

## Estrategia para la implementación del control jerárquico en microrredes

Lorena Castro<sup>a</sup>, Maximiliano Bueno-López<sup>b,\*</sup>, Juan Mora-Flórez<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, La Julita, Pereira, Colombia.

<sup>b</sup>Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Universidad del Cauca, Calle 5 No. 4-70, Popayán, Cauca, Colombia.

**To cite this article:** Castro, L., Bueno-López, M., Mora-Flórez, J. 2022. Strategy for the implementation of hierarchical control in microgrids. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 19, 254-264. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.15741>

### Resumen

Las microrredes son fundamentales ya que permiten la integración local de unidades de generación basadas en fuentes renovables, sistemas de almacenamiento y usuarios de energía eléctrica. Sin embargo, para un correcto funcionamiento, el control de la microrred es un aspecto fundamental, por lo que en este trabajo se propone, de forma didáctica, una estrategia de implementación sencilla para aquellos casos en los que no se disponga de la descripción matemática o modelo del sistema. El aporte del trabajo consiste en la propuesta de una estrategia detallada para el diseño del control jerárquico de convertidores de fuente de tensión basada en matemática difusa, que considera el funcionamiento de la microrred como aislada o conectada a la red principal. La implementación propuesta y el análisis de los resultados obtenidos muestran que la estrategia de control jerárquico propuesta tiene un desempeño satisfactorio. Además, esta estructura de diseño es escalable, robusta, aplicable en sistemas lineales o no lineales y rápidamente implementable en sistemas físicos.

*Palabras clave:* Microrredes, Convertidores de Fuente de Tensión, Control Difuso, Control Jerárquico

### Strategy for the implementation of Hierarchical Control in Microgrids

#### Abstract

Microgrids are essential as these allow the local integration of generation units based on renewable sources, storage systems and users of electrical energy. However, for a proper operation, microgrid control is a fundamental aspect, which is why this paper proposes, in a didactic way, a simple implementation strategy for those cases where the mathematical description or model of the system is not available. The paper's contribution consists of the proposal of a detailed strategy for the design of the hierarchical control for voltage source converters based on fuzzy mathematics, which considers the microgrid operation as islanded or connected to the main network. The proposed implementation and the analysis of the obtained results show that the proposed hierarchical control strategy has satisfactory performance. Furthermore, this design structure is scalable, robust, applicable in linear or non-linear systems, and rapidly implementable in physical systems.

*Keywords:* Microgrid, Voltage Source Converter, Fuzzy Control, Hierarchical control

## 1. Introducción

### 1.1. Motivación

Los recursos energéticos distribuidos (Distributed Energy Resources, DER) han aumentado su participación como nuevas alternativas para disminuir el consumo de combustibles fósiles y la emisión de gases contaminantes.

Por tal razón, las microrredes surgen con ventajas técnicas, tanto para el sistema eléctrico convencional, como para los usuarios finales. Además, la electrónica de potencia tiene un aporte fundamental en la integración de las fuentes de generación renovable no convencional y los dispositivos de almacenamiento de energía (Hussain et al., 2017), (Sen and Kumar, 2018).

\*Autor para correspondencia: mbuenol@unicauca.edu.co

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

Las microrredes han sido un tema de investigación bastante extenso, ya que la integración al sistema eléctrico implica múltiples desafíos técnicos, desde la gestión de potencia, hasta sobrepasar adecuadamente las fallas y/o perturbaciones en el sistema (Sen and Kumar, 2018), (Castro et al., 2019b). El modo operativo de la microrred define el objetivo de control de los convertidores para su óptimo funcionamiento, por lo que estos sistemas deben realizar la gestión de potencia de los generadores, del consumo de los dispositivos de almacenamiento y de los intercambios con la red eléctrica, y al mismo tiempo operar en modo aislado y soportar las cargas que se encuentren conectadas (Hou et al., 2018), (Montoya et al., 2018).

### 1.2. Estado del arte

Existen varias alternativas para el control de microrredes, tales como el control centralizado, descentralizado, distribuido y jerárquico. Cada alternativa está asociada a un objetivo de control o múltiples capas con diferentes objetivos como se propone en (Sen and Kumar, 2018).

Particularmente, el control jerárquico define diferentes objetivos de acuerdo al modo operativo de las microrredes, ya sea en modo aislado o en modo conectado a la red principal (Awal et al., 2020). Las estrategias de control aplicadas a los convertidores por fuente de tensión (Voltage Source Converter, VSC) generalmente son: Control *droop* (Huang et al., 2019), (Montoya et al., 2018), control predictivo basado en el modelo (Heydari et al., 2019) (Bordons et al., 2020), control PID (Montoya et al., 2018) y control vectorial (Sen and Kumar, 2018). No obstante, algunas de estas técnicas de control requieren la descripción matemática del sistema, el cálculo de ganancias y algunos requieren métodos de linealización, debido a la no-linealidad del sistema a controlar; en consecuencia, el diseño de control puede ser complejo.

Una estrategia que permite reducir la complejidad del diseño del controlador es la lógica difusa (Kerdphol et al., 2019), (Al Badwawi et al., 2019). En este caso, no se requiere descripción matemática detallada del sistema a controlar, puede realizar control con poca información, se aplica a sistemas no-lineales y el diseño no es complejo. Esta lógica mejora el rendimiento del control frente a técnicas clásicas como se presenta en (Rakshit and Maity, 2018), donde desarrollan un convertidor *Ćuk* controlado por lógica difusa, el cual mejora el tiempo de establecimiento y las fluctuaciones de la tensión comparado con un controlador PID. También, en (Castro et al., 2019a) se propone un control de bucle externo de un VSC con lógica difusa para el seguimiento de potencia, donde las mediciones de error son menores en comparación con un control PI. Por otro lado, en (Swathy et al., 2018) proponen un control no-lineal de la tensión de un convertidor reductor, donde la matemática difusa mejora el comportamiento del sistema ante condiciones transitorias comparado con técnicas clásicas de control. Incluso, en (Baghaee et al., 2018) se propone un control de potencia reactiva difuso, con el propósito de mejorar el rendimiento de la microrred cuando se presentan grandes perturbaciones y para aumentar la estabilidad del sistema.

Finalmente, en publicaciones más recientes se ha considerado la lógica difusa para seguimiento del punto de máxima potencia y la gestión de potencia en sistemas de

generación fotovoltaica, como se presenta en (Loukil et al., 2020) y (Roselyn et al., 2020), respectivamente.

A partir de lo expuesto, es relevante determinar una estrategia didáctica que permita realizar la integración de las fuentes de generación, unidades de almacenamiento y cargas, en un entorno de microrredes.

### 1.3. Contribuciones del artículo

- Este artículo presenta de manera didáctica, una estrategia para la formulación del control del VSC en microrredes, la cual es escalable, robusta y aplicable en sistemas lineales o no-lineales.
- La estrategia propuesta de control jerárquico se desarrolla y evalúa considerando la operación en modo conectado y aislado de las microrredes, lo cual no es común en el estado del arte.
- La estrategia permite el control de microrredes de una manera sencilla, sin considerar el modelo del sistema a controlar.
- A partir de los resultados se demuestra que ésta es una estrategia que mitiga las dificultades del diseño del control de múltiples VSC integrados en microrredes.

Finalmente, los resultados de las pruebas realizadas corroboran las bondades de la estrategia propuesta para el control de VSCs en entornos de microrredes.

## 2. Control de microrredes

Una microrred es un sistema de energía autosuficiente que sirve a una huella geográfica discreta, como un campus universitario, un complejo hospitalario, un centro de negocios o un vecindario (Pérez-Londoño et al., 2020). Dentro de las microrredes hay uno o más tipos de energía distribuida (paneles solares, turbinas eólicas, calor y energía combinados, generadores) que producen su energía. Además, muchas microrredes más nuevas contienen almacenamiento de energía, generalmente de baterías. Algunos también tienen ahora estaciones de carga de vehículos eléctricos. Las microrredes integran pequeñas agrupaciones de cargas, generadores y dispositivos almacenadores en algunos casos (Castro et al., 2021). Comunidades tales como: un complejo hospitalario, campus universitarios, granjas de generación renovable, comunidades no interconectadas, entre otros. En las microrredes, el control se realiza por esquemas jerárquicos, que actúan principalmente sobre los VSC, para mantener dentro de los valores nominales a variables como la tensión, la frecuencia y la potencia (Awal et al., 2020).

### 2.1. Control jerárquico

El control jerárquico es un esquema con etapas interdependientes que difieren en tiempo de operación y en objetivos. Se compone de cuatro etapas y el orden en que deben ejecutarse es el siguiente: a) Control de nivel cero, b) Control primario, c) Control secundario y d) Control terciario (Sen and Kumar, 2018).

El control de nivel cero es la denominación del control interno de cada uno de los convertidores. Este controlador opera en un tiempo inferior a los 5 ms, requiere alta velocidad de procesa-miento y bajo costo computacional. El control de nivel cero está asociado al lazo de externo de los VSC, donde el objetivo lo define el modo operativo de la microrred. Por un lado, en el modo conectado a la red, los VSC deben realizar la gestión de potencia del recurso integrado. Por el otro, cuanto se opera en modo aislado de la red, los VSC deben garantizar la estabilidad de la tensión y frecuencia. Dos de las estrategias más popula-res son el control vectorial clásico (Teodorescu et al., 2011) y la teoría PQ (Akagi et al., 2011). El desempeño dinámicos de estos controles son lo suficientemente rápidos para ser tenidos en cuenta en las demás etapas. Sin embargo, el rendimiento en estado estacionario y los limites de control requieren de un mayor análisis para la adecuada integración con las otras etapas.

El control primario debe actuar rápidamente en un margen de tiempo de hasta 50 ms y se implementa de forma local en los VSC. Cuando el modo operativo de la microrred es aislado, debe garantizar la operación estable para la tensión y frecuencia, en conjunto con el control de nivel cero. El principal objetivo del control primario es el de alcanzar un punto de equilibrio estable (Farrokhbadi et al., 2019). Por lo tanto, este control requiere ser rápido, simple y confiable. Usualmente, se utiliza un control proporcional implementado localmente en cada convertidor (Chandorkar et al., 1993).

El control secundario debe operar alrededor de los 500 ms y depende de las etapas de control anteriores. Su objetivo es mejorar la calidad de tensión y frecuencia en una microrred, para que opere en valores nominales. El control secundario comparte algunas características de los controles primario y terciario. Por tanto, un control secundario diseñado correctamente requiere incluir la variación en frecuencia y las constantes de regulación del control primario. Por otra parte, requiere incluir las restricciones de capacidad del control terciario

El control terciario coordina la interacción de la microrred con el sistema de potencia y optimiza la operación para minimizar los costos de operación y las pérdidas, respetando las restricciones operativas. Este tipo de control concilia tanto la generación como la demanda y define la potencia de referencia a los VSC seguidores de red. En comparación con el control secundario, el terciario tiene un tiempo de respuesta más lento y puede ser considerado como un problema de estado estacionario. El control terciario debe ser ejecutado en tiempo real y de forma automática sin la constante supervisión humana. Por tanto, se requieren algoritmos rápidos, robustos y eficientes que garanticen la convergencia.

2.2. Convertidores de fuente de tensión (Voltage Source Converter, VSC)

Los VSC son fundamentales para la integración de fuentes de energía y los dispositivos de almacenamiento al sistema (Montoya et al., 2018). En la Figura 1, se presenta la estructura básica de un VSC con el control de nivel cero (inner y outer).

El objetivo de control cambia de acuerdo al modo operativo del convertidor. Usualmente, se definen como

convertidores formadores de red (S3 cerrado; S2 y S1 abiertos en la Figura 1), cuando el objetivo de control es la tensión y frecuencia, y sirven de nodo de referencia (nodo slack) en caso de una microrred en modo aislado. Para los convertidores seguidores de red (S2 y S1 cerrados, S3 abierto), el objetivo de control es la gestión de potencia; y requieren que otro dispositivo controle la tensión y la frecuencia.

2.3. Control fundamentado en matemática difusa

La matemática difusa extiende la lógica bi-valuada a valores intermedios y utiliza información heurística para tomar decisiones. El control basado en lógica difusa aprovecha la información del modelo matemático y/o análisis del proceso a controlar. Este se utiliza en sistemas no lineales y con poca información del modelo matemático del sistema.

La estructura del control tiene cuatro etapas: fusificación, mecanismo de inferencia, base de conocimiento y defusificación, como se muestra en la Figura 2. Para el diseño de este control se define lo siguiente:

2.3.1. Mecanismo de inferencia de lógica difusa

Los métodos de inferencia comunes son: Mamdani y Takagi-Sugeno. En el primero las señales de entrada/salida requieren la fusificación y defusificación respectivamente; también usan una base de conocimiento obtenida del análisis heurístico del proceso. El segundo método requiere de una descripción matemática para la acción de control o salida; sin embargo, las entradas del controlador requieren la fusificación y las reglas conservan la misma estructura, incluyendo la descripción matemática difusa.

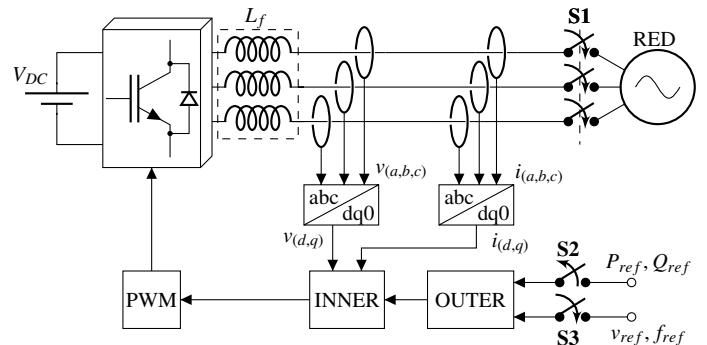


Figura 1: Esquema de control de un VSC, considerando los modos operativos de las microrredes

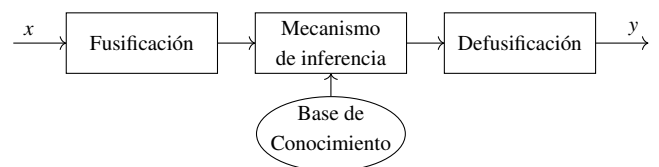


Figura 2: Estructura de control basado en lógica difusa.

2.3.2. Funciones de membresía

Las etapas de fusificación y defusificación requieren de las funciones de membresía, las cuales cuantifican y asignan de manera continua, el conjunto de valores al que pertenecen las entradas y/o salidas. Existen diferentes funciones de membresía, tales como la gaussiana, sigmoideal, trapezoidal y

triangular, que pueden representar características particulares de los sistemas. La elección se basa tanto en su similitud con el sistema a controlar como con el esfuerzo computacional requerido para la etapa de control.

2.3.3. *Universo de discurso*

El universo de discurso esta asociado al valor que pueden tomar las entradas y/o salidas del sistema. Tiene un rango en el cual se definen todas las funciones de membresía; éstas se restringen de acuerdo a las limitaciones físicas de los sensores y actuadores del sistema o por los rangos operativos de las variables que representan.

2.3.4. *Etiquetas lingüísticas*

Son nombres asignados a las funciones de membresía, definidos según el conocimiento del sistema y los rangos establecidos para el conjunto de valores. Además, pueden representar el grado de sensibilidad de las acciones de control. El número de valores lingüísticos está relacionado con la cantidad de funciones de membresía a evaluar y por tanto está relacionado con el esfuerzo computacional.

2.3.5. *Reglas o base de conocimiento*

La base de conocimiento representa la información obtenida del análisis matemático, el objetivo de control o en el análisis del comportamiento de la microrred. La construcción de las reglas y los consecuentes utiliza la información del sistema a controlar y la correlación de entrada-salida del control. Al definir la cantidad de valores lingüísticos por cada entrada y/o salida, la cantidad de reglas está directamente relacionada a todas las posibles combinaciones entre la correlación entrada-salida analizada.

2.3.6. *Método de defusificación*

El método de defusificación representa la conversión de las decisiones tomadas en acciones de control. Al evaluar cada regla, se forma la suma de las áreas obtenidas de la reglas que se activaron y el método de defusificación determina el mejor valor que represente el área obtenida. Existen diferentes métodos de defusificación, los más empleados son: biselector de área, centro de gravedad (COG) o el promedio de los valores máximos (MOM).

3. Estrategia para el diseño del control

La estrategia propuesta para el diseño del control de los VSC encargados de integrar las DER en las microrredes se fundamenta en una estructura de control jerárquico. En este caso, la matemática difusa es una alternativa para el control de convertidores electrónicos de potencia, orientado a mejorar la eficiencia y calidad de la operación. En la Figura 3 se presenta la estrategia propuesta, que se divide en dos secciones: La sección I corresponde a la definición de cada uno de los niveles de control jerárquico y la sección II representa las etapas de diseño de cada uno de los niveles de control. En el diseño de cada etapa de control se define como mecanismo de inferencia el tipo Mamdani, para disminuir la complejidad del diseño, ya que este método no requiere la descripción matemática detallada del sistema a controlar.

Además, para este caso se requiere definir un método de defusificación, por lo tanto, se propone el método centro de gravedad, con el objeto de obtener el valor numérico y así definir la acción de control.

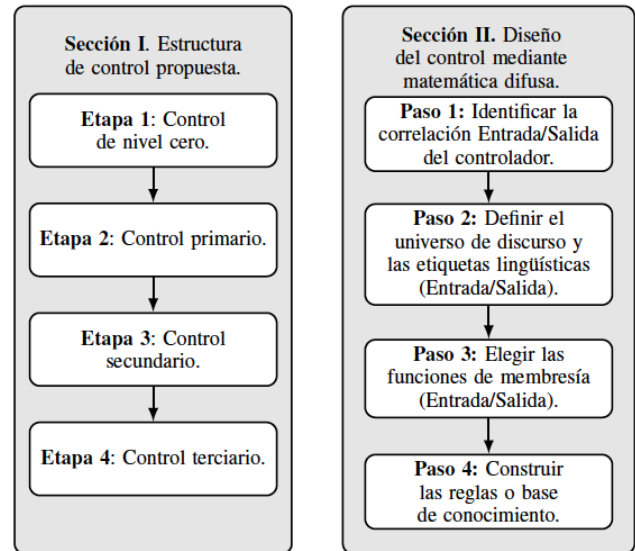


Figura 3: Estrategia de diseño para el control difuso

3.1. *Etapa 1. Control de nivel cero*

El diseño del control de nivel cero debe cumplir los objetivos según el modo operativo de la microrred. En el caso del control de los convertidores seguidores de red el objetivo es seguir la potencia de referencia. Para el caso de los convertidores formadores de red el objetivo es mantener la tensión y frecuencia durante la operación en modo aislado de la red. En este último caso, se requiere adicionalmente del control primario para establecer la referencia de tensión y frecuencia.

A continuación, se presentan cada uno de los pasos de diseño para el control de nivel cero.

3.1.1. *Paso 1. Identificar la correlación Entrada/Salida del controlador*

Para el control de los convertidores seguidores de red, se utilizan como entradas al error de potencia activa y reactiva  $(e(k)_P, e(k)_Q)$ , como se presenta en (1) y (2), para cada muestra  $k$ . Otra entrada es la variación entre muestras del error  $(\Delta e(k)_{P,Q})$ , para obtener mayor información del comportamiento dinámico del sistema, según (3).

$$e(k)_P = P(k)_{ref} - P(k)_{meas} \tag{1}$$

$$e(k)_Q = Q(k)_{ref} - Q(k)_{meas} \tag{2}$$

$$\Delta e(k)_{P,Q} = \frac{e(k)_{P,Q} - e(k-1)_{P,Q}}{t(k) - t(k-1)} \tag{3}$$

En la Figura 4, se presenta la estructura del control empleada para los convertidores seguidores de red.

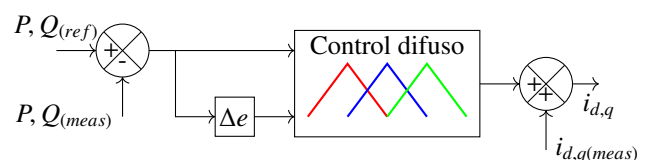


Figura 4: Estructura de control para los convertidores tipo seguidores de red.

En el caso de los convertidores formadores de red, se proponen como entradas al error en tensión en eje directo y eje de cuadratura ( $e(k)_{v_d}, e(k)_{v_q}$ ) y la derivada del error ( $\Delta e(k)_{v_d, v_q}$ ) para cada muestra  $k$ , como se presenta en las ecuaciones (4), (5) y (6), respectivamente.

$$e(k)_{v_d} = v_d(k)_{ref} - v_d(k)_{meas} \tag{4}$$

$$e(k)_{v_q} = v_q(k)_{ref} - v_q(k)_{meas} \tag{5}$$

$$\Delta e(k)_{v_d, v_q} = \frac{e(k)_{v_d, v_q} - e(k-1)_{v_d, v_q}}{t(k) - t(k-1)} \tag{6}$$

En la Figura 5, se presenta la estructura del control propuesta para los convertidores formadores de red.

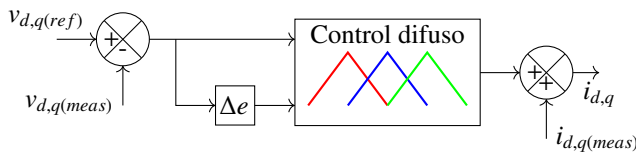


Figura 5: Estructura de control para los convertidores formadores de red.

Finalmente, la salidas del controlador basado en lógica difusa corresponden a la variación requerida en las corrientes en eje directo y en cuadratura definidas como ( $\Delta i_d, \Delta i_q$ ). Estos valores de variación modifican las corrientes de referencia del lazo de control interno de los VSC utilizando las corrientes medidas ( $i_{d,q}(meas)$ ), como se propone en (7).

$$i_{d,q} = \Delta i_{d,q} + i_{d,q}(meas) \tag{7}$$

### 3.1.2. Paso 2. Definir el universo de discurso y las etiquetas lingüísticas (Entrada/Salida)

Los universos de discurso se definen para ambos tipos de convertidores (formadores y seguidores de red), para cada entrada y cada salida. Para los seguidores de red, el universo de discurso de la potencia se restringe según la capacidad de potencia del convertidor, según la ecuación (8).

$$S(k) = \sqrt{P(k)^2 + Q(k)^2} \tag{8}$$

Donde  $S(k)$ , es la potencia aparente del convertidor. En el caso de valores en  $p.u.$ , se consideraran variaciones máximas en el intervalo entre  $[-1, 1]$  para el caso de  $e(k)_{P,Q}$ .

En el caso de los convertidores formadores de red, el error de tensión está restringido siguiendo la misma lógica anterior, por tanto el universo de discurso para  $e(k)_{v_d, v_q}$ , esta definido en valores en  $p.u$  entre  $[-1, 1]$ .

Los límites de los universos de discurso de la derivada del error, se definen de acuerdo a la mayor razón de cambio del sistema. Se especifica un intervalo máximo de  $0.1 p.u.$  para la variación del error entre las muestras  $k$  y  $k-1$ ; por tanto, en ambos casos y para un intervalo de muestreo de  $t(k) - t(k-1) = 1 \times 10^{-5} s$ , el universo de discurso de  $\Delta e(k)_{P,Q}$  y  $\Delta e(k)_{v_d, v_q}$  se define entre  $[-2 \times 10^3, 2 \times 10^3]$ . Los universos de discurso de las salidas están en función de los valores nominales de las corrientes en  $p.u$  entre  $[-1, 1]$ .

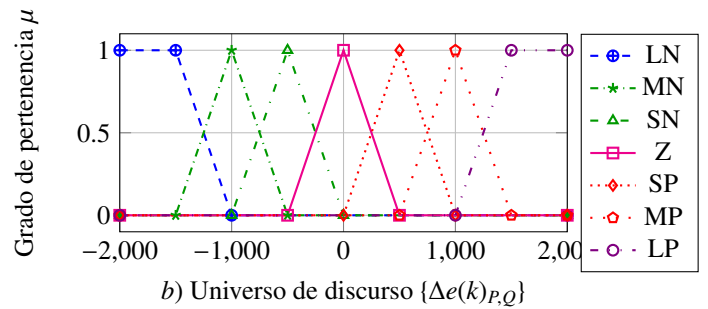
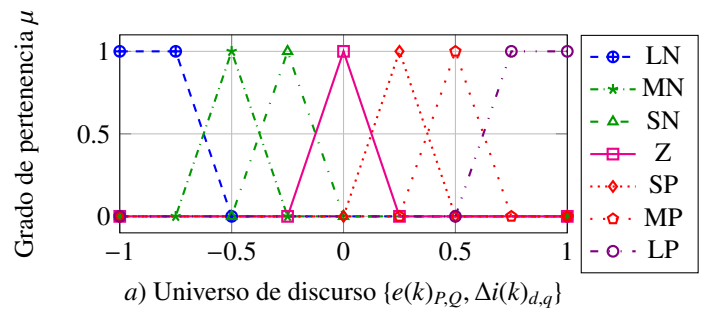


Figura 6: Funciones de membresía propuestas para los convertidores seguidores de red. a) Funciones para las entradas de  $e(k)_{P,Q}$  y las salidas  $\Delta i(k)_{d,q}$ . b) Funciones para las entradas  $\Delta e(k)_{P,Q}$ .

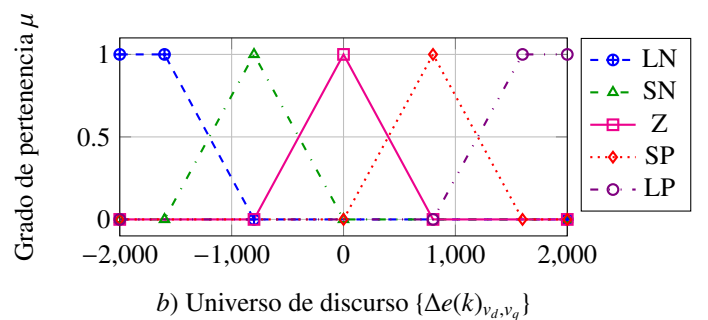
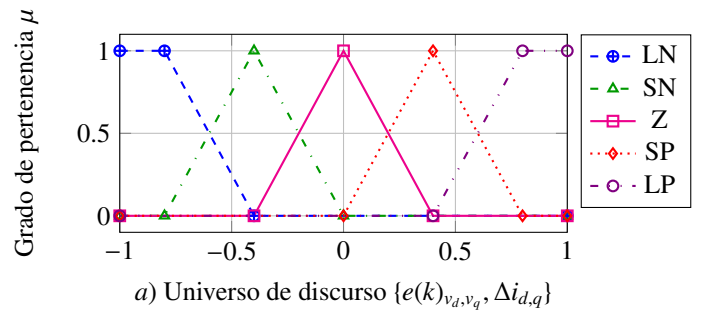


Figura 7: Funciones de membresía propuestas para los convertidores formadores de red. a) Funciones de las entradas de  $e(k)_{v_d, v_q}$  y las salidas  $\Delta i_{d,q}$ . b) Funciones de las entradas  $\Delta e(k)_{v_d, v_q}$ .

Por otra parte, para los valores lingüísticos asignados de los convertidores seguidores de red se propone un estado sobre cero ( $Z$ ), cuatro estados intermedios ( $MN, SN, SP, MP$ ) y dos para los valores extremos ( $LN, LP$ ) del universo de discurso. En el caso de los convertidores formadores de red se define un estado sobre cero ( $Z$ ), dos estados intermedios ( $SN, SP$ ) y dos para los valores extremos ( $LN, LP$ ) del universo de discurso. Con la misma estructura, se definen las etiquetas lingüísticas para las salidas en ambos convertidores.

En las Figuras 6 y 7, se presentan los universos de discurso y los valores lingüísticos para el control de nivel cero.

3.1.3. Paso 3. Elegir las funciones de membresía (Entrada-Salida)

Se proponen funciones de membresía lineales, tipo trapezoidales para los valores extremos y triangulares para los valores intermedios. Estas funciones que se presentan en las Figuras 6 y 7, permiten disminuir el esfuerzo computacional para que el control sea rápido.

3.1.4. Paso 4. Construir las reglas o base de conocimiento

Las reglas de la relación entradas/salida se construyen a partir del comportamiento del sistema. Para los convertidores seguidores de red, las reglas establecen la correlación entre las entradas para potencia activa ( $e(k)_p$ ,  $\Delta e(k)_p$ ) y la salida correspondiente ( $\Delta i_d$ ); así mismo, para potencia reactiva entre las entradas ( $e(k)_q$ ,  $\Delta e(k)_q$ ) y la salida ( $\Delta i_q$ ). En los convertidores formadores de red, se definen las correlaciones entre la tensión en eje directo ( $e(k)_{v_d}$ ,  $\Delta e(k)_{v_d}$ ) y salida ( $\Delta i_d$ ); también para la tensión en cuadratura ( $e(k)_{v_q}$ ,  $\Delta e(k)_{v_q}$ ) y la salida ( $\Delta i_q$ ).

El número de funciones de membresía para cada una de las entradas permite establecer el número de reglas que tendrá el sistema de inferencia, esto debido a las posibles combinaciones entre todas las funciones utilizadas. En este caso se obtienen 25 reglas para los formadores de red y 49 reglas para los convertidores seguidores de red, como se presenta las Tablas 1 y 2.

Tabla 1: Reglas de control - Convertidores formadores de red

		Derivada del error $\Delta e(k)$				
		LN	SN	Z	SP	LP
Error $e(k)$	LN	Z	SN	LN	LN	LN
	SN	SP	Z	SN	LN	LN
	Z	LP	SP	Z	SN	LN
	SP	LP	LP	SP	Z	SN
	LP	LP	LP	LP	SP	Z

Tabla 2: Reglas de control - Convertidores seguidores de red

		Derivada del error $\Delta e(k)$						
		LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP
Error $e(k)$	LN	LN	LN	LN	MN	SN	SN	Z
	MN	LN	LN	MN	SN	SN	Z	SP
	SN	LN	MN	SN	SN	Z	SP	SP
	Z	MN	SN	SN	Z	SP	SP	MP
	SP	SN	SN	Z	SP	SP	MP	LP
	MP	SN	Z	SP	SP	MP	LP	LP
	LP	Z	SP	SP	MP	LP	LP	LP

3.2. Etapa 2. Control primario.

El diseño del control primario debe garantizar la estabilidad de tensión y frecuencia ante perturbaciones de la microrred. Normalmente, este control no se orienta a alcanzar un punto de operación con valores nominales.

Para el diseño del control primario, se tienen los siguientes pasos:

3.2.1. Paso 1. Identificar la correlación Entrada/Salida del controlador

Este control se propone solo para los convertidores formadores de red, cuando la operación de la microrred es en modo aislado. En este caso, las entradas corresponden al error en potencia ( $e(k)_{p,q}$ ), y para mejorar la respuesta del controlador se emplea una segunda entrada como la derivada del error ( $\Delta e(k)_{p,q}$ ) y conservan la misma estructura de las ecuaciones (1), (2) y (3). Las salidas del controlador, se definen como un cambio en la tensión ( $\Delta v(k)_{d,q}$ ) y en la frecuencia ( $\Delta f(k)$ ). Las variables anteriores, definen la nueva referencia del control de nivel cero, tal como se presenta en (9) y (10).

$$v(k)_{d(ref)} = v(k)_{d(nom)} + \Delta v(k)_d \tag{9}$$

$$f(k)_{ref} = f(k)_{nom} + \Delta f(k) \tag{10}$$

3.2.2. Paso 2. Definir el universo de discurso y las etiquetas lingüísticas (Entrada/Salida)

El universo de discurso para esta etapa de control se define con los valores nominales del sistema y la capacidad de generación de las fuentes de energía conectadas, para entradas y salidas respectivamente.

Como este control soporta las perturbaciones más fuertes y las entradas que dependen del error en potencia y su derivada, los rangos del universo de discurso se definen con las máximas variaciones registradas. Para el error en potencia ( $e(k)_{p,q}$ ) se define un rango entre [-5, 5] y para la derivada del error ( $\Delta e(k)_{p,q}$ ) un rango entre  $[-6 \times 10^3, -6 \times 10^3]$  con intervalo de muestreo de  $1 \times 10^{-5}$ , que equivale a una variación del error de 0.3 p.u.. Para las salidas, se analizan los rangos permitidos para las variables propuestas y se definen así: para la tensión ( $\Delta v$ ) un rango entre [-10, 10] % y para la frecuencia ( $\Delta f$ ) un rango entre [-6, 6] % de los valores nominales.

Las etiquetas lingüísticas del control primario son cinco y se distribuyen de manera uniforme sobre el universo de discurso así: una alrededor de cero (Z), dos para valores intermedios (S P, S N), y dos en los valores extremos (LP, LN). Esta distribución se conserva tanto para entradas como para salidas. Los valores lingüísticos definidos propuestos conservan la misma distribución que se presenta en la Figura 7.

3.2.3. Paso 3. Elegir las funciones de membresía (Entrada-Salida)

El control primario requiere un bajo costo computacional, por lo que se definen funciones de membresía trapezoidales y triangulares, ya que representan funciones lineales y disminuyen el tiempo de procesamiento del controlador. La representación de las funciones de membresía propuestas conservan la misma estructura presentada en la Figura 7, con la diferencia que para este tipo de control los universos de discurso se definen en la sección 3.2.2.

3.2.4. Paso 4. Construir las reglas o base de conocimiento

La base de conocimiento se obtiene de la correlación de entra-das y salidas. Para el control primario, las reglas establecen la correlación entre las entradas de potencia activa ( $e(k)_p, \Delta e(k)_p$ ) y la salida ( $\Delta v(k)_d$ ); así mismo para las entradas de poten-cia reactiva ( $e(k)_Q, \Delta e(k)_Q$ ) y la salida ( $\Delta f(k)$ ). La cantidad de reglas depende de las combinaciones posibles de valores lingüísticos propuestos para las entradas; por lo tanto, se de-finen 25 reglas que conservan la misma estructura de la Tabla 1, para ambas acciones de control.

3.3. Etapa 3. Control secundario.

El control secundario debe eliminar desviaciones de los valores nominales en tensión y frecuencia de la microrred. Este control se aplica de forma local en los convertidores formadores de red, para mejorar el perfil de tensión y frecuencia cuando el sistema se encuentra en estado estable.

3.3.1. Paso 1. Identificar la correlación entrada - salida del controlador

Las entradas de este control son error entre los valores nominales y los valores medidos de tensión y frecuencia ( $e(k)_{(v_d, f)}$ ), como se presenta en (11) y (12) para cada muestra  $k$ , y para la derivada del error ( $\Delta e(k)_{(v_d, f)}$ ), según (13). En cuanto a la salida, debe modificar las desviaciones obtenidas en estado estable, por lo tanto, se definen como salidas del control una fracción de tensión y frecuencia ( $\Delta f(k), \Delta v(k)_d$ ), que modifica directamente la referencia entregada al control primario.

$$e(k)_{v_d} = v_d(k)_{nom} - v_d(k)_{meas} \tag{11}$$

$$e(k)_f = f(k)_{nom} - f(k)_{meas} \tag{12}$$

$$\Delta e(k)_{v_d, f} = \frac{e(k)_{v_d, f} - e(k-1)_{v_d, f}}{t(k) - t(k-1)} \tag{13}$$

3.3.2. Paso 2. Definir el universo de discurso y las etiquetas lingüísticas (Entrada/Salida)

Los universos de discurso se definen a partir de las máximas variaciones presentes en el sistema y el valor nominal de las variables propuestas. De acuerdo a lo anterior, se definen para el error de tensión ( $e(k)_{v_d}$ ) en valores en *p.u.* un rango entre [-1, 1], para la derivada del error de tensión ( $\Delta e(k)_{v_d}$ ) un rango de [-500, 500], para el error en frecuencia ( $e(k)_f$ ) un rango de [-3, 3] y para la derivada del error en frecuencia ( $\Delta e(k)_{v_d}$ ) un rango de [-100, 100] con intervalo de muestreo de  $1 \times 10^{-5}$ . En cuanto a las salidas ( $\Delta f(k), \Delta v(k)_d$ ), se define un universo de discurso con un rango de [-10, 10], de manera que ante variaciones fuertes en las entradas, el controlador pueda afrontar el comportamiento de manera ágil.

Los valores lingüísticos seleccionados se definen de la siguiente manera: uno se diseña para la variación alrededor de cero (Z), dos para las variaciones extremas (LP, LN), y finalmente dos entre cero y los valores extremos (SP, SN). Las variables lingüísticas se definen para entradas y salidas tiene la misma estructura planteada en la Figura 7.

3.3.3. Paso 3. Elegir las funciones de membresía (Entrada/Salida)

Se proponen funciones de membresía trapezoidales y triangulares, por las razones expuestas en la definición de los contro-les anteriores. Las funciones de membresía propuestas tienen la misma distribución que se presenta en la Figura 7, con la dife-rencia que los rangos de los universos de discurso se definen en la sección 3.3.2, tanto para las entradas como para las salidas de control.

3.3.4. Paso 4. Construir las reglas o base de conocimiento

En el caso del control secundario, las reglas representan la correlación entre las entradas de tensión en eje direc-to ( $e(k)_{v_d}, \Delta e(k)_{v_d}$ ) y la salida ( $\Delta v_d(k)$ ); así como la entrada ( $e(k)_f, \Delta e(k)_f$ ) y la salida ( $\Delta f(k)$ ). De acuerdo a la cantidad de funciones de membresía definidos para entradas, se obtienen 25 reglas. En la Tabla 3 se definen las reglas para el control de fre-cuencia. Las reglas para el control de tensión tienen la misma estructura presentada en la Tabla 1.

Tabla 3: Reglas para el control secundario de frecuencia

		Derivada del error $\Delta e(k)$				
		$\Delta f$	LN	SN	Z	SP
Error $e(k)$	NG	Z	SN	SN	SN	LN
	SN	SP	Z	SN	SN	SN
	Z	SP	SP	Z	SN	SN
	SP	SP	SP	SP	Z	SN
	LP	LP	SP	SP	SP	Z

3.4. Etapa 4. Control terciario.

El control terciario está asociado a la operación de la microrred y se encarga de optimizar su funcionamiento en estado estacio-nario. Depende de la predicción de la disponibilidad del recurso energético primario y también de los requerimientos de poten-cia de los usuarios de la microrred. Éste se encarga de definir  $P(k)_{re f}$  para cada uno de los convertidores seguidores de red, que en este caso se define como una variable de entrada. Este tipo de control se encarga de realizar la programación de ge-neración óptima y el ajuste en tiempo real de la generación de potencia. Este control considera la generación de energía reno-vable disponible y el pronóstico de la potencia demandada. El periodo de acción del control terciario oscila desde segundos, algunos minutos e incluso horas, según el energético primario analizado (Haiyun et al., 2013), (Heyderi et al., 2018).

4. Pruebas y análisis de resultados.

4.1. Sistema de prueba

El sistema de pruebas opera a 400V y está compuesto por una carga variable, dos generadores distribuidos integrados en el convertidor, un dispositivo de almacenamiento y la red el éctrica. En este sistema, el VSC del dispositivo de almacenamiento opera como formador de red, y los VSC de las fuentes de gene-ración operan como seguidores de red. La transferencia de los recursos de generación y energía almacenada a las cargas y a la red eléctrica se realiza a través de un punto de acoplamiento común o PCC (por sus siglas en ingl és correspondientes a Point of Common Coupling).



Los parámetros de línea consideran las resistencias de secuencia positiva y cero de 0.423 y 0.3864  $\Omega/km$ ; inductancias de secuencia positiva y cero de  $0.4265 \times 10^{-3}$  y  $4.1264 \times 10^{-3} H/km$ ; capacitancias de secuencia positiva y cero de  $310 \times 10^{-9}$  y  $7.751 \times 10^{-9} F/km$  y la longitud de la línea es igual a 0.1 km. La carga fija es 300 + 145.4ikVA y la carga variable es 35 + 33.9ikVA. Todos los generadores basados en fuentes no convencionales de energía tienen la misma potencia nominal de 100kVA. La simulación se realizó empleando el software OpenModelica.

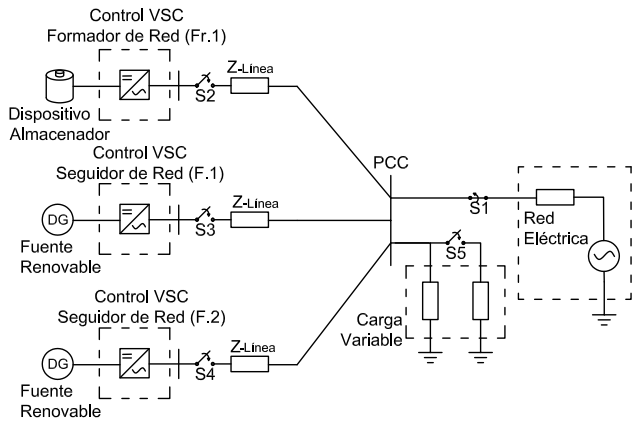


Figura 8: Sistema de prueba propuesto.

4.2. Escenarios de prueba y perturbaciones

Los escenarios de prueba se presentan en la Tabla 4. Inicialmente la red eléctrica está alimentando una parte de la carga (desde 0 s hasta 0.6 s). En 0.6 s se conmuta la operación a modo aislado, mediante la apertura de S1 y cierre de S2. Luego se conecta el VSC seguidor (F.1) a los 3.2 s. Posteriormente, en 3.6 y 4.0 s se realizan cambios en la referencia de potencia activa y reactiva, respectivamente, del VSC seguidor de red (F.1). En 6 s se conecta el VSC seguidor adicional (F.2) mediante S4, manteniendo la microrred en modo aislado. El último escenario operativo considera el cambio en la referencia de potencia activa y reactiva a los 6.4 y 6.8 s, respectivamente, para el segundo VSC seguidor de red (F.2).

Tabla 4: Escenarios de prueba propuestos

Número de escenarios	Tiempo de conexión [s]					
	0.6	3.2	3.6	4.0	6.0	6.4 6.8
1 Operación en modo aislado (S1=0)	S2					
2 Conexión de VSC's seguidores de red	S3		S4			
3 Cambio de referencia $P(k)_{ref}$ Cambio de referencia $Q(k)_{ref}$	F.1		F.2			
	F.1		F.2			

Ante cada escenario de prueba de la microrred, se realizan las perturbaciones que se presentan en la Tabla 5.

Se consideran fallas trifásicas cuando se estabiliza la conexión de cada convertidor en la red y se realiza cambio de carga cuando se tienen los tres convertidores conectados.

Tabla 5: Perturbaciones propuestas.

Número de escenarios	Descripción	Tiempo de conexión [s]			
		1.7	4.5	7.4	8.0
4	Falla Trifásica (duración 50 ms)	✓	✓		✓
5	Cambio de carga			S5	

4.3. Análisis de resultados

Con el fin de dar una valoración global de los resultados se han calculado dos índices de desempeño: el Criterio de la integral del valor absoluto del error multiplicado por el tiempo, ITAE por sus siglas en inglés correspondientes a Integral of time multiplied Absolute Error Criterion y el Criterio de la integral del valor absoluto del error o IAE por sus siglas en inglés correspondientes a Integral Absolute Error Criterion. Los resultados se muestran en las tablas 6 y 7

Tabla 6: IAE e ITAE para el convertidor formador de red. Voltaje (v) y frecuencia (f).

	Variable	Valor
IAE	v	0.926
	f	0.197
ITAE	v	6.093
	f	1.014

Tabla 7: IAE e ITAE para el convertidor seguidor de red. Potencia Activa (P) y Potencia Reactiva (Q).

	Variable	Valor
IAE	P	0.459
	Q	0.388
ITAE	P	3.566
	Q	3.071

4.3.1. Operación en modo aislado de la microrred

En la Figura 9, se presenta la tensión y la frecuencia del sistema ante la desconexión de la red principal y la conexión del convertidor formador; además, se presenta una falla trifásica aplicada luego de estabilizado el sistema en modo aislado. Por un lado, la línea sólida roja, representa el sistema con acción de control de nivel cero y primario (CP). Por otro lado, la línea a trazos azul representa el mismo sistema incluida la acción de control secundario (CPS).

El control propuesto estabiliza tensión y frecuencia en ambos escenarios, y los tiempos de establecimiento son bastante rápidos. El control primario estabiliza la tensión en 98 ms en el caso del cambio de modo de operación a los 0.6 s, mientras que en el caso de la falla trifásica a los 1.7 s el tiempo de establecimiento es de 10 ms. En este caso, la tensión se acerca al valor de 1p.u., lo cual corrobora el objetivo del control primario, que consiste en estabilizar el sistema, pero no necesariamente en el valor nominal. Así mismo, la estrategia de control permite estabilizar rápidamente la frecuencia del sistema ya que ante el



cambio de modo de operación, el tiempo de establecimiento es 205 ms, mientras que en el caso de falla trifásica es de 156 ms. Al aplicar control secundario, se observa que la tensión alcanza valores nominales, pero la frecuencia se perturba levemente por las acciones de control para la tensión.

#### 4.3.2. Conexión de VSC seguidores de red

En la Figura 10, se presentan las mediciones cuando la microrred opera en modo aislado y se conecta otro convertidor en 6.0 s. Este caso se considera que el convertidor seguidor de red no debe entregar potencia al sistema hasta que el sistema se estabilice. El ingreso del nuevo convertidor, perturba la microrred tanto la tensión como la frecuencia, pero se logra estabilizar en 53 ms para la tensión, mientras que la frecuencia se estabiliza a los 87 ms. Se observa que el tiempo de establecimiento es mayor para la frecuencia y la oscilación es similar para ambos controles. Además, la tensión presenta una notable mejoría de-bido al control secundario que permite estar más cerca del valor nominal, comparado con el efecto de solo el control primario.

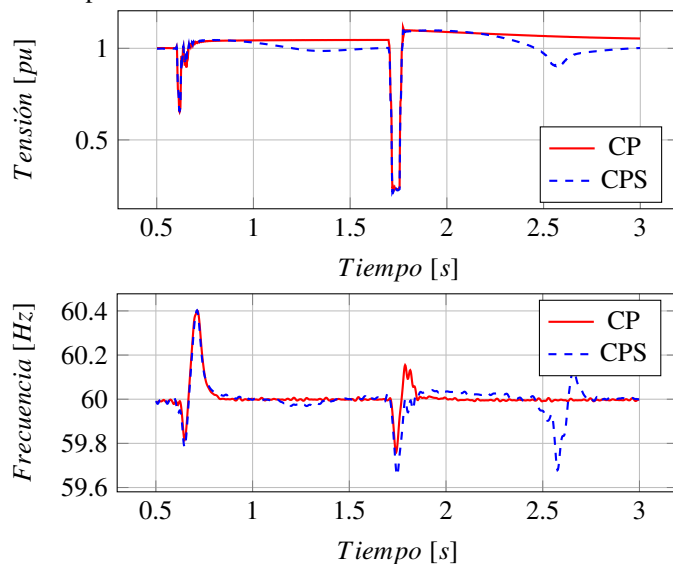


Figura 9: Medición de tensión y frecuencia en el convertidor seguidor de red (F.1), ante operación en modo aislado y falla trifásica.

#### 4.3.3. Cambio de potencia en VSC seguidores de red

Para el caso representado por la Figura 10 se observa la perturbación en las señales de tensión y la frecuencia a los 6.4s y 6.8s, originado por el cambio de la referencia de la potencia activa y reactiva del segundo convertidor seguidor de red (F.2). Aunque la perturbación es pequeña, ambos controles logran estabilizar las señales rápidamente en 250ms, aproximadamente.

En la Figura 11, se observa el cambio de potencia en uno de los generadores, como consecuencia de la acción del control terciario, que en este artículo se modela como una acción externa. En este caso, el control primario sigue la referencia adecuadamente, con tiempos de establecimiento de 387ms para la potencia activa y 97ms para la potencia reactiva. Sin embargo, se observa que cuando el sistema alcanza el estado estable y sólo se aplica control primario se mantiene un rizado, pero la acción de control secundario que mitiga las

desviaciones de tensión y frecuencia, también reduce el rizado en estado estable de la potencia en los convertidores seguidores de red.

#### 4.3.4. Falla trifásica

En la Figura 9, se puede apreciar que a 1.7s hay una falla trifásica con una duración de 50ms. Se observa, que ambos controladores llevan el sistema a estado estable luego de despejada la falla, con un tiempo de subida de aproximadamente 16ms. Ante esta falla trifásica cuya resistencia tiene un valor bajo, se genera un hueco de tensión de 0,82p.u. En este caso, la frecuencia tiene mayor oscilación cuando solo está presente el control primario, mientras que se compensa con el control secundario.

Finalmente, en la Figura 12 se muestran las señales de tensión y de frecuencia medidas en los terminales del segundo VSC seguidor (F.2), en la caso de una falla trifásica de 50ms de duración, localizada en el PCC y que ocurre a los 8s. El comportamiento en este caso en el que se encuentra la microrred aislada, funcionando a plena carga y con dos convertidores seguidores de red (F.1 y F.2) y el convertidor formador de red (Fr.1), es muy similar al presentado en la Figura 9. En ambos casos el control mantiene las señales de frecuencia y tensión en su valor de referencia.

#### 4.3.5. Cambio de carga

La Figura 10, presenta la respuesta de la microrred ante un cambio de carga a los 7.4s. Las acciones de control estabilizan el sistema, aunque el control secundario disminuye el hueco de tensión generado. En cuanto a la variación de la frecuencia, la acción de control secundario disminuye el rizado, comparado con la acción de control primario. Adicionalmente, la frecuencia alcanza su valor de establecimiento en un tiempo menor con respecto a la tensión.

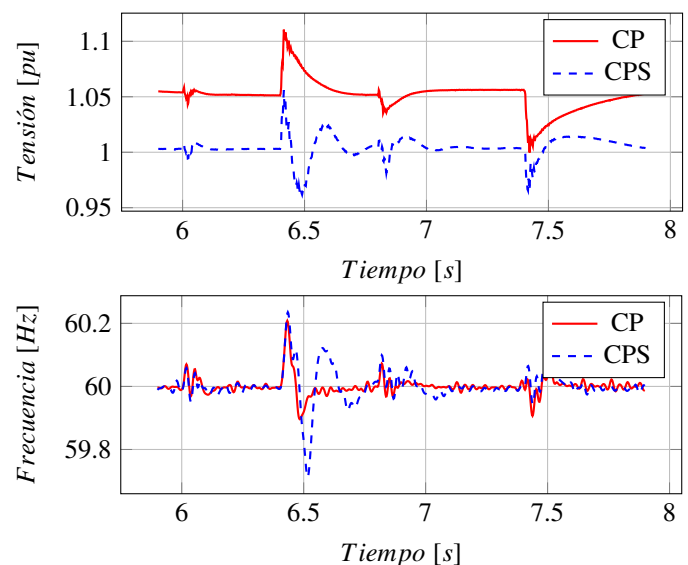


Figura 10: Medición de tensión y frecuencia en el convertidor formador de red (Fr.1), ante variaciones en la carga conectada a la microrred.

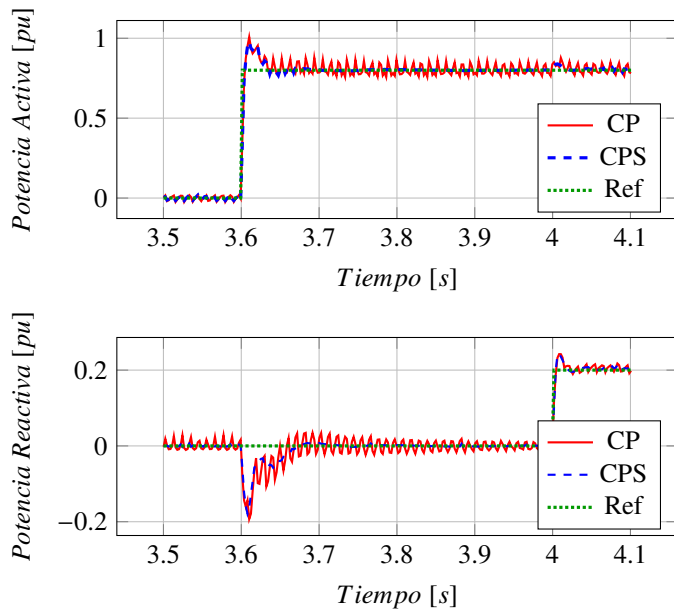


Figura 11: Medición de potencia en el convertidor seguidor (F.1), ante variaciones de la referencia de potencia.

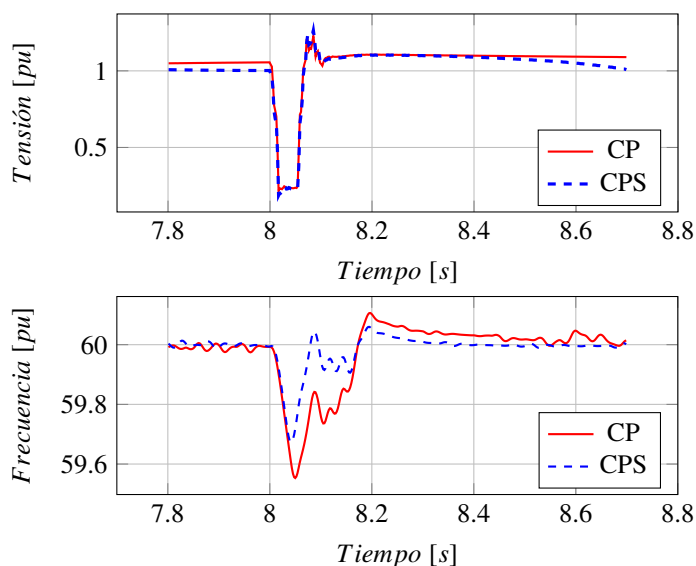


Figura 12: Medición de tensión y frecuencia en el convertidor seguidor de red (F.2), ante operación en modo aislado y falla trifásica.

## 5. Conclusiones

El control de los VSC en una microrred involucra una etapa de modelación la cual normalmente implica hacer unas simplificaciones del sistema a controlar, lo anterior puede ocasionar que no se consideren dificultades de operación como oscilaciones, compensación de potencia reactiva, desbalance de cargas y mitigación de corrientes armónicas a partir de la utilización de la lógica difusa permite tener una alternativa que puede manejar todas estas circunstancias a partir del conocimiento que se tenga sobre la operación de la red.

En este artículo se presenta una estrategia completa para el diseño del control de convertidores VSC que integran recursos energéticos distribuidos a las microrredes. Se muestra cómo la

estrategia que utiliza la matemática difusa tiene un diseño sencillo, presentada en pasos fácilmente repetibles para otros procesos en los cuales no se tiene un modelo del sistema a controlar. Adicionalmente y según los resultados obtenidos, se aprecia cómo la estrategia jerárquica de control funciona satisfactoriamente en caso de conexión o desconexión de la microrred de a red principal, cambio de carga, cambio de referencia e incluso ante fallas trifásicas severas. La facilidad de implementación de esta estrategia permite integrarla de manera sencilla a aplicaciones de microrredes, para resolver problemas de suministro de energía, especialmente en comunidades aisladas.

## Agradecimientos

Este artículo es un resultado parcial de los proyectos asociados a los contratos FP44842-031-2018 y 80740-774-2020, financiados por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Colombiano (Minciencias) y desarrollado por el grupo de investigación ICE3 de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP).

## Referencias

- Akagi, H., Watanabe, E. H., Aredes, M., 2011. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. John Wiley and Sons, New York, NY, USA.
- Al Badwawi, R., Issa, W. R., Mallick, T. K., Abusara, M., 2019. Supervisory control for power management of an islanded ac microgrid using a frequency signalling-based fuzzy logic controller. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 10 (1), 94–104. DOI: 10.1109/TSTE.2018.2825655
- Awal, M. A., Yu, H., Tu, H., Lukic, S. M., Husain, I., 2020. Hierarchical control for virtual oscillator based grid-connected and islanded microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics* 35 (1), 988–1001. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2912152
- Baghaee, H. R., Mirsalim, M., Gharehpetian, G. B., 2018. Performance improvement of multi-der microgrid for small- and large-signal disturbances and nonlinear loads: Novel complementary control loop and fuzzy controller in a hierarchical droop-based control scheme. *IEEE Systems Journal* 12 (1), 444–451. DOI: 10.1109/JSYST.2016.2580617
- Bordons, C., García-Torres, F., Rida, M., 2020. Control predictivo en microrredes interconectadas y con vehículos eléctricos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 17 (3), 239–253. URL: <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/13304> DOI: 10.4995/riai.2020.13304
- Castro, L., Bravo López, M. F., Rios Ocampo, M., García Ceballos, C. A., Ramírez Loaiza, D. A., Pérez-Londoño, S., Garcés, A., Bueno-López, M., Mora-Flórez, J., 2021. Control jerárquico en micro-redes AC. Vol. 1. UTP editorial. URL: <https://hdl.handle.net/11059/13701>
- Castro, L., López, M. B., Mora-Florez, J., 2019a. Adjustment strategy of a fuzzy control to integrate renewable sources and storage devices in microgrids. In: 2019 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA). pp. 1–6. DOI: 10.1109/PEPQA.2019.8851561
- Castro, L., Peréz-Londoño, S., Mora-Flórez, J., 2019b. Application of fuzzy logic based control in micro-grids. In: 2019 FISE-IEEE/CIGRE Conference - Living the energy Transition (FISE/CIGRE). pp. 1–8. DOI: 10.1109/FISECIGRE48012.2019.8985002
- Chandorkar, M. C., Divan, D. M., Adapa, R., Jan 1993. Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems. *IEEE Transactions on Industry Applications* 29 (1), 136–143. DOI: 10.1109/28.195899
- Farrokhabadi, M., Canizares, C. A., Simpson-Porco, J. W., Nasr, E., Fan, L., Mendoza-Araya, P., Tonkoski, R., Tamrakar, U., Hatzigiorgiou, N. D., Lagos, D., Wies, R. W., Paolone, M., Liserre, M., Meegahapola, L., Kabalan, M., Hajimiragha, A. H., Peralta, D., Elizondo, M., Schneider, K. P., Tuffner,

- F., Reilly, J. T., 2019. Microgrid stability definitions, analysis, and examples. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1–1.  
DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2925703
- Haiyun, W., Zuochun, Z., Qingfang, Y., Wei, B., Guoqing, H., Guanghui, L., Kaihui, F., Dec. 2013. A Hierarchical Control of Microgrid Based On Droop Controlled Voltage Source Converter. In: *IEEE PES Asia-Pacific P. En. Eng. Conf. (APPEEC)*. Hong Kong, China, pp. 1–4, doi: <https://www.doi.org/10.1109/APPEEC.2013.6837176>.  
DOI: 10.1109/APPEEC.2013.6837176
- Heydari, R., Dragicevic, T., Blaabjerg, F., 2019. High-bandwidth secondary voltage and frequency control of vsc-based ac microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics* 34 (11), 11320–11331.  
DOI: 10.1109/TPEL.2019.2896955
- Heydari, R., Alhasheem, M., Dragicevic, T., Blaabjerg, F., Sep. 2018. Model Predictive Control Approach for Distributed Hierarchical Control of VSC-Based Microgrids. In: *2018 20th Eur. Conf. P. Electron. Appl. (EPE'18 EC-CE Europe)*. pp. 1–8.
- Hou, X., Sun, Y., Lu, J., Zhang, X., Koh, L. H., Su, M., Guerrero, J. M., 2018. Distributed hierarchical control of ac microgrid operating in grid-connected, islanded and their transition modes. *IEEE Access* 6, 77388–77401.  
DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2882678
- Huang, L., Xin, H., Wang, Z., Zhang, L., Wu, K., Hu, J., 2019. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation. *IEEE Transactions on Smart Grid* 10 (1), 578–591.  
DOI: 10.1109/TSG.2017.2749259
- Hussain, A., Arif, S. M., Aslam, M., 2017. Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 71, 12 – 28.  
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116310863>  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.033>
- Kerdphol, T., Watanabe, M., Hongesombut, K., Mitani, Y., 2019. Self-adaptive virtual inertia control-based fuzzy logic to improve frequency stability of microgrid with high renewable penetration. *IEEE Access* 7, 76071–76083.  
DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2920886
- Loukil, K., Abbas, H., Abid, H., Abid, M., Toumi, A., 2020. Design and implementation of reconfigurable mppt fuzzy controller for photovoltaic systems. *Ain Shams Engineering Journal* 11 (2), 319 – 328.  
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447919301388>  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.10.002>
- Montoya, O. D., Garcés, A., Serra, F. M., 2018. Ders integration in microgrids using vses via proportional feedback linearization control: Supercapacitors and distributed generators. *Journal of Energy Storage* 16, 250 – 258.  
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X17303912>  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.01.014>
- Pérez-Londoño, S., Garcés, A., Bueno-López, M., Mora-Flórez, J., 2020. Modelizado de componentes en micro-redes AC. Vol. 1. UTP editorial.  
DOI: <https://doi.org/10.22517/97895>
- Rakshit, S., Maity, J., 2018. Fuzzy logic controlled Ćuk converter. In: *2018 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*. pp. 0771–0775.  
DOI: 10.1109/ICCSP.2018.8524168
- Roselyn, J. P., Chandran, C. P., Nithya, C., Devaraj, D., Venkatesan, R., Gopal, V., Madhura, S., 2020. Design and implementation of fuzzy logic based modified real-reactive power control of inverter for low voltage ride through enhancement in grid connected solar pv system. *Control Engineering Practice* 101, 104494.  
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066120301179>  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104494>
- Sen, S., Kumar, V., 2018. Microgrid control: A comprehensive survey. *Annual Reviews in Control* 45, 118 – 151.  
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578818300373>  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.04.012>
- Swathy, K., Jantre, S., Jadhav, Y., Labde, S. M., Kadam, P., 2018. Design and hardware implementation of closed loop buck converter using fuzzy logic controller. In: *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. pp. 175–180.  
DOI: 10.1109/ICECA.2018.8474570
- Teodorescu, R., Liserre, M., Rodriguez, P., 2011. *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. John Wiley and Sons, New York, NY, USA.