

Desarrollo del Modelo Equivalente de Una Planta Solar Con el Método de Enjambre de Partículas

Mauricio Calderón Gómez, David Uzziel Cuadra Flores, Alejandro Villegas Ortega, Daniel Ruiz Vega

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”
Col. Lindavista, C. P. 07738, Ciudad de México:

Resumen— En este artículo se presenta la estimación del modelo equivalente de una planta solar empleando el método heurístico de enjambre de partículas. Se demuestra que, empleando este método es posible determinar un modelo equivalente que puede ser empleado en los estudios de estabilidad de sistemas eléctricos de potencia.

Palabras Clave — Optimización, Planta Solar, Técnica Heurística.

Abstract- In this paper, the estimation of an equivalent model of a solar plant using the heuristic method of particle swarm optimization is presented. It is demonstrated that this method enables the determination of an equivalent model that is suitable for power system analysis studies.

I. INTRODUCCIÓN

La instalación de fuentes de energía renovable como las plantas solares ha ido en aumento alrededor del mundo, no solo en cantidad, sino también en capacidad de generación, lo cual implica un mayor impacto. En México, las plantas solares han tenido capacidades de generación diversas y crecientes: 100 MW, 300 MW, 764 MW, entre otros, con planes de construir plantas de mayores capacidades [1]. Considerando su impacto, un problema importante es el modelado correcto de las plantas fotovoltaicas [2].

Debido a que los modelos dinámicos y de estado estacionario de las plantas solares han sido propiedad intelectual de los fabricantes, funcionando como modelos de caja negra, la planeación y operación del sistema de potencia se complican, inclusive causando algunos apagones en Londres y Brasil [3] [4]. Hasta 2018 se publicaron los primeros modelos de flujos de potencia [5] y dinámicos [6] con las ecuaciones de estado del modelo, e instituciones como el EPRI, la WECC y el IEEE han desarrollado una serie de modelos típicos (actualmente están en la segunda generación) [7] que pueden ser empleados de manera segura y ser validados con pruebas de campo. En la **Figura 1** se muestra un ejemplo del modelo equivalente que se necesita para incluir el efecto de las plantas solares en los estudios de estabilidad de sistemas de potencia.

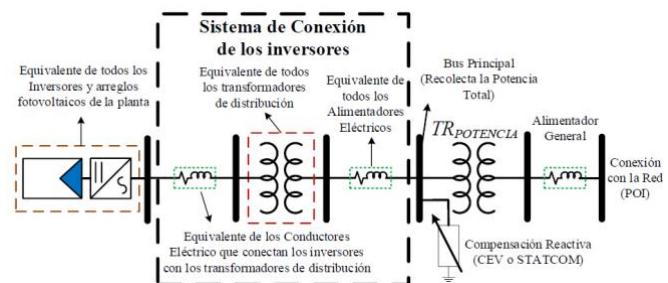


Figura 1.- Modelo equivalente de la planta fotovoltaica que se emplea en estudios de análisis de sistemas eléctricos de potencia (Adaptado de [2] [8] [9]).

En [10] se estimaron los parámetros del circuito equivalente de diferentes módulos fotovoltaicos, usando una red neuronal artificial, caracterizando módulos parcialmente sombreados; el artículo [11] presenta la aplicación de la optimización por enjambre de partículas (PSO) para extraer los parámetros de células solares a partir de características corriente-voltaje iluminadas; en [12] se utilizó un modelo de diodo simple y algoritmos genéticos (GAs) para caracterizar parámetros eléctricos de células y módulos solares fotovoltaicos, como la fotocorriente, la corriente de saturación, las resistencias en serie y en derivación, y el factor de idealidad.

El modelo requerido en los estudios de sistemas de potencia es un equivalente muy sencillo, que debe ser determinado a partir de las condiciones de operación reales de la planta. Este importante reto de estimar un modelo equivalente de estas grandes plantas, adecuado para estudios de análisis de sistemas eléctricos de potencia es estudiado en el presente trabajo, proponiendo un enfoque novedoso que tome en cuenta las particularidades de la operación de las plantas fotovoltaicas.

En el presente trabajo se presentan los resultados de un método que se implementó en [13] para estimar el modelo equivalente de plantas solares fotovoltaicas, que represente las características principales de operación de este tipo de instalaciones, empleando métodos heurísticos de optimización que pueden ser empleados en la determinación del modelo equivalente para desarrollar un programa de computadora

digital que aplique uno o varios de los métodos heurísticos para estimar los parámetros del modelo equivalente. Finalmente se validarán los resultados comparando las simulaciones de los modelos originales de plantas solares fotovoltaicas y sus modelos equivalentes.

II. METODOLOGÍA

En el presente trabajo, se propone un enfoque de validación de parámetros para el ajuste de las variables del modelo de la planta solar; los parámetros del modelo se ajustan iterativamente hasta que los valores de respuesta del modelo se aproximen a los medidos en la salida del sistema, usando siempre un criterio de minimización (Figura 2). Cabe resaltar que, aunque los valores obtenidos coincidan con las mediciones, éste no es un criterio suficiente para alcanzar una buena estimación, ya que el tiempo de ejecución es de vital importancia.

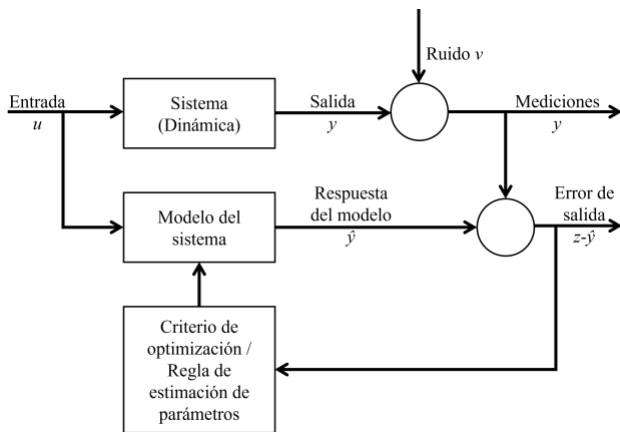


Figura 2.- Diagrama de bloques simplificado del procedimiento de estimación (Adaptada de [14]).

El método heurístico implementado en el presente trabajo es el Enjambre de Partículas (PSO por sus siglas en inglés). Este método de optimización tiene muchas similitudes con los métodos genéticos y de colonias, pero es mucho más simple, debido a que no usa mutación, ni combina operadores ni fenómenos. En su lugar usa la aleatoriedad de números reales y la comunicación global dentro del enjambre de partículas. En este sentido, es más fácil de implementar, ya que no se codifican ni descodifican los parámetros en cadenas binarias como en los algoritmos genéticos los cuales también pueden usar cadenas de números reales [15].

El movimiento de un enjambre de partículas consiste en dos grandes componentes: uno estocástico y otro determinístico. Cada partícula es atraída hacia la posición de la actual mejor estimación g^* y su propia mejor ubicación x_i^* en su histórico, mientras que al mismo tiempo tiende a moverse aleatoriamente. Cuando una partícula encuentra una mejor ubicación que las halladas anteriormente, entonces se actualiza como la nueva mejor la partícula i . Siempre habrá una mejor trayectoria a seguir para todas las n partículas en cualquier tiempo t durante las iteraciones. El objetivo es encontrar la mejor estimación

entre todas las soluciones encontradas hasta el momento hasta que el objetivo no mejore o después de cierto número de iteraciones. El movimiento de las partículas es representado esquemáticamente en la Figura 3.

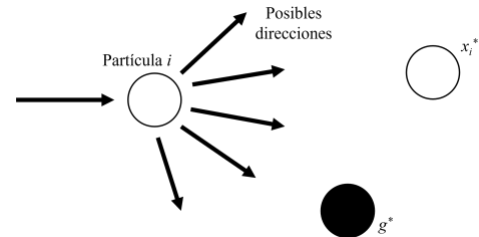


Figura 3.- Movimiento de una partícula aproximándose a la mejor solución global (Adaptada de [15]).

La mejor estimación es aproximadamente igual al mínimo de la función a optimizar, evaluada en el punto de la mejor aproximación calculada para cada nueva mejor partícula, como lo describe la Ecuación 1:

$$g^* \approx \min\{f(x_i)\}; i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

Con el fin de poder comparar nuestras mediciones con la respuesta del modelo, se empleó la ecuación de mínimos cuadrados para este problema de optimización. La Ecuación 2 es entonces la función objetivo que se minimizará usando el método PSO; las variables de decisión serán los parámetros del modelo de la planta solar como resistencias, inductancias y capacitancias de los elementos.

$$\text{Mínimos cuadrados} = \sum (\text{medición} - \text{aproximación})^2 \quad (2)$$

El modelo utilizado para este trabajo es el realizado en [16], implementado en MATLAB® y SIMULINK®, el cual se considera con el nivel de detalle suficiente y necesario para los objetivos propuestos. La estructura del modelo se presenta en la Figura 4, los elementos con los que se cuentan son los típicos instalados en las plantas solares reales.

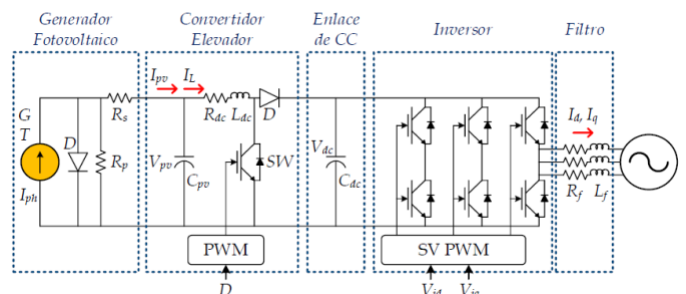


Figura 4.- Esquema de la planta solar fotovoltaica (Adaptada de [6]).

Las ecuaciones que modelan cada elemento se presentan a detalle en [15], y fueron empleadas para implementar el modelo dinámico en SIMULINK® de MATLAB®. El modelo fue inicialmente validado en [15], y fue utilizado para el proceso de validación del modelo empleando señales en el tiempo en [13].

La entrada del sistema son valores de irradiancia variante en el tiempo, y temperatura constante medidos en [17], ya que son utilizados para obtener la curva V-I y el punto de máxima potencia usando un control MPPT. Las gráficas se muestran en la **Figura 5**.

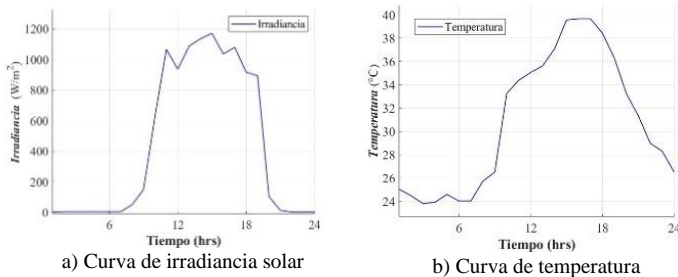


Figura 5.- Valores de irradiancia y temperatura (Adaptado de [13],[17]).

El algoritmo propuesto fue implementado usando el software MATLAB®. Se configuraron las siguientes opciones, las cuales mediante pruebas se consideró que se obtenía un mejor resultado en términos del error obtenido. En la **Tabla 1** se describen las opciones del solver para el algoritmo de enjambre de partículas. El tiempo de ejecución no se registró, ya que este depende del hardware del equipo con el que se compila el código.

Tabla 1.- Opciones usadas en el solver de MATLAB® [13]

Opción	Descripción
“particleswarm”	Es el algoritmo utilizado “Enjambre de partículas”
‘Display’, ‘iter’	Muestra iterativamente el número de la iteración, las veces que ha evaluado la función objetivo, el mejor valor obtenido de la función objetivo y el promedio de todos esos valores por iteración, y la cantidad de iteraciones de espera.
FunctionTolerance=0.001	Hace que el algoritmo se detenga si el cambio promedio en el mejor valor de la función objetivo es menor o igual a FunctionTolerance.
MinNeighborsFraction=0.12	Tamaño mínimo del vecindario adaptativo
SelfAdjustmentWeight=0.75	Ponderación de la mejor posición de cada partícula al ajustar la velocidad

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la **Tabla 2** se reportan los valores obtenidos al utilizar el algoritmo de Enjambre de Partículas con siete variables de decisión [13].

Las gráficas generadas donde se comparan directamente las mediciones con las curvas obtenidas después de la optimización de la función objetivo y el ajuste de los parámetros se presentan en la (**Figura 6**) [13].

Se puede apreciar que el ajuste de las curvas es prácticamente perfecto, la función objetivo se logró minimizar en todas las salidas del sistema.

Tabla 2.- Comparación de valores reales y obtenidos [13].

Variables de decisión	Valor real	Valor obtenido	Error (%)	Mínimos cuadrados
Inductancia del filtro	0.003	0.00299998	5.64e-4	0.1568
Resistencia del resistor del convertidor elevador	0.3	0.29982330	5.89e-2	
Capacitancia del capacitor del enlace de CC	0.001175	0.00117496	3.23e-3	
Resistencia que afecta a la potencia real que se inyecta a la red	0.00001	0.00001081	7.5073	
Capacitancia del capacitor del convertidor elevador	0.0003	0.00029975	8.25e-2	
Paneles en serie	14	14	0	
Paneles en paralelo	3	3	0	

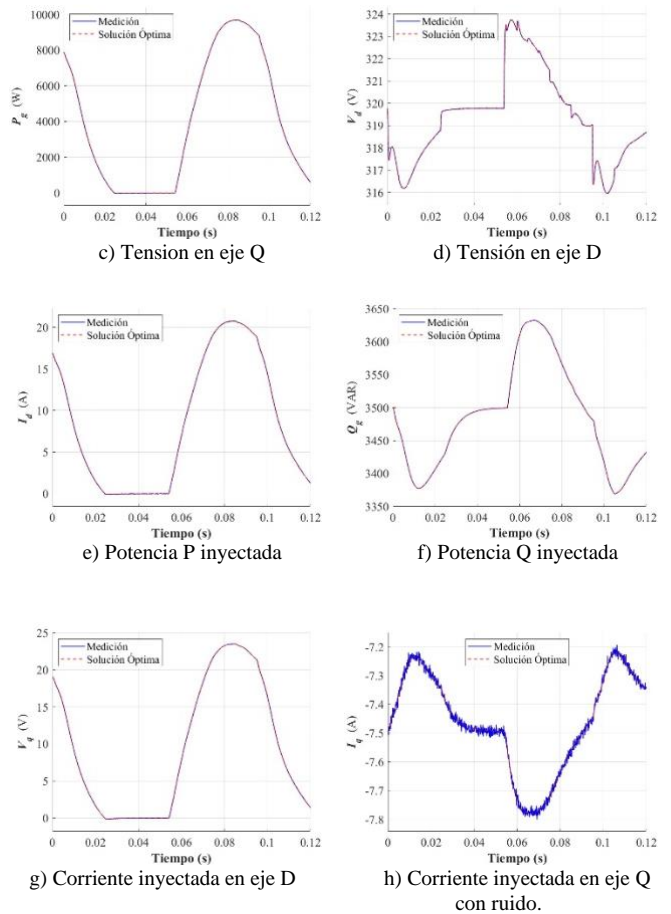


Figura 6.- Salidas del sistema contra mediciones usando enjambre de partículas (PSO) [13].

El ruido agregado a las mediciones no resultó particularmente relevante. La metodología propuesta no se vio afectada por estas perturbaciones.

IV. CONCLUSIONES

A partir de los resultados presentados se puede concluir que se lograron los objetivos inicialmente planteados, debido a que se desarrolló una herramienta computacional para determinar el modelo equivalente de plantas solares fotovoltaicas a partir de mediciones de salida.

Se investigó inicialmente sobre la estructura general de los sistemas fotovoltaicos, con el fin conocer el modelado dinámico de los principales elementos que los componen. En particular, se empleó un modelo desarrollado recientemente, implementado en SIMULINK® de MATLAB® en [16], haciendo hincapié en la importancia de obtener un equivalente de estos sistemas, analizando las salidas.

Se implementó un programa de simulación en SIMULINK® de MATLAB® aplicando la metodología propuesta. Se puede concluir que, aún con los transitorios generados por el cambio de irradiancia solar, el modelo logró un ajuste de parámetros adecuado, enfatizando la facilidad de implementación del algoritmo PSO y su velocidad de ejecución, el desempeño de este método fue adecuado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su profundo agradecimiento al Instituto Politécnico Nacional (IPN) por brindar la formación académica y los recursos necesarios para la realización del presente trabajo en el proyecto SIP 20242132.

DECLARACIÓN ÉTICA

El presente trabajo no involucró experimentación con seres vivos, ya sean humanos o animales, por lo cual, no fue necesario acudir a un comité de bioética o tener el consentimiento informado de algún participante. La investigación se llevó a cabo siguiendo los principios de integridad científica y rigor metodológico, asegurando el cumplimiento de las normativas aplicables en el ámbito de estudio.

REFERENCIAS

- [1] Secretaría de Energía (SENER), Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037 (Prodesen). Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037>
- [2] García Ordóñez, D. B. y Luna Rivas, J. G., Modelado de Plantas Solares Fotovoltaicas en el Estudio de Flujos de Potencia, Trabajo para obtener el grado de Ingeniero Electricista, ESIME-Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2023.
- [3] Bialek, J., What does the GB power outage on 9 August 2019 tell us about the current state of decarbonised power systems?, Energy Policy, Vol. 146, p. 111821, 2020.
- [4] Operador Nacional do Sistema Eléctrico, Análise da perturbação do dia 15/08/2023 às 08H30 Min envolvendo o SIN, RAP-ONS 00012/2023, Relatório de Análise de Perturbação – RAP, 2023.
- [5] Tapia Juárez, R., Fuerte Esquivel, C. R., Espinosa Juárez, E. y Sandoval, U., Steady-State Model of Grid-Connected Photovoltaic Generation for Power Flow Analysis, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 33, No. 5, septiembre, 2018.

- [6] Pal, B. C., Batzelis, E. I., Anagnostou, G., Cole, I. R. y Betts, T. R., A State-Space Dynamic Model for Photovoltaic Systems with Full Ancillary Services Support, IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 10, No. 3, julio, 2019.
- [7] EPRI, Model User Guide for Generic Renewable Energy System Models, Palo Alto, CA, 2018, 3002014083.
- [8] WECC, Solar Photovoltaic Power Plant Modeling and Validation Guideline, diciembre, 2019.
- [9] Castro, L. M., Rodríguez-Rodríguez, J. R. y del Campo, C. M., Modelling of PV systems as distributed energy resources for steady-state power flow studies, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 115, No. 105505, febrero, 2020.
- [10] Karatepe, E., Boztepe, M. y Colak, M., Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells, Solar Energy, Vol. 81, No. 8, pp. 977-992, 2007.
- [11] Wang, X. M. y Xu, Y., Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization, Journal of Applied Physics, Vol. 105, No. 9, p. 094502, 2009.
- [12] Zagrouba, M., Sellami, A., Bouaïcha, M. y Ksouri, M., Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms: application to maximum power extraction, Solar Energy, Vol. 84, No. 5, pp. 860-866, 2010.
- [13] Calderón Gómez, M. y Cuadra Flores, D. U., Desarrollo de equivalentes de plantas solares fotovoltaicas empleando técnicas heurísticas de optimización. Tesis de licenciatura, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco, junio, 2024, Ciudad de México.
- [14] Raol, J. R., Giriya, G. y Singh, J., Modelling and Parameter Estimation of Dynamic Systems, The Institution of Engineering and Technology.
- [15] Yang, X.-S., Engineering Optimization. An Introduction With Metaheuristic Applications, University of Cambridge, 2010.
- [16] Ruiz Vega, D. y Luna Rivas, J. G., Implementación del Modelo Dinámico de una Planta Solar Fotovoltaica en el Programa TRANSTAB, Reporte Interno, Grupo de Investigación de Fenómenos Dinámicos en Redes Interconectadas y Máquinas Eléctricas, ESIME Zacatenco, agosto, 2023, SEPI-ESIME-Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México.
- [17] Vargas Cruz, M. A., Análisis en Estado Estacionario en Sistemas Eléctricos de Potencia con Presencia de Sistemas de Generación Fotovoltaica y de Almacenamiento de Energía, Trabajo de Maestría, Facultad de Ingeniería Eléctrica, División de Estudios de Posgrado, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, junio, 2014.