

MICRORREDES – UNA REVISIÓN METODOLÓGICA EN EL CONTEXTO ACTUAL DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

Autores:

L.A. Paredes¹

B.R. Serrano²

M.G. Molina³

^{1,2,3}Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan

CONICET, San Juan, Argentina

1E-mail: lparedes@iee.unsj.edu.ar

2E-mail: bserrano@iee-unsjconicet.org

3E-mail: mmolina@iee-unsjconicet.org

Resumen

El objetivo de este documento es difundir el Estado del Arte de los sistemas eléctricos basados en microrredes. Esto en concomitancia con el perfeccionamiento y posicionamiento que ha alcanzado esta tecnología en los sistemas eléctricos. En la actualidad, existe un número creciente de sistemas de microrredes que se están implementando alrededor del mundo. El crecimiento de esta tecnología se encuentra motivado por el acceso y universalidad del consumo eficiente de energía eléctrica, supeditada al aprovechamiento de recursos energéticos primarios amigables con el medio ambiente y la reducción del uso de combustibles fósiles para la generación de electricidad. La revisión metodológica se ha efectuado en razón de las definiciones, características, clasificación, tecnologías de generación distribuida e inconvenientes operativos a los cuales se enfrentan los sistemas de microrredes. Además, se presentan las posibles soluciones a dichos inconvenientes de las microrredes y los requerimientos de investigación y desarrollo en relación con esta tecnología.

Palabras clave — Microrredes Eléctricas, Sistemas Eléctricos, Generación Distribuida, Energías Renovables.

Abstract

The aim of this document is to spread the State of the Art of electrical systems based on microgrids. This in concomitance with the improvement and positioning that this technology has achieved in electrical systems. Currently, there is a growing number of microgrid systems being implemented around the world. The growth of this technology is motivated by the access and universality of the efficient electrical energy consumption, subject to the use of environmentally friendly primary energy resources and the reduction of the use of fossil fuels for electricity generation. The methodological review has been carried out on the basis of definitions, characteristics, classification, distributed generation technologies and operational issues faced by microgrid systems. In addition, possible solutions to these problems of microgrids and research and development requirements in relation to this technology are presented.

Index terms — Electric Microgrids, Electric Systems, Distributed Generation, Renewable Energy.

1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO ACTUAL DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

Uno de los precursores de los Sistemas de Suministro de Energía Eléctrica (SSEE) fue Thomas Alba Edison, un ingeniero y prolífico inventor de connotada transcendencia en la industria de energía eléctrica. Este destacado profesional logró implantar en la ciudad de Nueva York aproximadamente en la década de 1880 la primera planta de generación y la red de distribución para suministro de energía eléctrica. Varias compañías eléctricas similares se establecieron en años posteriores a esa fecha. Para aquel entonces, la generación de energía era descentralizada o distribuida. En otras palabras, la energía eléctrica era producida y consumida prácticamente en el mismo lugar bajo el esquema operativo diseñado por Edison y otros.

Por lo tanto, no fue necesario la construcción de líneas de transmisión para transportar la energía eléctrica bajo el esquema que en tiempos contemporáneos conocemos. A final de la última década del siglo XIX y principios del siglo XX, las compañías de energía se integraron en sistemas interconectados por múltiples razones, tales como la necesidad de reducción de costos de producción y aumento en la confiabilidad del suministro para los consumidores de energía eléctrica. Esta fue la piedra angular mediante la cual surgió la industria eléctrica de grandes magnitudes o los sistemas eléctricos de potencia interconectados [1]. Para aquel entonces el sistema de corriente alterna (AC, por sus siglas en idioma inglés) mostraba sus ventajas sobre el sistema de corriente continua (CC). Por lo cual, hasta tiempos actuales los sistemas AC de características trifásicas han

prevalecido en estructuras organizacionales y operacionales verticalmente establecidas en etapas de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica [2].

En la actualidad, el concepto de una estructura operativa y organizacional de la cadena de suministro de electricidad: generación, transmisión y distribución abastecida desde una fuente primaria unidireccional de generación ha cambiado. El crecimiento de la demanda de electricidad tiene una relación estrecha con la expansión de los sistemas de generación, la transmisión y la distribución. Esta expansión permanente y continua justifica la necesidad de la instalación y el aprovechamiento de otras tecnologías que produzcan energía eléctrica en los SSEEs. Por otro lado, el cuidado y la preservación del medio ambiente ha originado que se busquen mecanismos y acciones alternativas de producción y generación de energía eléctrica comparadas con las clásicas, que operan en función de procesos de combustión con recursos fósiles o a través de grandes centrales hidroeléctricas, las cuales se encontraban muy alejadas eléctricamente hablando de las cargas. Bajo este contexto, la estructura de los SSEEs actualmente ha tomado de manera dinámica un nuevo enfoque, permitiendo así que existan fuentes de generación de electricidad que estén eléctricamente más cercanas a los centros de consumo, cargas o usuarios.

A esta innovación técnica y operativa se la denomina Generación Distribuida (GD). Para ello, se parte de la utilización del sistema eléctrico de distribución en condiciones tradicionales, para luego realizar modificaciones topológicas en la red que permitan la penetración de las fuentes de Energías Renovables No Convencionales (ERNCS). Es así que las ERNCS aprovechan el uso de recursos y fuentes de energía alternativas y renovables, como son el Sol y el viento, para generar electricidad a través de procesos físicos, químicos y electromecánicos, ayudando con ello a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero al planeta, en el contexto del calentamiento global.

Por lo expuesto, los SSEEs no pueden seguir siendo operados de manera conservadora, unidireccional y verticalmente estructurada. Es decir, la disposición operativa y de mercado de los SSEEs ha variado su esquema organizacional, permitiendo así la posibilidad de flujo de potencia ya no solo desde una única fuente de suministro unidireccional, fundamentalmente a nivel de distribución, sino también de forma bidireccional. Por lo mencionado, los llamados consumidores energéticos pasivos en el pasado, hoy en día están en capacidad de suministrar energía eléctrica a la red, dando lugar a la

aparición del novísimo concepto: consumidor activo del sistema (también denominado productor-consumidor o prosumer, por su terminología en el idioma inglés).

Con los antecedentes mencionados, es que se da origen a la aparición del concepto de Microrredes Eléctricas (MREs). Las MREs han recibido considerable atención en las últimas dos décadas, impulsadas por cuestiones ambientales globales, la necesidad de acceso a la energía en comunidades remotas y la promesa de una mayor confiabilidad, seguridad, calidad y resiliencia (resiliencia) de los sistemas eléctricos [3],[4].

Específicamente, las MREs se consideran un vínculo crítico o un punto de inflexión en la evolución de SSEEs integrados verticalmente hacia las redes inteligentes (smart grids) descentralizadas al facilitar la integración de los DERs (Distributed Energy Resources – Recursos de Energía Distribuida, por sus siglas en inglés) basados en ERNCS [5],[6]. Las redes inteligentes en forma general comprenden las necesidades de mejorar la accesibilidad a la energía, implementar tecnologías que respondan a las necesidades de los usuarios, mejorar las condiciones de seguridad y reducir la vulnerabilidad del sistema. En relación a los beneficios de esta tecnología, se puede mencionar la reducción de la congestión de la red de transmisión, disminución de apagones y cortes forzados del suministro, capacidades de los sistemas para determinar su autodiagnóstico y su autoreparación y un mejor manejo y respuesta a la demanda eléctrica [7]. Diferentes entidades alrededor del mundo, como agencias gubernamentales, servicios públicos, bases militares y universidades están implementando sistemas de MREs, y se espera que se desarrolle un número creciente de MREs en la próxima década [8].

La incorporación de los sistemas de MREs trae apareada inconvenientes técnicos y operativos, que en términos de ingeniería deben ser abordados, para que este nuevo paradigma de los SSEEs se desempeñe de manera eficaz en aras de una transición energética eficiente.

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera. En primera instancia se hace mención a la metodología utilizada para la revisión de la problemática expuesta. Posteriormente, se aborda conceptualmente los sistemas de microrredes eléctricas, los distintos inconvenientes operativos de esta tecnología y las posibles soluciones a considerar. Finalmente se establecen las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros que se deriven de esta revisión.

Resiliente: del inglés resilient, significado: capacidad de un material, mecanismo o sistema para recuperar su estado inicial cuando ha cesado la perturbación a la que había estado sometido. Diccionario en línea RAE, 2019.

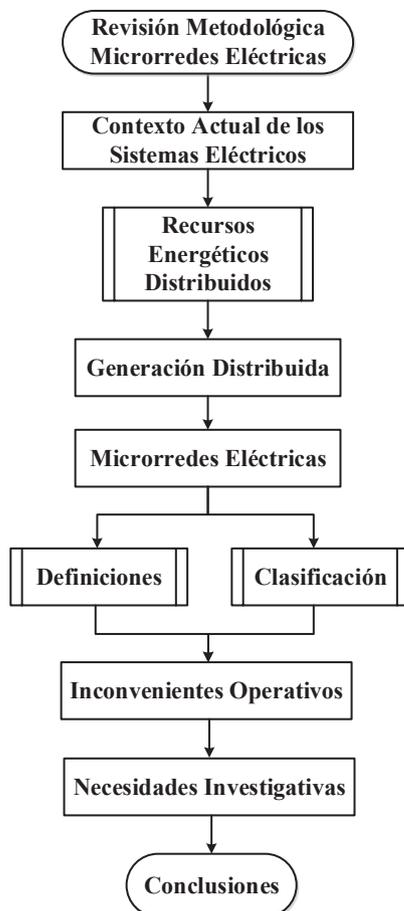


Figura 1: Metodología Aplicada

2. METODOLOGÍA

En la Fig. 1 se muestra el diagrama de flujo, mediante el cual se procedió con la revisión metodológica asociada a los sistemas de MREs en el contexto actual de los SSEs.

3. MICRORREDES ELÉCTRICAS

El concepto de MREs se remonta al año 1882 cuando Thomas Alva Edison construyó su primera planta de energía en los Estados Unidos. La compañía de Edison instaló 50 MREs de CC en cuatro años. Para ese entonces no se habían conformado aún redes eléctricas con sistemas de control y modos de operación centralizados. Posteriormente a inicios del siglo XX, con el auge de las construcciones de los grandes centros de generación y líneas de transmisión, fomentados por las economías de escala y fines asociados a la continuidad y confiabilidad de suministro, los SSEs se convirtieron en un servicio monopólico al interconectar las MREs aisladas existentes, desencadenando en que estas MREs se hayan desvanecido en dicha época. Sin embargo, en los últimos años del presente siglo surgió una nueva

tendencia de desarrollar MREs alrededor del mundo. Esto justificado por la necesidad de cubrir la mayor demanda de electricidad de manera eficiente, incrementando la confiabilidad y calidad de energía (power quality); sumado a los avances en electrónica de potencia, y el surgimiento y aprovechamiento de nuevas fuentes de generación de tipo DERs [9].

3.1. Definiciones y Generalidades

El DOE (Department Of Energy, departamento de energía de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés) define a la MRE como: “Una microrred es un conjunto de cargas interconectadas y recursos de energía distribuida que trabajan dentro de límites eléctricos definidos, que actúa como una única entidad controlable con respecto a la red y que se conecta o desconecta de dicha red para permitirle operar en modo conectado a la red o en modo de isla (autónomo)” [10]. Por otro lado, la CI-GRÉ define a la MRE como: “Sistemas de distribución de electricidad que contienen cargas y recursos de energía distribuidos en forma de generación distribuida, dispositivos de almacenamiento de energía (ESS, Energy Storage Systems en inglés), y cargas controlables, que pueden operarse de forma controlada y coordinada, ya sea conectados a la red principal de energía o en modo de isla” [11]. En lo correspondiente a GD, comprende todas las fuentes posibles de energía en las escalas y contexto de una MRE, incluyendo calefacción y energía combinados a pequeña escala (CHP, Combined Heat and Power en inglés) a base de combustibles fósiles o de biomasa, arreglos de paneles fotovoltaicos (FV), pequeñas turbinas eólicas (WT, Wind Turbines en inglés), micro–mini hidráulicas (μ H), (mH), generación sincrónica diésel, etc.

En lo referente a dispositivos y sistemas de almacenamiento de energía incluyen todas las tecnologías: mecánicas, eléctricas, electromecánicas, químicas y térmicas [12].

En lo correspondiente a las cargas controladas, se hace mención a la iluminación regulable de forma automática, sistemas de bombeo diferido [11] y un especial énfasis en cargas críticas y sensibles o también denominadas de alta confiabilidad de suministro.

Cabe mencionar que no se considera una MRE a un sistema alimentado por una única tecnología DER o a un grupo de una misma tecnología de GD que trabaja de manera no coordinada [13].

En la Fig. 2, se muestra un esquema típico de un sistema de microrred eléctrica.

Adicionalmente, las ventajas que ofrecen las MREs son las siguientes:

- Confiabilidad del suministro.

3.2.3 MREs remotas:

Son MREs cuya operación es en modo isla o modo sin acceso de enlace de interconexión a una red de distribución o un sistema más grande. Este tipo de MREs están ganando popularidad en la actualidad con fines de cobertura y accesibilidad de energía eléctrica a poblados, que se encuentran alejados de los sistemas de distribución convencionales.

4. INCONVENIENTES OPERATIVOS

La seguridad de la operación junto con la economía constituyen los principales tópicos a considerar en la operación de SSEEs y en tiempos actuales particularmente en sistemas de GD y MREs. Este primer requerimiento se puede lograr básicamente a través del mantenimiento y el control de la tensión y de la frecuencia, la supervisión de los límites térmicos y/o estabilidad sobre los diferentes ramales y nodos, la limitación de las corrientes de cortocircuito en los diferentes nodos y el cumplimiento de un criterio de seguridad ante posibles fallas.

La incorporación de DERs como sistemas de GD a través de fuentes de energías renovables no convencionales (ERNCS) en MREs impone complejos desafíos técnicos que permitan su operación con resultados satisfactorios. La GD al estar eléctricamente cercana a las cargas, a los usuarios o a los centros de consumo requiere de resiliencia por parte de la red principal de energía y de los componentes que conforman el sistema red-MRE o de la MRE cuando su operación es en modo isla (autónoma), respecto a la red de distribución principal.

Adicionalmente, se deben considerar las fluctuaciones de potencia que son producidas por arreglos de paneles fotovoltaicos (FV), parques de generación eólica y sistemas de almacenamiento de energía que estén conectados conformando el sistema de la MRE.

Con la presencia de ERNCs, el control de la generación se vuelve significativamente más desafiante en términos de ingeniería, debido a la mayor intermitencia e incertidumbre para mantener el equilibrio generación-demanda. Adicionalmente, otras particularidades relacionadas a los sistemas de MREs se mencionan a continuación: flujos de potencia bidireccionales, desbalances en términos de cargabilidad, desviaciones en los perfiles de tensión, incertidumbre en la generación de electricidad y baja o nula inercia eléctrica, lo que ocasiona problemas asociados a la frecuencia.

Los inconvenientes señalados requieren de acciones de I+D con el objetivo de solucionarlos y facilitar una adecuada operación de los sistemas de MREs y GD. Además, estos sistemas deben permitir realizar las ac-

ciones de control para garantizar el mantenimiento de la seguridad de operación en términos de confiabilidad y resiliencia.

4.1. Estabilidad en MREs

Las estructuras topológicas de redes eléctricas débilmente malladas en SSEEs se tornan altamente vulnerables ante la aparición de fallas o perturbaciones, que pueden originar con alta probabilidad severos problemas transitorios y dinámicos. La necesidad del manejo más eficiente de los SSEEs ha dado origen a la aparición de tecnologías innovadoras en la generación, transmisión y distribución de energía. Una buena posibilidad para la aplicación de estas nuevas tecnologías es la de controlar la operatividad y mantener la seguridad del SSEE, pudiendo bajo este contexto influir decididamente sobre la confiabilidad, calidad de suministro y resiliencia en la operación de los sistemas, así como también, controlar y mitigar problemas puntuales referentes a fenómenos que pongan en riesgo la estabilidad de tensión o de frecuencia.

Entre las tecnologías innovadoras que surgieron en estos últimos años relacionadas con la distribución de energía se pueden mencionar fundamentalmente las MREs. A pesar del tamaño relativamente pequeño de las mismas, una MRE típica consta de diversos componentes y variadas tecnologías de producción de electricidad, a las que en anterioridad se denominó DERs. El acoplamiento de los DERs es generalmente a través de inversores, con lo que las necesidades de acciones y estrategia de control se presentan como un nuevo desafío en los sistemas de MREs. Para generación tipo DER que no está basada en una etapa inversora, como máquinas sincrónicas y de inducción, tienen un comportamiento y modelado idéntico que en los SEP tradicionales [15].

Además, es necesario indicar que la coordinación entre los diversos componentes en las MREs es crítica, ya que se debe considerar la fuerte interdependencia, topología y proximidad entre los mismos. Por lo tanto, el diseño, control y el análisis de las MREs requieren modelos precisos que reflejen adecuadamente su desempeño real y con mayor énfasis de manera particular, si se ha previsto realizar estudios que involucren la estabilidad en el sistema.

Los problemas de estabilidad que se pueden presentar en esta clasificación están asociados con la pérdida de una unidad de generación, la violación de los límites de potencia nominal de los DERs, el bajo reparto de potencia entre los múltiples DERs, la selección incorrecta de los recursos de reserva [16] y/o el disparo involuntario debido a una falla en la MRE, que no haya sido causada por la carga.

Haciendo referencia a lo expuesto en [17], se menciona que pueden ocurrir cambios significativos en los perfiles de tensión y frecuencia en una MRE, cuando ocurren transiciones en los modos de operación red-MRE y MRE en isla u operación autónoma. Estos cambios son causados fundamentalmente por el fuerte acoplamiento entre diversas variables del sistema, como los flujos de potencia activa y reactiva, así como también la tensión y la frecuencia. En particular, tal acoplamiento es evidente en MREs bajo condiciones operativas de estrés, que se presentan en muchos casos asociadas con problemas de inestabilidad. Por lo mencionado, es importante identificar adecuadamente las causas principales de los problemas de inestabilidad [18].

4.1.1 Problemática asociada a la Tensión

Un problema a tener en consideración en las MREs con fuentes de ERNCs a través de DERs, son las constantes fluctuaciones de tensión. Estas fluctuaciones se originan generalmente por las inyecciones temporarias de potencia que la red de distribución principal suministra a alguna MRE conectada a la misma.

En los sistemas eléctricos de potencia convencionales, una de las principales causas de eventos que producen inestabilidad de tensión son las líneas de transmisión de extensa longitud, las cuales limitan la transferencia de potencia entre los parques generadores y los centros de consumo. Sin embargo, en las MREs, los alimentadores eléctricos que conforman este sistema son relativamente de corta longitud, lo que provoca caídas de tensión de pequeña magnitud entre los extremos emisor y receptor de los alimentadores [19], [20]. No obstante, con las actuales redes de distribución evolucionando hacia las MREs, las caídas de tensión y los límites de cargabilidad asociados a las corrientes circulantes pueden convertirse en un problema de considerable representatividad, en particular con las redes de características eléctricas débiles y antiguas en función de su tiempo de operación [21]. Por lo mencionado, el colapso de tensión, es decir, la disminución lenta y sostenida de la tensión asociada con el proceso de recuperación de carga y capacidad de suministro de potencia reactiva, se convierte en un desafío actual de análisis e investigación en las MREs.

Los términos relacionados a estabilidad de tensión incluyen: calidad, regulación, distorsión y perfil de tensión. Como se indicó, la estabilidad de tensión en microrredes consiste en mantener estable la amplitud de tensión en un nivel requerido por el sistema. En la Tabla 2 se muestra las causas y manifestaciones en términos de estabilidad de tensión.

4.1.2 Problemática asociada a la Frecuencia

La regulación de frecuencia es una de las principales preocupaciones de las MREs autónomas o en modo isla; esto es debido a la baja inercia del sistema y la alta

Estabilidad de Tensión	
Causa raíz	Manifestación
<ul style="list-style-type: none"> • Límites de potencia activa y reactiva de DERs • Inadecuado suministro de potencia reactiva • Pobre reparto de potencia reactiva • Sensibilidades de la tensión de carga • Capacitor del enlace de DC 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajas tensiones en estado estable • Grandes oscilaciones de potencia • Altas oscilaciones de tensión en el lado de DC

Tabla 2: Causas y Manifestaciones de Estabilidad de Tensión en MREs.

participación de DERs con fuentes de ERNCs, que suministran energía eléctrica a la MRE en forma intermitente. Por lo tanto, ante la presencia de perturbaciones tales como fallas o contingencias mayores, la frecuencia eléctrica puede experimentar grandes desvíos que varían a una alta tasa de razón de cambio con respecto a la potencia, comprometiendo así la estabilidad de frecuencia del sistema [22],[23]. En este contexto, las técnicas y tecnologías de control de frecuencia convencionales pueden no ser lo suficientemente rápidas para superar el cambio rápido y a veces abrupto de la frecuencia del sistema, incluso en casos donde hay disponible suficiente reserva de generación.

Una coordinación deficiente entre los múltiples controladores de frecuencia y la repartición de potencia entre los DERs puede también desencadenar en problemas de estabilidad de pequeñas perturbaciones, las cuales dan origen a oscilaciones de frecuencia en lapsos de tiempo de unos pocos segundos hasta unos pocos minutos, un fenómeno que raramente es observado en grandes SSEEs [24]. En la Tabla 3, se presentan las causas y manifestaciones en términos de estabilidad de frecuencia.

Estabilidad de Frecuencia	
Causa raíz	Manifestación
<ul style="list-style-type: none"> • Límites de potencia activa de DER • Inadecuado suministro de potencia activa • Pobre compartición de potencia activa 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta tasa de cambio de frecuencia • Baja frecuencia de estado estable • Oscilaciones de frecuencia y gran potencia

Tabla 3: Causas y Manifestaciones de Estabilidad de Frecuencia en MREs.

5. POSIBLES SOLUCIONES

A partir de lo mencionado previamente, se desprende la necesidad de disponer de suficiente reserva de generación, para mantener los niveles de seguridad adecuados en las MREs con DERs basados en ERNCs. La posibilidad de contar con reservas se torna desafiante, facilitando a que las MREs puedan garantizar el suministro de generación, acciones de control y respuestas rápidas ante las contingencias que pudiesen presentarse en los sistemas de MREs en sus dos modos operativos, permitiendo de esta manera mantener la seguridad operativa en términos de tensión y frecuencia.

Como parte de las redes eléctricas inteligentes (REIs), las MREs se han desarrollado para aprovechar todos los beneficios de la integración de los recursos energéticos distribuidos, especialmente la generación renovable distribuida basada en fuentes variables e intermitentes, como la eólica y la solar. Sin embargo, cumplir con todos estos objetivos requiere la implementación de tecnologías innovadoras de sistemas de almacenamiento de energía integradas con sistemas de acondicionamiento de electrónica de potencia de alta eficiencia y respuesta muy rápida para interactuar con los SSEEs y particularmente con las MREs. En este complejo entorno, las tecnologías de ESSs surgen como una solución tecnológica necesaria y muy valiosa, con capacidades excepcionales para lograr plenamente los beneficios de las redes inteligentes. Los ESSs coinciden con los requisitos de las aplicaciones de MREs para el suministro de energía. Los principales beneficios de los dispositivos de almacenamiento avanzados incluyen alta densidad de potencia y de energía, con una extraordinaria eficiencia de conversión y respuesta dinámica [12]. Sin embargo, para aprovechar al máximo los beneficios de los ESSs en el entorno de las MREs, se requiere el apoyo de un sistema de acondicionamiento de electrónica de potencia con características de alta eficiencia y respuesta muy rápida, para interactuar con la red eléctrica. Los ESSs desempeñan un papel fundamental en la regulación y estabilidad de tensión y frecuencia, además de suministrar potencia activa y reactiva de forma simultánea o independiente y de manera muy rápida al sistema eléctrico, aportando con ello a mejorar las condiciones de seguridad, confiabilidad, resiliencia y calidad de energía de las MREs [12], [25].

Por otro lado, el fuerte acoplamiento existente entre la tensión y la frecuencia en microrredes complica aún más la regulación de frecuencia. Esto es debido a la alta relación R/X de los alimentadores que conforman la MRE, con lo cual no es válido considerar el desacoplamiento matemático en la formulación del flujo de potencia activa y la magnitud de tensión, que se suele realizar convencionalmente en los SEP. Dentro de este contexto y, debido al tamaño relativamente pequeño en

términos de potencia de las MREs, los cambios o variaciones de tensión en los terminales de los DERs se reflejarán casi instantáneamente en los nodos de carga del sistema, lo que origina que haya un cambio en la demanda del sistema que actuará en función de los índices de sensibilidad que tenga la tensión en la carga [20],[26]. Por lo tanto, el acoplamiento entre las variables eléctricas tensión–frecuencia debe considerarse y tomarse en cuenta en el análisis de estabilidad y control de frecuencia en las MREs.

Los dispositivos FACTS, que se introdujeron en la década de 1970, tenían como objetivo principal en ese entonces permitir el control de los flujos de potencia y garantizar buenos márgenes de estabilidad transitoria así como la cargabilidad en las líneas de transmisión de los grandes SSEEs. Este equipamiento de electrónica de potencia cuenta con bancos de capacitores y reactores, que pueden conmutarse o controlarse mediante tiristores de alta tensión. Por otra parte, desarrollos e investigaciones recientes han dado como resultado capacidades de control mejoradas en tiempo real, como la inyección y absorción de potencia reactiva de los FACTS, proporcionando así, oportunidades para el control y estabilidad de tensión y frecuencia en los sistemas eléctricos y particularmente en tiempos actuales en MREs [10].

6. NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

En la Fig. 3, se presentan las diferentes aristas investigativas que en la actualidad está abordando la comunidad científica en el contexto de las MRE.

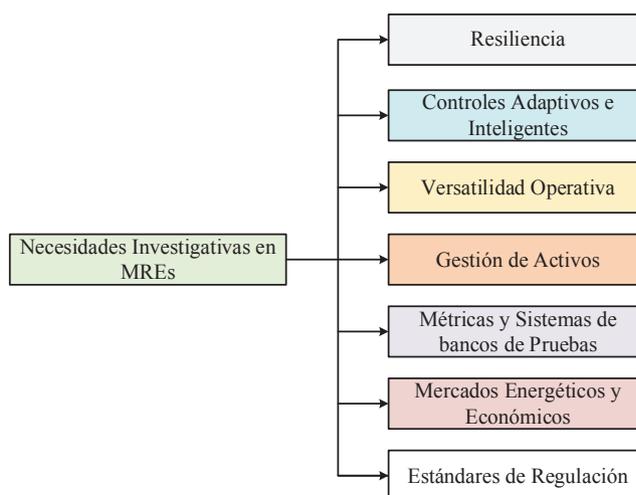


Fig. 3: Necesidades Investigativas en MREs.

7. CONCLUSIONES

El nuevo paradigma de los sistemas eléctricos está transformando toda la cadena de valor y estructura operativa organizacional del sector eléctrico. A través de los sistemas de microrredes basados en tecnologías de generación distribuida se ha logrado mitigar problemas medioambientales en la generación de energía eléctrica y también establecer mercados eléctricos desregulados. Un sistema de microrred eléctrica es por sí mismo un sistema energético controlable en términos de generación, consumo y almacenamiento de energía. Las microrredes permiten de manera flexible acortar la brecha entre la dependencia de las grandes centrales de generación y la transición hacia sistemas de GD de energías renovables, facilitando el acondicionamiento de diferentes fuentes renovables, tales como solar fotovoltaica y eólica, y de sistemas de almacenamiento de energía. Adicionalmente, con la incorporación de las ERNCs la presencia de equipamiento basado en dispositivos de electrónica de potencia se hace más significativa, requiriendo de sistemas de control para que su desempeño resulte óptimo. En relación con los esquemas de protección, estos deberán obedecer a la topología de los sistemas de microrred y en función de sus modos operativos, ya sea red-MRE o MRE aislada. En este sentido este último modo operativo reviste mayor connotación, por lo que requiere de ajustes y controles que garanticen el suministro de energía de manera segura, confiable y resiliente. Finalmente, se ha observado además que la utilización de la tecnología FACTS en este tipo de sistemas permite una mejor operación y control de los sistemas de MREs en función de los requerimientos de regulación y estabilidad de tensión y de frecuencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. B. Gharehpetian and S. M. M. Agah, *Distributed Generation Systems: Design, Operation and Grid Integration*. 2017.
- [2] A. Zambroni de Souza and M. Castilla, *Microgrids Design and Implementation*. 2019.
- [3] D. T. Ton and W.-T. P. Wang, "A more resilient grid: The U.S. Department of Energy joins with stakeholders in an R&D plan," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 13, no. 3, pp. 26–34, 2015.
- [4] K. P. Schneider, F. K. Tuffner, M. A. Elizondo, C. C. Liu, Y. Xu, and D. Ton, "Evaluating the Feasibility to Use Microgrids as a Resiliency Resource," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 2, pp. 687–696, 2017.
- [5] D. E. Olivares et al., "Trends in microgrid control," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, 2014.
- [6] J. Guerrero et al., "Distributed generation: Toward a new energy paradigm," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 4, no. 1, pp. 52–64, 2010.
- [7] M. El-Sharkawi, *Electric Energy An Introduction*, vol. 1. 2013.
- [8] R. Majumder, "Some aspects of stability in microgrids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3243–3252, 2013.
- [9] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei, and S. Bahramirad, "State of the art in research on microgrids: A review," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 890–925, 2015.
- [10] T. Samad and A. M. Annaswamy, "Controls for Smart Grids: Architectures and Applications," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2244–2261, 2017.
- [11] Microgrids at Berkeley Lab, "Microgrids definitions." [Online]. Available: <https://goo.gl/3JsCGm>. [Accessed: 26-May-2018].
- [12] M. G. Molina, "Energy Storage and Power Electronics Technologies: A Strong Combination to Empower the Transformation to the Smart Grid," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2191–2219, 2017.
- [13] M. Smith, "Overview of the US Department of Energy's Research & Development Activities on Microgrid Technologies," 2009 Symp. Present. Micro-Grid, 2009.
- [14] P. Asmus, A. Cornelius, and C. Wheelock, "Research report: Microgrids Islanded Power Grids and Distributed Generation for Community, Commercial, and Institutional Applications," PikeResearch, 2009.
- [15] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York, US.: McGraw-Hill Professional, 1994.
- [16] A. Bernstein, J. Y. Le Boudec, L. Reyes-Chamorro, and M. Paolone, "Real-time control of microgrids with explicit power setpoints: Unintentional islanding," in 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015, 2015.
- [17] F. Katiraei, M. R. Iravani, and P. W. Lehn, "Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 1, pp. 248–257, 2005.
- [18] C. A. Cañizares, *Microgrid Stability Definitions, Analysis and Modeling*, IEEE. 2018.
- [19] Z. S. K. Strunz, E. Abbasi, C. Abbey, C. Andrieu, U. Annakkage, S. Barsali, R. C. Campbell, R. Fletcher,

F. Gao, T. Gaunt, A. Gole, N. Hatzigiorgiou, R. Iravani, G. Joos, H. Konishi, M. Kuschke, E. Lakervi, C. Liu, J. Mahseredjian, F. Mosallat, D. Muthumuni, A., "Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources," CIGRE, no. ELECTRA, pp. 4–6, 2014.

[20] M. Farrokhabadi, C. A. Cañizares, and K. Bhattacharya, "Frequency control in isolated/islanded microgrids through voltage regulation," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 8, no. 3, pp. 1185–1194, 2017.

[21] R. B. Prada, "Voltage stability and thermal limit : Constraints on the maximum loading of electrical energy distribution feeders," IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib., vol. 145, no. ii, pp. 573–577, 1998.

[22] G. Delille, B. François, and G. Malarange, "Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system's inertia," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 3, no. 4, pp. 931–939, 2012.

[23] A. Borghetti, C. A. Nucci, M. Paolone, G. Ciappi, and A. Solari, "Synchronized phasors monitoring during the islanding maneuver of an active distribution network," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 2, no. 1, pp. 70–79, 2011.

[24] N. Pogaku, S. Member, M. Prodanovic, T. C. Green, and S. Member, "Modeling , Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Microgrid," vol. 22, no. 2, pp. 613–625, 2007.

[25] F. Z. Peng, "Flexible AC Transmission Systems (FACTS) and Resilient AC Distribution Systems (RACDS) in Smart Grid," Proc. IEEE, vol. 105, no. 11, pp. 2099–2115, 2017.

[26] G. Delille, L. Capely, D. Souque, and C. Ferrouillat, "Experimental validation of a novel approach to stabilize power system frequency by taking advantage of Load Voltage Sensitivity," 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015, 2015.



Luis Angel Paredes. – Nació en Quito, Ecuador en 1987. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en 2012 y de Magíster en Gestión de Energías en 2016. Además, ha realizado varios cursos y especializaciones en temáticas de ingeniería eléctrica en Estados Unidos, China, Perú y Chile. Su

experiencia profesional ha sido desarrollada en varias empresas e instituciones del sector eléctrico y energé-

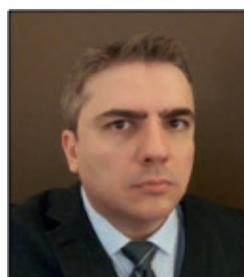
tico del Ecuador. Actualmente es candidato a Doctor en Ingeniería Eléctrica (Ph.D.) del Instituto de Energía Eléctrica (IEE) de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) en Argentina. Sus campos de investigación están relacionados con: Resiliencia de los Sistemas Eléctricos, Estabilidad y Control en Microrredes Eléctricas, FACTS, Electromovilidad, Energías Renovables y Operación de Sistemas Eléctricos en Tiempo Real.



Benjamín Rodolfo Serrano.

– Nació en San Juan, Argentina en 1955. Recibió su título de Ingeniero Electromecánico en la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), Argentina en 1981. Realizó perfeccionamientos en el Institut fuer Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft de la Universidad RWTH

de Aachen, Alemania desde 1984 a 1987 y en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Madrid, España entre 1997 y 1998. Obtuvo su título de Doctor en Ingeniería Eléctrica en el Instituto de Energía Eléctrica (IEE) de la UNSJ, Argentina en 2017. Actualmente es docente e investigador en el IEE de la UNSJ-CONICET y sus campos de investigación están relacionados con la Programación Óptima de la Operación de los Sistemas Eléctricos de Potencia, considerando en forma específica del Control de Tensiones y Suministro de Potencia Reactiva.



Marcelo Gustavo Molina. –

Es profesor titular de Electrónica de Potencia, Energías Renovables y Redes Inteligentes en la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) e investigador principal del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina. Desde 2019 se desempeña

como Director del Instituto de Energía Eléctrica, UNSJ-CONICET. El Dr. Molina recibió el título de Ingeniero Electrónico de la UNSJ en 1997 y su Ph.D. de la misma universidad en 2004. Ha participado en diversos proyectos nacionales e internacionales y en consultoría de alto nivel. Ha colaborado con investigadores universitarios y de la industria. Es autor de un libro y coautor de ocho capítulos de libros en ingeniería eléctrica y más de 200 publicaciones en su campo de especialización.