

IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE CONTROL DIFUSO PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS APLICADOS EN MICRO-REDES DE CD

Juan José Martínez Nolasco

Tecnológico Nacional de México en Celaya

juan.martinez@itcelaya.edu.mx

José Alfredo Padilla Medina

Tecnológico Nacional de México en Celaya

alfredo.padilla@itcelaya.edu.mx

Elías José Juan Rodríguez Segura

Tecnológico Nacional de México en Celaya

elias.rodriguez@itcelaya.edu.mx

Resumen

El uso de sistemas de inteligencia artificial como redes neuronales artificiales, lógica difusa y algoritmos evolutivos han demostrado con el paso del tiempo una mejora significativa contra los sistemas clásicos al utilizarse como sistemas de predicción, aproximación de modelos, regresión, optimización y control de sistemas complejos en diversos ámbitos. Esto debido a características como la no linealidad y la no necesidad de modelos matemáticos complejos. En esta investigación se presenta una propuesta de aplicación de lógica difusa en algoritmos de control para sistemas de generación eléctrica fotovoltaica utilizados en una micro-red de CD (μ R-CD). La μ R-CD maneja una potencia máxima de 1 kW con un bus de CD de 190 V, esta μ R-CD cuenta con dos Paneles Fotovoltaicos (PFs) de 0.6 kW cada uno, un convertidor CD-CA para interconectar la μ R-CD con la Red Eléctrica Principal (REP) de 1 kW, y un banco de baterías de 115 Ah a 120 V. Los algoritmos de control difuso propuestos cuentan con dos modos de operación, el primero es el modo de control de voltaje, el cual se

encarga de mantener estable el voltaje de salida de los sistemas fotovoltaicos; mientras que el segundo se encarga de extraer la potencia máxima de los mismos. La implementación de los controladores difusos se realizó utilizando el software LabVIEW, realizando pruebas experimentales con la tarjeta de desarrollo NI-myRIO. Por último, se presentan pruebas experimentales donde se demuestra que los algoritmos de control difuso propuestos presentan mejorías al compararlos con los algoritmos clásicos.

Palabra(s) Clave: LabVIEW, Micro-Redes de CD, Sistemas de control difuso, Sistemas fotovoltaicos.

Abstract

The use of artificial intelligence such as neuronal networks, fuzzy logic and evolving algorithms have demonstrated through the years a significant improvement in comparison with the classic systems when are used as prediction systems, model approximation, regression, optimization and complex system control in different topics, mainly due to features such as non-linearity and the lack need for complex mathematic models. This research presents an application proposal for a fuzzy control in algorithms for photovoltaic electric generation applied to a DC microgrid (μ G-DC) capable of managing a 1 kW and a DC bus of 190 V. This μ G-DC has two 0.6 kW photovoltaic panels each, a DC-AC for interconnect the μ G-DC and the electric main grid. Also, it has a 115 Ah, 120 V battery bank. The proposed fuzzy control algorithms have two operation modes. The first one is the voltage control mode, which is in charge of keeping the output voltage level stable prevenient from the panels. The second one extracts the maximum possible power from the panels. The fuzzy control implementation was made using the software LabVIEW, making experimental tests with the NI myRIO. Finally, experimental results are shown, where is demonstrated an improvement of the functioning of the proposed fuzzy control algorithms in comparison witch classic algorithms.

Keywords: Diffuse control systems, LabVIEW, Micro-Networks CD, Photovoltaic systems.

1. Introducción

Las μ R-CDs se están convirtiendo en uno de los principales temas de investigación hoy en día, esto debido a que podrían resolver el problema de escasez de energía que enfrentamos en la actualidad [Yu et al., 2014]. Usualmente, una μ R-CD se compone de: Fuentes generadoras de energía que alimentan la μ R-CD, Convertidores Electrónicos de Potencia (CEPs), así como de fuentes de almacenamiento como banco de baterías y bancos de supercapacitores, además de las cargas conectadas al bus. Todos los componentes antes mencionados requieren de un sistema de administración y control cuya función es monitorear la μ R-CD, tomar decisiones con base en los datos obtenidos y conmutar entre las distintas formas de operación con el objeto de proporcionar estabilidad al bus de CD que usualmente presenta variaciones de voltaje del $\pm 5\%$ del voltaje de operación establecido [Bae and Kwasinski, 2012], [Jin et al., 2014], [Shadmand & Balog, 2014], [Dizqah et al., 2015] y [Morstyn et al., 2016]. Al aplicar teorías de control en μ R-CDs se tienen modelos matemáticos no-lineales, desconocidos o complejos, lo cual ha generado la búsqueda de aplicaciones de técnicas de control inteligente que facilitan el control y la administración de las μ R-CDs. Los sistemas difusos son muy útiles para trabajar con procesos no lineales, multi-variables, y con modelos matemáticos difíciles de definir. Además, esta teoría de control es bastante sencilla en comparación con las teorías de control moderno que utilizan la representación en el espacio de estados [Kakigano et al., 2013]. Por tales motivos, la finalidad de este trabajo es presentar el diseño de dos algoritmos de control difuso que operan sobre un convertidor CD-CD elevador utilizado para interconectar los PFs con el bus de CD de una μ R-CD.

2. Metodología

Descripción General de la Micro-Red

La μ R-CD fue diseñada para manejar una potencia máxima de 1 kW, con un bus de CD de 190 V. En figura 1 se presenta el diagrama a bloques de la μ R-CD propuesta, en la cual se representa el flujo de la energía entre los diferentes elementos que conforman el sistema.

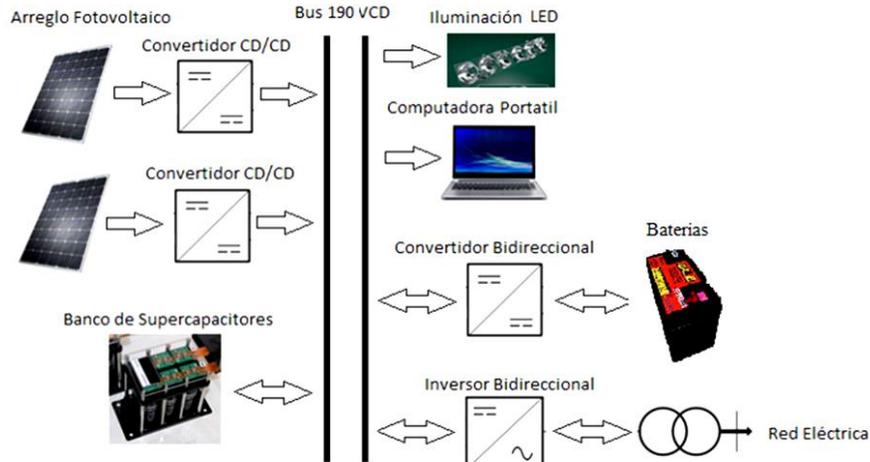


Figura 1 Estructura de una Micro-red de CD.

La fuente principal de energía de la μ R-CD son los PFs, los cuales alimentan cada uno a un convertidor CD-CD elevador con una capacidad de 0.6 kW. Para emular el comportamiento de los PFs se emplearon dos Simuladores de Paneles Fotovoltaicos (SPFs) de la marca Agilent modelo E4360A. El segundo elemento que forma parte de la μ R-CD es el convertidor CD-CA bidireccional, el cual permite interconectar la μ R-CD con la REP, encargándose de transferir a la REP la energía generada por los SPFs que no es utilizada por las cargas locales o por el sistema de almacenamiento de energía.

Convertidor CD-CD Elevador

Cada SPF alimenta a un convertidor CD-CD en topología elevadora. En la figura 2 se presenta el diagrama esquemático de este CEP, el cual fue diseñado para establecer una ganancia de 1.5. Esta ganancia permite asegurar un voltaje de salida del convertidor de 190 V cuando el SPF se encuentra en el punto de potencia máxima.

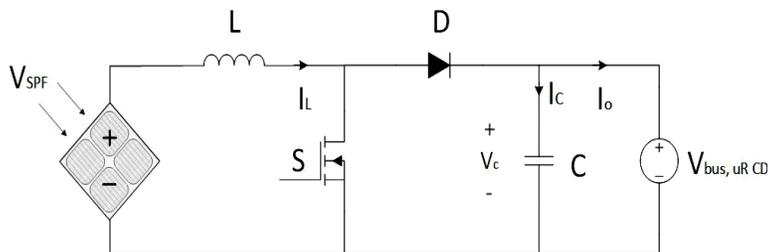


Figura 2 Diagrama esquemático del convertidor CD-CD elevador.

Controladores Lógicos Difusos

La lógica de los conjuntos difusos se introdujo por primera vez por Zadeh, quien introdujo el concepto de la teoría de sistemas y luego se extendió como una técnica de inferencia para el diseño de sistemas expertos difusos. Estos sistemas se han aplicado con éxito en numerosas ocasiones con fines comerciales y de investigación. Su popularidad se debe a la capacidad de modelar la incertidumbre y al uso de mecanismos de inferencia eficientes. Los Sistemas de Control Difusos (SCD) ofrecen un enfoque sistemático para generar algoritmos de control automático utilizando variables lingüísticas considerando el conocimiento de los expertos. Estos controladores presentan ventajas cuando se trabajan con información imprecisa cuyo modelo matemático resultaría demasiado complejo. En la figura 3 se presenta la estructura general de un SCD.

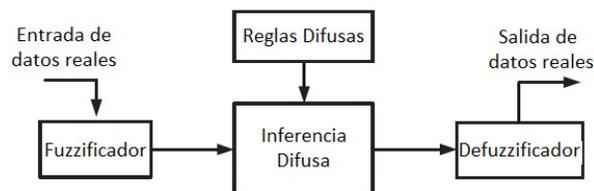


Figura 3 Estructura básica de un SCD.

En la estructura general de un SCD se consideran cuatro componentes generales:

- El fuzzificador, realiza un procedimiento matemático en el que convierte los valores de entrada en un valor en cada función de membresía a las cuales pertenece.
- Conjunto de reglas, las cuales definen el comportamiento del controlador mediante el uso de un conjunto de sentencias SI-ENTONCES.
- La máquina de inferencia, la cual mapea conjuntos difusos de entrada en conjuntos difusos de salida mediante la aplicación de las reglas.
- El defuzzificador, que asigna valores difusos de salida en valores reales.

Las reglas que describen la operación del SCD son expresadas como variables lingüísticas representadas por conjuntos difusos. La salida del SCD se obtiene mediante la aplicación de un sistema de inferencia, el cual define:

- El tipo de funciones de membresía.
- Las conexiones utilizadas para vincular las reglas.
- La función de implicación elegida y 4) el operador de agregación de regla.

Sistemas de Control Locales

La μ R-CD cuenta con dos convertidores CD-CD elevadores conectados con los dos SPFs. Cada uno de estos convertidores tiene un sistema de control local encargado de mantener estable el bus de CD. A continuación, se describen los controladores utilizados en cada convertidor.

Controlador de Voltaje para los Convertidores CD-CD Elevadores

Los convertidores CD-CD elevadores conectados con los SPFs pueden operar en modo Control de Voltaje (CV), en este modo de operación el control se realiza con un controlador PD+I difuso encargado de mantener el voltaje de salida del convertidor CD-CD (voltaje del bus de CD) en un nivel de 190 V. En la figura 4 se ilustra el diagrama del convertidor con el controlador difuso, este controlador monitorea el nivel de voltaje de salida del convertidor y en base a los cambios realiza acciones correctivas para eliminar los efectos generados por las perturbaciones del sistema.

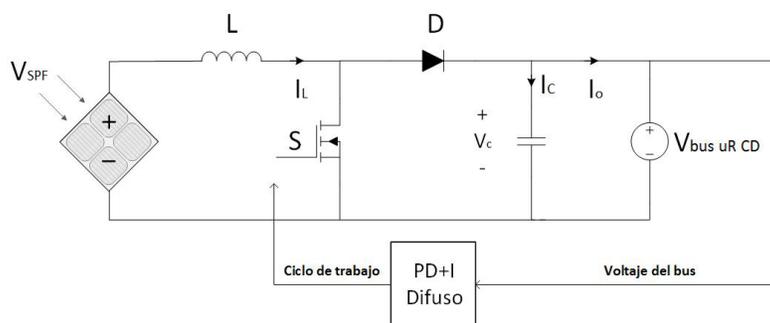


Figura 4 Control en modo voltaje para el convertidor CD-CD elevador.

El controlador difuso PD+I cuenta con dos entradas, la primera entrada (Error) se obtiene al calcular la diferencia entre el valor deseado (SP) del nivel de voltaje de salida del convertidor y el voltaje medido a la salida del mismo (VP), mientras que

la segunda entrada (DSalida) se obtiene de las variaciones que sufre el voltaje de salida del convertidor. La señal de salida del controlador difuso (Duty) proporciona los cambios necesarios en el ciclo de trabajo (D) del interruptor de potencia del convertidor.

Los conjuntos difusos para las variables de entrada y la salida del controlador difuso son Very Negative (VN), Negative (N), Zero (Z), Positive (P) y Very Positive (VP). Las funciones de membresía triangular y trapezoidal son las funciones más populares debido a la fácil representación y a que requieren menor gasto computacional proporcionando resultados satisfactorios. Para el controlador difuso propuesto, las variables de entrada y salida cuentan con dos funciones de membresía trapezoidales y tres funciones de membresía triangulares, como puede apreciarse en la figura 5.

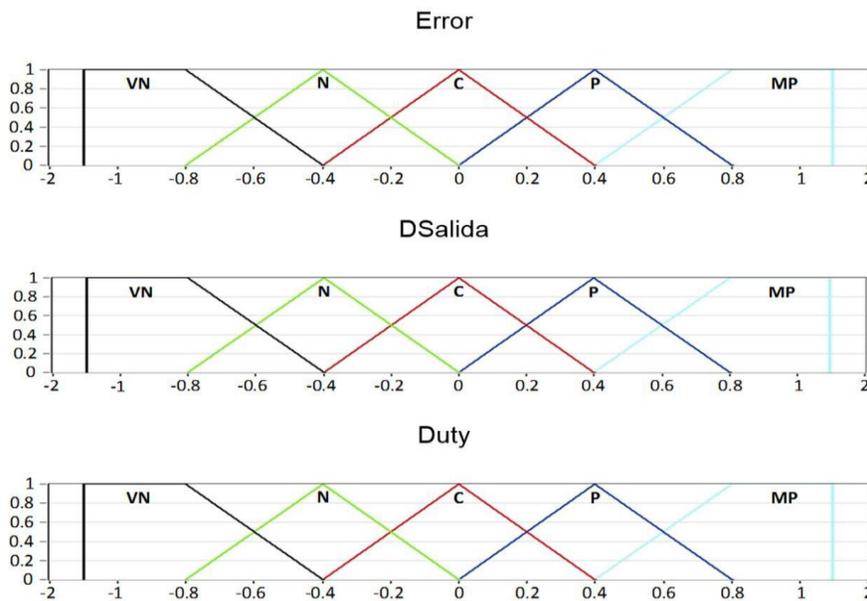


Figura 5 Funciones de membresía para variables de entrada y salida.

El conjunto de reglas difusas se diseñó considerando el principio de funcionamiento de un controlador PD+I difuso, el cual elimina el error que existe entre la variable medida y el valor deseado por el punto de referencia (Set-Point), considerando las variaciones en la variable medida. Por ejemplo, si la entrada "Error" es Very Negative AND la entrada "DSalida" es Very Positive THEN la salida

"Duty" es Negative. En la tabla 1 se ilustran las 21 reglas consideradas para el diseño del controlador difuso. En el proceso de defuzzificación se utiliza el sistema de inferencia difuso tipo Mamdani, en el cual se emplea el método del centroide para obtener la variación del ciclo de trabajo (Duty) en forma de un valor numérico a partir de una salida difusa.

Tabla 1 Reglas difusas tipo AND.

		Error				
		VN	N	Z	P	VP
DSalida	VN	VN	N	VP	VP	VP
	N	VN	N	P	P	
	Z	N	N	Z	P	
	P	N	VN	N	P	
	VP	N	VN	VN	P	

La gráfica que relaciona las variables de entrada con la variable de salida se muestra en la figura 6.

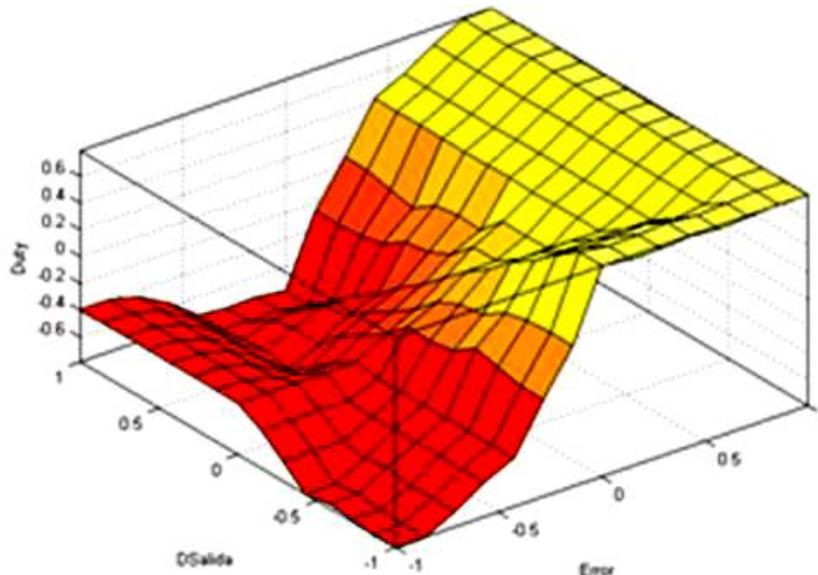


Figura 6 Relación de las variables de entrada y salida del SCD.

Controlador Difuso para el Seguimiento del Punto de Potencia Máxima (SPPM)

El segundo modo de operación de los dos convertidores CD-CD elevadores conectados a los SPF se encarga de extraer la potencia máxima de los SPF utilizando un controlador difuso que basa su funcionamiento en el algoritmo clásico para el SPPM Perturbar y Observar (P&O) que se ilustra en la figura 7.

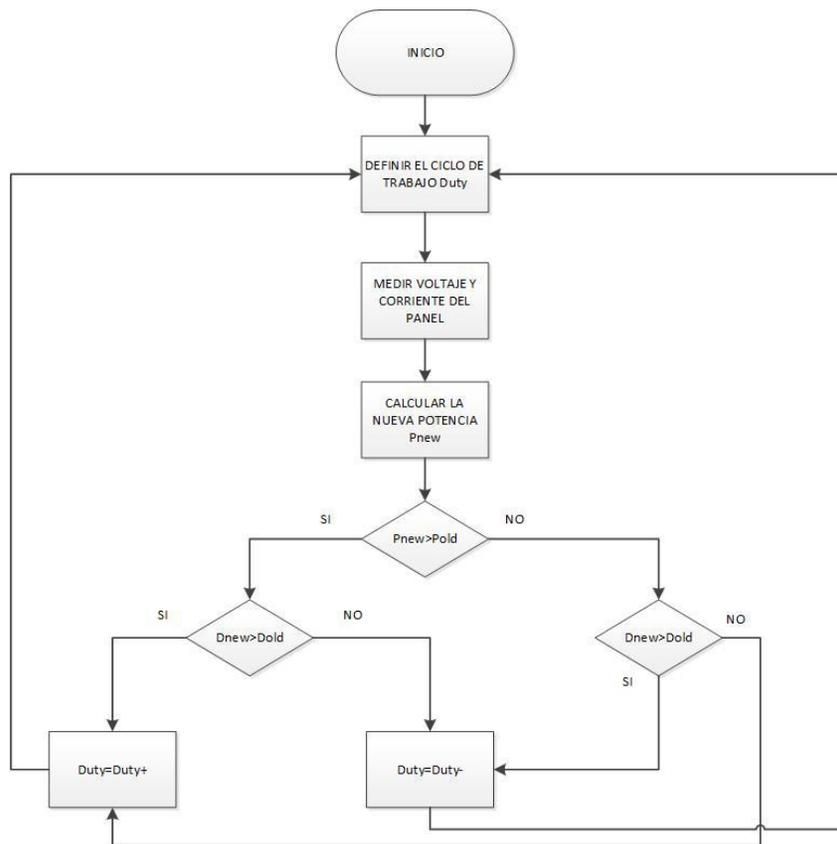


Figura 7 Algoritmo del control Perturbar y Observar.

El principio de funcionamiento de este algoritmo implica perturbar la salida del SPF, esta perturbación genera cambios en la potencia de salida del SPF, estos cambios son juzgados con el principio de generar un aumento en la potencia del SPF. Si la perturbación genera un aumento en la potencia del sistema, la perturbación se sigue generando en esa dirección; de lo contrario, si la perturbación genera una disminución en la potencia, la perturbación se realizará en sentido opuesto.

En la figura 8 se presenta el diagrama del convertidor con el controlador SPPM. Este controlador modifica el ciclo de trabajo del interruptor de potencia y monitorea los cambios en la potencia de los SPF.

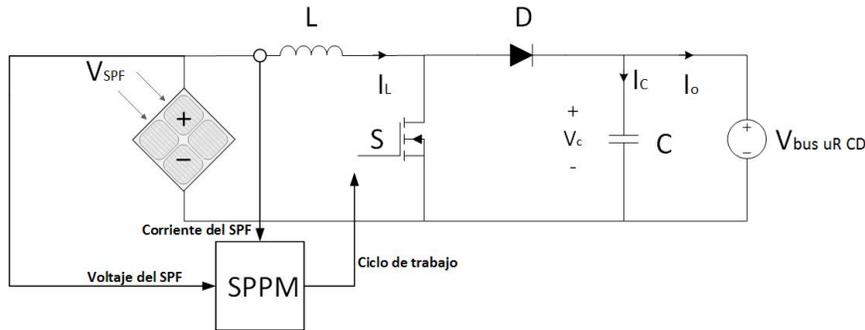


Figura 8 Diagrama del sistema de control SPPM.

El controlador difuso para el SPPM cuenta con las mismas entradas que el algoritmo P&O, en estas entradas se monitorean las variaciones en la potencia del SPF (V_{pot}) y las variaciones en el ciclo de trabajo (V_{duty}). Cada una de estas variables de entrada cuenta con tres funciones de membresía triangulares y dos funciones de membresía trapezoidales que operan en un rango de -1 a 1. La variable de salida define el cambio en el ciclo de trabajo para perturbar el sistema (I_{dut}), esta variable cuenta con las mismas funciones de membresía que las variables de entrada y opera en el mismo rango. El rango de operación de las entradas y salidas del sistema difuso se definieron entre -1 y 1 con la intención de realizar ajustes en los rangos de las señales de entrada y salida, consiguiendo con esto manejar diferentes niveles de potencia.

En la figura 9 se presenta el diagrama del controlador difuso con las ganancias empleadas para manejar una potencia de 500 W en cada SPF.

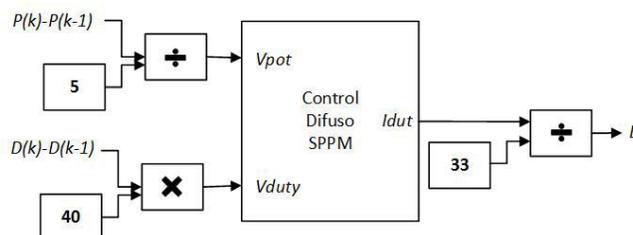


Figura 9 Acondicionamiento para una potencia de 500 W en cada SPF.

En la figura 10 se muestran las variables de entrada y salida, así como las funciones de membresía que las componen. En la tabla 2 se presentan las reglas empleadas para el diseño del controlador difuso. La grafica que relaciona las entradas con la salida y describe el comportamiento del sistema difuso se muestra en la figura 11.

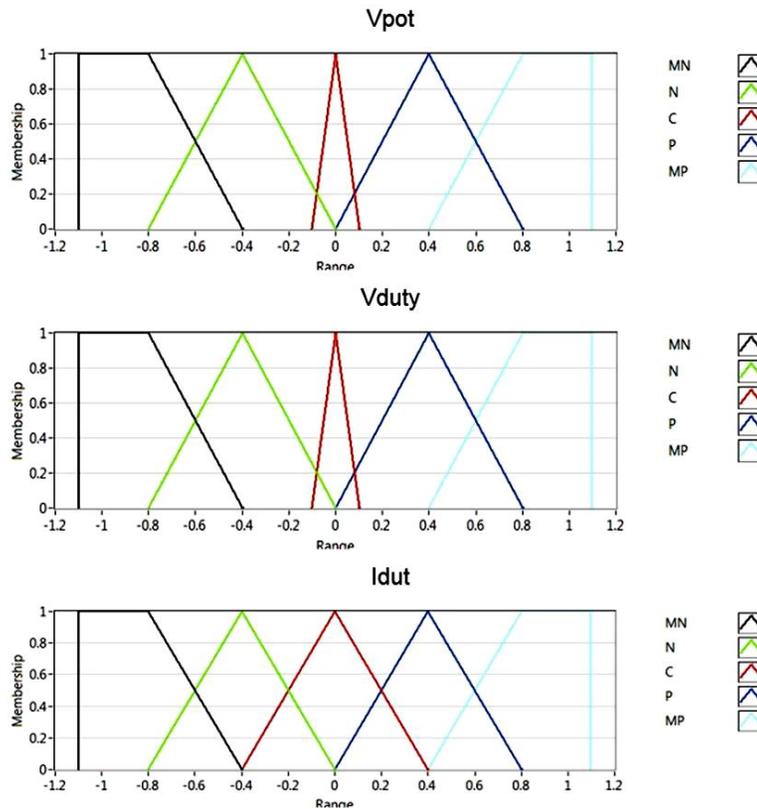


Figura 10 Variables de entrada, salida y funciones de membresía.

Tabla 2 Reglas difusas tipo AND.

		<u>Vpot</u>				
		MN	N	C	P	MP
<u>Vduty</u>	MN	MP	MP		N	MN
	N	MP	MP		MN	MN
	C	P		P	P	
	P	MN	MN		MP	MP
	MP	MN	MN		P	MP

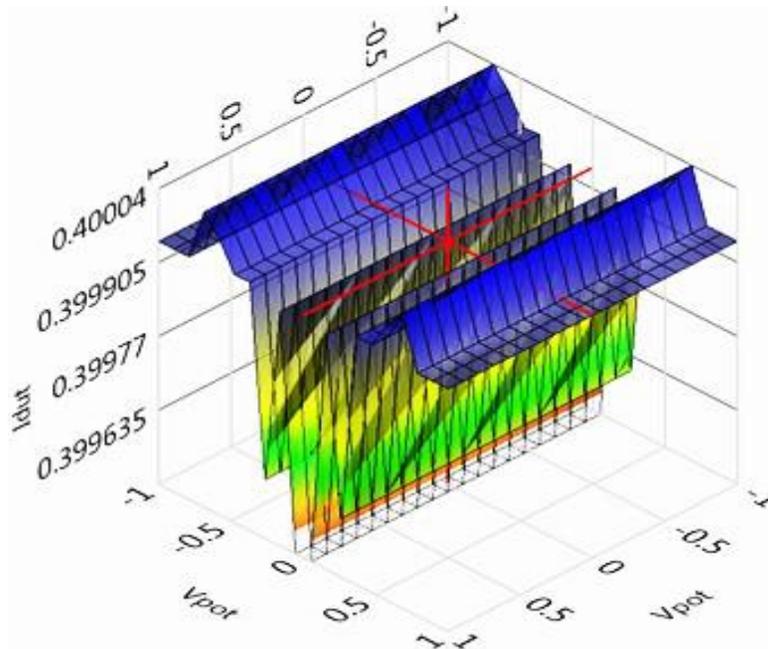


Figura 11 Representación del comportamiento del sistema difuso.

3. Resultados

Comparación de Algoritmos de Control para el SPPM

Dentro de la literatura se ha demostrado que los SCDs presentan ventajas sobre los sistemas de control clásico. A continuación, se comprueba esta teoría al comparar un algoritmo de control para el SPPM clásico P&O contra un algoritmo de control difuso basado en la misma lógica aplicados en sistemas fotovoltaicos. Los resultados del algoritmo de control clásico se muestran en la figura 12, el controlador tarda 17 segundos en alcanzar la potencia máxima del PF, cuando se encuentra en estado estable oscila entre el 97.6% y el 100% de la potencia máxima. Si se desea agilizar la respuesta transitoria del controlador se tendría que aumentar el porcentaje de perturbación, lo que generaría oscilaciones mayores en estado estable. De lo contrario, si se desean disminuir las oscilaciones en estado estable se tendría que disminuir el porcentaje de perturbación, disminuyendo la velocidad en la respuesta transitoria.

En la figura 13 se presenta el comportamiento de la potencia en el PF utilizando el SCD. El tiempo de la respuesta transitoria de este controlador es de 8 segundos, mientras que las oscilaciones en estado estable se mantienen entre el 97.5% y el

100%. Si se quiere disminuir el valor de esta oscilación se perdería la idea de perturbar el sistema para el SPPM.

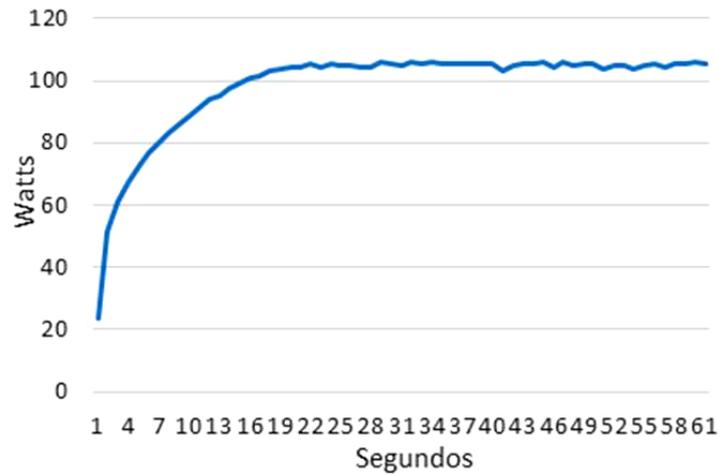


Figura 12 Comportamiento del algoritmo de control P&O.

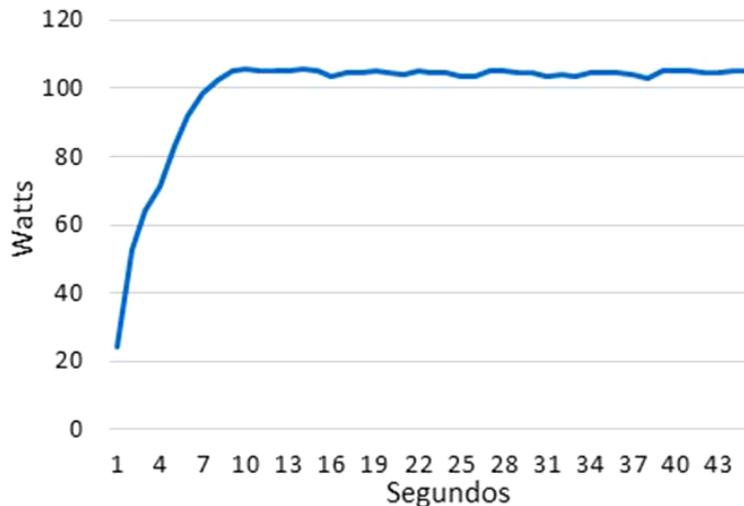


Figura 13 Comportamiento del controlador difuso para el SPPM.

Comparación de Algoritmos de Control de Voltaje

Antes de realizar las pruebas de operación en modo control de voltaje se enciende el SPF, al arranque, el convertidor CD-CD elevador tiene conectada una carga resistiva de 116 W. En la figura 14 se presenta el comportamiento del bus de CD al arranque, el tiempo de la respuesta transitoria es de 6.4 segundos y

alcanza un nivel de voltaje de 128 V generado solo por el encendido del SPF. Después del arranque del SPF se enciende el control clásico PI en modo CV. En la figura 15 se presenta el comportamiento del bus de CD, el nivel deseado del bus es de 190 V y le toma un tiempo de 20 segundos alcanzarlo.

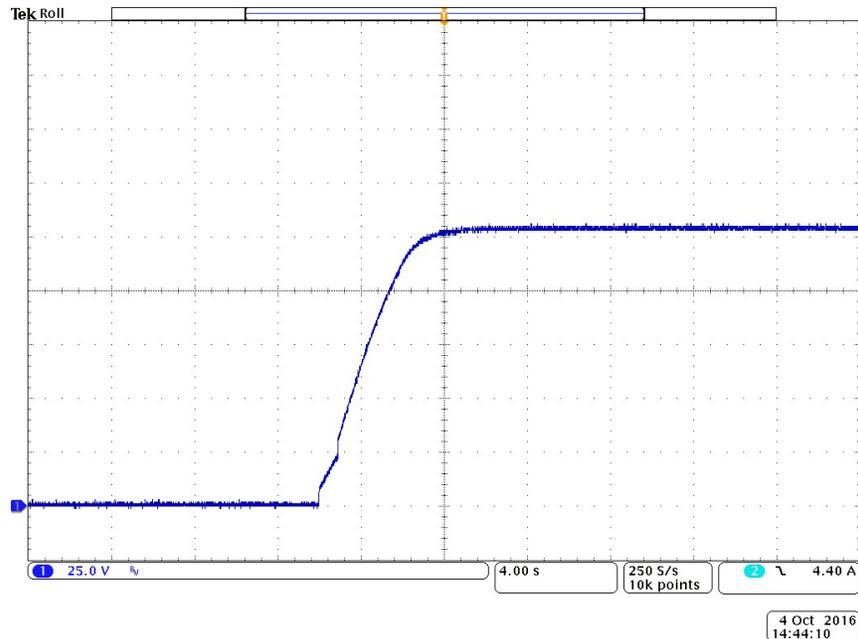


Figura 14 Encendido del SPF.

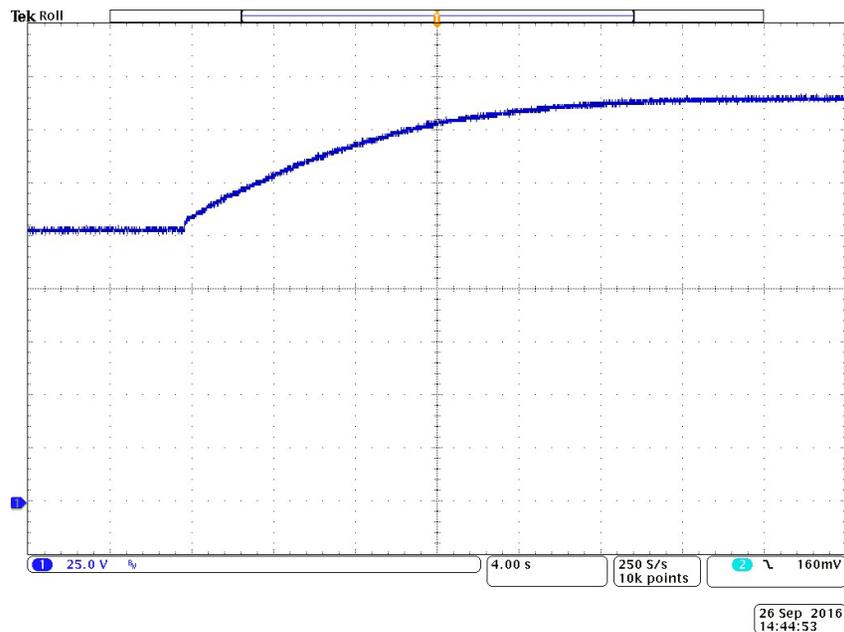


Figura 15 Arranque con acción de control PI.

En la figura 16 se presenta el comportamiento del bus de CD utilizando el controlador difuso, la respuesta transitoria con este sistema de control es de 10 segundos.

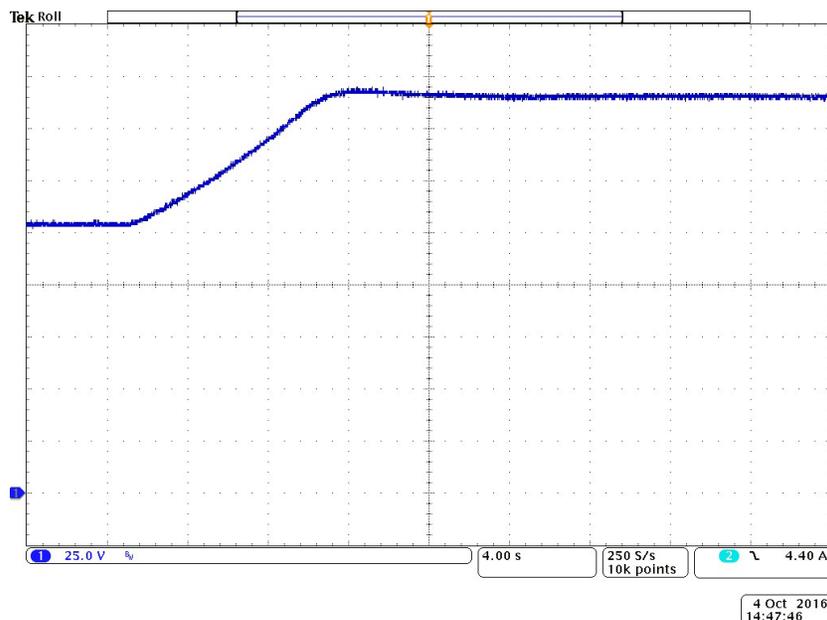


Figura 16 Arranque con controlador difuso.

4. Discusión

En el presente trabajo se describe el comportamiento de los algoritmos de control aplicados en sistemas fotovoltaicos utilizados como fuente generadora de energía renovable en una micro-red de CD. La μ R-CD donde se emplean los sistemas fotovoltaicos se diseñó para manejar una potencia máxima de 1kW con un bus de CD de 190 V, la cual puede operar aislada o interconectada con la REP. Para la administración y control de la energía en la micro-red se implementó un SAC sobre la plataforma NI myRIO-1900 utilizado para el diseño del SAC el software de programación virtual LabVIEW.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Bae, S., & Kwasinski, A. (2012). Dynamic modeling and operation strategy for a microgrid with wind and photovoltaic resources. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 3(4), 1867-1876.

- [2] Dizqah, A. M., Maheri, A., Busawon, K., & Kamjoo, A. (2015). A multivariable optimal energy management strategy for standalone DC microgrids. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 30(5), 2278-2287.
- [3] Jin, C., Wang, P., Xiao, J., Tang, Y., & Choo, F. H. (2014). Implementation of hierarchical control in DC microgrids. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 61(8), 4032-4042.
- [4] Kakigano, H., Miura, Y., & Ise, T. (2013). Distribution voltage control for dc microgrids using fuzzy control and gain-scheduling technique. *IEEE transactions on power electronics*, 28(5), 2246-2258.
- [5] Morstyn, T., Hredzak, B., Demetriades, G. D., & Agelidis, V. G. (2016). Unified distributed control for dc microgrid operating modes. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 31(1), 802-812.
- [6] Shadmand, M. B., & Balog, R. S. (2014). Multi-objective optimization and design of photovoltaic-wind hybrid system for community smart DC microgrid. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 5(5), 2635-2643.
- [7] Yu, X., She, X., Zhou, X., & Huang, A. Q. (2014). Power management for DC microgrid enabled by solid-state transformer. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2), 954-965.