

**CONTROLADOR BORROSO PARA EL BUS DE ALIMENTACIÓN
PROVENIENTE DE UN GENERADOR FOTOVOLTAICO PARA SER
ACOPLADO A UN CIRCUITO INVERSOR**

**(FUZZY CONTROLLER FOR THE FEED BUS FROM A
PHOTOVOLTAIC GENERATOR TO BE COUPLED TO AN INVERTER
CIRCUIT)**

Carlos Zambrano, Gabriel Noriega.

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” UNEXPO. Departamento de
Ingeniería Electrónica. Vicerrectorado Barquisimeto-Estado Lara, Venezuela.

czambrano@unexpo.edu.ve / gnoriega@unexpo.edu.ve

Recibido: 11-12-2021/ Aceptado: 21-12-2021

RESUMEN

Muchos sistemas eléctricos o electrónicos requieren ser alimentados a partir de tensiones estabilizadas, desde pequeños circuitos hasta redes de alimentación eléctrica que reciben energía de fuentes renovables como las fotovoltaicas, eólicas, entre otras. En el caso de aplicaciones para el suministro de energía eléctrica a partir de estas fuentes renovables se deben colocar convertidores DC-AC (Inversores) para lograr una tensión de corriente alterna y es muy importante que el valor de tensión de este bus DC sea de valor constante, esto para garantizar una buena calidad de energía eléctrica al usuario final con niveles de voltaje dentro de ciertos límites óptimos y además sin desbalances para no afectar las cargas trifásicas. El presente artículo es una nota técnica cuyo objetivo es aplicar algoritmos de control borroso para realizar una modulación por ancho de pulso (PWM) en la conmutación de los interruptores del circuito convertidor DC-DC (Chopper) y así estabilizar a un voltaje constante la salida de tensión que alimenta al circuito inversor. Se establece una topología conformada por: generador fotovoltaico-chopper-inversor trifásico y carga. Sobre la topología simulada en Matlab-Simulink se inducen fallas antes y después de la aplicación del control borroso, se obtienen gráficas ilustrativas del comportamiento del bus DC y se comparan los resultados obtenidos. Al aplicar el control borroso se consiguen valores de tensión estabilizados alrededor del valor deseado, bajos desbalances y cortos tiempos de estabilización de la salida. Según los resultados obtenidos el controlador realizado puede ser de gran utilidad para sistemas alimentados fuera de la red eléctrica convencional.

Palabras clave: controlador borroso, bus DC, energías renovables.

ABSTRACT

Many electrical or electronic systems require to be fed from stabilized tensions, from small circuits to power supply networks that receive energy from renewable sources such as photovoltaic, wind, among others. In the case of applications for the supply of electrical energy from these renewable sources, DC-AC converters (inverters) must be placed to achieve an alternating current voltage and it is very important that the voltage value of this DC bus be constant, this to guarantee a good quality of electric power to the end user with voltage levels within certain optimal limits and also without imbalances so as not to affect three-phase charges. This article is a technical note whose objective is to apply fuzzy control techniques to perform a pulse width modulation (PWM) in switching of Chopper circuit switches and thus stabilize a constant voltage output that feeds the inverter circuit. A topology formed by: photovoltaic generator -chopper- three-phase inverter and load is established. On the simulated topology in Matlab-Simulink, failures are induced before and after the application of the fuzzy control, illustrative graphics of the DC bus behavior are obtained and the results obtained are compared. When applying the fuzzy control, stabilized voltage values are achieved around the desired value, low unbalances and short stabilization times of the output. According to the results obtained, the controller carried out can be very useful for systems fed outside the conventional electrical network.

Keywords: fuzzy logic, bus DC, renewable energies.

INTRODUCCIÓN

Una gran tendencia mundial es reemplazar redes eléctricas de uso convencional por redes eléctricas autónomas de menor envergadura y estas pueden estar acopladas a las redes convencionales o no. Estas redes, en muchos casos denominadas micro redes, se pueden alimentar desde fuentes de energías renovables como la fotovoltaica o eólica, también desde bancos de baterías, bancos de condensadores, moto-generadores, entre otros. Cuando la fuente de alimentación es del tipo fotovoltaica la tensión de suministro es en corriente directa y, a menos que se desee alimentar cargas en corriente directa (CD), se hace imperioso el uso de circuitos inversores para obtener tensiones de corriente alterna a una frecuencia estable. Esta tensión proveniente del generador fotovoltaico se denomina *bus DC* y es quien alimenta a la etapa siguiente, el circuito inversor. Ahora bien, los niveles de tensión hacia el usuario final pueden verse alterados si esta tensión del *bus DC* se modifica y esto puede ocurrir por perturbaciones en los niveles de radiación solar, producto de averías en los paneles solares nubosidad u obstrucción en las celdas del panel; esto traería

como consecuencia tensiones fuera de rango y desbalances que perjudicarían la calidad de la energía recibida por el cliente.

En este sentido, se hace necesario intercalar un circuito estabilizador entre el generador y el circuito inversor, este circuito al que se denomina Chopper y su función será mantener constante la tensión de alimentación hacia el inversor. La técnica de control aplicada sobre el Chopper puede ser PID tradicional, control borroso u otras. Generalmente estas confluyen hacia el control del ciclo útil de la onda de salida usando modulación por ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés). Hechas las consideraciones anteriores, resulta oportuno preguntarse, ¿Cómo se lograría realizar un controlador borroso para lograr la estabilización del voltaje que alimentará al circuito inversor?

Con referencia a lo anterior, en el presente artículo se propone un controlador borroso para realizar un PWM que permita suministrar un voltaje constante al circuito inversor desde un arreglo de paneles fotovoltaicos, considerando el criterio de expertos y con la debida documentación se definen las variables de entrada, las variables lingüísticas y funciones de pertenencia; aplicando el método de inferencia de Mamdani se establece el motor de inferencia y se desborrosifica la salida que controla el PWM. Asimismo, mediante Simulink se simulan perturbaciones en los niveles de radiación solar hacia los paneles y se grafican tensiones y corrientes claves para analizar el comportamiento del circuito. Finalmente, se presentan conclusiones y posibles aportes de esta investigación.

METODOLOGÍA y EPISTEMOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Con base en Hurtado (2011), la metodología de esta investigación esta soportada bajo un enfoque hipotético deductivo (interrogante general planteada) y técnicas cuantitativas de análisis de los datos recolectados (variables medidas).

En la base de lo dicho por Méndez (2001), ya que en la presente investigación se elaboran modelos, simulaciones y ensayos experimentales, las posturas preponderantes presentes aquí son la positivista y la racionalista.

ESTADO DEL ARTE

A pesar de las muchas ventajas que ofrece la generación de energía fotovoltaica, sufre de condiciones ambientales aleatorias y de cambios abruptos en las cargas a ella conectadas, Zalani et al., (2014). Dichos autores, citando a Yazdani e Iravani (2010); y a Ahmed et al., (2011) aseguran que uno de los desafíos típicos en la integración de estas fuentes renovables a la red eléctrica es controlar la estabilidad de la tensión del bus de corriente continua (CC o CD) dentro del sistema de conversión de energía. Torres et al., (2017) utilizaron Matlab para validar un modelo matemático que certifica la función de transferencia de un compensador PI en cascada conectado a un *bus DC* para mantener constante su valor.

El correcto funcionamiento de una micro red se basa en las estrategias de control y gestión de potencia implementados, para ello es importante, entre otros aspectos, compensar los desequilibrios de potencia causados por la discontinuidad de la generación y de la demanda de la carga, Salas (2018). Para el caso de micro redes conectadas a fuentes de generación fotovoltaicas, estos desequilibrios se deben a variaciones en los niveles de radiación solar disponibles.

Los buses DC de alimentación no solo son utilizados en aplicaciones de generación con fuentes renovables. Desde finales del siglo pasado se emplean significativamente para alimentar equipos electrónicos, como es el caso de variadores de frecuencia y fuentes conmutadas. En el caso de cargas como motores de corriente alterna, se realiza una conversión a CD desde la red eléctrica y luego el proceso de Inversión (CD-CA) a una frecuencia y tensión deseada. En este orden de ideas, Zhou et al (2020) recalcan la importancia de mantener un *bus DC* estable para evitar alteraciones que en él se puedan generar, producto de fluctuaciones en la red de suministro o por causas de cambios en la corriente de carga y así, mejorar la seguridad de operación y un buen desempeño de un motor trifásico. En su aplicación modelaron un motor síncrono de imán permanente (PMSG por sus siglas en inglés) conectado a la red eléctrica y la estrategia de control diseñada para la estabilización del *bus DC* fue evaluada utilizando Matlab.

En aplicaciones prácticas de lógica borrosa, debido a sus razonamientos basados en información imprecisa, se permite utilizar el conocimiento disponible de un experto para encontrar soluciones sencillas y con un poder computacional poco exigente a problemas que no requieren aprendizaje, Lozada (2017). Sánchez y Torres (2017), aplicaron razonamiento aproximado multicondicional para diseñar un control borroso y aseguran que el Fuzzy Logic Toolbox es una buena herramienta para obtener resultados cercanos a los obtenidos mediante un sistema experimental real. Ramos (2020), utilizó control lógico borroso, pues asegura que basado en el conocimiento heurístico que se puede tener de un sistema, es ideal por no requerir aproximar el modelo matemático del sistema, ni tampoco hacer operaciones de linealización, y nuestro sistema bajo estudio es un sistema no lineal.

Según se obtiene de diversas fuentes bibliográficas, la estabilización del voltaje del *bus DC* en diversas aplicaciones (con fuentes de energía renovables o con la red eléctrica convencional), es de fundamental importancia para obtener una energía de calidad que alimente a las cargas que a él se conecten. Como objetivo de este trabajo, se plantea realizar un ensayo sobre la aplicación de la lógica borrosa para lograr un control de voltaje estabilizado en un *bus DC* alimentado desde un generador fotovoltaico y que tiene como carga un circuito inversor trifásico acoplado a una carga eléctrica. Como posibles aportes de este trabajo está el enfoque borroso del tema tratado, la elaboración de reglas basadas en aportes de expertos y el esquema de supervisión planteado. Con estos aportes se podría contribuir con incentivar el estudio de sistemas que requieren una conversión AC-DC para alimentar cargas eléctricas.

RESULTADOS

Se presentan a continuación los resultados, donde se indica paso a paso todo el desarrollo de la topología planteada, definición de las variables involucradas, borrosificación de variables, reglas condicionales, aplicación en el Fuzzy Logic Toolbox de Matlab, visor de reglas y desborrosificación. Al final un análisis de los resultados obtenidos, conclusiones y recomendaciones.

Topología propuesta para el circuito de esta investigación

La arquitectura propuesta se presenta en la figura 1. Donde se muestra: un generador fotovoltaico con una salida de tensión en corriente directa denominada V_{array} , bloques para modificar los niveles de radiación y temperatura de operación de los paneles solares, un convertidor DC-DC tipo impulsor (Boost) con una salida V_{bus} , un circuito inversor trifásico (convertidor DC-AC), bloques de medición, filtros y la carga.

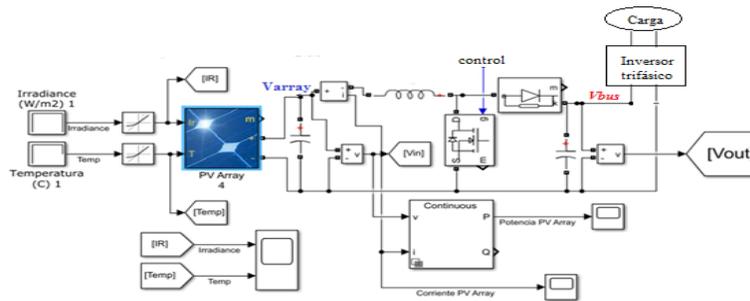


Figura 1. Arquitectura del circuito propuesto.

Controlador borroso

La tensión de salida del generador se estimó en 220V y debe permanecer constante, pero esta propensa a variaciones según condiciones de radiación solar y temperatura en el conjunto de paneles. Para evitar que estas afectaciones se trasladen a las cargas (usuarios) se debe realizar algún tipo de ajuste o compensación, una alternativa es colocar convertidores DC-DC realimentados desde las salidas (carga), capaces de efectuar ajustes de ciclo útil para mantener el valor de " V_{bus} " constante. En la figura 2 se presenta el sistema de control borroso. Para la compensación de ciclo útil se utiliza un controlador difuso con acción integral.

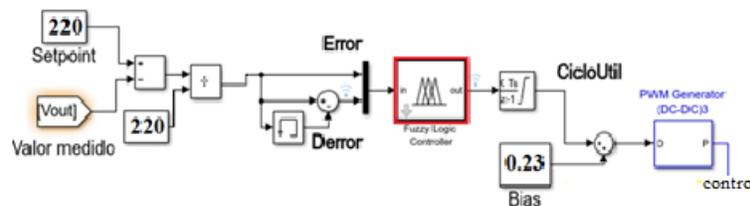


Figura 2. Sistema de control borroso.

Para llevar a cabo esta estrategia de control se hizo uso del Toolbox de Lógica Difusa de Matlab. Se consideraron dos variables de entradas denominadas “Error”, referida a la diferencia entre el valor rms deseado y el valor medido y “Derror” que corresponde a las variaciones del error calculado, la variable de salida es denominada “CicloUtil”, este controlador es del tipo Mamdani (FIS Mamdani).

La diferencia o error se lleva a un bloque de ganancia $K=1/220$ para su normalización y los valores de entrada del controlador se limitaron entre -1 y 1. De aquí, el controlador recibe la señal de error y el cambio del error. Para el cálculo en el cambio del error se colocó un bloque de memoria que permite almacenar el valor anterior y luego comparar con el valor actual y obtener el signo positivo o negativo de dicho cambio. Luego del controlador está un bloque de integración que actúa como un acumulador, la salida del controlador varía desde -1 hasta 1, lo que hace este bloque es ir sumando las contribuciones que le indica el controlador para ajustar el ciclo útil del convertidor DC-DC. El último bloque del lazo de control es el encargado de convertir el valor de salida del acumulador (0-1) a una señal cuadrada cuyo ciclo útil coincide con el valor de la entrada.

Variables lingüísticas de las entradas y la salida

En la tabla 1 se presentan las variables de entrada y de salida. Además, sus rangos de evaluación, las etiquetas asignadas y su variable lingüística asociada. Dichas tablas se construyen en base a la información recabada de bibliografía consultada, Torres (2013); Klir y Yuan (2012).

Tabla 1. Variables Lingüísticas

Entrada				Salida	
Error		Derror		CicloUtil	
Variable	Rango	Variable	Rango	Variable	Rango
NB	-1 a -0.3334	NB	-1 a -0.3334	NB	-1 a -0.3334
NS	-0.666 a 0	NS	-0.666 a 0	NS	-0.666 a 0
ZE	-0.334 a 0.334	ZE	-0.334 a 0.334	ZE	-0.334 a 0.334
PS	0 a 0.666	PS	0 a 0.666	PS	0 a 0.666
PB	0.334 a 1	PB	0.334 a 1	PB	0.334 a 1

NB: Negativo grande NS: Negativo pequeño ZE: Cero
 PS: Positivo pequeño PB: Positivo grande

Funciones de pertenencia de las variables

La figura 3 muestra la función de pertenencia del tipo triangular. Este tipo de función se usa para ambas variables de entrada, $Error$ y D_{error} y también para la variable de salida $CicloÚtil$

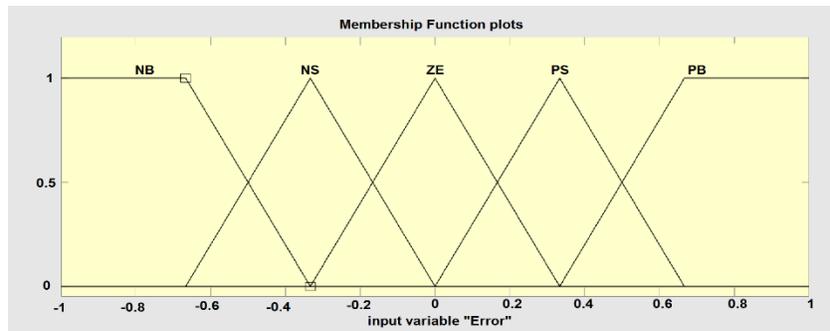


Figura 3. Funciones de pertenencia.

Reglas borrosas

El conjunto de reglas borrosas propuestas tiene como objetivo proporcionar una tensión de V_{bus} (bus DC) en un valor constante, esto se realiza ajustando la variable $CicloÚtil$ (ver control en las figuras 1 y 2) para la activación de la compuerta del interruptor de estado sólido (transistor) según los valores de presentes de $Error$ y la velocidad en que se presenta D_{error} .

Se usan reglas “if-then” (si-entonces) para formular las declaraciones multicondicionales. Los conjuntos borrosos A y B pertenecen a los conjuntos universales X e Y , y se asocian a las variables de entrada y de salida respectivamente. Las variables de entrada y salida se denotan con X e Y , respectivamente, de manera que se componen las proposiciones:

p : Si X es A , entonces Y es B

En la tabla 2 se muestran las reglas consideradas para el control difuso

Tabla 2. Reglas para el controlador difuso.

		Derror				
		NB	NS	ZE	PS	PB
Error	NB	NB	NB	NB	ZE	ZE
	NS	NB	NB	NS	ZE	PS
	ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
	PS	NS	ZE	PS	PB	PB
	PB	ZE	PS	PB	PB	PB

Fuente: propia

Desborrosificación

La distribución de salida se desborrosifica por el método del centroide para lograr una salida nítida. A continuación, en la figura 4 se muestra un resultado generado por Matlab para un *Error* y *Derror* forzados y el ajuste de ciclo útil realizado. El ciclo útil se ajusta entre -1 y +1 (equivalente a 0% y 100%) para errores y sus derivadas desde valores muy pequeños o muy grandes, respectivamente. Se puede observar las reglas que se activan y su fuerza, contribuyendo así al valor nítido de la salida *CicloÚtil*, en función de la magnitud del error y en menor grado a su velocidad de variación *DError*.

Los valores aquí obtenidos se expresan en valores porcentuales, por eso se podrían aplicar a esquemas con valores diferentes de tensión.

Desempeño del sistema borroso ante perturbaciones (Radiación solar y Temperatura)

Para generar cambios y evaluar el comportamiento del controlador se introducen al generador fotovoltaico algunas perturbaciones en los paneles solares, aquí se ajustan los instantes en que ocurrirán y su amplitud (w/m^2).

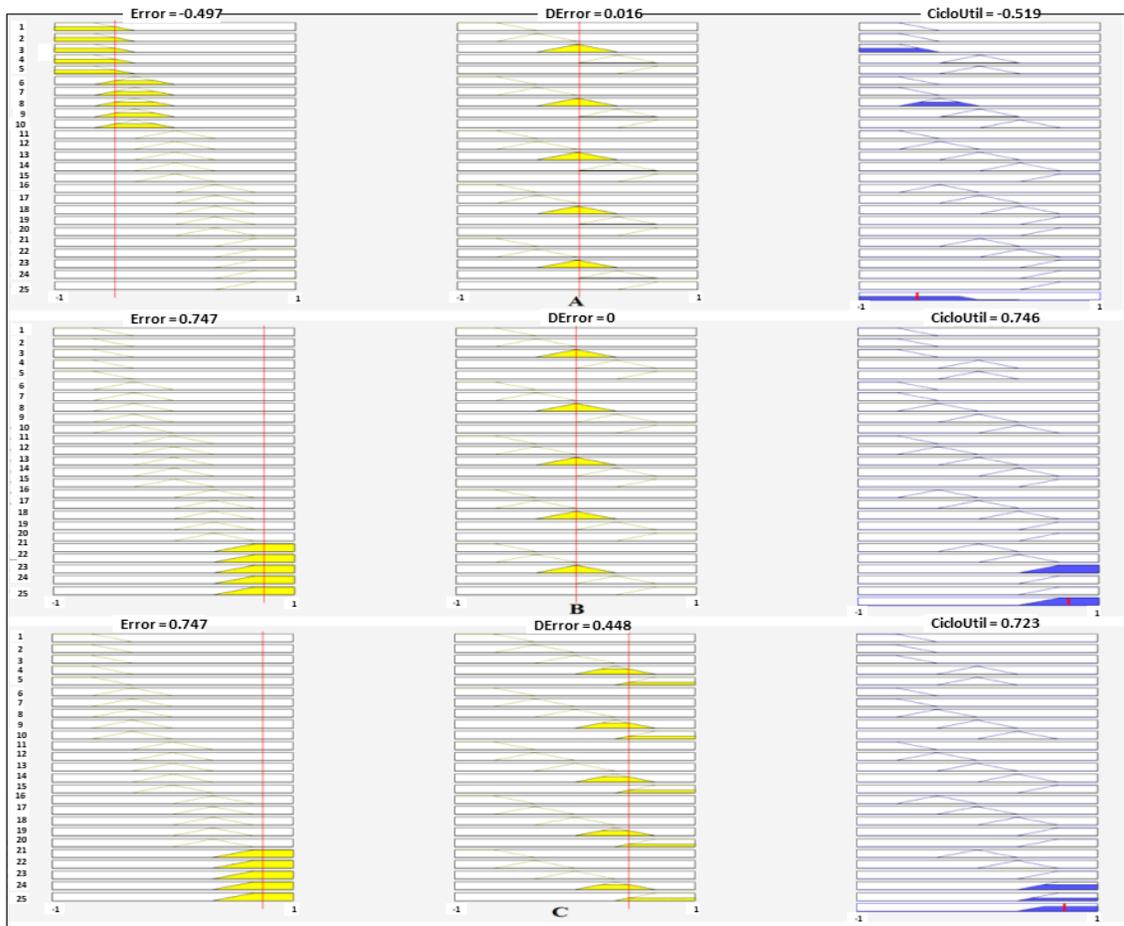


Figura 4. Desborrosificación por Método de Centroide. (A) Error=-0.497, DError=0.016, CicloÚtil=-0.519, (B) Error=0.747, DError=0, CicloÚtil=0.746, (C) Error=0.747, DError=0.448, CicloÚtil=0.723.

Las figuras 5, 6 y 7 muestran cómo responde el control borroso a la señal de error ajustando la variable CicloUtil, como mantiene estabilizada la tensión de salida hacia la carga en el valor prefijado de 220V, y, además en la figura 8, la contribución significativa para lograr la estabilización del voltaje del bus DC (V_{bus}) mientras que ocurren perturbaciones forzadas en el generador fotovoltaico a partir de los instantes 0,25 s y 0,75 s para la radiación solar y a partir de los tiempos 1,2s y 1,3 s en la temperatura de los paneles solares.

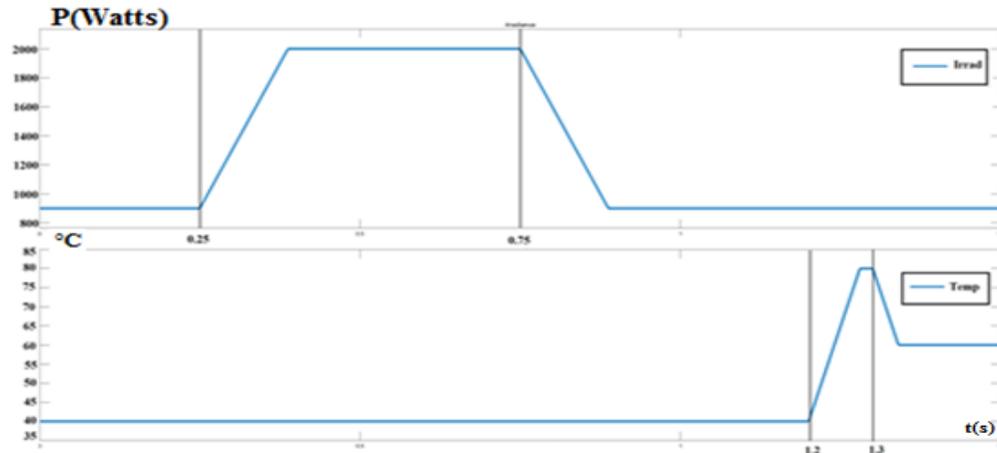


Figura 5. Variaciones en radiación solar y temperatura.

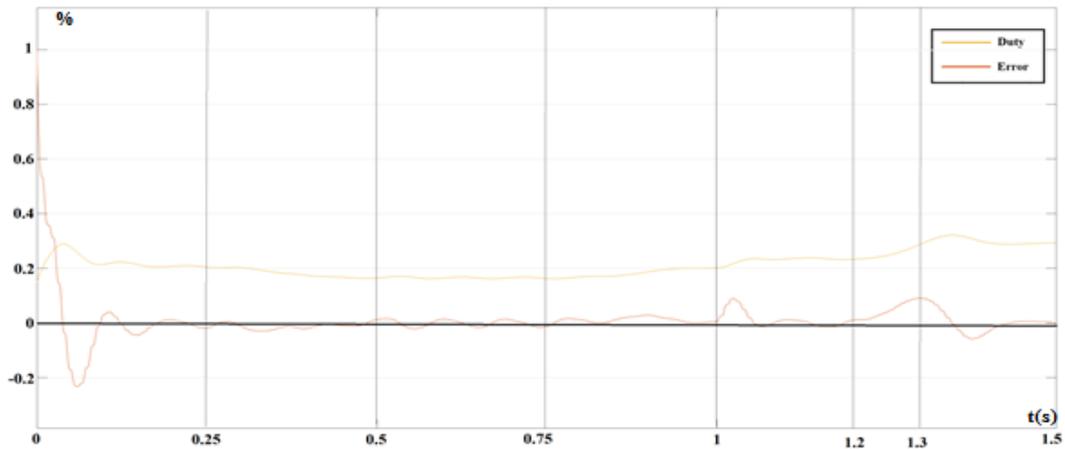


Figura 6. Salida de Control (Ciclo útil) y Error.

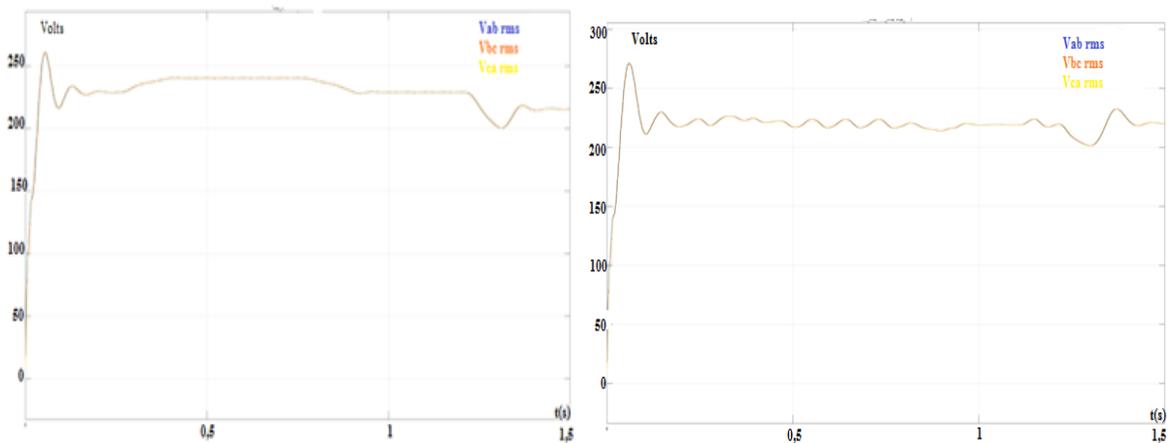


Figura 7. Voltajes V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} . Sin control (izq.), con control (Derecha).

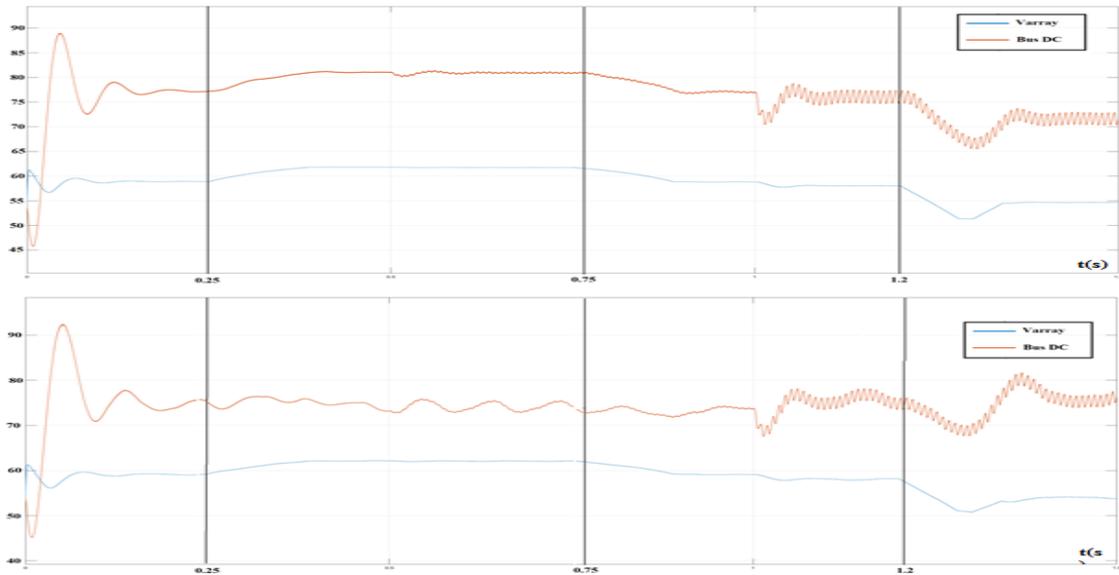


Figura 8. Voltajes; Varray, Bus DC. Sin control(arriba), con control(abajo)

En la figura 9 se observa como la corriente de salida en una de las fases se mantiene muy próxima al valor que tenía antes de las perturbaciones de entrada.

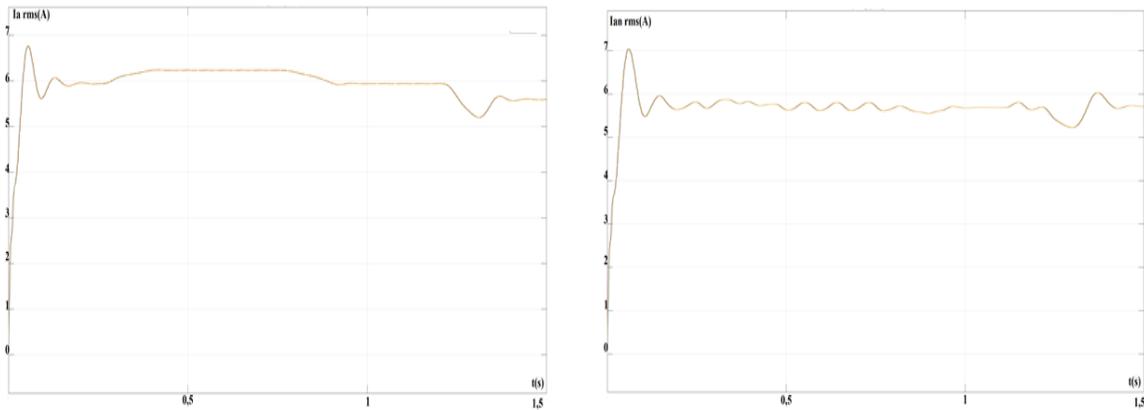


Figura 9. Corriente en fase A. Sin control (izq.), Controlado (derecha).

En la tabla 3 se resumen valores de tensiones y corrientes de salida, V_{bus} y desbalance en la salida (LVUR), partiendo de un valor deseado de 220V y con perturbaciones en el generador.

Tabla 3. Resumen de valores obtenidos, sin control y con control difuso

Sin control Difuso (Con control difuso)							
Vrms Línea [V]			Irms Fase [A]			Bus DC	LVUR
Vab	Vbc	Vca	Ian	Ibn	Icn	[V]	[%]
229.8	229.7	229.7	5.95	5.96	5.95	232,62	0.029
(219.0)	(219.1)	(219.2)	(5.6)	(5.6)	(5.6)	221.34	(0.046)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las estrategias de control basadas en lógica borrosa permiten estabilizar la tensión de bus DC en manera bastante eficiente.

Al mantener estabilizado el bus DC los voltajes de salida se mantienen muy cercanos al valor prefijado.

En general, el controlador presenta pequeñas oscilaciones y un sobre impulso, pero en régimen estacionario los voltajes y corrientes son bastante cercanos a los valores deseados. Una mejor elección de los parámetros del integrador debe mejorar este resultado.

Es fundamental definir en forma correcta y precisa tanto las reglas como las funciones de pertenencia, así como los límites de estas. Esto asegurará la correcta respuesta a los fallos que se presenten en algunas de las variables del sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ahmed NA, Al-Othman AK. y Alrashidi MR.2011. *Desarrollo de un sistema de energía de energía eólica / fotovoltaica / celda de combustible combinada e interactiva eficiente con MPPT y regulación de voltaje de bus de CC*. Investigación de sistemas de energía eléctrica, vol. 81, no. 5, págs. 1096-1106.
- Hurtado J.2012. *Metodología de la Investigación. Guía para la comprensión holística de la ciencia*. 4ta Edición. Editorial Quirón, Bogotá-Caracas.
- Klir G. and Yuan B.2012. *"Fuzzy Sets Theory". Theory and Applications*. Chapter 11, Approximate Reasoning, pp. 302-326. Prentice Hall.
- Lozada, R.2017. *Redes neuronales y lógica difusa aplicado a un sistema climatológico*. Trabajo de grado para optar al título de doctor. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/>.

- Mathworks, Inc. MATLAB R2012b (8.0.0.783). August 2012. Disponible en www.mathworks.com/trademark.
- Méndez, C.2001. *Metodología diseño y desarrollo del proceso de investigación*. Editorial Mc Graw Hill. Colombia.
- Ramos, V.2020. *Diseño de un algoritmo de gestión basado en lógica difusa para el intercambio de potencia entre micro redes eléctricas*. Trabajo de grado para obtener el título de doctor. Escuela superior politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. Disponible en: <http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/14503>.
- Salas R.2018. *Gestión eficiente de los convertidores de potencia conectados al bus dc de una micro red híbrida de generación distribuida*. [Artículo en línea]. Trabajo de Tesis Doctoral. SaberULA Repositorio Institucional de la Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela. Disponible en: <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/45743>.
- Sánchez, L. y Torres, E.2017. *Control borroso de la remoción de estrógenos en un biorreactor de membranas*. Creative Commons. Ingeniería 27 (1):3-20. San José, Costa Rica. Disponible en: <https://www.readcube.com/articles/10.15517%2Fjte.v27i1.23188>.
- Torres, E. (2021). *Lógica Gradual*. Material con fines didácticos. Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, mención Productividad. UNEXPO, Barquisimeto, Venezuela.
- Torres L.; Urrea J. y Muñoz N.2017. *Control de Tensión en el Bus DC para Compensadores Activos de Potencia Conectados en Paralelo*. [Artículo en línea]. Scielo, Información Tecnológica, Vol. 28 no.6, La Serena. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000600013>.
- Yazdani A. e Iravani R.2010. *Convertidores de voltaje en sistemas de potencia*, John Wiley & Sons, Hoboken, Nueva Jersey, EE. UU.
- Zalani M., Mohamed A. y Hannan MA.2014. *Una estrategia de control óptima para la regulación del voltaje del bus de CC en un sistema fotovoltaico con almacenamiento de energía en batería*. Indawi La revista Scientific World. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2014/271087>.
- Zhou X.; Zhou Y.; Ma Y.; Yang L.; Yang X. y Zhang B.2020. *DC Bus Voltage Control of Grid-Side Converter in Permanent Magnet Synchronous Generator Based on Improved Second-Order Linear Active Disturbance Rejection Control*. Energies 2020, Smart Grids y Microgrids,13 (18), 4592; Disponible en: <https://doi.org/10.3390/es13184592>.