



# REVISTA INGENIO

## Análisis de Protecciones Eléctricas de Microgrids Modo Isla con Elevada Penetración de Energías Renovables no Convencionales

### Analysis of Electrical Protections of Island Mode Microgrids with High Penetration of Non-Conventional Renewable Energies

Kevin Alexander Ortiz Santiana | Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador

#### ARTICLE HISTORY

Received: 7/11/2022  
Accepted: 7/12/2022

#### KEY WORDS

Distributed generation, micro network, island mode, protection.

#### ABSTRACT

The integration of distributed generation in microgrids offers a renewable alternative to conventional generation with improved power quality and reduced energy losses. However, microgrids also pose new technological challenges such as the coordination of electrical protection measures against short-circuit currents and fluctuations in the bidirectional energy flow. This research measures load and generation operating conditions to determine the best settings and overcurrent protection for microgrids. Simulations were developed for four different cases: synchronous generator bus, wind generation bus and solar generator bus 1 and 2, separate three-phase faults were caused in each bus to which each generator was connected, thus obtaining the operating curve of each relay and the process of disconnecting said bar.

#### PALABRAS CLAVE

Generación distribuida, microred, modo isla, protección.

#### RESUMEN

La integración de la generación distribuida en microrredes ofrece una alternativa renovable a la generación convencional con una calidad de energía mejorada y pérdidas de energía reducidas. Sin embargo, las microrredes también plantean nuevos retos tecnológicos, como la coordinación de medidas de protección eléctrica ante corrientes de cortocircuito y fluctuaciones en el flujo de energía bidireccional. Esta investigación mide las condiciones de operación de la carga y generación para determinar los mejores ajustes y protección contra sobrecorriente para microrredes. Se desarrollaron simulaciones para cuatro casos diferentes: barra del generador sincrónico, barra de generación eólica y barra del generador solar 1 y 2, se provocaron fallas trifásicas separadas en cada barra a la que estaba conectado cada generador, obteniendo así la curva de funcionamiento de cada relé y el proceso de desconexión de dicha barra.

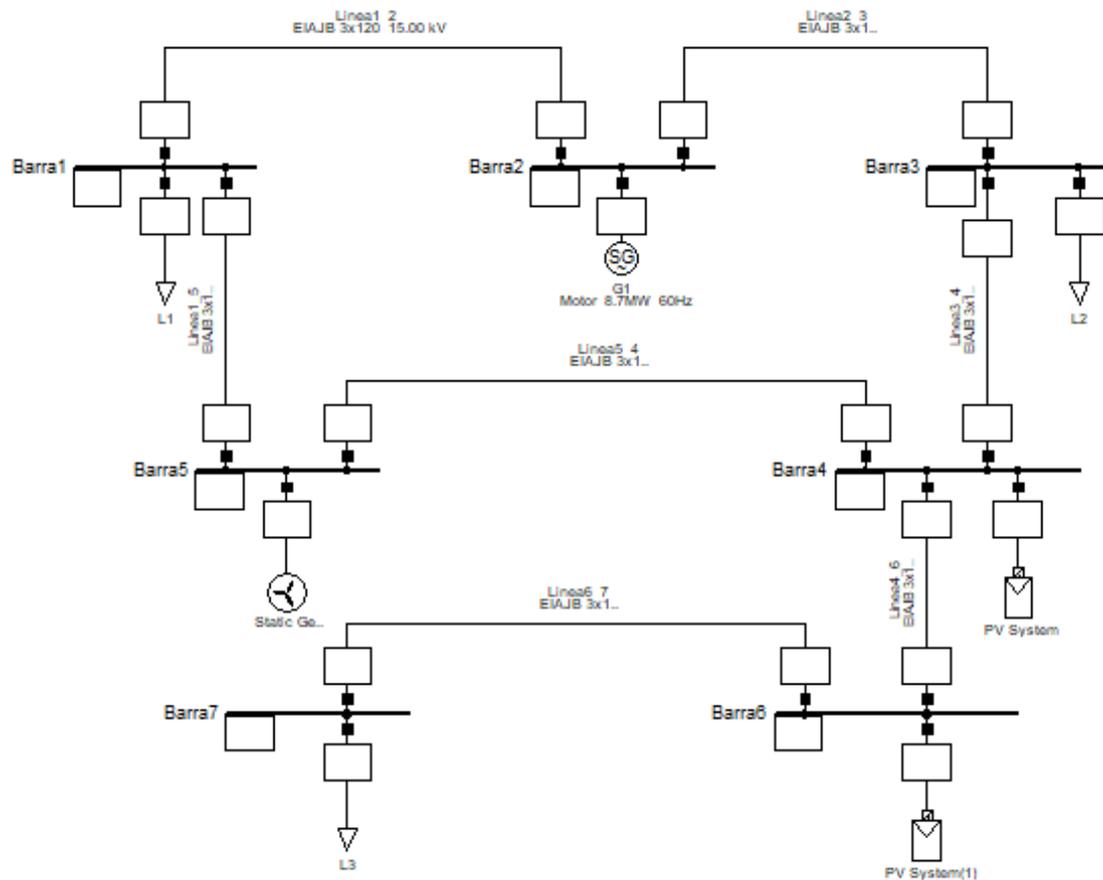
## I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, en el mercado eléctrico se escucha el concepto de microrredes, el cual es una serie de generadores de cargas y almacenamiento de energía que forman una pequeña red, que se puede conectar a una red convencional u operar en modo isla, es decir, sin conexión a la red eléctrica.

La creciente demanda de energía eléctrica y la predisposición a reducir los gases de efecto invernadero que aportan al calentamiento global exigen la integración de fuentes de energía renovables como la eólica y la solar a través de la generación distribuida; los usuarios ya no son solo una carga en la red, sino que pueden aportar

**Figura 1.**

Caso de estudio



energía a la misma, reduciendo así las pérdidas de electricidad y la contaminación [1] que se produce al generar energía eléctrica a partir de fuentes de energía fósiles.

Sin embargo, debido a la imprevisibilidad de la energía renovable, el flujo bidireccional y las corrientes de cortocircuito variables que exhiben las barras de generación distribuida complican enormemente la operación y protección del sistema. Esta es la razón por la que la protección de circuitos eléctricos tradicional no funciona correctamente [2].

Las fallas, tanto grandes como pequeñas, en el sistema eléctrico, provocan importantes pérdidas económicas que afectan directamente la calidad de vida de las personas. Por este motivo, se requiere un estudio exhaustivo de los dispositivos de protección eléctrica. Los estudios sobre la protección de las microrredes son de gran interés para mejorar la confiabilidad considerando el uso de energías renovables, ya que pueden operar en islas con solo generación distribuida, pero esto implica que los componentes de las microrredes necesitan un control para asegurar los niveles de voltaje, frecuencia, potencia activa y reactiva en valores nominales [3].

En el presente proyecto se realiza la simulación en el software Power Factory DigSilent de un caso de estudio en el cual se efectúa el análisis de flujo de carga, análisis de cortocircuito en las barras donde se encuentran conectadas las fuentes de generación y una simulación dinámica de cortocircuito en las barras previamente mencionadas, con la finalidad de obtener criterios de protección de sobrecorrientes y verificar el comportamiento de la frecuencia del sistema frente a dichas contingencias.

## 1.1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

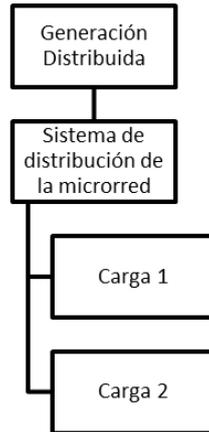
### 1.1.1. ¿Qué es una microrred?

Una microrred es una red eléctrica inteligente que opera sobre una red de distribución, o sin esta, este tipo de sistemas contribuyen a la confiabilidad y eficiencia de los servicios eléctricos en zonas remotas, además de que ayudan a mantener un flujo activo de energía [4].

Una de las grandes ventajas de la red es que la generación se encuentra cerca de la carga, eso significa que se optimiza las pérdidas de energía. De manera similar, si

**Figura 2.**

Esquema de una microrred operando en modo isla



falla la red principal, la microrred puede operar en modo isla, sin necesidad de perder el suministro de electricidad y así satisfacer la demanda [1].

En la figura 1 se muestra el caso de estudio que corresponde a una microrred modo isla de 7 barras, posee una topología mixta, una parte es radial y otra en anillo (ver Figura 1).

### 1.1.2. Protecciones en una microrred

Se propuso una protección de sobrecorriente con diferentes curvas de operación del relé, y uno de los enfoques principales en este estudio fue modificar este documento para que el esquema de protección pueda generalizarse ante diferentes escenarios de operación [5].

Varios autores [6], [7], [8] destacan que, para implementar una estrategia de protección, es necesario considerar los efectos de corriente de cortocircuito que tienen los distintos generadores, dependiendo del estado de operación del sistema (conectado a la red como modo o modo isla).

### 1.1.3. Generación distribuida

La generación distribuida se compone de fuentes de energía renovables convencionales o no convencionales, es la cooperación de suministrar energía a través de la interacción con una red local o una red convencional.

El sistema ya tiene una operatividad diferente, con múltiples barras que actúan como carga y generación, la inyección de corriente en el sistema reduce las pérdidas debido a la transferencia de energía, además si se inyectan reactivos mejora el factor de potencia y eso ayuda a mejorar el perfil de tensión del sistema de distribución [9] (ver Figura 2).

### 1.1.4. Operación de la microrred en modo isla

Esto es posible si la generación distribuida es lo suficientemente grande como para cubrir las demandas de

energía y las pérdidas de energía en la red [9]. Debido a que existe un flujo diferente de energía en este modo de operación en comparación con el modo de operación conectado a la red, solo hay una contribución de corriente de cortocircuito proporcionada por energía renovable, lo que hace que sea mucho más complicado coordinar la protección eléctrica de la red.

## 2. MÉTODO

La implementación de energía distribuida en las microrredes es una oferta muy beneficiosa para el mercado eléctrico, ya que es una propuesta renovable y limpia, pero la misma naturaleza de estas fuentes de energía, además de la tecnología necesaria para poder utilizarlas presenta desafíos técnicos muy grandes, entre ellos está la protección del sistema [5], [10], [11]; para el caso de estudio se plantea la simulación de [9], sin considerar la red eléctrica convencional, además de añadir un pequeño generador síncrono en la barra 2 y una carga 1 en la barra 1; en este estudio se aborda el análisis de curvas de relés frente a fallas trifásicas individuales en las barras donde se encuentran conectados generadores, además de verificar el estado de la red con un flujo de carga y comprobar la frecuencia mediante una simulación dinámica frente a las fallas anteriormente mencionadas.

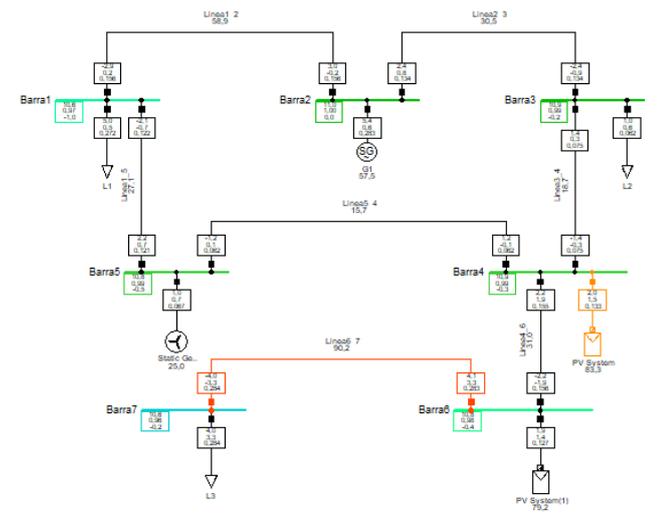
### 2.1. DESARROLLO

#### 2.1.1. Estudio de flujo de carga

Los criterios considerados para desarrollar el flujo de potencia en el circuito de caso de estudio: la red podrá abastecer las cargas, la red debe mantener continuidad del servicio ante la existencia de falla de algún elemento del sistema, no se aceptan sobrecargas en los elementos de la red, el nivel de voltaje no debe exceder al 5%.

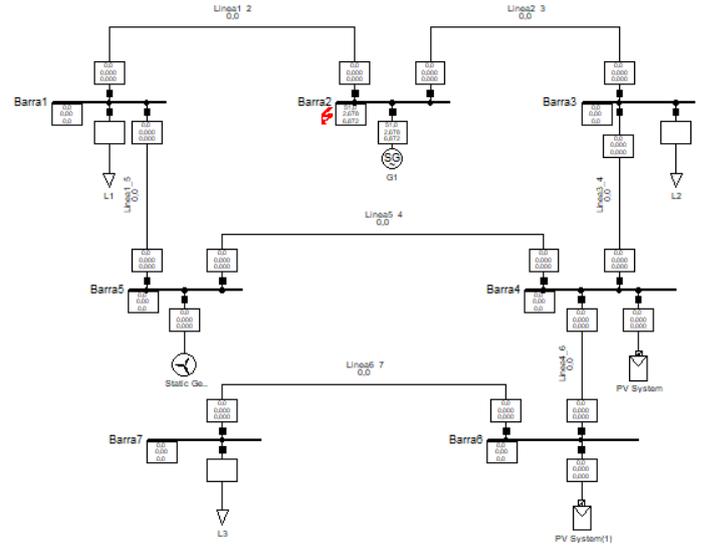
**Figura 3.**

Flujo de potencia en la microrred



**Figura 4.**

Ubicación de la falla trifásica y relé de desconexión



**Tabla 1.**

Escenarios de operación definidos para el caso de estudio

Escenario de operación	Generador 1	Generador eólico	Generador fotovoltaico 1	Generador fotovoltaico 2
1	Cortocircuito			
2		Cortocircuito		
3			Cortocircuito	
4				Cortocircuito

Nota. Las fallas se efectúan en las barras donde se encuentran conectados los generadores.

La figura 3 presenta el estado de la microrred en el momento de ejecutar el flujo de potencia a la misma (ver Figura 3).

### 2.1.2. Estudio de cortocircuitos

En un sistema eléctrico, cualquier evento que interrumpa el flujo normal de energía se lo conoce como falla, la más grave es la simétrica o también conocida como falla trifásica, pero lo más común es que existan fallas asimétricas.

El resultado de estas fallas provoca: flujos no deseados de corriente, corrientes que podrían dañar equipos y producir armónicos en la red entre los más relevantes.

El estudio de cortocircuito considera las condiciones de falla más relevantes en la microrred que serían fallas trifásicas en las barras donde se encuentran conectados los generadores, es así que la tabla 1 plantea los escenarios de operación (ver Tabla 1).

### 2.1.3. Primer escenario de operación

La figura 4 muestra la falla trifásica en la barra 2, además de la ubicación del relé que desconecta el generador que aporta a la falla (ver Figura 4).

### 2.1.4. Segundo escenario de operación

La figura 5 muestra la falla trifásica en la barra 5, además de la ubicación de los relés que desconecta al generador de la red (ver Figura 5).

### 2.1.5. Tercer escenario de operación

La figura 6 muestra la falla trifásica en la barra 4, además de la ubicación del relé que desconecta al generador de la red (ver Figura 6).

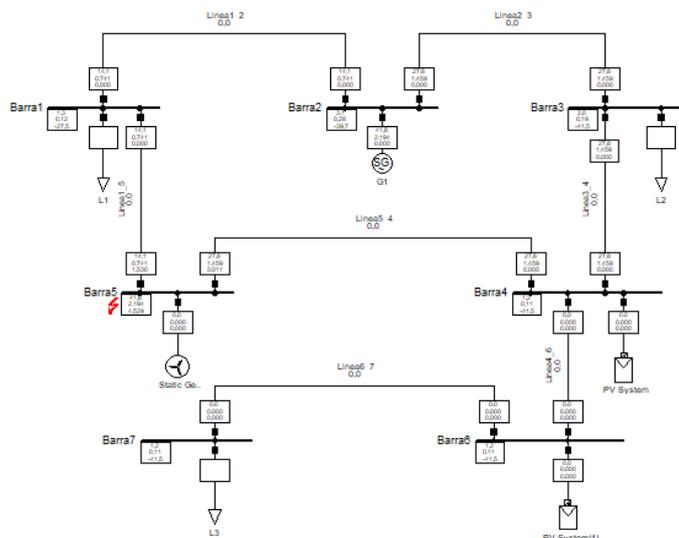
### 2.1.6. Cuarto escenario de operación

La figura 7 muestra la falla trifásica en la barra 6, además de la ubicación del relé que desconecta al generador de la red (ver Figura 7).

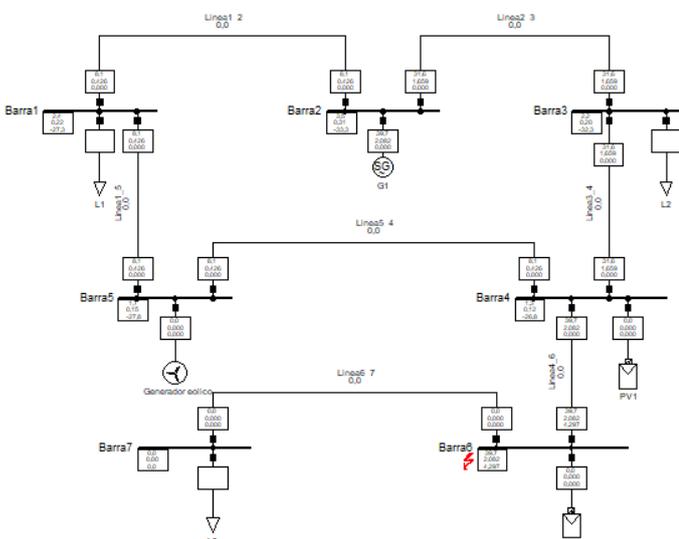
### 2.1.7. Simulación dinámica

La figura 8 presenta eventos de cortocircuito trifásicos en las barras donde se encuentran conectados generadores, con la finalidad de observar algún tipo de transitorio en la frecuencia (ver Figura 8).

**Figura 5.**  
Ubicación de la falla trifásica y relés de desconexión



**Figura 7.**  
Ubicación de la falla trifásica y relé de desconexión



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. RESULTADO DEL ESTUDIO DE FLUJO DE CARGA

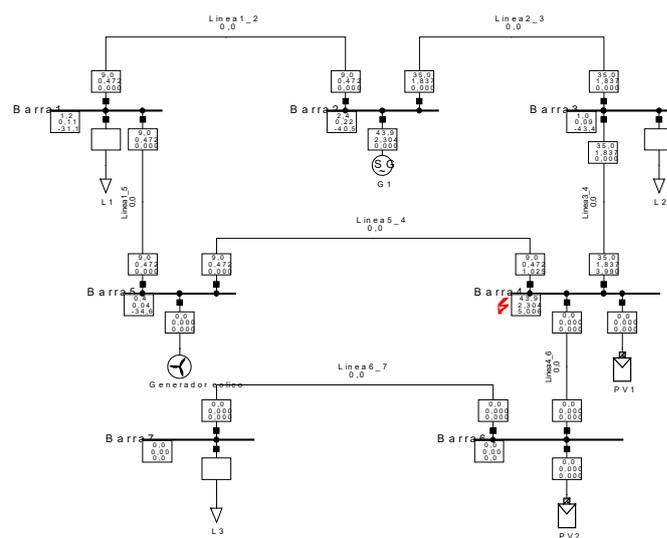
La tabla 2 muestra los voltajes en p.u. de las barras de la microrred correspondiente al caso de análisis (ver Tabla 2).

El perfil de voltaje en todas las barras de la microrred se encuentra en un margen tolerable, ya que los valores mostrados en p.u. no sobrepasan del 4% en caídas de voltaje. La tabla 3 presenta la cargabilidad de los elementos de la microrred (ver Tabla 3).

#### 3.2 RESULTADO DEL PRIMER ESCENARIO

En la figura 9 se puede evidenciar la solución de curvas para el generador que está conectado a la barra 2 (ver Figura 9). El relé opera a corriente de falla con un valor de 2646,56 A con un tiempo de operación 35 ms.

**Figura 6.**  
Ubicación de la falla trifásica y relé de desconexión



**Figura 8.**  
Eventos de simulación dinámica

Name	Time	Object	Out of Service	Object modified	Object modified by
Short-Circuit Event	0.1	Barra2	<input type="checkbox"/>	6/11/2022 21:42:05	Acer
Short-Circuit Event(1)	0.5	Barra2	<input type="checkbox"/>	6/11/2022 22:07:56	Acer
Short-Circuit Event(2)	0.6	Barra5	<input type="checkbox"/>	6/11/2022 22:08:57	Acer
Short-Circuit Event(3)	1.	Barra5	<input type="checkbox"/>	6/11/2022 22:09:15	Acer
Short-Circuit Event(4)	1.1	Barra4	<input type="checkbox"/>	6/11/2022 22:09:36	Acer
Short-Circuit Event(5)	1.5	Barra4	<input type="checkbox"/>	6/11/2022 22:10:09	Acer
Short-Circuit Event(6)	1.6	Barra6	<input type="checkbox"/>	6/11/2022 22:10:27	Acer
Short-Circuit Event(7)	2.	Barra6	<input type="checkbox"/>	6/11/2022 22:10:37	Acer

#### 3.3. RESULTADO DEL SEGUNDO ESCENARIO

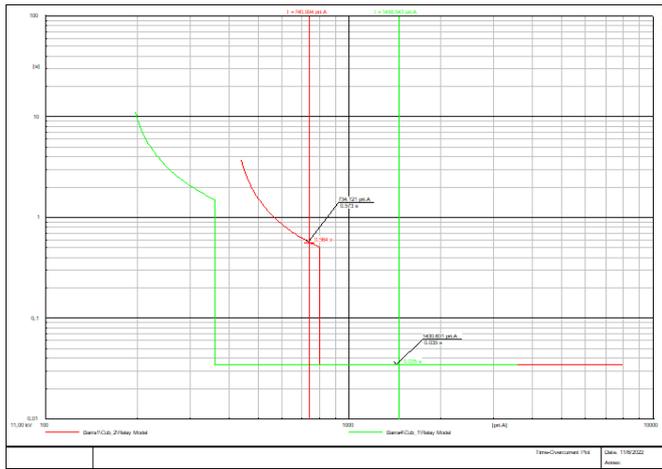
En la figura 10 se puede evidenciar la solución de curvas para el generador que está conectado a la barra 5 (ver Figura 10).

El relé que opera en la barra 1 censa una corriente de falla de 734,12 A con un tiempo de operación de 0,573 s, además del relé que opera en la barra 4, censa un valor de 1430,63 A con un tiempo de operación de 0,035 s, es evidente notar que la corriente en la barra 4 duplica en valor a la barra 1.

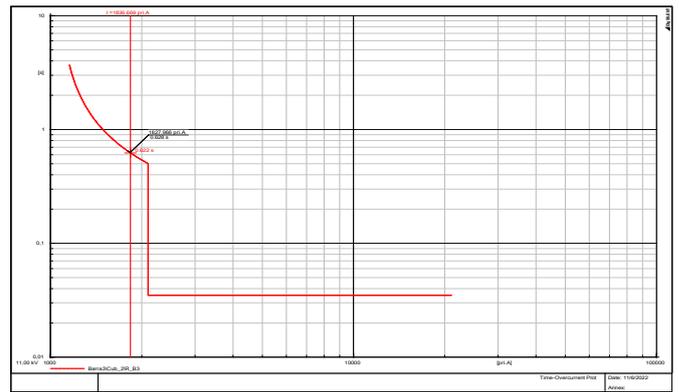
#### 3.4. RESULTADO DEL TERCER ESCENARIO

En la figura 11 se presenta la solución de curvas para el generador que está conectado a la barra 4 (ver Figura 11). El único aporte hacia la falla en la barra 4 corresponde a la barra 3, cuyo relé censa una corriente de falla de 1 827,96 A y opera en un tiempo de 0,628 s.

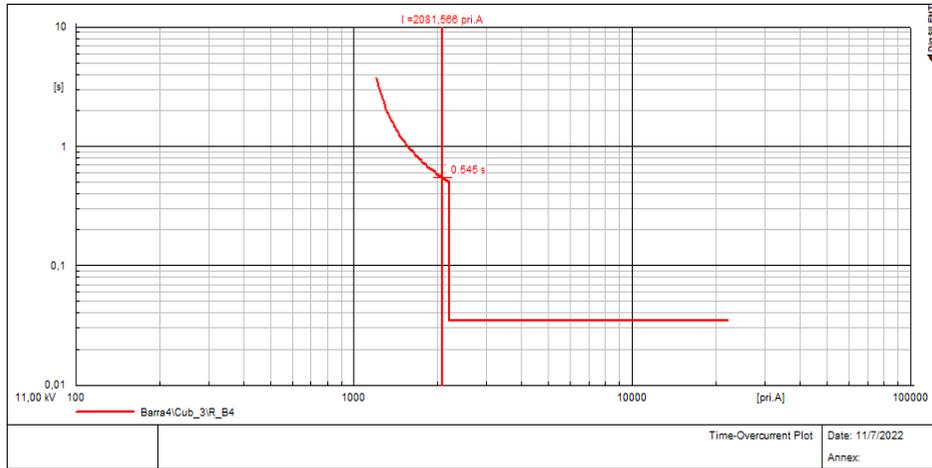
**Figura 10.**  
Curva de protección del segundo escenario



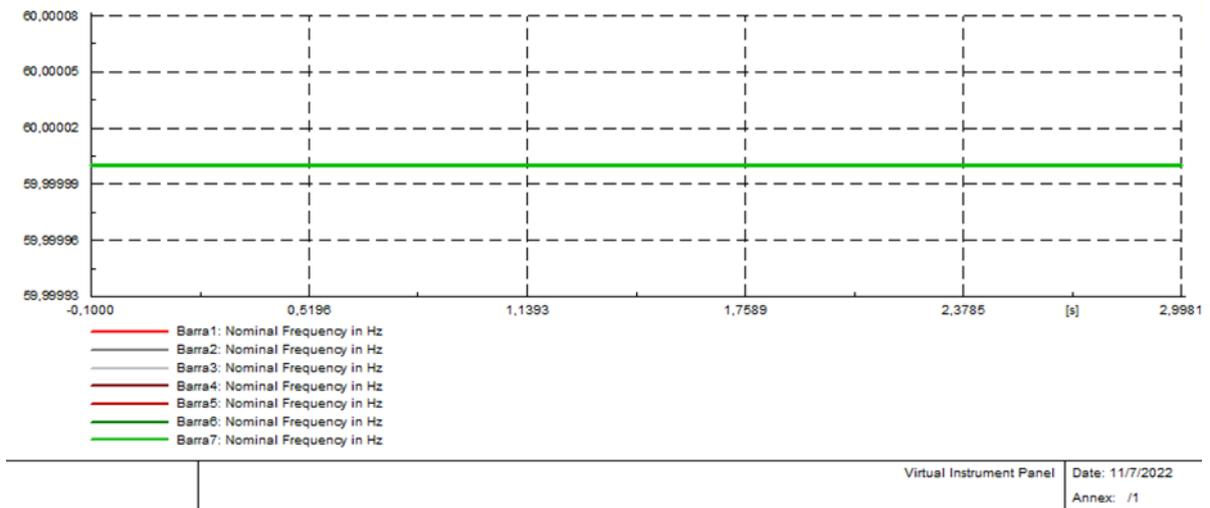
**Figura 11.**  
Curva de protección del tercer escenario



**Figura 12.**  
Curva de protección del cuarto escenario



**Figura 13.**  
Frecuencia en barras de la microrred



### 3.5. RESULTADO DEL CUARTO ESCENARIO

En la figura 12 se presenta la solución de curvas para el generador que está conectado a la barra 6. (ver Figura 12)

El relé de la barra 4, censa una corriente de falla de 2 081,56 A en un tiempo de operación de 0,545 s, la barra 7 no brinda aporte a la falla trifásica puesto que es una barra de carga.

### 3.6. RESULTADO DE LA SIMULACIÓN DINÁMICA

La importancia que tiene el mantener la frecuencia de la red dentro de una banda tolerable es de mucha importancia, es así que se ha efectuado una simulación dinámica en el dominio del tiempo para determinar la afectación que existe en la frecuencia de la red.

La figura 13 muestra el comportamiento de la frecuencia en las barras de la microrred (ver Figura 13).

Es notable que la frecuencia de las barras se mantiene constante a pesar de que existe contingencias, todas las barras mantienen la frecuencia nominal de 60Hz, por lo que la gráfica nos muestra una sola línea constante que se entiende por la superposición del resto de curvas de las barras que no se puede observar.

## 4. CONCLUSIONES

- Se implementó un modelo de microrred para probar diversas dificultades, como pequeñas corrientes de cortocircuito o flujos de energía bidireccionales.
- Para todos los escenarios de operación se desarrolló un estudio de cortocircuito, en el cual se verificó la diferencia en las magnitudes de corriente de cortocircuito de los diferentes escenarios.
- El nivel de cortocircuito de las microrredes está muy relacionado con la tecnología del inversor que se utiliza en ellas, ya que se trata de un limitado aporte de corriente.

## REFERENCIAS

[1] F. G.-T. L. V. Carlos Bordonsa, «Gestión óptima de la energía en microrredes con generación renovable», *Scimedirect*, vol. 12, n.º 2, 2015, pp. 117-132.

[2] J. A. B. Eneko Unamuno, «Hybrid ac/dc microgrids-Part I», *ScienceDirect*, vol. 52, n.º 1, 2015, pp. 1251-1259.

[3] P. Arbolea et al., «Efficient energy management in smart micro-grids: ZERO grid impact buildings», *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, n.º 2, 2015, pp. 1055-1063.

[4] R. H. Lasseter, «Microgrids», 2002, *IEEE Power Eng. Soc. Winter Meet. Conf. Proc. (Cat. No.02CH37309)*, vol. 1, 2002. pp. 305-308.

[5] S. D. Saldarriaga-Zuluaga, J. M. López-Lezama and N. Muñoz-Galeano, «Optimal coordination of over-current relays in microgrids considering multiple characteristic curves», *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, n.º 2, abr. 2021, pp. 2093-2113 DOI: 10.1016/j.aej.2020.12.012.

[6] C. Li, P. Rakhra, P. J. Norman, G. M. Burt and P. Clarkson, «Multi-sample differential protection scheme in DC microgrids», *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, n.º 3, jun. 2021, pp. 2560-2573. DOI: 10.1109/JESTPE.2020.3005588.

[7] W. T. El-Sayed, E. F. El-Saadany and H. H. Zeineldin, «Interharmonic differential relay with a soft current limiter for the protection of inverter-based islanded microgrids», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, n.º 3, jun. 2021, pp. 1349-1359. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3006791.

[8] S. F. Zarei, H. Mokhtari and F. Blaabjerg, «Fault detection and protection strategy for islanded inverter-based microgrids», *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, n.º 1, feb. 2021, pp. 472-484. DOI: 10.1109/JESTPE.2019.2962245.

[9] S. Ordóñez, «Propuesta de parametrización de protecciones eléctricas en microrredes mediante análisis de cargas y generación distribuida».

[10] S. Manson y E. McCullough, «Practical microgrid protection solutions: promises and challenges», *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 19, n.º 3, art. n.º 3, may 2021. DOI: 10.1109/MPE.2021.3057953.

[11] S. C. Vegunta et al., «AC microgrid protection system design challenges: a practical experience», *Energies*, vol. 14, n.º 7, art. n.º 7, ene. 2021, DOI: 10.3390/en14072016.