cambios en el software son mínimos respecto a la PSO original.

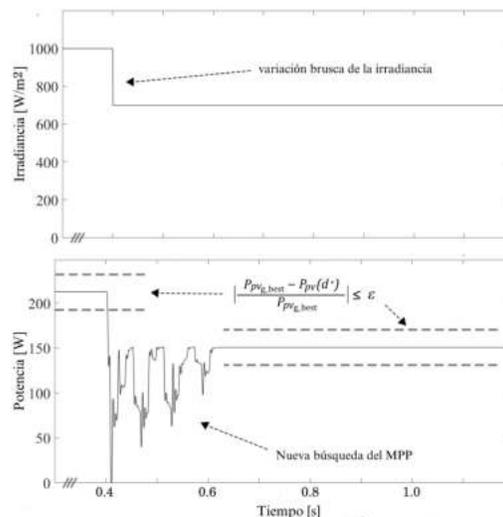


Fig. 4. Variación brusca de la irradiancia en la PSO.

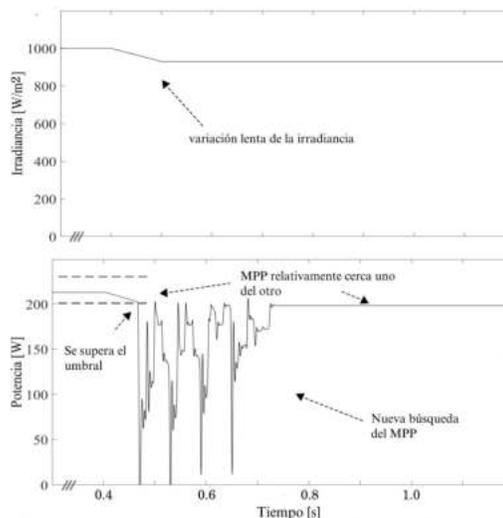


Fig. 5. Variación lenta de la irradiancia en la PSO.

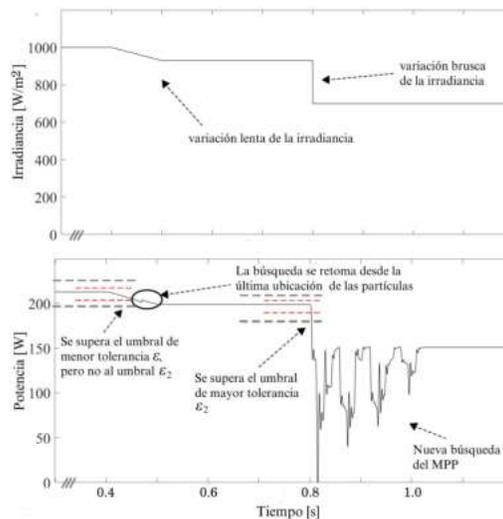


Fig. 6. Mejora propuesta a la PSO utilizando dos umbrales.

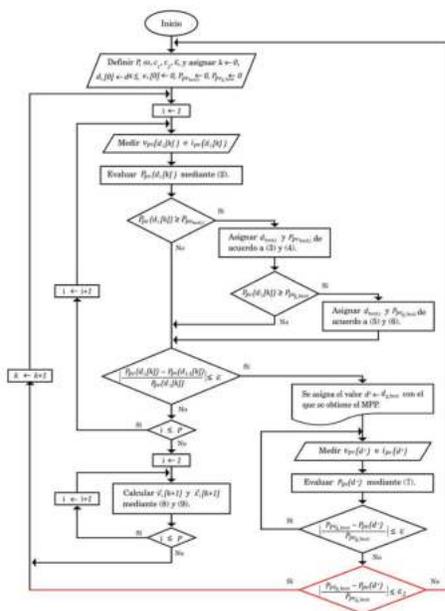


Fig. 7. Diagrama de flujo de la PSO con la mejora propuesta.

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

La mejora propuesta se compara con la PSO original y con la técnica PSO-P&O en el ambiente Matlab/Simulink. En la Fig. 8 se muestra el diagrama esquemático de la simulación, en donde se interconectan las celdas fotovoltaicas con un convertidor CD/CD elevador y una carga resistiva. En la Tabla 1 se muestran los parámetros de las celdas fotovoltaicas (bajo condiciones de prueba estándar) y del convertidor elevador, mientras que en la Tabla 2 se muestran los parámetros de las técnicas a comparar, en donde los umbrales se tomaron en base a Obukhov et al. (2020) y corresponden entre el 3 al 10%.

La Fig. 9 muestra perfiles de irradiancias considerando cambios repentinos, incluyendo la condición de sombreado parcial. En este caso, el arreglo de las celdas fotovoltaicas se divide en tres partes y cada una de ellas recibe cierto nivel de irradiancia. Como resultado, en la Fig. 10 se muestra la respuesta de la potencia frente a estas variaciones. En esta figura se observa que ante variaciones rápidas, las tres técnicas se reinician para buscar el MPP global bajo las nuevas condiciones. La diferencia entre ellas se observa en el estado estacionario, en donde la PSO-P&O tiene oscilaciones alrededor del MPP.

La Fig. 10 mostró que las técnicas presentan un comportamiento idéntico ante cambios bruscos, aunque en esta parte no es en donde se enfoca la mejora. Así que en la Fig. 11 se muestra un perfil de irradiancia con variaciones lentas, en donde se enfoca la mejora. Como resultado, las Figs. 12 y 13 muestran la potencia de las celdas fotovoltaicas y el ciclo de trabajo promedio del convertidor CD/CD elevador, respectivamente. En estas figuras se observa que la PSO original tiene dos reinicios en el proceso de optimización. En cambio, la PSO-P&O sigue estas variaciones lentas, aunque presenta las oscilaciones alrededor del MPP. En el caso de la

PSO mejorada, se reinició una única vez en el proceso de búsqueda. Como se observa, una de las búsquedas es relativamente rápida (imagen ampliada) y la del reinicio tiene un mayor número de iteraciones, aunque sigue siendo más rápida que el reinicio total de la PSO original. Una vez se encuentra el MPP, el ciclo de trabajo se mantiene constante para evitar las oscilaciones del MPP. Por lo tanto, el ciclo de trabajo se mantiene constante hasta superarse nuevamente la condición para iniciar una nueva búsqueda.

Tabla 1. Parámetros del sistema

Parámetros		Valor
Voltaje en el MPP	V_{mpp}	35 V
Corriente en el MPP	I_{mpp}	11.3 A
Potencia en el MPP	P_{mpp}	387.2 W
Capacitor de entrada	C_i	100 μ F
Inductor	L	500 μ H
Resistencia parásita del inductor	r_L	1 m Ω
Capacitor de salida	C	400 μ F
Resistencia de carga	R	15 Ω
Frecuencia de conmutación	f_s	50 kHz

Tabla 2. Parámetros de las técnicas a comparar

Parámetros	PSO	PSO-P&O	PSO modificada	
No. de partículas	P	4	4	
Coefficiente de inercia	ω	0.7298	0.7298	
Coefficiente de aceleración cognitivo	c_1	1.4962	1.4962	
Coefficiente de aceleración social	c_2	1.4962	1.4962	
Ubicación inicial de las partículas		$d_1 = 0.10, d_2 = 0.39, d_3 = 0.49$ y $d_4 = 0.68$		
Umbral	ϵ	0.05	0.10	0.03
Segundo umbral	ϵ_2	—	—	0.05
Incrementos del algoritmo P&O	ΔD	—	0.005	—
Periodo de muestreo	t_s	—	40 ms	—

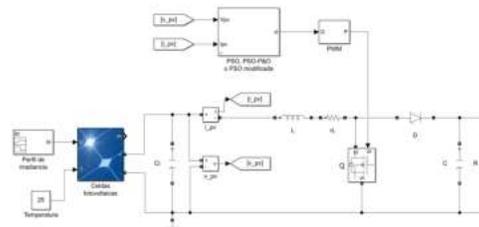


Fig. 8. Diagrama esquemático de la simulación.

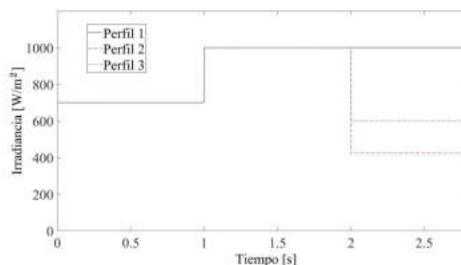


Fig. 9. Perfil de irradiancia con cambios repentinos.

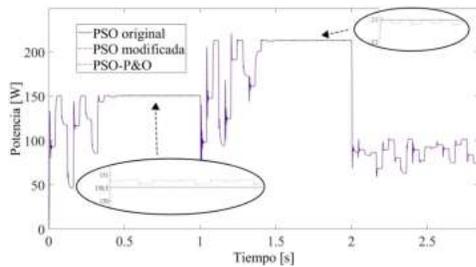


Fig. 10. Potencia de las celdas ante cambios repentinos.

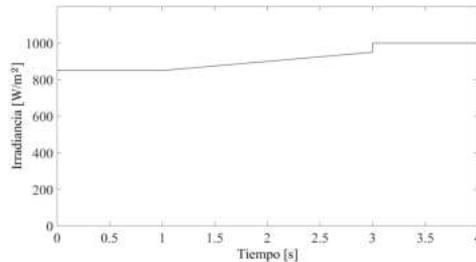


Fig. 11. Perfil de irradiancia con variaciones lentas.

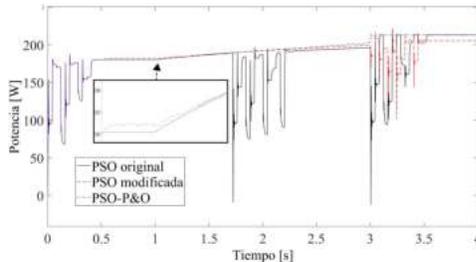


Fig. 12. Potencia de las celdas ante variaciones lentas.

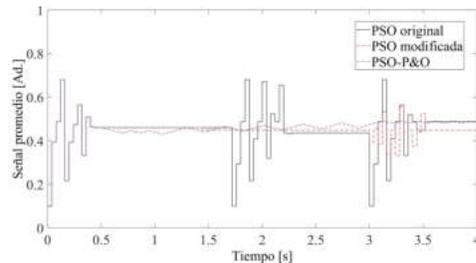


Fig. 13. Ciclo de trabajo promedio ante variaciones lentas.

5. CONCLUSIONES

En este documento se presentó una mejora a la técnica PSO para obtener el MPP de las celdas fotovoltaicas. Esta mejora se enfocó en el comportamiento frente a variaciones relativamente lentas de las condiciones ambientales una vez que se encuentra el MPP. La mejora propuesta disminuyó la cantidad de reinicios innecesarios y redujo el tiempo de búsqueda del MPP respecto a la PSO original. Además, se evitaron las oscilaciones en estado estacionario en comparación de la PSO-P&O. Lo anterior se realizó al considerar la idea de continuar la búsqueda del MPP desde la última ubicación de las partículas, lo que resultó sencillo de modificar e implicó incluir operaciones adicionales mínimas. Como futuro trabajo se planea llevar a cabo un prototipo

experimental y realizar un análisis más profundo sobre los valores más convenientes de los umbrales.

REFERENCIAS

- Ahmad, R., Murtaza A. F., and Sher, H. A. (2019). Power tracking techniques for efficient operation of photovoltaic array in solar applications—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. (101), pp. 82-102.
- Babu, T. S., Rajasekar, N., and Sangeetha, K. (2015). Modified particle swarm optimization technique based maximum power point tracking for uniform and under partial shading condition. *Applied soft computing*, vol. (34), pp. 613-624.
- Danandeh M. A., and Mousavi S. M. (2018). Comparative and comprehensive review of maximum power point tracking methods for PV cells. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. (82), pp. 2743-2767.
- Dhimish, M. (2019). Assessing MPPT techniques on hot-spotted and partially shaded photovoltaic modules: Comprehensive review based on experimental data. *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. (66), pp. 1132-1144.
- Dileep G., and Singh, S. N. (2017). An improved particle swarm optimization based maximum power point tracking algorithm for PV system operating under partial shading conditions. *Sol. Energy*, vol. (158), pp. 1006-1015.
- Eltamaly, A., Farh, H. M. H., and Al Saud, M. S. (2019). Impact of PSO Reinitialization on the Accuracy of Dynamic Global Maximum Power Detection of Variant Partially Shaded PV Systems. *Sustainability*, vol. (11), pp. 2091.
- Fébba, D. M., Rubinger, R. M., Oliveira, A. F., and Bortoni, E. C. (2018). Impacts of temperature and irradiance on polycrystalline silicon solar cells parameters. *Sol. Energy*, vol. (174), pp. 628-639.
- Hanzaei, S. H., Gorji, S. A., and Ektesabi, M. (2020). A Scheme-Based Review of MPPT Techniques With Respect to Input Variables Including Solar Irradiance and PV Arrays' Temperature. *IEEE Access*, vol. (8), pp. 182229-182239.
- Hayder, W., Ogluari, E., Dolara, A., Abid, A., Hamed, M. B., and Sbita, L. (2020). Improved PSO: A Comparative Study in MPPT Algorithm for PV System Control under Partial Shading Conditions. *Energies*, vol. (13), pp. 2035.
- Ibrahim, A., Aboelsaud, R., and Obukhov, S. (2019). Improved particle swarm optimization for global maximum power point tracking of partially shaded PV array. *Electr. Eng.*, vol. (101), pp. 443-455.
- Kannan, N., and Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world: - A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. (62), pp. 1092-1105.
- Kennedy J., and Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. In *ICNN'95-Int. Conf. on Neural networks*, pp. 1942-1948.
- Li, H., Yang, D., Su, W., and Lu, J. (2019). An Overall Distribution Particle Swarm Optimization MPPT Algorithm for Photovoltaic System Under Partial Shading. *IEEE Tran. Ind. Electron.*, vol. (66), pp. 265-275.
- Martínez, D. D., Codorniu, R. T., Giral, R., and Seisdedos, L. V. (2021). Evaluation of particle swarm optimization techniques applied to maximum power point tracking in photovoltaic systems. *Int. J. Circuit Theory Appl.*, vol. (49), pp. 1849-1867.
- Motahhir, S., El Hammoumi, A., and El Ghzizal, A. (2020). The most used MPPT algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm. *J. Clean. Prod.*, vol. (246), pp. 118983.
- Obukhov, S., Ibrahim, A., Zaki Diab, A. A., Al-Sumaiti, A. S., and Aboelsaud, R. (2020). Optimal Performance of Dynamic Particle Swarm Optimization Based Maximum Power Trackers for Stand-Alone PV System under Partial Shading Conditions. *IEEE Access*, vol. (8), pp. 20770-20785.
- Ram, J. P., and Rajasekar N. (2017). A new robust, mutated and fast tracking LPSO method for solar PV maximum power point tracking under partial shaded conditions. *Applied Energy*, vol. (201), pp. 45-59.
- Ruschel, C.S., Gasparin, P., and Krenzinger, A. (2021). Experimental analysis of the single diode model parameters dependence on irradiance and temperature. *Sol. Energy*, vol. (217), pp. 134-144.
- Shi, Y., and Eberhart, R. (1998). A Modified Particle Swarm Optimizer. In *IEEE Int. Conf. on Evolutionary Computation Proc.*, pp. 69-73.
- Sundareswaran, K., Kumar, V. V., and Palani, S. (2015). Application of a combined particle swarm optimization and perturb and observe method for MPPT in PV systems under partial shading conditions. *Ren. Energy*, vol. (75), pp. 308-317.