

# Diseño y evaluación de un controlador de lógica difusa para la extracción de la máxima potencia en un sistema fotovoltaico de 10KW interconectado a la red

K. G. Vidaña-Aldaba<sup>1</sup>, J. Lara-Cardoso<sup>1</sup>, C. Hernandez-Flores<sup>1</sup>, M. A. Arjona-López<sup>1</sup>

**Resumen** — La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía prometedora ya que es abundante, limpia y sustentable. Sin embargo, presenta el inconveniente de una baja eficiencia de conversión de sus paneles fotovoltaicos aunada a la intermitencia de su generación en función de las condiciones ambientales. Los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia permiten operar los paneles fotovoltaicos en su punto óptimo para extraer el máximo de energía disponible. Una forma de lograrlo es aplicando un controlador lineal proporcional-integral a un convertidor elevador de voltaje conectado en cascada. Sin embargo, este controlador clásico tiene un bajo desempeño ante cambios rápidos de irradiancia solar. Considerando que la lógica difusa no requiere un modelo matemático exacto y trabaja con entradas imprecisas, este artículo presenta el diseño y evaluación de un controlador de lógica difusa para extraer la máxima potencia en un sistema fotovoltaico de 10kW interconectado a la red eléctrica mediante un convertidor trifásico con capacidades de mejoramiento de la calidad de la energía. Los resultados de simulación obtenidos en Matlab-Sim Power Systems demuestran que el controlador propuesto no solo es capaz de extraer una mayor potencia sino de hacerlo de una manera más rápida y precisa que los controladores clásicos.

**Palabras claves** — algoritmo SPMP, energía solar, lógica difusa, sistema fotovoltaico

**Abstract** — Photovoltaic solar energy is a promising source of energy since it is abundant, clean and sustainable. Nevertheless, it has the drawback of a low conversion efficiency of its photovoltaic panels along with the intermittency of its generation in function of the environmental conditions. The maximum power point tracking algorithms allow the photovoltaic panels to operate at the optimal point for extracting the maximum of the available energy. One way to achieve this is by applying a linear proportional-integral controller to a voltage boost converter connected in cascade. Nevertheless, this classic controller has a poor performance under rapid changes in solar irradiance. Considering that fuzzy logic does not require an exact mathematical model and works with imprecise inputs, this article presents the design and evaluation of a fuzzy logic controller for extracting the maximum power in a 10kW photovoltaic system interconnected to the grid by means of a three-phase converter with power quality improvement capabilities. The simulation results obtained in Matlab-SimPowerSystems demonstrate that the proposed controller not only is capable of extracting a higher power but do it in a faster and more accurate manner than the classic controllers.

**Keywords** — fuzzy logic, MPPT algorithm, photovoltaic system, solar energy

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los combustibles fósiles se han ido agotando de manera gradual e inevitable, por lo que la sustentabilidad energética de futuras generaciones representa una problemática seria. Para contrarrestarla, una alternativa es el uso de fuentes de energía renovable, como la fotovoltaica que aprovecha la radiación del sol para producir electricidad. Esta es una solución prometedora que está contribuyendo en gran medida hacia un futuro sustentable [1]. Sin embargo, para aprovechar al máximo la energía fotovoltaica es necesario extraerla y convertirla de manera óptima y eficaz mediante el uso de convertidores electrónicos de potencia (CEP). Estos convertidores están basados en dispositivos semiconductores que mediante su apertura y cierre permiten regular la transferencia de energía, así como implementar diversos algoritmos de control [2].

Un sistema fotovoltaico consiste principalmente de dos CEP. El primero de ellos es un elevador de voltaje, con el cual se implementa el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (SPMP) [3]. El segundo convertidor es un inversor, el cual transforma la corriente directa (CD) proveniente de las celdas solares fotovoltaicas en una corriente alterna (CA). Además, se encarga de compensar la distorsión armónica total (DHT) de la corriente de la red causada por la no linealidad de la carga, teniendo así un efecto positivo en la calidad de energía suministrada [4].

Los controladores de lógica difusa (CLD) han demostrado tener un alto desempeño en aplicaciones de energía fotovoltaica. Estos CLD se caracterizan por dos grandes ventajas: 1) la capacidad de trabajar con sistemas no lineales sin requerir de su modelo matemático, y 2) la capacidad de lidiar con entradas imprecisas. Distintas investigaciones han demostrado que los algoritmos SPMP basados en lógica difusa (LD) permiten extraer una mayor potencia del sistema fotovoltaico y mantener una salida estable ante cambios de temperatura e irradiancia, además de hacerlo de una manera más rápida, precisa y con mayor eficiencia que los controladores clásicos lineales como el proporcional-integral (PI) [5]-[8].

<sup>1</sup> División de Estudios de Posgrado e Investigación, TNM Instituto Tecnológico de La Laguna, Blvd. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de La Laguna, C.P. 27000, Torreón, Coahuila, México.

\* vidanakarol@gmail.com

En este artículo, se presenta el análisis, diseño y simulación de un CLD para el seguimiento del PMP en un sistema fotovoltaico interconectado a la red. Las variables de entrada a este controlador difuso son el error  $[E]$  y la diferencia del error  $[\Delta E]$  [9], [10]. A diferencia de trabajos anteriores [11], [12], se propone 1) una base de reglas difusas únicas, 2) las entradas se fuzzifican y tratan mediante siete funciones de membresía consistentes en cinco funciones triangulares y dos funciones sigmoideas, y 3) para la variable de salida se utilizan siete funciones triangulares. La propuesta de estos siete niveles difusos permite alcanzar una mayor eficiencia del algoritmo de SPMP, en comparación con los controladores basados en cinco o tres niveles.

El presente artículo se organiza de la manera siguiente. En la sección II presenta el sistema fotovoltaico de 10kW bajo estudio, así como el modelado de todos sus componentes. El diseño del controlador de lógica difusa propuesto se describe en la sección III. La sección IV muestra los resultados de simulación obtenidos en Matlab-SimPowerSystems. Aquí también se analiza la eficiencia del CLD en comparación con el controlador PI clásico. Finalmente, la sección V presenta las conclusiones.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

Sistema fotovoltaico bajo estudio

El sistema fotovoltaico estudiado se muestra en la Figura 1. Sus componentes son: el arreglo fotovoltaico serie/paralelo de 10kW, el controlador de lógica difusa y el lineal, el convertidor elevador para el SPMP y el inversor trifásico binomial que funciona como un filtro activo paralelo y que se interconecta a la red eléctrica y a la carga. Se puede observar que la entrada del módulo fotovoltaico tiene un par de señales, una constante para la temperatura, y otra variante en el tiempo para la irradiancia solar. Observe que la salida  $G$  del bloque de control del algoritmo SPMP se envía a la compuerta del MOSFET del convertidor elevador de voltaje.

A. Modelado de las Celdas Fotovoltaicas y Obtención de las Curvas Características.

El modelo de un panel fotovoltaico se basa en el de una celda fotovoltaica, el cual consiste de una fuente de corriente, un diodo que representa la no linealidad de la celda, una resistencia en serie  $R_s$  y otra en paralelo  $R_p$ . Estas resistencias representan las pérdidas asociadas al material de la celda y a las fugas de corriente, respectivamente.

En la Figura 2, se muestra el circuito equivalente del modelo de una celda fotovoltaica [13].

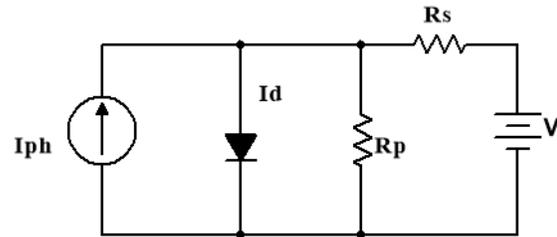


Figura 2. Circuito del modelo de una celda fotovoltaica

La corriente neta  $I$  de una celda fotovoltaica está dada por la expresión:

$$I = I_{ph} - I_o \left[ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{kT_c A} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

donde

- $I_{ph}$  es la fotocorriente
- $I_d$  es la corriente del diodo
- $k$  es la constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/K)
- $T_c$  es la temperatura absoluta de la celda (K)
- $q$  es la carga del electrón ( $1.602 \times 10^{-19}$  J/V)
- $V$  es el voltaje de salida (V)
- $I_o$  es la corriente de saturación (A)
- $A$  es el factor de idealidad

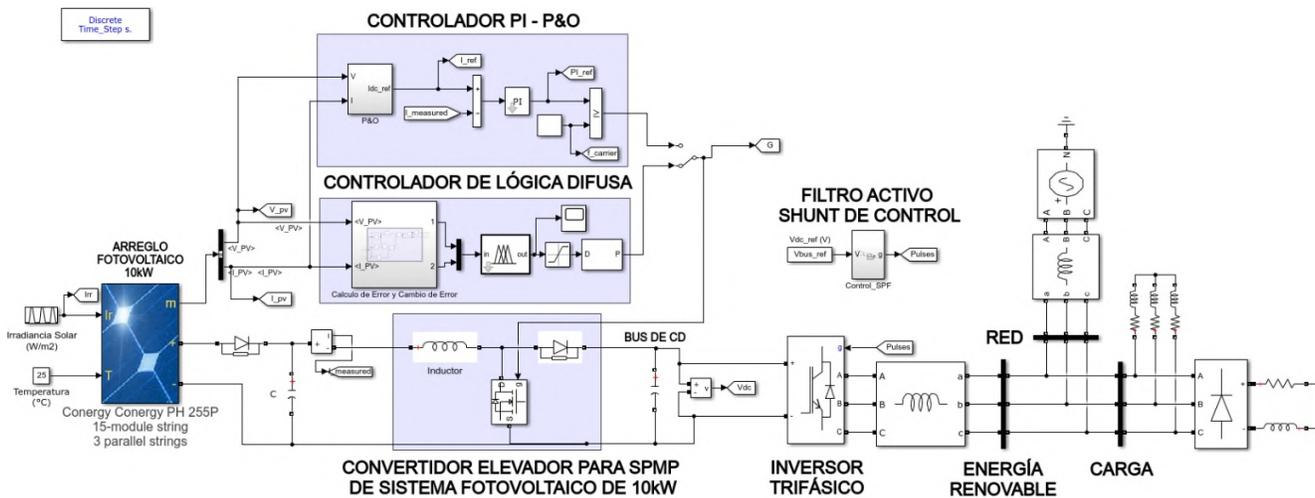


Figura 1. Diagrama a bloques del sistema fotovoltaico bajo estudio

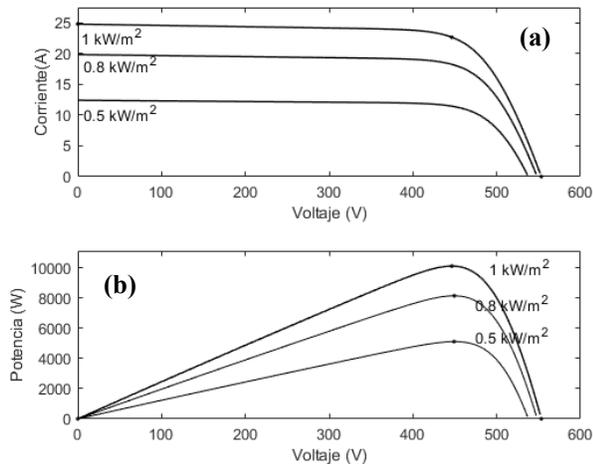


Figura 3. a) Curvas  $V-I$ . b) Curvas  $V-P$

La herramienta de Matlab-SimPowerSystems cuenta con un bloque de panel solar fotovoltaico, el cual incluye una gran variedad de paneles comerciales. En el presente trabajo se han aprovechado los recursos de este bloque para generar las curvas características de voltaje-corriente ( $V-I$ ) y de voltaje-potencia ( $V-P$ ). El modelo de los paneles fotovoltaicos utilizados en la simulación es CONERGY PH 255P. El arreglo de 10kW bajo estudio consiste de 15 módulos en serie y 3 en paralelo. Las curvas  $V-I$  y  $V-P$  obtenidas para este sistema fotovoltaico se muestran en la Figura 3. Para esto, se consideró una temperatura ambiente de  $T=25^\circ\text{C}$  e irradiancias solares de 1000, 800 y 500  $\text{W}/\text{m}^2$ , respectivamente. Estas gráficas además permiten conocer la corriente de corto circuito  $I_{SC}$ , el voltaje de circuito abierto  $V_{OC}$ , y el punto de máxima potencia tanto de un panel fotovoltaico como del arreglo total, el cual seguirá en todo momento el algoritmo SPMP.

### B. Convertidor Elevador de Voltaje

El convertidor elevador también denominado troceador en paralelo, transforma el voltaje de entrada de CD en otro de CD

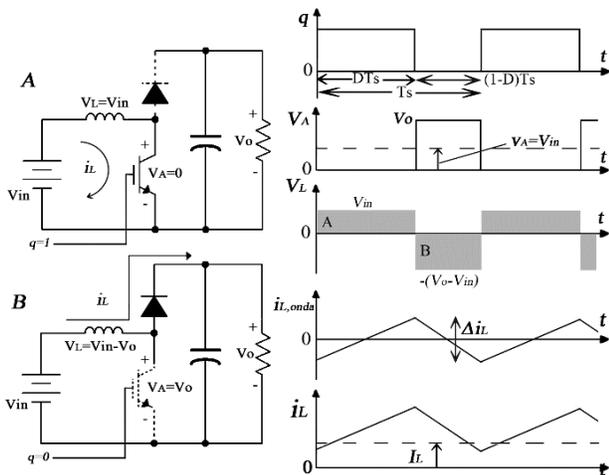


Figura 4. Circuito eléctrico del convertidor elevador y sus formas de onda

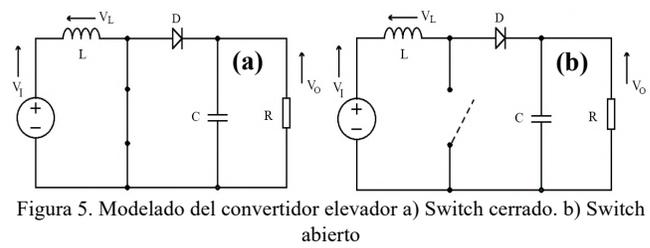


Figura 5. Modelado del convertidor elevador a) Switch cerrado. b) Switch abierto

de salida de mayor magnitud. Su comportamiento con el switch tanto abierto como cerrado se ilustra en la Figura 4.

En la Figura 5, se muestra el circuito del convertidor elevador, en sus dos estados posibles. Cuando el switch está cerrado, la corriente de la fuente circula solo a través del inductor pues el diodo está polarizado inversamente. Por lo que

$$V_L = V_i \quad (2)$$

$$v_L = V_i = L \frac{di_L}{dt} \quad (3)$$

$$\int_0^{DT_s} di_L = I_L(DT_s) - I_L(0) = \Delta i_{L_{on}} \quad (4)$$

$$\Delta i_{L_{on}} = \int_0^{DT_s} \frac{v_L}{L} dt = \int_0^{DT_s} \frac{V_i}{L} dt = \frac{V_i DT_s}{L} \quad (5)$$

mientras que, cuando el switch está abierto, la corriente fluye hasta la carga RC a través del inductor y el diodo polarizado directamente. De esta manera se tiene que

$$V_L = -(V_i - V_o) \quad (6)$$

$$v_L = -(V_i - V_o) = L \frac{di_L}{dt} \quad (7)$$

$$\int_{DT}^{T_s} di_L = I_L(T_s) - I_L(DT_s) = \Delta i_{L_{off}} \quad (8)$$

$$\Delta i_{L_{off}} = \int_{DT_s}^{T_s} \frac{v_L}{L} dt = - \int_{DT_s}^{T_s} \frac{V_i - V_o}{L} dt = - \frac{(V_i - V_o)(1 - D)T_s}{L} \quad (9)$$

En cada estado el área bajo la curva de  $V_L$  es igual en magnitud, pero de signo opuesto, por lo que su suma durante un ciclo es igual a cero. Así, las corrientes que circulan en cada estado también son iguales y se cumple lo siguiente:

$$\Delta i_{L_{on}} - \Delta i_{L_{off}} = \frac{V_i DT_s}{L} + \frac{(V_i - V_o)(1 - D)T_s}{L} = 0 \quad (10)$$

Finalmente, el voltaje de salida  $V_o$  en función del voltaje de entrada  $V_i$  y el ciclo de trabajo  $D$  se expresa como:

$$V_o = \frac{1}{1 - D} V_i \quad (11)$$

dato que  $D$  varía de 0 a 1, entonces  $V_o$  siempre es igual o mayor que  $V_i$ . El valor de  $D$  será proporcionado por el controlador de lógica difusa diseñado o el controlador PI.

C. Algoritmo de SPMP P&O

El método de perturbación y observación (P&O) se basa en el criterio de variar el voltaje a la salida del arreglo fotovoltaico en una dirección positiva y evaluar si aumenta la potencia o disminuye, en caso de aumentar se continua así hasta que se encuentre el punto de máxima potencia (PMP) [14]. En el caso de que el cambio en la potencia resulte negativo, la perturbación tendrá ahora un sentido contrario al anterior. El algoritmo P&O basado en estas condiciones y la diferencia de potencia ( $\Delta P$ ) se ilustra en la Figura 6 y se resume como:

- a) Si  $\Delta P > 0$ , se encuentra a la izquierda del PMP y se debe incrementar el voltaje.
- b) Si  $\Delta P = 0$ , la pendiente de la curva es cero y se ha encontrado el PMP.
- c) Si  $\Delta P < 0$ , se encuentra a la derecha del PMP y debe decrementar el voltaje.

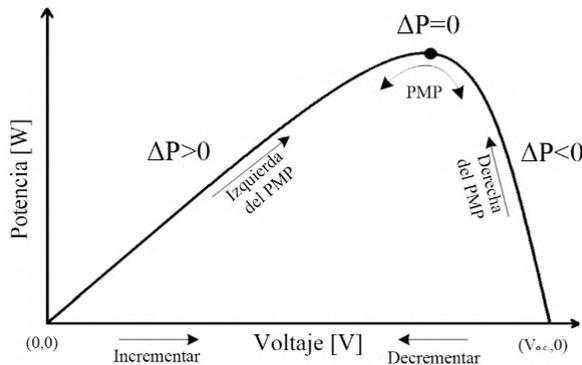


Figura 6. Algoritmo de P&O [14]

D. Convertidor Trifásico Binivel

Un convertidor de fuente de voltaje (CFV) trifásico binivel alimentando una carga trifásica en estrella se muestra en la Figura 7. Esta topología consiste de un arreglo de 3 switches ( $S_a, S_b, S_c$ ) en la parte superior, y otros tres en la parte inferior ( $S'_a, S'_b, S'_c$ ) que funcionan de manera complementaria a los primeros con el fin de evitar un corto circuito en el bus de CD. La combinación de cerrado '1' y abierto '0' de los 6 switches, da lugar a 8 posibles combinaciones que generan distintas rutas de flujo de corriente y voltajes de salida.

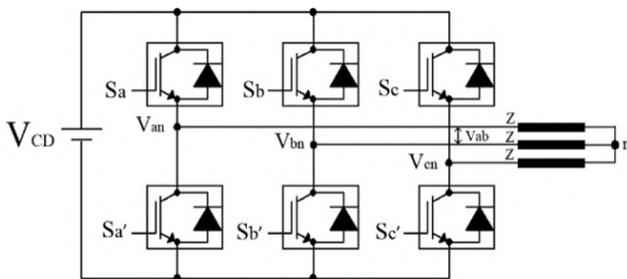


Figura 7. Convertidor trifásico binivel de fuente de voltaje

La Tabla I resume los voltajes resultantes en función del patrón de conmutación de sus switches.

TABLA I. ESTADOS DE CONMUTACIÓN DEL INVERSOR BINIVEL

VECTORES DE VOLTAJE	PATRÓN DE CONMUTACIÓN			VOLTAJES					
	$S_a$	$S_b$	$S_c$	DE FASE			DE LÍNEA		
				$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$	$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$
$V_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1$	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3	1	0	-1
$V_2$	1	1	0	1/3	1/3	-2/3	0	1	-1
$V_3$	0	1	0	-1/3	2/3	-1/3	-1	1	0
$V_4$	0	1	1	-2/3	1/3	1/3	-1	0	1
$V_5$	0	0	1	-1/3	-1/3	2/3	0	-1	1
$V_6$	1	0	1	1/3	-2/3	1/3	1	-1	0
$V_7$	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Los voltajes de fase y de línea se calculan a partir de la combinación de los switches superiores utilizando las siguientes matrices:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{CD}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = V_{CD} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

E. Filtro Activo Paralelo

En el sistema fotovoltaico bajo estudio, el filtro activo paralelo tiene el objetivo de compensar las corrientes armónicas generadas por la carga no lineal y mantener una corriente sinusoidal en la red eléctrica. Así, el sistema opera con una distorsión armónica por debajo de los límites permitidos y se mejora la calidad de la energía generada.

La Figura 8 muestra el diagrama del algoritmo de control indirecto que compensa los armónicos generados por la carga no lineal [15]. Observe como el voltaje del bus de CD se controla mediante un PI, cuya salida es multiplicada con los voltajes de referencia unitarios para así generar las corrientes de referencia. El error de corriente finalmente entra a la modulación de espacio vectorial de donde se obtienen las seis señales de conmutación para el convertidor de la Figura 7.

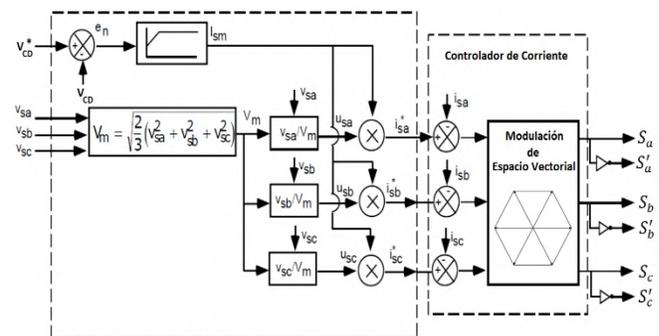


Figura 8. Técnica de control indirecto del filtro activo [15]

Algoritmo de SPMP basado en lógica difusa

Los controladores de lógica difusa son muy utilizados en aplicaciones de energías renovables, ya que son sencillos de implementar, tienen un buen desempeño considerando la no linealidad del sistema y no requieren conocer su modelo matemático exacto. En este trabajo, el controlador de lógica difusa se ha diseñado para seguir el punto de máxima potencia del sistema fotovoltaico de 10kW bajo condiciones climáticas cambiantes. Los CLD constan de tres fases: fuzzificación, inferencia y defuzzificación.

- 1) En la fuzzificación las entradas del controlador se convierten en variables lingüísticas. Las entradas propuestas del CLD son el error  $E$  y la diferencia de error  $\Delta E$  definidas como:

$$E(n) = \frac{dP}{dV} = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (14)$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (15)$$

donde  $P$  y  $V$  son la potencia y el voltaje del arreglo fotovoltaico, respectivamente. La salida del controlador es por conocimiento del sistema, el cambio en el ciclo de trabajo  $\Delta D$  del convertidor elevador.

- 2) La inferencia consiste en crear un conjunto de reglas. En el sistema fotovoltaico las reglas son basadas en el convertidor elevador de voltaje. En la Tabla II, se muestra el conjunto de reglas correspondiente al proceso de inferencia. Para esto se han propuesto los siguientes siete niveles difusos: NB (Negative Big), NM (Negative Medium), NS (Negative Small), ZE (Zero), PS (Positive Small), PM (Positive Medium) y PB (Positive Big).
- 3) Para el proceso de defuzzificación, la salida del controlador es convertida a una variable numérica mediante funciones de membresía. Así, se podrá controlar el ciclo de trabajo del convertidor elevador en base al PMP.

La Figura 9 muestra estas funciones membresía correspondientes a las entradas  $E$  y  $\Delta E$ , así como a la salida.

TABLA II. REGLAS DIFUSAS

		$\Delta E$						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
$E$	NB	PB	PM	PS	NS	NS	NM	NB
	NM	PM	PS	PS	NS	NS	NS	NM
	NS	PS	PS	PS	NS	NS	NS	NS
	ZE	NS	NS	PS	ZE	ZE	NS	NS
	PS	NS	NS	NS	PS	PS	PS	PS
	PM	NM	NM	NS	PS	PS	PS	PS
	PB	NB	NB	NM	PS	PS	PM	PB

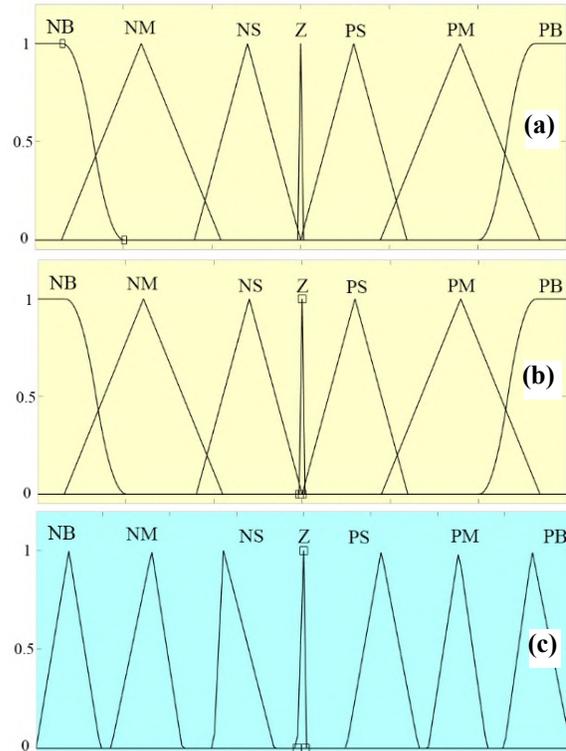


Figura 9. Funciones membresía. a) Entrada  $E$ . b) Entrada  $\Delta E$ . c) Salida  $\Delta D$

$\Delta D$ . Estas funciones de membresía han sido ajustadas en base a prueba y error hasta obtener un resultado de alto desempeño y máxima eficiencia.

III. RESULTADOS

El sistema fotovoltaico de la Figura 1 se simuló en Matlab-SimPowerSystems considerando condiciones de temperatura nominal a 25 °C y de irradiancia solar cambiante en el rango de 500W/m<sup>2</sup> a 1000W/m<sup>2</sup>. Mediante la secuencia repetitiva mostrada en la Tabla III se especificó el perfil trapezoidal de variación para la irradiancia solar.

En la Figura 10, se observan las trayectorias completas del seguimiento del PMP, tanto con el controlador LD como con el controlador PI de P&O para una irradiancia cambiante a 25 °C. Es notable que ambos controladores siguen el punto de máxima potencia con una alta precisión. Sin embargo, se nota como el controlador de lógica difusa lo hace con una mayor exactitud.

En la Figura 11, se muestra la potencia obtenida con ambos controlares para una irradiancia de 500W/m<sup>2</sup> a 25 °C. Los resultados para una irradiancia solar de 1000W/m<sup>2</sup> a 25 °C se muestran en la Figura 12.

La Tabla IV muestra un análisis comparativo de la eficiencia obtenida con los dos controladores SPMP. Es importante notar que en ambos casos el controlador de lógica difusa alcanzó una mayor eficiencia que el controlador PI.

A continuación, se analiza la calidad del voltaje y de la corriente de la red eléctrica, y también se identifica si están en

Tabla III. Parámetros para la simulación de Irradiancia solar

TIEMPO [s]	[ 0 0.5 1.5 2.5 3.5 4 ]
IRRADIANCIA [ $W/m^2$ ]	[ 500 500 1000 1000 500 500 ]

Tabla IV. Comparación de eficiencia de los controladores SPMP

PARÁMETROS		EFICIENCIA	
Irradiancia ( $W/m^2$ )	Temperatura ( $^{\circ}C$ )	Controlador LD	Controlador PI
500	25	97.84%	95.44%
1000	25	98.3%	92.9%

fase o fuera de fase para así deducir cuando la red está suministrando o recibiendo energía. Este análisis se realiza en los primeros dos segundos de la simulación.

La Figura 13 muestra que en  $t = 1s$ , el voltaje y la corriente se encuentran en fase, lo que significa que la red eléctrica suministra la potencia para alimentar la carga. Por el

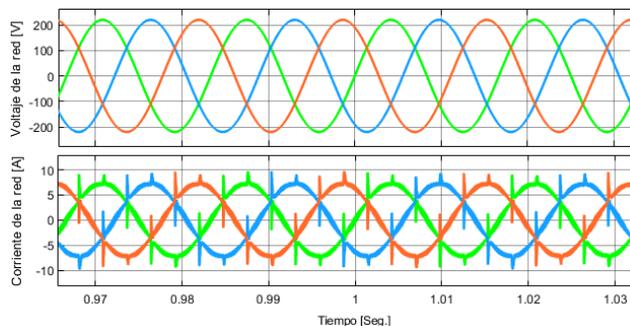


Figura 13. Voltaje y corriente de la red eléctrica en fase

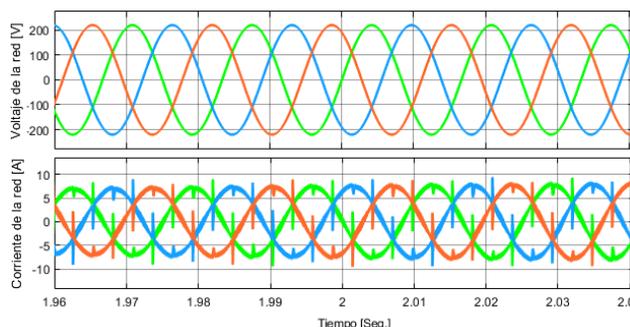


Figura 14. Voltaje y corriente de la red eléctrica fuera de fase

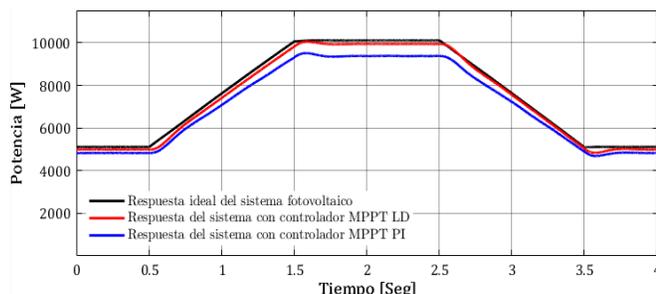


Figura 10. Respuesta completa del sistema a 25 °C con ambos controladores SPMP: LD y PI

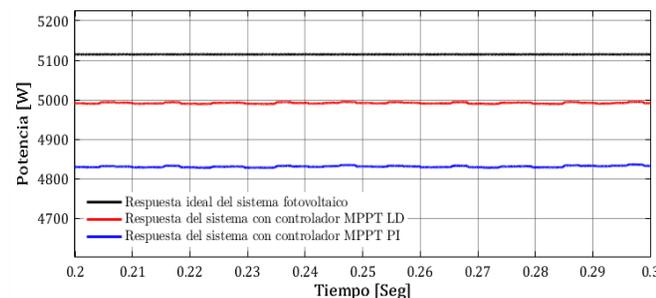


Figura 11. Respuesta del sistema a 500W/m<sup>2</sup> y 25 °C con ambos controladores SPMP: LD y PI

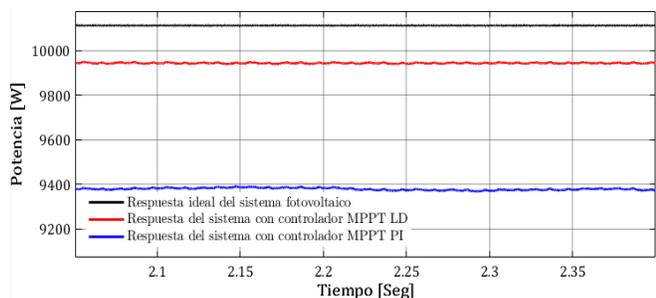


Figura 12. Respuesta del sistema a 1000W/m<sup>2</sup> y 25 °C con ambos controladores: LD y PI

contrario, en la Figura 14 se nota que en  $t = 2s$  se encuentran defasados 180°. Esto debido a que ahora el sistema fotovoltaico está produciendo energía suficiente para alimentar la carga y envía el excedente a la red eléctrica. Una característica importante de la corriente de la red es que tiene forma senoidal debido a la correcta compensación de los armónicos generados por la carga no lineal. El filtro activo paralelo basado en la técnica de control indirecto permite llevar a cabo esta compensación utilizando el mismo inversor trifásico binivel encargado de la regulación e integración de la energía producida por el arreglo fotovoltaico.

#### IV. CONCLUSIONES

Este artículo presentó el diseño y la evaluación de un controlador de lógica difusa para la extracción de la máxima potencia de un sistema fotovoltaico de 10kW interconectado a la red eléctrica. Se evaluó el desempeño y eficiencia del CLD y se comparó con la de un controlador PI basado en el algoritmo P&O. Ambos controladores se probaron bajo condiciones variables de irradiancia solar y a temperatura constante. Los resultados de la simulación mostraron que el CLD no solo sigue correctamente el PMP, sino que lo hace con una mayor eficiencia, pues para una irradiancia de 1000  $W/m^2$ , el CLD alcanzó una eficiencia de 98%, mientras que con el controlador PI fue de tan solo 93%. Al analizar y comparar las trayectorias del seguimiento de máxima potencia obtenidas con ambos controladores se puede concluir que el controlador basado en lógica difusa supera en general al controlador PI, ya que logró un mejor rendimiento y un menor tiempo de respuesta, por lo que es el más viable para aplicaciones de energía fotovoltaica de alto desempeño.

## V. AGRADECIMIENTOS

K. G. Vidaña-Aldaba agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado en el marco del "Programa de Becas Nacionales para Estudios de Posgrado" con número de solicitud 2022-000002-01NACF-00971.

Los autores también agradecen al TNM y al Instituto Tecnológico de La Laguna por el apoyo económico recibido para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

## VI. REFERENCIAS

- [1] Hester R.E, Harrison R.M. y Elliot. D. (2003). "Sustainable Energy: Choices, problems and opportunities", *Sustainability and Environmental Impact of Renewable Energy Sources* (19-48). London: Royal Society of Chemistry. DOI: 10.1039/9781847551986-00019.
- [2] Xiao W., El Moursi M. S., Khan O. y Infield D. (2016). "Review of grid-tied converter topologies used in photovoltaic systems," *IET Ren. Power Gen.*, vol. 10, no. 10, pp. 1543-1551. DOI: 10.1049/iet-rpg.2015.0521.
- [3] Subudhi B. y Pradhan R. (2013). "A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 4, pp. 89-98. DOI: 10.1109/TSTE.2012.2202294.
- [4] Boukadoum A. y Bahi T. (2014). "Fuzzy Logic Controlled Shunt Active Power Filter for Harmonic Compensation and Power Quality Improvement," *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 7, no. 4, pp. 143-149. DOI: 10.25103/jestr.074.23.
- [5] Noman A. M., Addoweesh K. E. y Mashaly H. M. (2012). "A fuzzy logic control method for MPPT of PV systems," *38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 874-880. DOI: 10.1109/IECON.2012.6389174.
- [6] M. L. Shah, A. Dhaneria, P. S. Modi, H. Khambhadiya y K. K. D. (2020). "Fuzzy Logic MPPT for Grid Tie Solar Inverter," *IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCN)*, pp. 1-6. DOI: 10.1109/INOCN50539.2020.9298323.
- [7] M. S. Bouakkaz, A. Boukadoum, O. Boudebouz, I. Attoui, N. Boutaseta y A. Bouraiou. (2020). "Fuzzy Logic based Adaptive Step Hill Climbing MPPT Algorithm for PV Energy Generation Systems," *International Conference on Computing and Information Technology (ICCIIT-1441)*, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICCIIT-144147971.2020.9213737.
- [8] S. Siddula. (2020). "Analysis of Fuzzy Logic Based MPPT Using Incremental Conductance Technique for PV Cell," *Conference on Smart Technologies in Computing, Electrical and Electronics (ICSTCEE)*, pp. 180-185. DOI: 10.1109/ICSTCEE49637.2020.9277172.
- [9] R. Sankar, S. Velladurai, R. Rajarajan y J. A. Thulasi. (2017). "Maximum power extraction in PV system using fuzzy logic and dual MPPT control," *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, pp. 3764-3769. DOI: 10.1109/ICECDS.2017.8390168.
- [10] C. B. Prasad, S. K. Sonam, B. R. G. Reddy y P. Harika (2017), "A fuzzy logic based MPPT method for solar power generation," *2017 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, pp. 1182-1186. DOI: 10.1109/ICCONS.2017.8250654.
- [11] M. Dabboussi, A. Hmidet and O. Boubaker (2020), "An efficient Fuzzy Logic MPPT Control Approach for Solar PV System: A Comparative Analysis with the Conventional Perturb and Observe Technique," *6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*, pp. 366-371, DOI: 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236503.
- [12] Ray P. K., Das S. R. y Mohanty A. (2019). "Fuzzy-Controller-Designed-PV-Based Custom Power Device for Power Quality Enhancement," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 34, no. 1, pp. 405-414. DOI: 10.1109/TEC.2018.2880593.

- [13] Granda-Gutiérrez E. E. et al. (2013). "Modelado y simulación de celdas y paneles solares," *Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica*, vol. 35, pp. 17-22. DOI: 10.13140/2.1.4192.8968.
- [14] Ali A. I. M., Mohamed E. E. M. y Youssef A.-R. (2017). "MPPT algorithm for grid-connected photovoltaic generation systems via model predictive controller," *Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, pp. 895-900. DOI: 10.1109/MEPCON.2017.8301286.
- [15] Singh B. N., Chandra A. y Al-Haddad K. (1998). "Performance comparison of two current control techniques applied to an active filter," *8th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, vol. 1, pp. 133-138. DOI: 10.1109/ICHQP.1998.759859.

## VII. BIOGRAFÍA



**Vidaña Aldaba Karol Gabriel** es egresado de la carrera de Ingeniería Electrónica con la especialidad de Mecatrónica y Control, del Instituto Tecnológico de La Laguna en la ciudad de Torreón, Coahuila, México en 2021.

Él actualmente estudia la Maestría en Ciencias de Ingeniería Eléctrica perteneciente al PNPC del CONACYT, en la línea de investigación de Potencia y Energías Renovables dentro de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coahuila, México. Sus áreas de interés son la energía fotovoltaica y la electrónica de potencia.



**Lara Cardoso Jorge** obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Université du Québec-École de Technologie Supérieure (ÉTS), Montreal, Canadá, en 2017. Actualmente es profesor investigador en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de la Laguna (ITL), Torreón, Coahuila, México.

El Dr. Lara es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) de México teniendo la distinción de Investigador Nacional Nivel I. También es revisor activo de las revistas IEEE Transactions on Industrial Electronics, IEEE Transactions on Power Electronics, IEEE Transactions on Energy Conversion, IEEE Access e IET Electric Power Applications. Sus intereses de investigación incluyen electrónica de potencia, energías renovables eólica y fotovoltaica, calidad de la energía, filtrado activo, máquinas eléctricas y drives, vehículos eléctricos y control en tiempo real basado en DSP.



**Hernández Flores Concepción** recibió el grado de Ingeniería Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Morelos en 1990, el grado de Maestría en Ciencias en Fundamentos de Tecnología de la Información Avanzada en el Imperial College, de Londres, Inglaterra en 1995, y el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón, México, en 2007. Laboró con el Departamento de Simulación del Instituto de Investigaciones Eléctricas desde 1991 hasta el 2000. Actualmente trabaja en el Instituto Tecnológico de la Laguna, en Torreón, México. Sus áreas de interés son inteligencia artificial, optimización, máquinas eléctricas y energías renovables.



**Arjona López Marco A.** recibió el grado de Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Durango, México en 1988, el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en 1990 y el grado de Doctor en Filosofía en Ingeniería Eléctrica del Imperial College, Londres, Inglaterra en 1996. Laboró con el Departamento de Simulación del Instituto de Investigaciones Eléctricas desde 1991 hasta 1999. Actualmente es Profesor de Máquinas Eléctricas en el Instituto Tecnológico de la Laguna.

Sus intereses son el diseño, análisis y control de máquinas eléctricas y energías renovables.