

Alternativa de desarrollo de un controlador difuso para convertidor tipo buck en la regulación de voltaje

Francisco Macias¹, J. Martínez Patiño² y Fernando Jurado²

, Departamento de Ingeniería eléctrica¹, Departamento de la Maestría en Ingeniería Eléctrica²

Universidad de Guanajuato¹, Tecnológico Superior de Irapuato²

Irapuato, Gto.; México

ff.macias@ugto.mx , jesusmp23@gmail.com , fernando.jp@irapuato.tecnm.mx

Abstract— The constant search for optimization of time and resources in power processing give the challenge for development of new techniques that contribute to this purpose, in power electronics. The mathematical technique called fuzzy logic provides a different perspective by having within its properties the management of expert systems that once the main input and output variables of the system have been detected offer to perform the same task as its analytical homonym, therefore the objective in this work is the development of a fuzzy controller for a dc-dc buck converter implemented in a photovoltaic solar system, developing a methodology that allows to reduce the heuristics in its development.

Keyword— Fuzzy logic, Buck converter.

Resumen— La búsqueda constante de optimización de tiempos y recursos en el procesamiento de potencia plantea el reto para el desarrollo de nuevas técnicas que contribuyan a dicho propósito en el área de la electrónica de potencia. La técnica matemática llamada lógica difusa brinda una perspectiva diferente al tener dentro de sus propiedades el manejo de sistemas expertos que una vez detectadas las variables principales de entrada y salida del sistema ofrecen realizar la misma tarea que su homónimo analítico, por ello el objetivo en el presente trabajo es el desarrollo de un controlador difuso para un convertidor reductor dc-dc tipo Buck implementado en un sistema solar fotovoltaico, desarrollando una metodología que permita disminuir la heurística en el desarrollo del mismo.

Palabras clave—Lógica difusa, convertidor Buck.

I. INTRODUCCIÓN

En el presente siglo se establecieron las bases de la ingeniería eléctrica a nivel mundial, sentando escenarios técnicos, sociales al abrir el camino hacia la era de la electrónica de potencia, y evolucionando los sistemas de transmisión, distribución, generación, consumo y control de la energía eléctrica, debido a la transformación de los sistemas de potencia y el nacimiento de necesidades ambientales y sociales tales como la contaminación, la escases de recursos, la independencia de los combustibles fósiles para la generación de energía, etc.

Los antecedentes de la electrónica, el desarrollo e incorporación de reguladores de tensión conmutados, presentan un papel estratégico en cada una de las acciones a realizar a modo de poder aprovechar de una mejor manera la energía; partiendo de la creciente demanda de energías renovables, existen numerosas razones que avalan la utilización de reguladores conmutados frente a sus homólogos lineales radicando su superioridad en sus altos rendimientos, la capacidad de procesar igual cantidad de potencia con menores dimensiones, además de su particularidad de elevar o disminuir tensiones superiores e inferiores a la tensión de salida.

La conceptualización de los reguladores conmutados dc-dc inicia en dos etapas principales: la conversión de potencia encargada de administrar lo más eficiente posible la energía de entrada y el sistema de control encargado de regular la tensión de salida acorde a las especificaciones de diseño tanto estáticas

como dinámicas definidas. En donde la primera etapa se encuentra constituida por elementos eléctricos activos, en tanto que la segunda etapa de control es formada por elementos conmutadores capaces de cambiar de estado de conmutación a intervalos de tiempo fijos o variables, siendo el algoritmo de control quien define el intervalo y la posición de los elementos conmutadores para asegurar una máxima transferencia de energía.

A. Alternativa de control difuso en la regulación de tensión

Los sistemas difusos se basan en la teoría del control difuso introducida por L.A. Zadeh en 1965 (Zadeh, Fuzzy Sets, 1965), dicha teoría establece una manera de cuantificar relaciones de variables de naturaleza imprecisa mediante el lenguaje, asignando una letra a una variable física y un adjetivo como término lingüístico de la variable, del tipo “alto”, “bajo”, “angosto”, “ancho” etc. Las suposiciones anteriores son conocidas como reglas difusas y se conforman con un antecedente (si), y un consecuente (entonces). Este tipo de sistemas permiten inferir el valor de una variable física mediante la utilización de un conjunto de reglas lingüísticas. Dejando la posibilidad de ser aplicadas en una estrategia de control automático creando el concepto de “controlador difuso”.

En este sentido el antecedente se toma como el error de control, y la derivada del error, de la variable de salida quedando el consecuente como el incremento de control, partiendo de esta filosofía la complejidad de las reglas de control resultantes es minimizada a un grado mucho menor en comparación a sus homólogos no lineales, sin embargo, la imprecisión, consecuencia inherente de las reglas de control lingüísticas sufre un ajuste heurístico de los parámetros del controlador difuso. Con esta debilidad presente, es posible incluir cierta parte del control de forma analítica con el desarrollo de controladores híbridos como el controlador de (Takagi & Sugeno , 1985).

Zadeh propone una nueva forma de matemáticas para atacar el problema de la incertidumbre (Zadeh, Fuzzy Sets, 1965), que no sea descrito en términos de probabilidad, fundamentados en la lógica aristotélica, desde sus inicios la lógica difusa trajo controversia al mundo científico donde expertos científicos en probabilidad veían la teoría en contra de los principios básicos del método científico; el mayor problema fue la falta de aplicaciones reales en su inicio.

Sin embargo, el trabajo de Zadeh sobre algoritmos difusos en 1968 (Zadeh, Fuzzy Algorithms, 1968), toma de decisiones en ambientes difusos (Bellman & Zadeh, 1970), (Zadeh, Similarity relations and fuzzy ordering, 1971).

En el año de 1973 L.A. Zadeh muestra lo que será el origen del control difuso en su artículo (Zadeh, Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, 1973), además de preceder uno de los eventos más importantes en el área de control, el nacimiento del primer controlador difuso propuesto por Mamdani y Assilian en 1975 para una máquina de vapor (Mamdani & Assilian, 1975), donde se aprecia la facilidad de construcción y buen funcionamiento del controlador con base en la lógica difusa.

A finales de los setenta y principio de los años ochenta fueron pocos los centros de investigación que continuaron con la exploración del campo, debido al poco apoyo que se le otorgo a esta nueva línea de investigación, sin embargo, en Japón fue donde la curiosidad de los ingenieros hacia nuevos retos, además de la ventaja de no requerir modelos matemáticos de los procesos a controlar, proporcionó la herramienta adecuada para situaciones donde el control clásico no había sido implementado. Fue (Takagi & Sugeno , 1985) a principios de los ochenta el que implemento el control difuso en una planta purificadora de agua, además de realizar en 1983 un sistema de control para un robot.

En julio de 1987, donde la segunda Conferencia de la Asociación Internacional de Sistemas Difusos tomó lugar en Tokio; la comunidad científica japonesa mostró en diferentes aplicaciones lo que la lógica difusa enfocada al control era capaz de hacer. Después de la conferencia, la comunidad científica

internacional rompió el paradigma negativo hacia la lógica difusa y en el año de 1992 la primera Conferencia Internacional de la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sobre Sistemas Difusos fue Realizada en San Diego, simbolizando la aceptación de esta nueva técnica por la comunidad científica internacional, desde ese momento son innumerables las disciplinas de la ciencia que han puesto a prueba la lógica creada por Zadeh.

Las referencias encontradas en la literatura sobre la aplicación del control difuso en convertidores dc-dc no es tan amplia, comenzando su historia aproximadamente en las últimas tres décadas, sin embargo no fue una implicación que escapara a los ojos de los investigadores en aquellos años citando a Fumio Ueno, (Ueno, Inoue, Oota, & Sasaki, 1991) donde presenta un controlador difuso de tipo PI (proporcional integral) para un convertidor conmutado Cuk, exponiendo la dificultad de control por medio de los métodos tradicionales. En este trabajo demuestra cómo se puede tomar el error y su derivada como variables de entrada y el ciclo de trabajo de la tensión de salida como únicas variables para implementar el control del regulador reductor tipo Buck. Aunque el diseño propuesto es totalmente heurístico, los resultados obtenidos son altamente aceptables y comprobables contra su homólogo PID (proporcional integral derivativo). Al abrir Fumio Ueno el camino de la aplicación de la lógica difusa para control de pequeñas potencias en reguladores conmutados, más investigadores se sumaron al experimentar con consecuentes lingüísticos de todo tipo, en su mayoría acampanados y singleton, no obstante, el diseño para la regulación de la tensión de salida sigue siendo heurístico.

Por otra parte P. Mattavelli (Mattavelli, Rosseto, Spiazzi, & Tenti, 1997), propone una serie de reglas para la elaboración de un controlador difuso aplicable a cualquier tipo de controlador, separando la acción proporcional e integral en dos controladores con salidas difusas y tres variables de entrada, sin embargo, su elaboración sigue siendo heurística.

B. Procesamiento de potencia

El amplio campo de la ingeniería eléctrica se puede clasificar en tres grandes áreas: electrónica, potencia y control (W. Erickson & Maksimovic, 2004); regularmente cuando se escucha la palabra “electrónico” viene a la mente imágenes de circuitos, procesamiento de señales etc. a la vez que “electricidad” con motores, transformadores, líneas de transmisión etc. (Newell, 1973), Sin embargo, al combinar las tres áreas se puede obtener un control o regulación al poder procesar la energía. El campo de la electrónica de potencia es referido habitualmente al procesamiento de la potencia eléctrica mediante dispositivos donde los elementos clave son los convertidores de conmutación (W. Erickson & Maksimovic, 2004), en un convertidor dc-dc se tiene como elementos de entrada y salida los observados en la Figura 1, donde el voltaje de salida puede ser de mayor o menor magnitud, además de tener la posibilidad de una salida con polaridad contraria, aislamiento de referencias de tierra de las entradas etc.

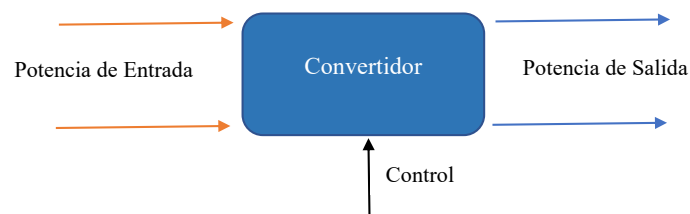


Fig. 1. Modelo básico de procesamiento de potencia (W. Erickson & Maksimovic, 2004).

Cada día crece la demanda por convertidores conmutados cada vez más pequeños, ligeros y eficientes (Cheong, Ioinovici, & Chung, 1993), donde las diferentes secciones de los convertidores tienen que ser

mejoradas buscando la mayor eficiencia del convertidor (Newell, 1973), por ello la importancia de reconocer el tipo de semiconductor que actuara como compuerta, buscando siempre sea el óptimo para la clase de carga a la que se suministra energía.

El convertidor reductor genera una tensión de salida v_s menor a la tensión de entrada v_e ; para estudiar el comportamiento del convertidor se deberá tomar en consideración las siguientes condiciones: carga puramente resistiva, interruptor ideal y tensión v_e de entrada constante.

La imagen de la Figura 2. muestra el diagrama equivalente de un convertidor Buck utilizado.

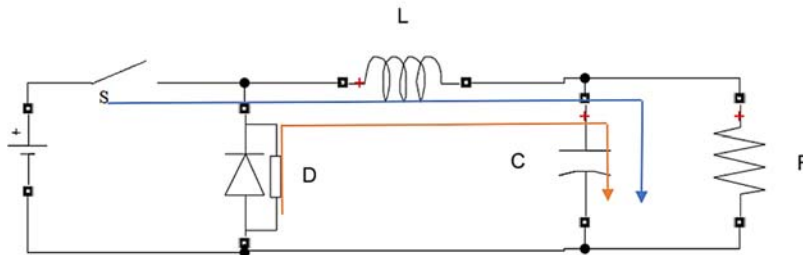


Fig. 2. Diagrama del convertidor Buck con carga puramente resistiva.

Al darse cuenta de la importancia del papel que juega del ciclo de trabajo en el convertidor para elevar la eficiencia de este, nos da una perspectiva que puede ser utilizada como guía para encontrar nuevas formas de confrontar las pérdidas por conmutación, como es el caso de la lógica difusa.

La línea de color azul de la Figura 2, muestra la dirección de la corriente cuando el interruptor S se encuentra cerrado, la línea de color naranja muestra la dirección de la corriente cuando el interruptor S se encuentra abierto, lo que en la literatura es conocido como modo de conducción continua y discontinua respectivamente.

Algunas de las ventajas de los convertidores Buck radican en las pocas pérdidas que se tienen, además de la eficiencia que puede alcanzar fácilmente el 97% (Roberts, 2016) y una de las desventajas principales es cuando es aplicada una técnica de PWM para controlar el convertidor debido a que el rizo de salida de la retroalimentación al controlador requiere de valores mínimos para poder controlar adecuadamente el valor del voltaje de salida.

II. CONTROLADORES DIFUSOS.

La lógica difusa propone un cierto grado de pertenencia para alguna variable que se presente dentro de los conjuntos difusos, en consecuencia, admite a un controlador difuso tomar diferentes grados de acción en el sistema, es de mencionar que es necesario el conocimiento experto del sistema con la finalidad de establecer la base de conocimiento con base en la cual se tomarán las decisiones del controlador.

La estructura básica de un controlador se puede apreciar en la Figura 3, donde el bloque de fuzzyficación es el encargado de descifrar el grado de membresía de los datos dentro del controlador, posteriormente toma lugar la etapa de inferencia que junto con la base de conocimiento desarrollada de los expertos manejarán la forma en que se comportará el controlador, el conjunto de reglas que forman la base de conocimiento son del tipo antecedente-consecuente es decir “si-entonces”, para finalizar el proceso la etapa de defuzzyficación es la encargada de tomar los valores difusos desarrollados en la inferencia y convertirlos en valores cuantificables para el sistema a controlar, más adelante se definirá de forma más precisa el papel de cada bloque.

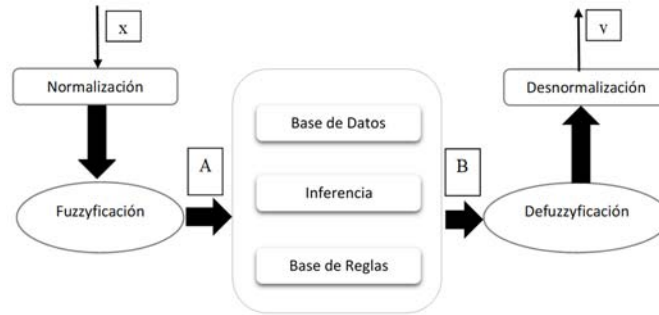


Fig. 3. Estructura de un controlador difuso.

Basados en la Figura 3, la función que representa cada bloque en el controlador difuso es:

- *Normalización/Desnormalización:*
Son bloques opcionales encargados de pasar de los dominios físicos de las variables a sus dominios normalizados, en la literatura se pueden encontrar como márgenes de operación del hardware.
- *Fuzzyficación / defuzzyficación:*
Son los encargados de definir los algoritmos mediante los cuales un valor numérico pasa a su correspondiente conjunto difuso y viceversa.
- *Base de Datos:*
Se encuentra formada por la información de las funciones de pertenencia asociada a los valores lingüísticos que intervienen en los antecedentes y consecuentes. En determinados casos contiene el tipo y mapeo de funciones de pertenencia, así como, los dominios físicos de cada variable y los dominios normalizados.
- *Base de reglas:*
Está formada por la información de las variables de entrada y de salida del controlador, el conjunto de valores lingüísticos asociados a las variables de entrada/salida y las reglas de control fijando los antecedentes y los consecuentes de cada una de ellas además de realizar los ajustes necesarios para llevar el número de reglas a utilizar al mínimo.
- *Inferencia:*
Basada en la composición de todas las reglas para obtener los resultados de las variables difusas. Para un correcto diseño del controlador que se ajuste a los objetivos se deben de establecer diferentes variables en determinado orden para minimizar la parte heurística de (Gomaríz Castro & Guinjoan Gispert, 2012):
 - I. Las variables físicas de entrada y salida del controlador.
 - II. Los factores de escalado que permiten la normalización o no normalización.
 - III. Los algoritmos de fuzzyficación y defuzzyficación.
 - IV. La base de datos.
 - V. La base de reglas.
 - VI. Establecer el algoritmo de inferencia.

De tal forma se eligen las variables entrada y salida.

Recordando que la elección de las variables de control está en función del tipo de problema y manejo de información física. Los controles más comúnmente utilizados son del tipo P (proporcional), PI (proporcional integral), PD (proporcional derivativo), PID (proporcional integral derivativo) difusos los

cuales reciben el mismo nombre que sus homónimos lineales convencionales por el tipo de entrada que reciben.

Se pueden distinguir diferentes variables lingüísticas para los antecedentes de estos controladores:

- El error: $e(t), e(k)$
- El cambio del error: $de(t), \Delta e(t)$
- La suma del error: $\int e(t), \sum e(k)$

Las variables lingüísticas de salida son:

- La salida de control: $u(t), u(k)$
- El cambio de la salida del error: $du(t), \Delta u(k)$

Al escoger las variables de entrada y salida para el controlador pueden dar lugar a los siguientes tipos de reglas para la selección del tipo de controlador difuso. Los factores de normalización y desnormalización también llamado de escalado pueden ser vistos como el papel que juegan los coeficientes de ganancia de los controladores convencionales, éstos aparecen cuando se trabaja en dominios normalizados.

Dichos factores de escalado son utilizados para apartar la base de reglas del diseño del controlador, además de los diferentes bloques descritos (fuzzyficación, inferencia, defuzzyficación etc.) de los dominios físicos de las variables.

En el momento que ocurra un cambio en las variables solo se tendrá que ajustar los factores de escalado, por tanto, puede deducirse que estos factores pueden traer estabilidad e inestabilidad al sistema. El algoritmo de fuzzyficación puede verse como el proceso mediante el cual una entrada numérica se transforma en un conjunto difuso de entrada.

Observe la siguiente expresión de inferencia:

$$\mu_R(u) = \min \{ \min [\mu_E(e^*), \mu_{\Delta E}(\Delta e^*)] \mu_U(u) \} \tag{1}$$

Si se analiza la ecuación con determinación se puede observar que las salidas a la hora de aplicar el algoritmo de fuzzyficación será $\mu_E(e^*), \mu_{\Delta E}(\Delta e^*)$ en la Figura 4, se muestra el proceso de fuzzyficación para la ecuación previa.

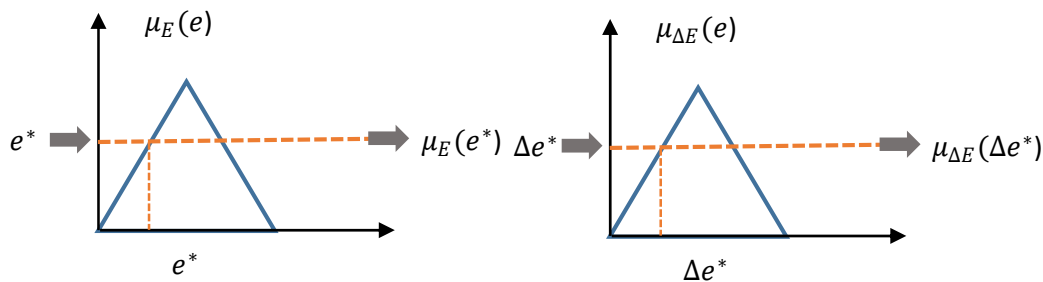


Fig. 4. Proceso de fuzzyficación para las entradas del sistema (Gomaríz Castro & Guinjoan Gispert, 2012).

Las reglas difusas como se mencionó previamente representan el estado y la estrategia de control, sin embargo, cuando se asignan valores específicos en las variables de entrada, el proceso de inferencia se hace necesario para el cálculo de la salida a la sentencia “entonces” dicho resultado se da en conjuntos difusos y son tantos como el número de reglas propuestas.

Por lo que la defuzzyficación puede ser visto de la manera más simple como un proceso matemático por el cual un conjunto difuso es transformado en un número real. Como se menciona en los puntos anteriores en el proceso de inferencia y agregado los resultados de ambos son conjuntos difusos y el algoritmo de defuzzyficación debe ser representativo del conjunto obtenido en la etapa de agregado, es por ello por lo que existe en la literatura diferentes algoritmos de defuzzyficación que arrojan diferentes resultados.

En seguida, en la Figura 5, se observa el proceso para la ecuación planteada a continuación:

$$\mu_U(u) = \max \{ \mu_{C_U^1}(u), \dots, \mu_{C_U^n}(u) \}$$

Por lo tanto, el proceso de defuzzyficación debe concluir en un valor fijo u^* a partir del conjunto difuso U como lo muestra la Figura siguiente:

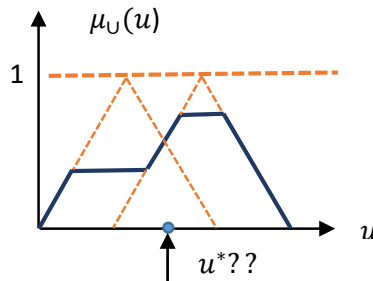


Fig. 5. Proceso de defuzzyficación (Gomariz Castro & Guinjoan Gispert, 2012).

Se debe ser cauto a la hora de seleccionar la metodología de defuzzyficación, cuya decisión de elección debe ser inherente al problema que se quiera resolver. Las metodologías pueden llegar a ser complejas en algunos casos y en otros puede representar una mayor carga computacional.

A continuación, se enuncian algunos de los métodos más comunes:

- Criterio de máximo.
- Método del centro de área.
- Método de la media de máximo.
- Método del máximo más chico.
- Método del máximo más grande.

La Figura 6, muestra los diferentes métodos antes mencionados.

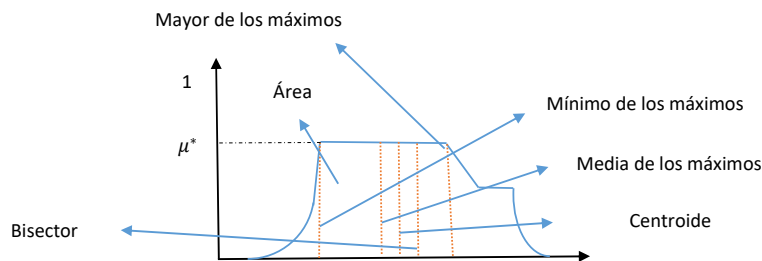


Fig. 6. Diferentes métodos de defuzzyficación (Diciembre Sanahua, 2017).

Actualmente el método de defuzzyficación por centroide o centro de gravedad es considerado de los mejores en la literatura contemporánea (Lee, 1990). Este algoritmo determina el centro de gravedad de área de la combinación de conjuntos difusos de salida, la Figura 7, muestra gráficamente el método previamente descrito por centro de área.

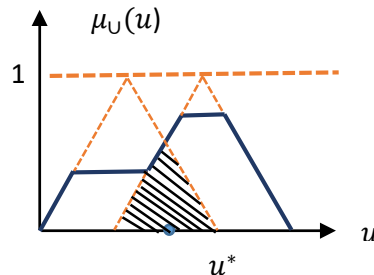


Fig. 7. Defuzzyficación por centro de área (Gomariz Castro & Guinjoan Gispert, 2012).

Donde el cálculo analítico se realiza por medio de la siguiente ecuación:

$$u^* = \frac{\int_U u * \mu_U(u) du}{\int_U \mu_U(u) du}$$

La obtención de las reglas de control derivará en el grado de resolución del controlador además de definir su comportamiento dinámico, por ello la forma de obtenerlas y definir las es menester en determinados problemas de control. Existen dos formas por las cuales se pueden obtener:

- Por conocimiento empírico y experto
Se da cuando las reglas son obtenidas por conocimiento empírico del operador al tener y desear cierto conocimiento del sistema, por tanto, esta metodología es puramente heurística.
- Analíticamente
Las reglas son obtenidas de procesos analíticos, basados en controladores convencionales lineales o no lineales.

III. DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO.

Como se describe a continuación, se presenta una alternativa de diseño de controladores difusos para convertidores dc-dc reductor Buck, para ello se utilizarán las herramientas básicas del control difuso que se presentaron en la sección II. La metodología a seguir muestra como variables de entrada, al error y la derivada del error de la tensión de salida del convertidor; la variable de salida del convertidor será la variación del ciclo de trabajo del convertidor.

La propuesta de diseño pretende como bien lo describe el título del presente trabajo, así como la mejora en las siguientes formas:

- Disminución de la complejidad computacional del convertidor.
- Conseguir prestaciones similares a los diseños convencionales.
- Disminuir la brecha heurística de diseño.

Se propone un controlador proporcional integral que puede ser aplicado al ciclo de trabajo del convertidor Buck cuyo conjunto de reglas se obtiene mediante el conocimiento de un experto del sistema, en la Figura 8, se muestra el diagrama de bloques del convertidor.

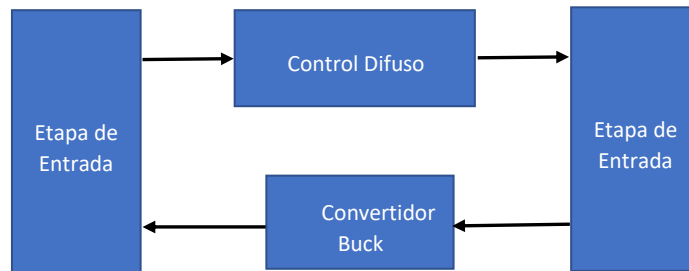


Fig. 8. Diagrama de bloques del convertidor con controles difusos.

Las variables de entrada se muestran en las ecuaciones.

$$e_k = V_{sk} - V_{ref}; \quad e_N = GE^{-1}(V_{sk} - V_{ref})$$

$$ce_k = e_k - e_{k-1}; \quad ce_N = GR^{-1}(e_k - e_{k-1})$$

El tomar estas variables como entrada permiten interpretar de manera adecuada y sencilla las reglas de control y así proponer lingüísticamente la interpretación. La variación del ciclo de trabajo se denota como *du* como se muestra en la siguiente ecuación.

$$u_k = u_{k-1} + GU * du_k$$

A continuación, se presentan las variables lingüísticas de entrada. La literatura (Gomaríz Castro & Guinjoan Gispert, 2012) propone cinco funciones de pertenencia por cada variable de entrada como lo muestra la Figura 9.

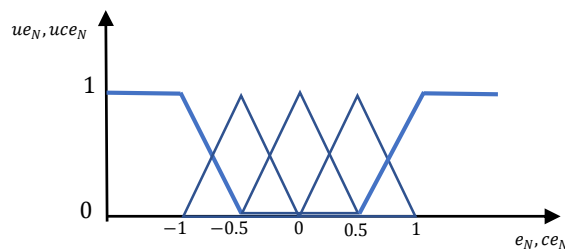


Fig. 9. Funciones de pertenencia de las variables lingüísticas.

La Figura 9, define al universo de discurso de -1 a 1, las oraciones que señalan las funciones de pertenencia de la figura previas mostradas en la presente investigación.

$$GN = trapezoidal(e: -1, -1, -1, -0.5)$$

$$PN = triangular(e: -1, -0.5, 0)$$

$$C = triangular(e: -0.5, 0, 0.5)$$

$$PP = triangular(e: 0, 0.5, 1)$$

$$GP = triangular(e: 0.5, 1, 1, 1)$$

Las ecuaciones previas permiten vislumbrar como máximo cuatro reglas de control que se relacionarán con la acción de control dependiendo de la salida de tensión del regulador. A continuación, se describe lingüísticamente el conjunto de reglas:

1. Si la tensión de salida del convertidor está lejos de la tensión de referencia entonces el cambio en el ciclo de trabajo debe ser grande.
2. Si la tensión de salida del convertidor es semejante a la tensión de referencia entonces el cambio en el ciclo de trabajo debe de ser pequeño.
3. Si la tensión de salida del convertidor es muy cercana a la tensión de referencia entonces el ciclo de trabajo permanecerá constante.
4. Si la tensión de salida del convertidor es mayor o menor que la tensión de referencia entonces el signo del incremento del ciclo de trabajo debe ser positivo o negativo.

La Figura 10, muestra la superficie de control para la correspondiente acción del sistema.

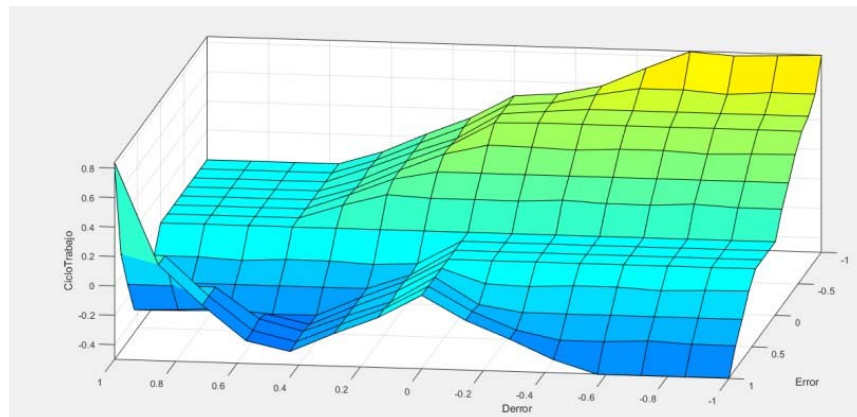


Fig. 10. Superficie de control del sistema.

La Tabla I, muestra la base de las reglas del control difuso propuesto.

Tabla I. Tabla de reglas del controlador difuso (Gomaríz Castro & Guinjoan Gispert, 2012).

e\ce	GN	PN	C	PP	GP
GP	-0.3	-0.35	-0.45	-0.65	-1
PP	0	-0.1	-0.2	-0.35	-0.5
C	0.2	0.1	0	-0.1	-0.2
PN	0.5	0.35	0.2	0.1	0
GN	1	0.65	0.45	0.35	0.3

En la siguiente Figura 11, se puede apreciar la implementación del sistema en el cual se probaran las reglas del controlador.

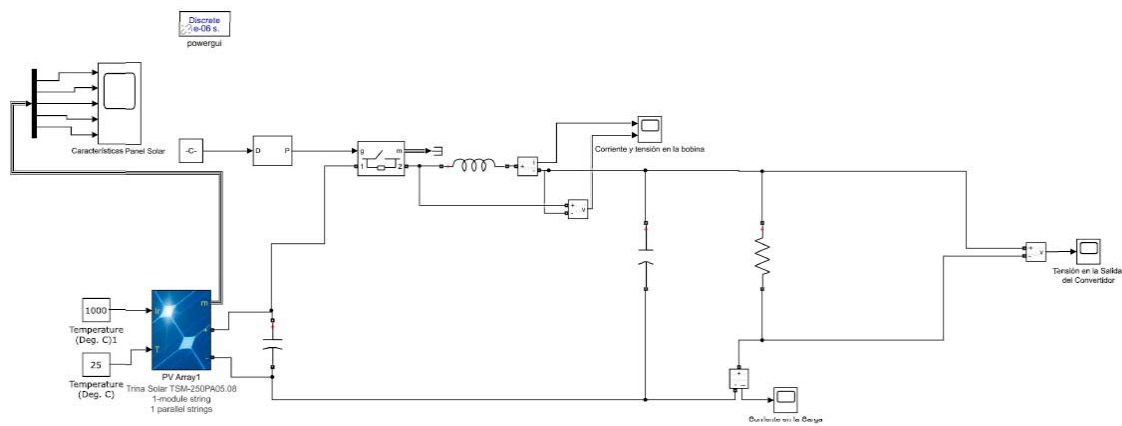


Fig. 11. Sistema a implementar.

La implementación se muestra a continuación en las siguientes figuras utilizando el toolbox Fuzzy Logic Designer de Simulink.

IV. RESULTADOS

La elaboración del controlador se llevo a cabo en la herramienta Fuzzy Logic Designer debido a su aceptación en la literatura además de poder tener efectos comparativos de respuesta. En la Figura 12, se aprecia las reglas del controlador difuso de la Tabla I, y en la Figura 13 se muestra el sistema con dos entradas.

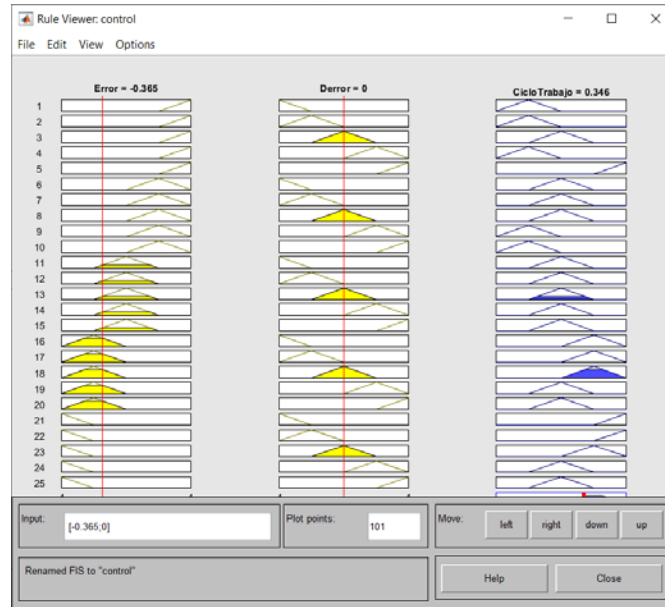


Fig. 12. Implementación de las reglas de control de la tabla I.

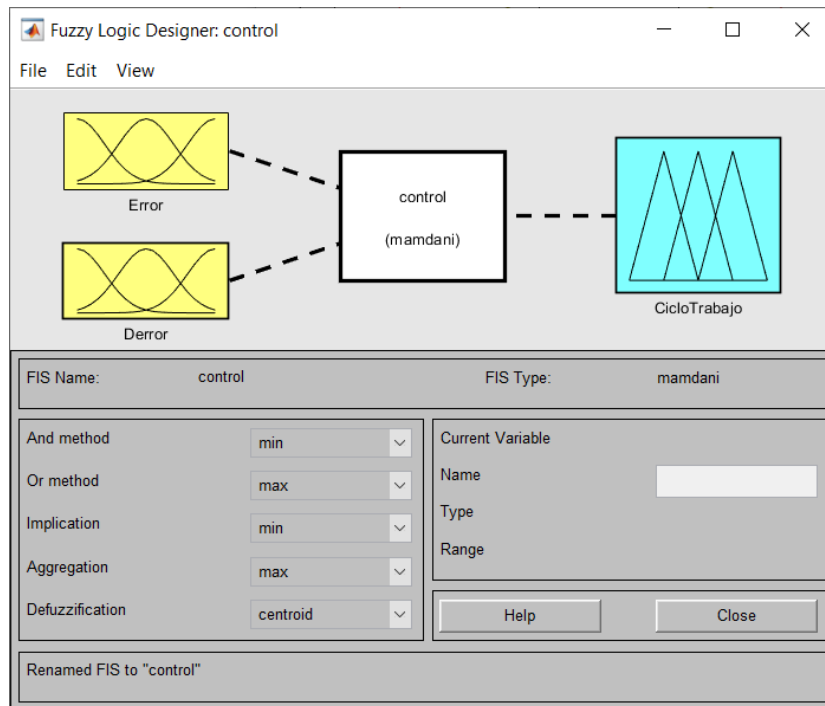


Fig. 13. Introducción del sistema de dos entradas una salida.

Las funciones de membresía se observan en la Figura 14.

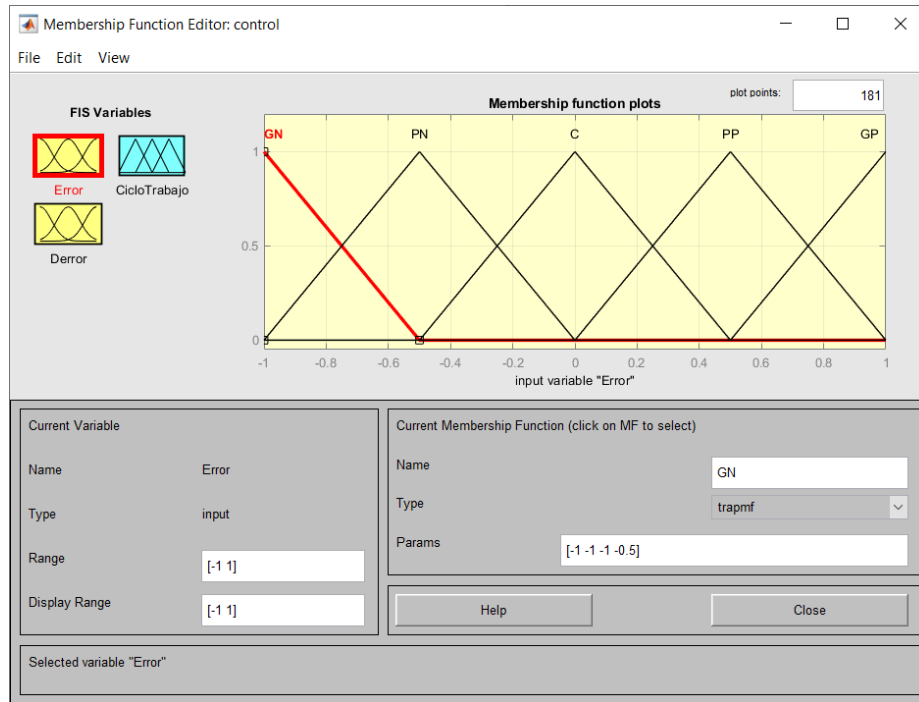


Fig. 14. Introducción de las funciones de membresía.

A continuación, se presenta el sistema con carga. En la Figura 15, se muestra una batería como carga de 18Ah, y en la Figura 16, se aprecia la respuesta comparativa del sistema. Así como el Figura 17, se expone el sistema con respuesta del sistema convencional.

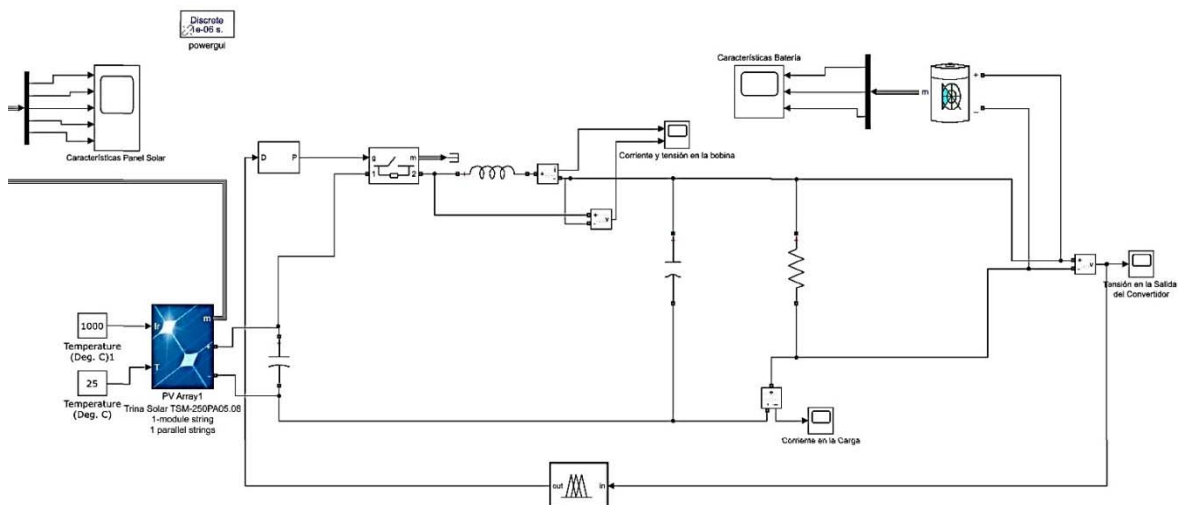


Fig. 15. Sistema con una batería como carga de 18Ah.

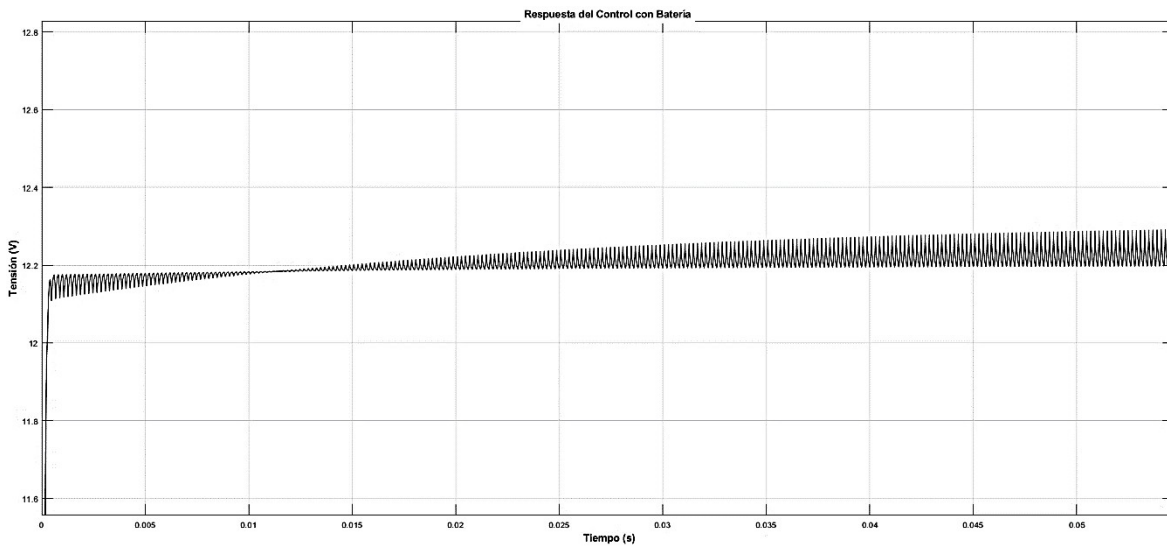


Fig. 16. Respuesta del sistema con el controlador difuso.

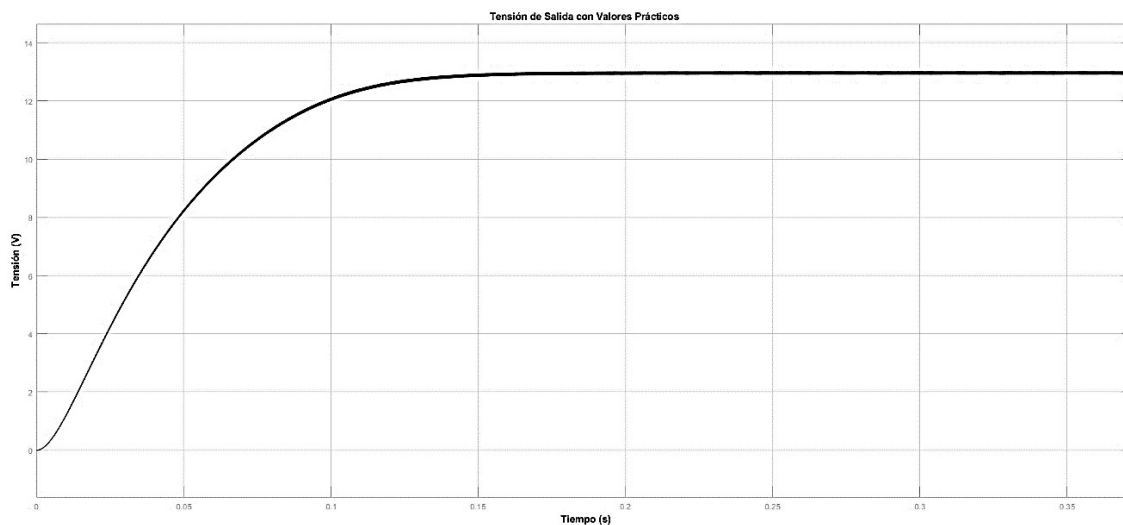


Fig. 17. Respuesta del sistema convencional.

En las Figuras previas se puede observar que la respuesta difiere en algunos aspectos como son el tiempo de levantamiento, rizado, estado estable, etc. Sin embargo, no se debe descartar la naturaleza de la fuente de tensión y de la carga por lo que se puede considerar satisfactoria la respuesta del sistema.

V. CONCLUSIONES

La conclusión más significativa de la presente investigación es la implementación de una metodología de diseño de convertidores Buck y su control por medio de la lógica difusa. La respuesta en los controladores de convertidores dc-dc, ante perturbaciones en la carga y en la fuente siempre busca ser lo más rápido posible, además de llegar a su punto de estabilidad de la misma manera, en el caso presentado, la naturaleza de la fuente al ser un panel solar fotovoltaico aminoró la complejidad de las perturbaciones en la fuente ya que su tensión de salida al ser función de la temperatura no varía más allá de un 10% en las condiciones actuales.

TRABAJOS CITADOS

- Albers A, W. D. (2014). Adaption of the TRIZ method to the development of electric energy storage systems. CIRP, 509-514.
- Bellman, R. E., & Zadeh, L. (17 de Diciembre de 1970). DECISION-MAKING IN A FUZZY ENVIRONMENT. MANAGEMENT SCIENCE, 17(4).
- Cheong, S. V., Ioinovici, A., & Chung, S. H. (Marzo de 1993). Duty-cycle control boosts DC-DC converters. IEEE Circuits and Devices Magazine, 9, 36-37.
- Diciembre Sanahua, S. (2017). Sistemas de Control con Lógica Difusa: Métodos de Mamdani y de Takagi-Sugeno-Kang (TSK). Castellón de la Plana.
- Domijan, A. M. (2005). Custom power devices: An interaction study. IEEE, 1111-1118.
- Farhoodnea, M. M. (2014). A comparative study on the performance of custom power devices for power quality improvement. IEEE, 153-157.
- G, H. N. (1995). Introducing Custom Power. IEEE Spectrum, 32(6), 41-48.
- Ghosh, A. &. (2012). Ghosh, A. Power quality enhancement using custom power devices. Springer Science & Business Media., 9.
- Gomariz Castro, S., & Guinjoan Gispert, F. (2012). Contribución al control difuso de convertidores conmutados dc-dc. Saarbrücken, Alemania: Editorial Académica Española, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG.
- IEEE. (2009). Recommended Practices on Monitoring Electric Power Quality. IEEE, 50-59.
- Institute., E. P. (1993). Estimating the cost of power quality . IEEE Spectrum, 40-41.
- K. H., & E. (2001). Cost of power interruptions to electricity consumers in the United States. IEEE, 1845-1855.
- Kabeel, M. A. (2016). Kabeel, M. A., Abdelsalam, A. A., A modified DSTATCOM topology for power quality enhancement. . Power system conference , 367-372.
- Lee, C. (1990). Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. II. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 419-435.
- Mamdani, H., & Assilian, S. (1975). An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller . International journal of man-machine studies, 1-13.
- Mattavelli, P., Rosseto , L., Spiazzi, G., & Tenti, P. (January de 1997). General-Purpose Fuzzy Controller for dc-dc Converters. IEEE Trans. Power Electronics, 12(1), 79-85.
- N. H. Woodley, A. S. (1998). N. H. Woodley, A. Sundaram, BDynamic voltage restorer demonstration project experience. CEPSE, 561-569.
- Newell, W. E. (1973). Power Electronics-Emerging from Limbo. IEEE Power Electronics Specialists Conference.
- Pal, Y. S. (2008). A review of compensating type custom power devices for power quality improvement. . Pal, Y., Swarup, A., & Singh, B. A review of compensating type custom pow Power System Technology and IEEE Power India Conference, 150-157.
- Rahman, S. A. (2015). Voltage sag and swell mitigation based on modulated carrier PWM. . Rahman, S. A., Janakiraman, P. A., & Somasundaram, P. (2015). Voltage sag and swell miInternational Journal of Electrical Power & Energy Systems, 78-85.
- Roberts, S. (2016). DC/DC BOOK OF KNOWLEDGE Practical Tips for the User. Gmunden Austria: Recom Engineering GmbH & Co KG.
- Takagi, M., & Sugeno , M. (January de 1985). Fuzzy Identification of systems and its applications to modelling and control. IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics, 15(1), 116-132.
- Ueno, F., Inoue, T., Oota, I., & Sasaki, M. (1991). Regulation of cuk converters using fuzzy controllers. IEEE Intelec, 261-267.
- W. Erickson, R., & Maksimovic, D. (2004). Fundamentals of Power Electronics Second Edition. Boulder Colorado: Kluwer Academic Publishers.

- Woodley, N. H. (1999). Experience with an inverter-based dynamic voltage restorer. *IEEE Transaction on power Delivery* , 1181-1186.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 16.
- Zadeh, L. A. (1968). Fuzzy Algorithms. *Information and Control*, 94-102.
- Zadeh, L. A. (1971). Similarity relations and fuzzy ordering. *Information Sciences*, 3(2), 177-200.
- Zadeh, L. A. (Enero de 1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3(1), 28-44.