

## Análisis del impacto en transitorios y niveles de tensión relacionados con la conexión de micro-redes eléctricas al sistema de distribución

Giovanny Pedroza<sup>1,2</sup> , Nuno Gil<sup>1</sup> , Juan L. Espinoza<sup>2</sup> , Sergio Zambrano<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Higher School of Technology and Management, Polytechnic Institute of Leiria, Portugal.

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, DEET, University of Cuenca, Ecuador.

<sup>3</sup> EERCS-Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, Cuenca, Ecuador.

Autor para correspondencia: giovanny.pedroza.a@gmail.com

Fecha de recepción: 25 de agosto de 2017 - Fecha de aceptación: 29 de septiembre de 2017

### ABSTRACT

This article presents an analysis of the impact on the distribution system produced by the so-called micro-grids (micro-electric networks), supplied by small generation sources. Studies are developed in both steady state and dynamic state to obtain results that do not affect the network or consumers. The analysis is performed for photovoltaic, wind, diesel generator, gas generator, and mini-hydropower systems, which are part of the University of Cuenca's micro-grid. The software used for this work was DIgSILENT PowerFactory, enabling the conduct of power flows and electromagnetic transients (EMT) studies. Technical impacts caused by the micro-grid on losses, voltage profiles, overhead lines when it is installed to the closer distribution network are detailed. Also, a sensitivity study is carried out to know if the distribution network is suitable for the interconnection of a micro-grid under the concept of Distributed Generation - GD.

Keywords: Micro-grid, transient, DIgSILENT, renewable energy, distributed generation.

### RESUMEN

Este artículo presenta un análisis del impacto sobre el sistema de distribución producido por las denominadas micro-redes eléctricas, abastecidas por pequeñas fuentes de generación. Para ello, se realizaron estudios en régimen permanente (estado estable) y estudio dinámico (transitorios), con el fin de obtener resultados que no afecten a la red ni a los consumidores. El análisis se realiza para sistemas fotovoltaicos, eólicos, generador a diésel, generador a gas y mini-hídrica, que forman parte de la micro-red de la Universidad de Cuenca. El software utilizado en este análisis es el DIgSILENT PowerFactory, que permite realizar estudios de flujos de potencia y de transitorios electromagnéticos (EMT). Se detallan los impactos que ocasionaría la micro-red al ser instalada a la red de distribución cercana tanto en pérdidas, perfiles de voltaje, sobrecargas en líneas. Además, se realiza un estudio de sensibilidad con el fin de conocer si la red de distribución está apta para la interconexión de una micro-red eléctrica bajo el criterio de Generación Distribuida - GD.

Palabras clave: Micro-red, transitorios, DIgSILENT, energía renovable, generación distribuida.

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de este estudio es analizar los diferentes impactos que ocasionan las micro-redes al momento de ser conectadas a una red de distribución eléctrica, con el objetivo de tener una visión técnica detallada acerca de las ventajas y problemas que se pueden presentar en una red de distribución al momento de interconectar una micro-red eléctrica. Se puede decir que una micro-red es una red de distribución a pequeña escala y en baja tensión (Asmus, Lauderbaugh, & Adamson, 2012). Como tal, debe disponer de los mismos elementos que una red convencional en alta tensión como son:

generadores, cargas y sistemas de control, añadiendo además la posibilidad de incluir equipos de almacenamiento de energía. Sin embargo, de una manera conceptual todos estos equipos tienen las mismas funciones que en una red a gran escala, su funcionamiento, y, especialmente sus sistemas de control y protección (Nikkhajoei & Lasseter, 2007; Hatziaargyriou *et al.*, 2005), deben estar adaptados para operar adecuadamente de acuerdo con la filosofía de funcionamiento de las micro-redes (Sánchez Rodríguez s.f.).

Este artículo se encuentra dividido en dos etapas. En la primera etapa se realiza una calibración preliminar de los modelos de las pequeñas unidades de generación que componen la micro-red eléctrica analizada, misma que se encuentra instalada en la Universidad de Cuenca, Campus Balzay (Cuenca, Ecuador), con el fin de analizar, individualmente, su funcionamiento cuando son conectadas a la red de distribución de la distribuidora local, Empresa Eléctrica Regional Centro Sur (Alimentador 0523). En una segunda etapa, se combinan las diferentes fuentes de generación, formando así la micro-red, evaluando diferentes escenarios de operación para analizar los impactos sobre el sistema de distribución, teniendo como referencia las normas ARCONEL No 004/15 (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2015) e IEEE 1547 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003). Los estudios que se realizaron, y cuyos resultados se presentan en este artículo, son: estudios en régimen permanente (estado estable) y estudios dinámicos (transitorios).

El análisis en régimen permanente comprende determinar los perfiles de tensión, pérdidas y sobrecargas en las líneas, con el fin de analizar el cumplimiento de las normas ya mencionadas anteriormente. El estudio dinámico consiste en analizar diferentes transitorios (anomalías en la red), con el objetivo de estudiar las sobretensiones temporales, realizando eventos como son: de interruptor (switch), desconexión y conexión de la micro-red.

## 2. MÉTODOS Y MATERIALES

### 2.1. Metodología

Como primer punto, para el análisis se recopiló toda la información necesaria (catálogos, bibliografía especializada) con el fin de contar con la línea base para modelar la micro-red Balzay (Espinoza,

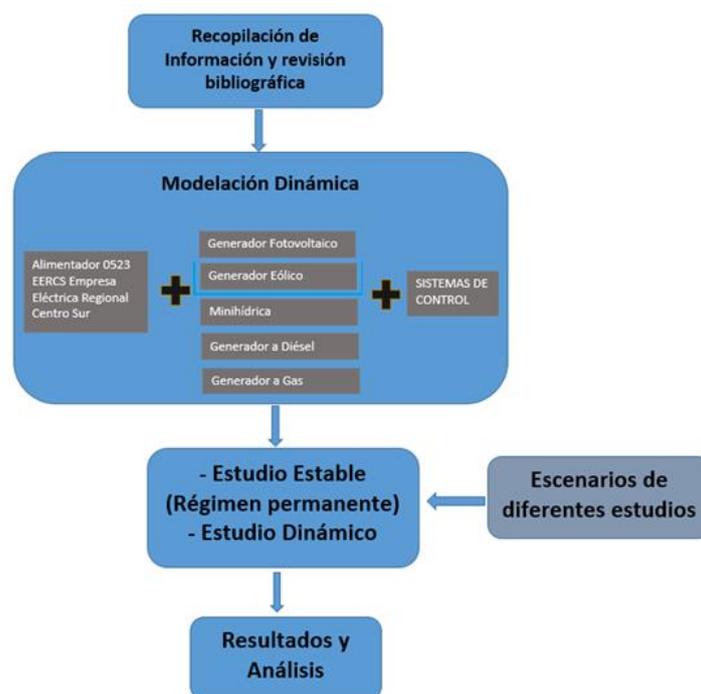


Figura 1. Diagrama de bloques metodología.

González, & Sempértegui, 2007), que tiene una potencia instalada de generación de 0.124 MW, y estimar su impacto sobre el alimentador conectado a la misma (red de distribución). Después de tener el modelo actual listo, se trabajó en escenarios como son: aumento del tamaño de la micro-red por cinco y diez veces, a fin de conocer el impacto sobre la red de distribución cuando la micro-red incrementa su potencia instalada; y, combinando las diferentes fuentes de generación. Como se mencionó anteriormente, los estudios que se realizan son en Estado Estable y Transitorios. Después de tener todos estos datos se procede a hacer su respectivo análisis para cada caso de estudio. En la Figura 1 se presenta el diagrama seguido para obtener los diferentes resultados.

## 2.2. Red de distribución eléctrica

El alimentador 0523 (Fig. 2) de la subestación S/E 5 es una red radial, que recorre el noroeste de la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay (Ecuador), donde la micro-red se encuentra actualmente conectada al PCC (Punto común de conexión) en la Barra 201323 a 2.7 km de la subestación aproximadamente, interconectados mediante un transformador trifásico Pad-Mounted con capacidad nominal de 400 kVA (actualmente está instalado un transformador provisional de 150 kVA).

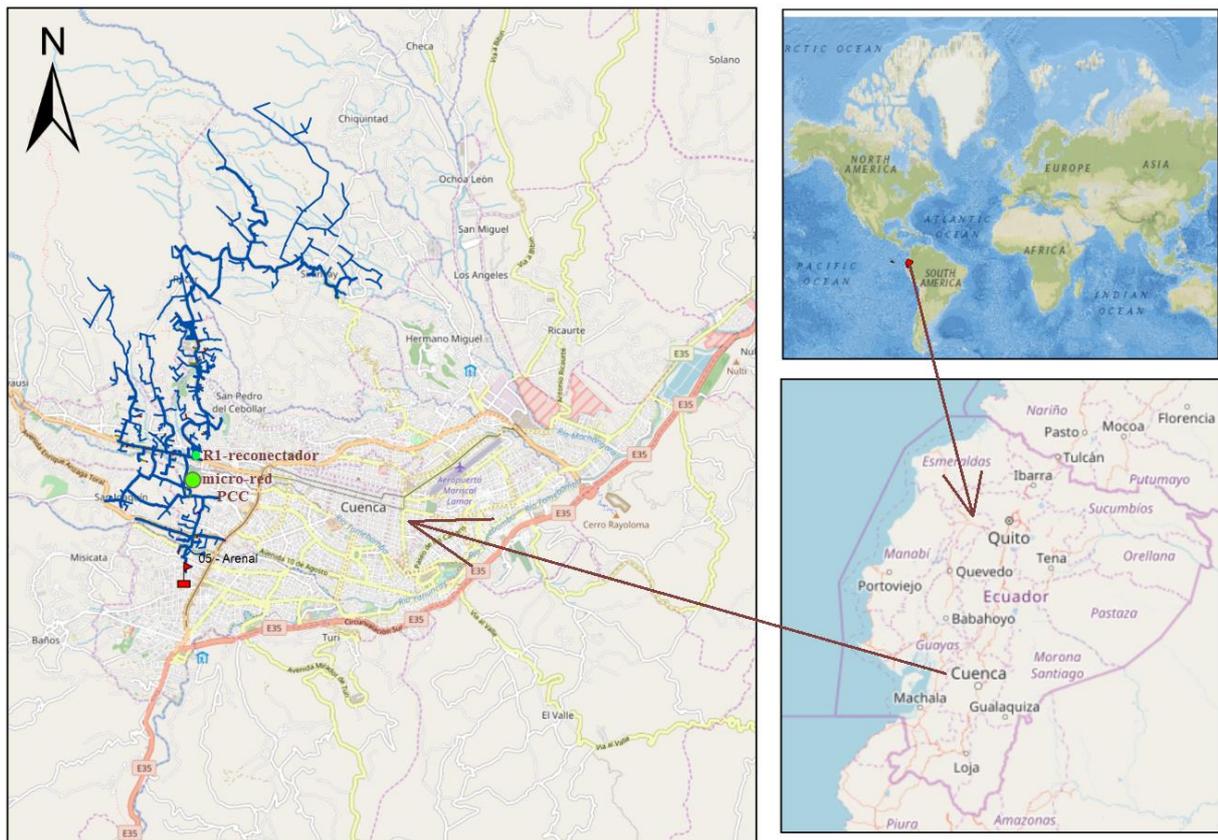


Figura 2. Alimentador 0523 S/E 5 - EERCS.

## 2.3. Modelo de la micro-red

En la Figura 3 se muestra el esquema unifilar de la micro-red eléctrica conectada a la red de distribución. Como se puede ver, la micro-red está compuesta de fuentes renovables de generación como fotovoltaica (35 kW en total), eólica (15 kW), generadores a gas y diésel (40 kW c/u), así como una mini central hidroeléctrica (5 kW).

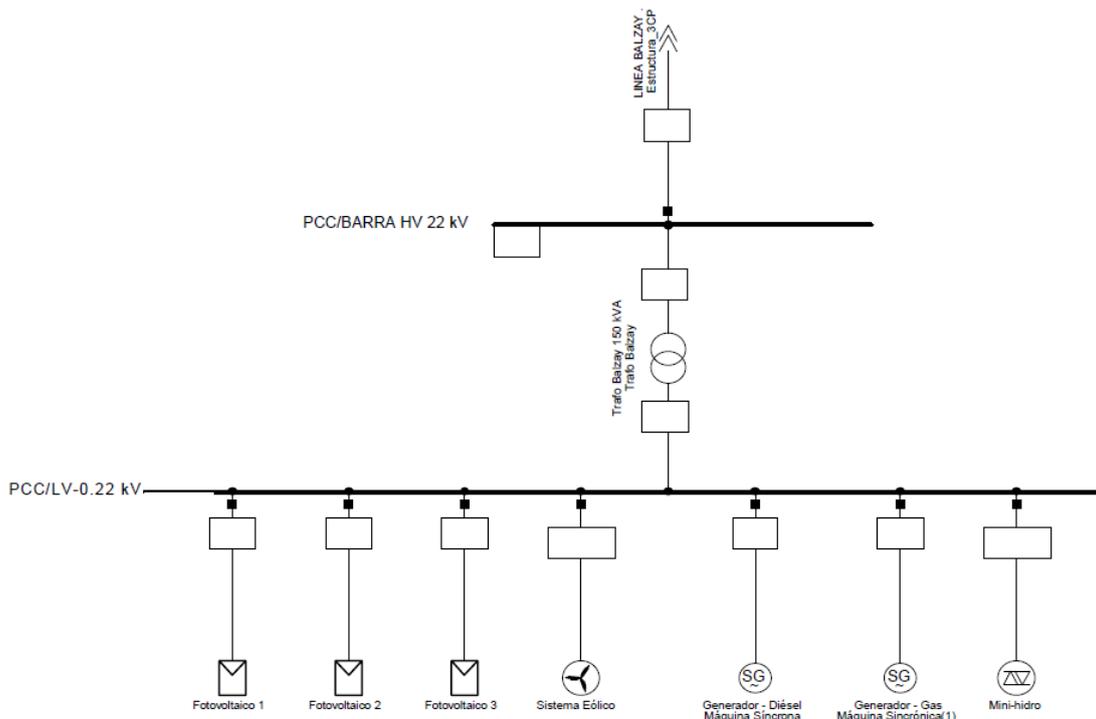


Figura 3. Esquema unifilar de la micro-red conectado a la red de distribución.

#### 2.4. Escenarios de perfiles de generación y carga

Para este estudio se obtuvo un perfil de generación de un día típico para cada tipo de generador: Fotovoltaico, Eólico, Gas, Diésel y Mini-hídrico (Fig. 4a) con resolución de intervalos de 10 minutos, con el fin de obtener resultados más precisos para el análisis requerido. También se elaboró un perfil de carga del alimentador para un día que sea representativo (Fig. 4b). Esta información fue proporcionada por la Universidad de Cuenca y la empresa local de distribución eléctrica “CENTROSUR”, respectivamente.

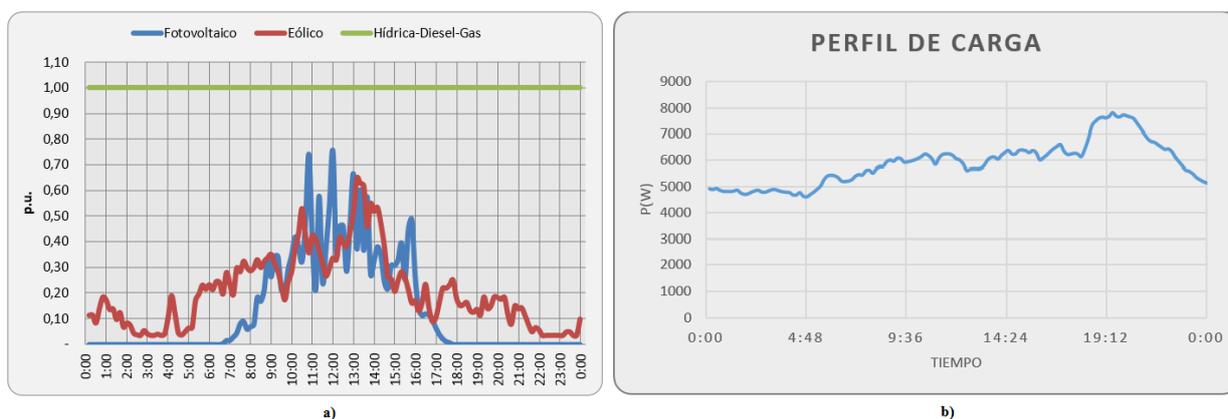


Figura 4. a) Perfil de generación, b) Perfil de carga del alimentador.

### 3. RESULTADOS

En la Tabla 1 se puede observar los estudios que se realizaron.

**Tabla 15.** Caso de estudio.

| Estudio          | Caso de estudio |
|------------------|-----------------|
| PCC              | 201323          |
| micro-red        |                 |
| micro-red normal | 0.124MW         |
| micro-red x 5    | 0.62MW          |
| micro-red x 10   | 1.24MW          |

Caso de estudio: La micro-red estará conectada a la red de distribución en el Punto Común de Conexión (PCC) 201323, que está a 2.79 km de distancia de la subestación, además en este caso, se hará un estudio de sensibilidad, que no es más que aumentar la generación de la micro-red a 0.62MW y 1.24MW, que corresponde a incrementar el tamaño de la micro-red 5 y 10 veces, respectivamente. Además, se planteó escenarios de estudio (Tabla 2), donde se jugó con las pequeñas fuentes de generación, siendo el escenario 0, el equivalente al sistema de distribución sin la micro-red, el escenario 1, equivalente al sistema de distribución con la micro-red conectada (a toda su capacidad), y, el resto de los escenarios, son posibles combinaciones de acuerdo con el tiempo que podrían funcionar las diferentes fuentes de generación renovable.

**Tabla 2.** Escenarios de estudio.

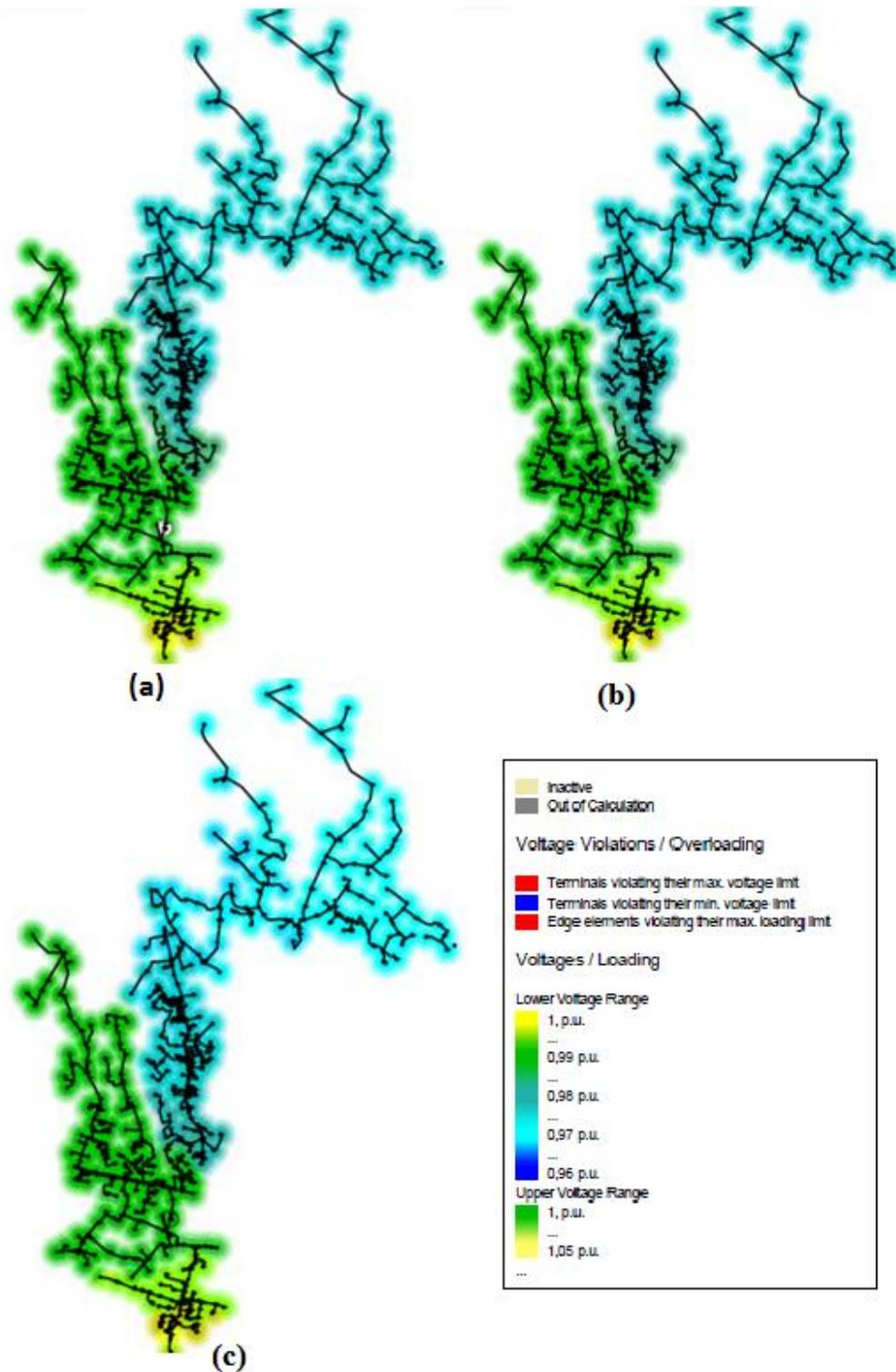
| Nombre Escenario | Fotovoltaico 1<br>ElmGenstat | Fotovoltaico 2<br>ElmGenstat | Fotovoltaico 3<br>ElmGenstat | Sistema Eólico<br>ElmGenstat | Mini-hidro<br>ElmGenstat | Generador - Diésel<br>ElmSym | Generador - Gas<br>ElmSym |
|------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 0                | ●                            | ●                            | ●                            | ●                            | ●                        | ●                            | ●                         |
| 1                | ●                            | ●                            | ●                            | ●                            | ●                        | ●                            | ●                         |
| 2                | ●                            | ●                            | ●                            | ●                            | ●                        | ●                            | ●                         |
| 3                | ●                            | ●                            | ●                            | ●                            | ●                        | ●                            | ●                         |
| 4                | ●                            | ●                            | ●                            | ●                            | ●                        | ●                            | ●                         |
| 5                | ●                            | ●                            | ●                            | ●                            | ●                        | ●                            | ●                         |
| 6                | ●                            | ●                            | ●                            | ●                            | ●                        | ●                            | ●                         |
| 7                | ●                            | ●                            | ●                            | ●                            | ●                        | ●                            | ●                         |
| 8                | ●                            | ●                            | ●                            | ●                            | ●                        | ●                            | ●                         |
| 9                | ●                            | ●                            | ●                            | ●                            | ●                        | ●                            | ●                         |

#### 3.1. Estudio en régimen permanente

En este estudio se observan variables muy importantes cuando se integra una micro-red al sistema de distribución, es decir, se estudian los casos y escenarios planteados en las Tablas 1 y 2. Las variables analizadas son las siguientes:

- Pérdidas en el Alimentador.
- Perfiles de Voltaje.
- Porcentaje de Sobrecarga en las líneas.

Con la ayuda de la herramienta DIGSILENT PowerFactory, se realizó estudios de flujo de potencia, obteniendo mapas de calor con los voltajes en por unidad p.u. en cada uno de los nodos del alimentador. Estos mapas son el resultado de la simulación de flujo de potencia desbalanceado con demanda mínima y máxima generación de la micro-red (Fig. 5). En los escenarios de la Figura 5 se puede ver una variación en la gama de colores muy pequeña ya que estas variaciones de generación (x5 y x10) no afecta en mucho al voltaje dentro del alimentador, manteniéndose así dentro de los límites que exige la norma CONELEC 004/01 (CONELEC, 2001).



**Figura 5.** Mapa de calor de voltajes en p.u. en los nodos del alimentador 0523, (a) Escenario “0”, sin Micro-red, (b) Caso 1s conectado micro-red normal, (c) Caso 1s conectado micro-red x 10.

#### Pérdidas en el alimentador

En la Tabla 3 se presenta la variación de las pérdidas de energía en la red de distribución eléctrica (alimentador 0523) a medida que aumenta la capacidad de generación de la micro-red eléctrica. En estos casos se observa que las pérdidas disminuyen. Los escenarios 0 al 9 indican la combinación de las pequeñas fuentes de generación analizadas, estando estas en servicio y fuera de servicio. En los tres

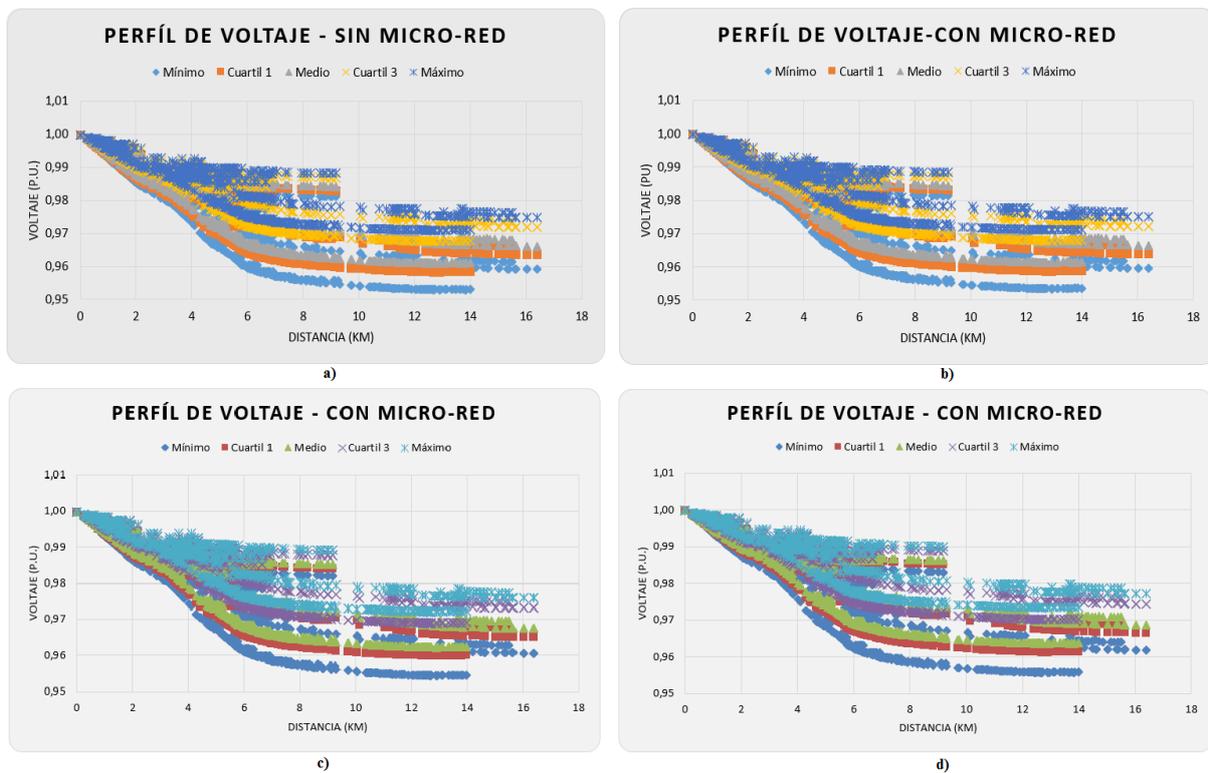
escenarios presentados en la Tabla 3 (micro-red normal, x5 y x10), se observa que las pérdidas están dentro del rango aceptable, según la regulación CONELEC N° 004/01.

**Tabla 3.** Pérdidas totales en el alimentador.

| Escenario | Micro-red normal |              |            | Micro-red x5 |              |            | Micro-red x10 |              |            |
|-----------|------------------|--------------|------------|--------------|--------------|------------|---------------|--------------|------------|
|           | P Load (MWh)     | Losses (MWh) | Losses (%) | P Load (MWh) | Losses (MWh) | Losses (%) | P Load (MWh)  | Losses (MWh) | Losses (%) |
| 0         | 136.61           | 4.48         | 3.28%      | 136.57       | 4.52         | 3.31%      | 136.51        | 4.57         | 3.35%      |
| 1         | 136.60           | 4.45         | 3.26%      | 136.56       | 4.42         | 3.23%      | 136.51        | 4.39         | 3.22%      |
| 2         | 136.60           | 4.46         | 3.27%      | 136.56       | 4.44         | 3.25%      | 136.51        | 4.43         | 3.24%      |
| 3         | 136.60           | 4.46         | 3.26%      | 136.56       | 4.43         | 3.25%      | 136.51        | 4.41         | 3.23%      |
| 4         | 136.60           | 4.46         | 3.26%      | 136.56       | 4.44         | 3.25%      | 136.51        | 4.42         | 3.24%      |
| 5         | 136.60           | 4.45         | 3.26%      | 136.56       | 4.42         | 3.24%      | 136.51        | 4.39         | 3.22%      |
| 6         | 136.60           | 4.47         | 3.27%      | 136.56       | 4.49         | 3.29%      | 136.51        | 4.51         | 3.30%      |
| 7         | 136.60           | 4.45         | 3.26%      | 136.56       | 4.42         | 3.24%      | 136.51        | 4.39         | 3.22%      |
| 8         | 136.60           | 4.47         | 3.27%      | 136.56       | 4.50         | 3.30%      | 136.51        | 4.54         | 3.33%      |
| 9         | 136.60           | 4.47         | 3.27%      | 136.56       | 4.51         | 3.30%      | 136.51        | 4.55         | 3.33%      |

Perfiles de Voltaje

Los resultados de perfiles de voltaje se interpretaron a partir de datos estadísticos de voltajes por unidad: mínimo, cuartil 1 (25%), medio, cuartil 3 (75%) y máximo.



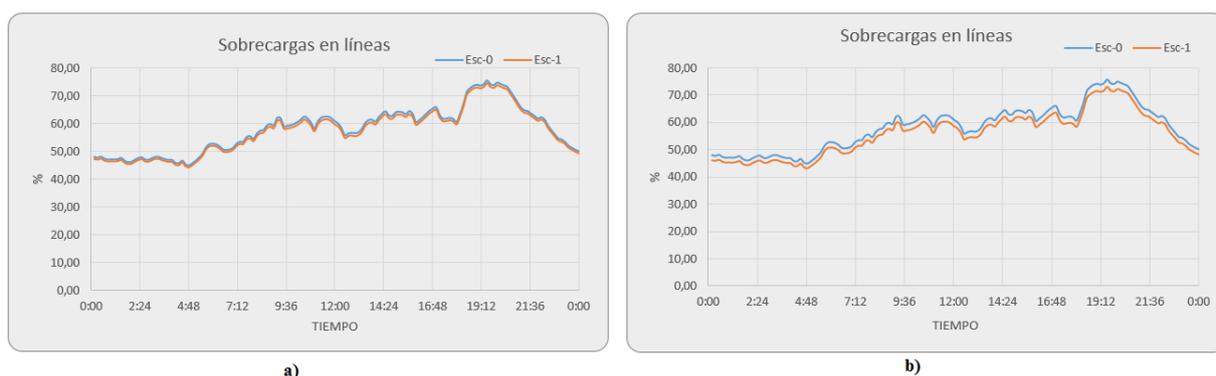
**Figura 6.** Perfil de voltaje. a) Sin micro-red, b) Con micro-red normal, c) Con micro-red x5, y d) Con micro-red x10.

En la Figura 6 se detalla la variación del perfil de voltaje en todos los nodos, cuando se incorpora la micro-red al alimentador. Se puede observar que en ningún caso afecta al alimentador manteniendo así al sistema dentro de los límites establecidos en la regulación CONELEC N° 004/01 que es  $\pm 10\%$  para redes en medio voltaje.

### Sobrecarga en las líneas

El escenario “0” de la Figura 7 tiene una máxima sobrecarga en el intervalo de horario de las 18h20 y 21h20, llegando al 74.69% de sobrecarga en las líneas a las 19h30. En el escenario “1” de la Figura 7a se muestra los resultados de sobrecarga al conectar la micro-red de la Universidad de Cuenca, teniendo como resultados que la sobrecarga de las líneas disminuye un aproximado de 1.13% a lo largo de todo el alimentador, y en el intervalo de hora pico disminuye de 74.69% a 73.32%, teniendo una diferencia de 1.37%. El escenario “1” de la Figura 7b muestra los resultados de sobrecarga de las líneas cuando la micro-red genera 10 veces más, teniendo así que disminuye un 3.85% de sobrecarga en las secciones a lo largo de todo el alimentador.

Es de resaltar que la mayor sobrecarga se encuentra al inicio del alimentador, cerca de la subestación. Los otros escenarios no fueron necesarios graficar; con este escenario se obtiene la generación máxima de la micro-red, teniendo así mejores resultados de impacto, llegando así a la conclusión que con la micro-red en funcionamiento no habría problemas de sobrecargas en las secciones del alimentador, teniendo así los porcentajes de sobrecargas dentro de los rangos y el sistema podrá funcionar de una manera adecuada.



**Figura 7.** Sobrecargas en las líneas: (a) micro-red normal, b) micro-red x10.

### **3.2. Estudio dinámico**

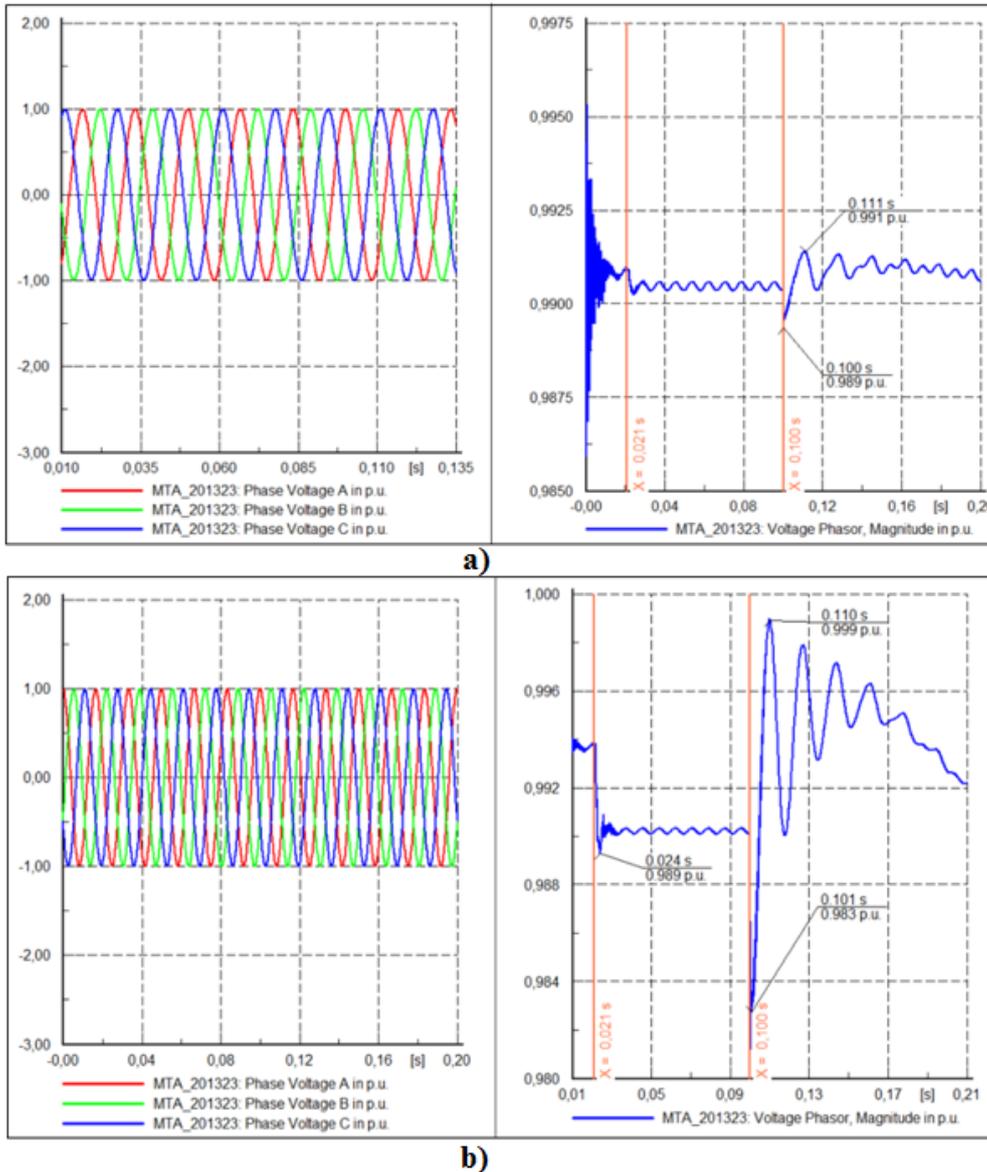
Esta parte del estudio se enfoca en los transitorios electromagnéticos analizando que ocurre con la tensión cuando existe alguna anomalía en la red de distribución, teniendo así los diferentes eventos como son: evento de desconexión y conexión de la micro-red, evento de “switch” o apertura del reconectador (al momento que abre el reconectador, se desconecta el ramal donde está interconectado esta parte del alimentador, quedando así energizado un 56.2% del mismo). Además, en esta parte del estudio se presentan los resultados con una micro-red normal y una micro-red aumentada 10 veces su potencia instalada, ya que es el peor caso donde puede existir mayor impacto sobre la red de distribución.

Para los siguientes resultados con esta variación de generación se realizó una simulación de flujo de carga en mínima demanda con una máxima generación, después, se calcularon las condiciones iniciales, donde se inicializaron las variables del modelo dinámico para posteriormente definir los eventos ya mencionados anteriormente, teniendo así por último la definición de las variables de resultados en los elementos de red que se desea monitorear, con el objetivo de analizar sobretensiones temporales mediante simulaciones de transitorios electromagnéticos (EMT).

#### Evento desconexión/conexión de la micro-red

En la Figura 8 se puede observar como varía el voltaje cuando ocurre este evento, al comienzo de la simulación se tiene una variación brusca, pero eso no es tomado en cuenta ya que ocurre cuando se inicia una simulación en PowerFactory. El evento empieza cuando la micro-red se desconecta de la red en un tiempo de 0.021 segundos, teniendo una duración de 0.079 segundos, para así conectarse de nuevo a la red en un tiempo de 0.1 segundos, observando así en la Figura 8a una variación muy pequeña en la tensión, después de la conexión, teniendo así la tensión mínima de 0.989 p.u. en 0.1

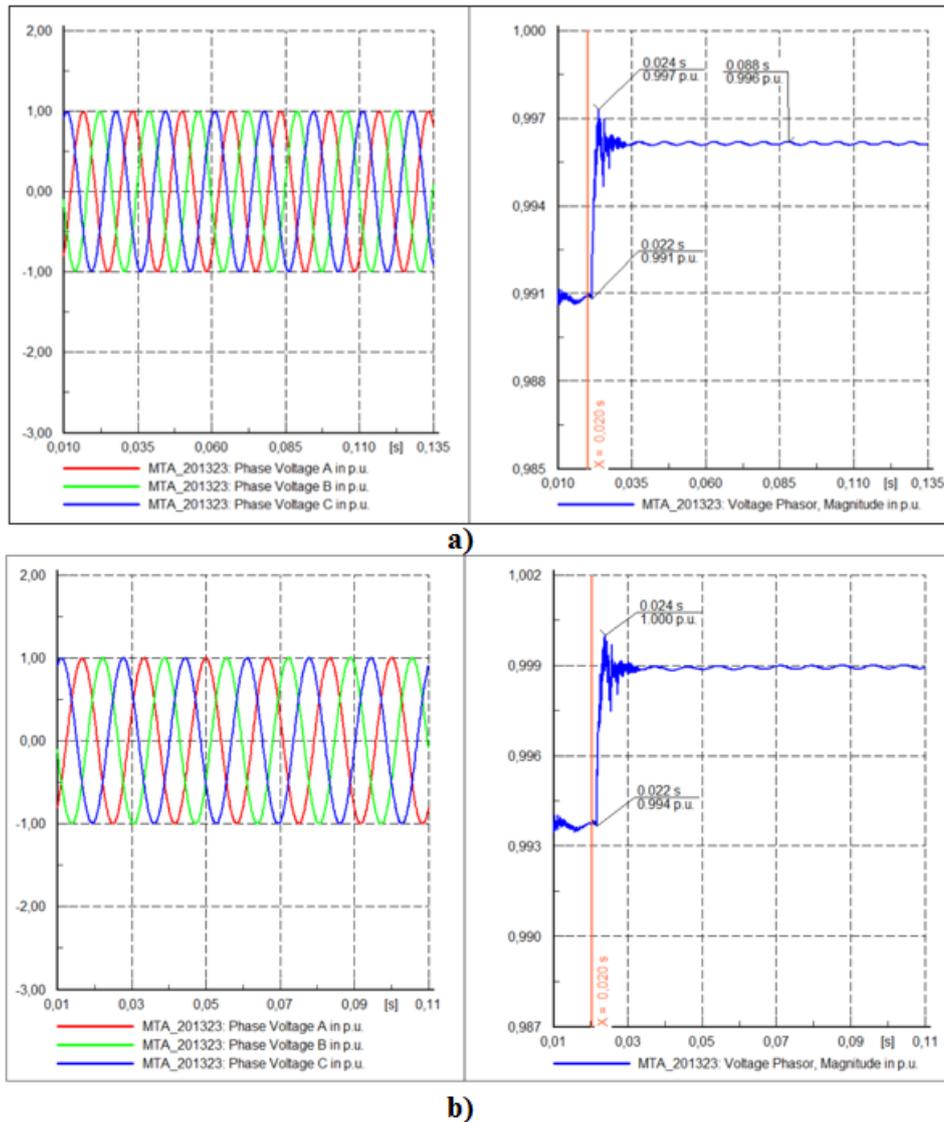
segundos y un máximo de 0.991 p.u. en 0.111. Con la micro-red aumentada 10 veces su capacidad de generación ( Fig. 8b), la tensión disminuye a 0.983 p.u. en 0.101 segundos, mientras que en un tiempo de 0.110 segundos llega a tener una máxima tensión de 0.999 p.u. Estos resultados se mantienen dentro de los límites permisibles, no afectando así en nada a la red al momento de ocurrir esta clase de evento.



**Figura 8.** Sobrevoltajes (p.u.) en el PCC luego del evento desconexión/conexión de la micro-red normal; a) micro-red normal, b) micro-red x10.

Evento “switch” (apertura del reconectador)

En la Figura 9a se observa la variación de tensión después de realizar el evento de “switch” que consiste en abrir el reconectador que está ubicado en la avenida Ordoñez Lazo (Fig. 2) en un tiempo de 0.02 segundos, dejando fuera de servicio a gran parte del alimentador (43.8%), llegando así a tener unos resultados de tensión máxima de 0.997 p.u. en 0.024 segundos y que se estabiliza en 0.996 p.u. en un tiempo de 0.035 segundos. Con la micro-red aumentada 10 veces (Fig. 9b) se tiene una tensión máxima de 0.1 p.u. en 0.024 segundos y se estabiliza en 0.999 p.u. a partir de un tiempo de 0.035 segundos, teniendo así cambios en comparación con los resultados obtenidos en la Figura 9a, estando estos resultados dentro de los límites permisibles dados por la norma CONELEC N° 004/01.



**Figura 9.** Sobrevoltajes (p.u.) en el PCC luego del evento de “switch” (abre reconectador R1); a) micro-red normal, b) micro-red x10.

#### 4. CONCLUSIONES

El impacto de una micro-red en la red de distribución dependerá mucho de los tipos de tecnología de generación que se estén utilizando, ya que diferentes tecnologías no van a producir el mismo efecto sobre el sistema de distribución. Además, el impacto sobre la red depende mucho de la cantidad de generación que se esté inyectando. De acuerdo con las normas estudiadas, una generación distribuida menor a 30 kW no es común de tener un impacto considerable sobre la red, pero habrá algunos casos donde la generación sobrepase el tamaño de la demanda del alimentador, en esos casos se tendrá un impacto significativo.

Los resultados de los estudios para el caso actual de conexión de la micro-red que se encuentra instalada en la Universidad de Cuenca, Campus Balzay, que es pequeña en capacidad de generación, llevan a concluir que no existe un impacto significativo hacia la red de distribución cercana, pero al momento que se realiza estudios de sensibilidad aumentando la cantidad de generación y moviendo a un punto estratégico la micro-red eléctrica, los impactos comienzan a aparecer. Sin embargo, estos impactos son negativos como para afectar a la red de distribución, ya que la demanda del alimentador es muy grande en comparación con la generación de la micro-red. Además, los resultados obtenidos

para estos casos de estudio, tanto en pérdidas eléctricas, perfiles de tensión, sobrecargas en líneas, están dentro de los rangos permitidos, teniendo así que la micro-red podrá inyectar generación al alimentador sin ningún problema.

## AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) de la República del Ecuador por la beca de cuarto nivel que se nos otorgó para dar continuidad a nuestra formación como profesionales. Un especial agradecimiento a la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur por facilitar la información necesaria para este trabajo. Se agradece, asimismo, el apoyo brindado por parte de la Universidad de Cuenca (DIUC) y el Instituto Politécnico de Leiria-Portugal.

## REFERENCIAS

- Agencia de Regulacion y Control de Electricidad. (2015). *Regulación N° ARCONEL - 004/15: Requerimientos técnicos para la conexión y operación de generadores renovables no convencionales a las redes de transmisión y distribución*. 46 p. Disponible en <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/Regulacion-No.-ARCONEL-004-15.pdf>
- Asmus P, Lauderbaugh A., Adamson, K.-A. (2012). *Microgrid deployment Tracker 4Q12 and community - Utility microgrids*. Pike Research Report, 13 p. Disponible en <https://www.navigantresearch.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/11/MGDT-4Q12-%20Executive-Summary.pdf>
- CONELEC. (2001). *Regulación Nro. CONELEC - 004/01. Calidad del servicio eléctrico de distribución*. 25 p. Disponible en <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/02/Regulacion-No.-CONELEC-004-01.pdf>
- Espinoza, L., González, G., Sempértegui, R. (2017). *Micro grid laboratory as a tool for research on non-conventional energy sources in Ecuador*. IEEE International Autumn Meeting on Power Electronics and Computing (ROPEC). <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2017.8261615>
- Hatzargyriou, N. D., Dimeas, A., Tsikalakis, A. G., Pecos Lopes, J. A., Kariniotakis, G., Oyarzabal, J. (2005). *Management of microgrids in market environment*. International Conference on Future Power Systems, 6 p. <https://doi.org/10.1109/FPS.2005.204225>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2003). *IEEE Std. 1547-2003: IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2003.94285>
- Nikkhajoei, H., Lasseter, R. (2006). *Microred protection*. Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Quebec, Canada, 6 p.
- Sánchez Rodríguez, A. (s.f.). *Operación y Control de Micro-redes*. Tesis de maestría en Sistemas de Energía Eléctrica, 67 p. Disponible en <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70022/fichero/Tesis+M%C3%A1ster+Microredes+ASR+27112007.pdf>