

A Review of Microgrids in Latin America: Laboratories and Test Systems

Juan M. Rey, *Member, IEEE*, Geovanni A. Vera, Pedro Acevedo-Rueda, Javier Solano, Maria A. Mantilla, Jacqueline Llanos, *Member, IEEE*, and Doris Sáez, *Senior Member, IEEE*.

Abstract—In recent years, microgrids have gained attention as a technological alternative to face the energy transition and universal sustainable electrification challenges. Its versatility to operate in grid-connected or isolated mode allows adapting the microgrid concept to several urban and rural applications. It has motivated the industry and academia, in order to develop experimental projects, prototypes, and application pilots worldwide. This paper presents a review of some laboratories and test systems of microgrids in Latin America. A brief description of the general information, characteristics and components of each microgrid is presented. Also, a discussion of the advances in distributed generation in Latin America is included.

Index Terms—Distributed Generation, Laboratories, Latin America, Microgrids, Test Systems.

I. INTRODUCCIÓN

Las microrredes eléctricas (MRs) son redes de baja o media tensión compuestas por generadores distribuidos y sistemas de almacenamiento de energía, que operan en conjunto y como una única entidad controlable para abastecer cargas locales [1], [2]. Las MRs pueden operar en modo isla o conectadas a la red de distribución [3]. Cuando se diseñan integradas a la red de distribución, tienen la capacidad de conectarse y desconectarse del sistema de potencia en caso de que se presenten fallas en la operación o existan desconexiones programadas, razón por la cual mejoran la flexibilidad y la calidad del servicio de energía eléctrica. Además, su implementación favorece la integración de fuentes de generación distribuida a las redes eléctricas principales, en especial las basadas en energías renovables [4].

La flexibilidad operativa de las MRs hace que este tipo de redes sirvan como soluciones energéticas para proyectos urbanos y rurales (donde pueden operar en zonas que no estén conectadas a la red principal) [5], [6]. La Fig. 1 presenta esquemas generales con los componentes que integran a las MRs en ambas aplicaciones. En el caso de las aplicaciones urbanas, las MRs suelen operar en modo conectado a la red, como se muestra en la Fig. 1(a). El punto eléctrico en el cual se realiza dicha conexión, automatizada mediante un controlador,

es conocido como el punto de acoplamiento. Las MRs en aplicaciones urbanas se caracterizan por incluir fuentes de generación distribuidas, sistemas de almacenamiento y cargas de diferentes tipos como residenciales, industriales, comerciales y prioritarias. Además, debido al incremento en la producción de vehículos eléctricos, la integración de sus estaciones de carga se ha convertido en un reto tecnológico relevante. Por otro lado, en el caso de las aplicaciones rurales, las MRs suelen operar en modo aislado, como se muestra en la Fig. 1(b). Por esta razón, resulta estratégico incluir generación de respaldo basada en combustibles fósiles que permite abastecer a las cargas industriales y residenciales rurales de una forma confiable y, por lo general, menos costosa que con MRs basadas en un solo tipo de fuente de generación [7]. El concepto de MR puede ser adaptado para soluciones de movilidad terrestre, como es el caso de los sistemas ferroviarios [8], movilidad marítima [9], [10] o aplicaciones industriales como en la minería [11]. Recientemente se ha explorado el uso de MRs en nuevos escenarios entre los que se destacan los aeroespaciales [12].

Algunos aspectos que caracterizan a las MRs son su alto nivel de controlabilidad debido al uso de tecnologías basadas en electrónica de potencia y sistemas de comunicaciones [13], así como su capacidad de gestión óptima en términos técnicos y económicos, que permite minimizar el uso del combustible y maximizar el aprovechamiento de los recursos renovables [14]. Esto favorece que las MRs puedan ser fácilmente integradas con sistemas inteligentes relacionados a tecnologías como el internet de las cosas (*IoT*), la industria 4.0, las ciudades inteligentes, los sistemas de carga de vehículos eléctricos, entre otras [15]–[17]. De igual forma, la capacidad de monitorear múltiples variables eléctricas facilita el diseño e implementación de estrategias de control que tienen como objetivo mejorar la calidad de la potencia, optimizar el aprovechamiento de la energía e integrar activamente al usuario final a través de técnicas como la respuesta a la demanda [18]. Por estas razones, las MRs están jugando un papel fundamental en la transformación de las redes de potencia tradicionales, en la transición energética y en los esfuerzos por alcanzar la cobertura universal sostenible del servicio de energía eléctrica alrededor del mundo [19], [20].

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El creciente interés en el estudio y desarrollo de las MRs ha motivado la publicación de múltiples trabajos que agrupan y sintetizan los avances más importantes del estado del arte

Juan M. Rey, Geovanni A. Vera, Pedro Acevedo, Javier Solano and Maria A. Mantilla are with Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga 680002, Colombia (e-mail: juanmrey@uis.edu.co).

Jacqueline Llanos is with the Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 171-5-231B Sangolquí, Ecuador.

Doris Sáez is with the Department of Electrical Engineering, University of Chile, Santiago 8370451, Chile, and also with the Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería, Santiago 8370451, Chile.

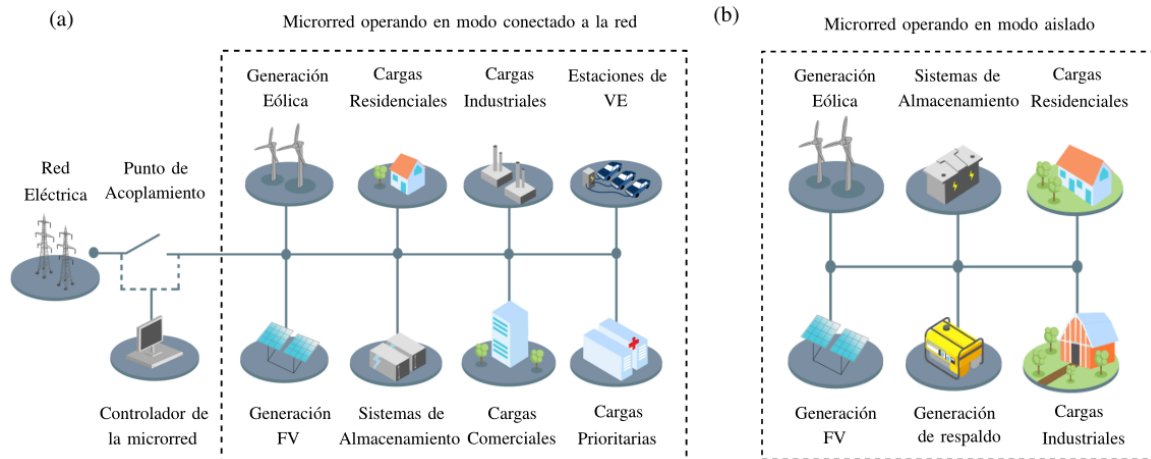


Fig. 1. Esquemas generales de microrred para: (a) aplicaciones urbanas, (b) aplicaciones rurales.

en esta temática. En [21], se discuten los principales retos y alternativas relacionados a la investigación en el diseño, control y operación de MRs. Los trabajos presentados en [22] y [23] resumen los principales problemas y soluciones de la calidad de la potencia en diversos tipos de MRs. Con respecto a las estrategias de control, algunos trabajos como [24], [25], [26], [27] y [28] abordan revisiones de técnicas para MRs en AC, DC e híbridas, enfocándose en aspectos operativos importantes como la repartición de la potencia y discutiendo sus ventajas y desventajas. Otros trabajos como [29] y [30] recopilan información sobre los sistemas de comunicaciones, la multiconectividad y sus características, y limitaciones operativas. En [31], se presenta una revisión de estrategias de control de MRs desde el enfoque de los sistemas multi-agentes y en [32] se analizan los avances y desafíos del control cooperativo distribuido. En [33] y [34] se presentan revisiones sobre las estrategias y alternativas futuras para el diseño de sistemas de protecciones. Algunos trabajos son más específicos y se enfocan en el estudio de la estabilidad, como es el caso de [35] y [36], en los retos operativos de los sistemas de almacenamiento [37] y en las investigaciones sobre MRs interconectadas [38].

Desde la industria y la academia, se han venido desarrollando proyectos experimentales, prototipos y pilotos de aplicación en todo el mundo. Algunos trabajos se han encargado de reportar estas experiencias. En [39]–[43] se presentan revisiones de proyectos pilotos principalmente en Norte América, Europa y Asia. En [44] se presentan algunas MRs aisladas ubicadas en islas de China. Por su parte, en [45] se presenta una revisión de MRs de prueba ubicadas en el África subsahariana, mientras que en [46] se recopilan diferentes tipos de MRs de la India.

Teniendo en cuenta lo anterior, se identifica que no existen trabajos recientes que se enfoquen exclusivamente en reportar experiencias de implementación de MRs en América Latina. Esto puede limitar la divulgación de los proyectos, avances y capacidades existentes en diferentes países de la región, lo que desfavorece la creación de lazos de cooperación en investigación entre pares académicos e industriales latino-americanos y de otras regiones. Para aportar en la solución de este problema identificado, este trabajo presenta una revisión

de algunas experiencias de laboratorio y de proyectos piloto de MRs en América Latina documentadas en la literatura especializada. Para esto, se hará una breve descripción de la información general de cada MR y sus principales características y componentes, enfocándose en los sistemas de generación, almacenamiento y cargas.

El resto de este documento está organizado de la siguiente manera: la sección III presenta una descripción general de los principales avances en materia de generación distribuida en América Latina. La sección IV discute conceptos claves relacionados al control y operación de MRs eléctricas. La sección V presenta la metodología de selección bibliográfica seguida. Las secciones VI y VII presentan experiencias de MRs de laboratorios y proyectos pilotos en América Latina. En la sección VIII se presentan algunos software y plataformas interactivas relacionados con las MRs. Finalmente, en la sección IX se presentan las conclusiones generales.

III. GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN AMÉRICA LATINA

La generación distribuida ha tenido un importante crecimiento en América Latina en las últimas décadas, en la medida en que diversos países han adoptado y fortalecido marcos regulatorios que permiten la conexión a la red eléctrica por parte de pequeños generadores y se han establecido políticas para la promoción de las energías renovables [47]–[49].

Países como Brasil, Chile y Uruguay han sido los abanderados en la implementación de políticas públicas para promover la generación distribuida. Sus experiencias y resultados han servido como ejemplo para otros países de la región [50]. Se destacan también las experiencias de Guatemala, Perú y México por tener capacidades instaladas mayores a 100 MW. Por otra parte, los avances en regulación de Costa Rica y Argentina han sido destacados por diversos autores y son objeto de estudio de entidades especializadas [51].

En otros países de la región, como es el caso de Ecuador, se han generado normativas relacionadas a la instalación de Sistemas de Microgeneración Fotovoltaica (*PVMS*, por sus siglas en inglés) en techos, casas y edificios residenciales para autoabastecimiento con capacidad nominal de hasta 100kW operando en sincronía con la red principal en media o baja tensión, y se ha autorizado la venta a la red de los eventuales

excedentes de generación de energía bajo el cumplimiento de requisitos técnicos [52].

Debido a su localización privilegiada, la mayoría de países de América Latina se caracterizan por tener un alto potencial energético y unas condiciones climatológicas que favorecen el aprovechamiento de las energías renovables. Algunos países como Colombia, presentan importantes desarrollos de la generación distribuida en zonas rurales remotas, en su mayoría no interconectadas a las redes principales, donde habitan comunidades en condición de pobreza o pobreza extrema [53], [54]. Por otra parte, los países isleños y costeros de Centro América, ven en la generación distribuida una oportunidad para aumentar la resiliencia de sus sistemas eléctricos ante la ocurrencia de desastres naturales como huracanes [55].

Las políticas públicas que se han adoptado para regular e incentivar el uso de la generación distribuida en los diferentes países de América Latina son variadas. Entre las más comunes se encuentran la eliminación de los impuestos por importación y valor agregado de los sistemas necesarios para la microgeneración, junto con deducciones en las declaraciones de renta de los propietarios de dichos sistemas [56]. También se destacan los esquemas de pagos como las tarifas de alimentación (FIT), y la medición y facturación neta [50], [57].

En general, en la región aún se observan debilidades en algunos países como la falta de claridad en los esquemas de remuneración, vacíos u obstáculos legales, redes eléctricas sin la capacidad tecnológica requerida y falta de apoyos o incentivos económicos, lo que ha llevado a que el porcentaje de participación de la generación distribuida siga siendo bajo si se compara con otras regiones del mundo [58]. A pesar de esto, el futuro de la generación distribuida en América Latina es muy prometedor, ya que las experiencias pioneras han motivado a que en la mayoría de las países se den los pasos iniciales para avanzar en la aprobación de políticas requeridas, la creación de marcos regulatorios y en la acumulación de experiencia valiosa para futuros proyectos [59]. En el marco de estos avances y con la reducción sostenida de costos de producción que se viene presentando en el mundo entero, la implementación de generación distribuida en los sistemas de potencia nacionales presentará un crecimiento importante en la región en los próximos años, favoreciendo el avance de desarrollos tecnológicos relacionados como es el caso de la integración de MR eléctricas y evolución a las redes inteligentes.

IV. OPERACIÓN Y CONTROL DE MICRORREDES

Como se mencionó anteriormente, las MRs tienen la capacidad de operar conectadas a otras redes de potencia o de forma aislada. Para garantizar una operación estable, los dispositivos de control pueden ser programados en diferentes modos de funcionamiento, los cuales permiten controlar variables como la tensión de operación y/o la inyección de potencias [60]. Usualmente, el control de la operación de MRs se concibe a partir de una estructura jerárquica en la cual los objetivos de control son divididos por capas o niveles, de acuerdo a sus dinámicas operativas. Esto permite desacoplar las estrategias de control usadas en cada capa a partir de sus tiempos de

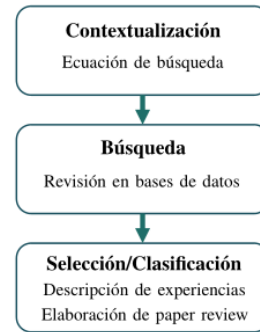


Fig. 2. Esquema de la metodología de selección bibliográfica.

respuesta. La estructura de control jerárquico mayormente mencionada en la literatura es la de tres niveles [61].

En la capa primaria se controlan variables como la frecuencia y las tensiones. La técnica más usada para este propósito es el control por pendiente (*droop control*, en inglés), la cual permite que los generadores de la MR operen a una frecuencia global emulando la inercia virtual propia de los generadores síncronos [62], [63]. Las desviaciones de esta frecuencia global con respecto a la referencia de operación deseada, así como aspectos relacionados al perfil de tensión y la calidad de la potencia, son corregidos en la capa secundaria [64], [65]. Finalmente, en la capa terciaria se controlan los flujos de potencia a partir restricciones operativas y objetivos económicos [66], [67]. Algunos trabajos proponen considerar la capa cero en la estructura jerárquica, siendo esta en la cual se ubican los lazos de control internos que permiten la operación de los controladores. También se contempla a la capa cuaternaria como aquella en la que se realiza la planeación, se definen políticas y se llevan a cabo las transacciones de los mercados energéticos [68].

Otro aspecto fundamental de la operación de las MRs son los esquemas de control. Estos pueden clasificarse como centralizados o distribuidos de acuerdo a la utilización de un controlador central dedicado o varios controladores distribuidos en cada unidad de generación, respectivamente [69]. La primera topología permite regular de forma más sencilla la operación, pero presenta inconvenientes graves si el controlador central presenta fallas. Por su parte, en la topología distribuida la operación requiere de estrategias de control más complejas y sistemas de comunicación robustos, pero las MRs son menos propensas a fallar globalmente.

V. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN BIBLIOGRÁFICA

La metodología utilizada para la recopilación de la información está dividida en tres etapas como se observa en la Fig. 2: contextualización, búsqueda y selección/clasificación. A continuación, se describen cada una de estas etapas.

A. Contextualización:

En esta primera etapa se realizó una búsqueda preliminar en la base de datos bibliográfica *Scopus* mediante la ecuación: “TITLE-ABS-KEY (*microgrids*) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , ”ENGI”) OR LIMIT-TO (SUBJAREA , ”ENER”) OR LIMIT-TO (SUBJAREA , ”COMP”))”.

TABLA I
PALABRAS CLAVES IDENTIFICADAS PARA LA BÚSQUEDA
BIBLIOGRÁFICA

Inglés	Español
Microgrids	Microrredes
Smart grids	Redes inteligentes
Distributed generation	Generación distribuida
Renewable energy	Energía renovable
Hybrid systems	Sistemas híbridos
Rural electrification	Electrificación rural
Laboratory facilities	Infraestructura de laboratorios
Pilot projects	Proyectos pilotos

Los resultados permitieron verificar la ausencia de trabajos recientes enfocados en recopilar exclusivamente experiencias relacionadas a las MRs en América Latina. Por otra parte, la búsqueda permitió identificar algunas palabras claves relacionadas con MRs, las cuales son presentadas en la Tabla I.

B. Búsqueda:

En la segunda etapa se realizó una revisión sistemática en las bases de datos de la *IEEE*, *IET*, *ScienceDirect*, *Springer*, *Taylor & Francis* y *Scielo*, usando las palabras claves presentadas en la Tabla I y los nombres de los países de la región. Además, la búsqueda se complementó con la herramienta *Google Scholar*. Como resultado se obtuvieron más de 50 trabajos.

C. Selección/Clasificación:

Existen diversas alternativas para categorizar a las MRs según su modo de operación, sistema de comunicaciones, tipo de carga, entre otras. Para efectos de este trabajo, se categorizaron las experiencias en dos tipos:

- **Laboratorios:** Se considerarán en esta sección las MRs dotadas con la capacidad de emular diversos escenarios operativos, con el objetivo de realizar investigaciones, experimentos y prácticas de carácter científico y de desarrollo tecnológico. Habitualmente, este tipo de MRs están equipadas con una amplia infraestructura de medición y de monitorización que permite controlar y tomar datos de las pruebas realizadas. En algunos casos, la generación y/o las cargas son emuladas usando equipos de electrónica de potencia y cargas controladas, para garantizar repetitividad y reproducibilidad en los experimentos. Las temáticas de investigación de los laboratorios reseñados fueron agrupadas en tres grandes líneas: Control y operación de MRs (CO), cuando el interés se enfoca en el diseño de estrategias de control para las diferentes capas del control jerárquico; Respuesta a la demanda (RD), cuando el interés se enfoca en técnicas aplicadas a la carga; y Generación distribuida (GD), cuando se busca evaluar el desempeño de la producción energética.
- **Proyectos pilotos :** Se considerarán en esta sección aquellas experiencias que fueron diseñadas e implementadas para probar la viabilidad de usar MRs como solución energética para diferentes escenarios, especialmente en



Fig. 3. Experiencias reseñadas en este trabajo.

regiones apartadas sin servicio de energía eléctrica o con un servicio deficiente.

Se consideraron dentro de este trabajo aquellas experiencias ubicadas en la región de las cuales fue posible identificar información básica como composición de la MR, modo de operación, fecha de puesta en operación y líneas de investigación, para el caso de laboratorios; además de esto, usuarios beneficiarios del proyecto, para el caso de proyectos piloto. La Fig. 3 presenta un compendio del número y localización de las experiencias reseñadas en las secciones VI, VII y VIII.

VI. LABORATORIOS

En esta sección se presenta un compendio de algunos de los laboratorios de MRs más importantes de América Latina.

1) *Juiz de Fora - Brazil:* La MR de este laboratorio fue implementada en un edificio sostenible de la Escuela de Ingeniería de la Universidad Federal de Juiz de Fora, Brasil. La red está conformada por 264 paneles fotovoltaicos distribuidos en 11 arreglos independientes, cada uno con una capacidad de operación máxima de $404V/7.12A$, un generador eólico con una potencia de operación máxima de $2kW$ y un grupo de pilas de combustible. Además, cuenta con un cargador DC y un punto de carga AC nivel 2 SAE J1772 para vehículos eléctricos. La MR está dotada para evaluar diferentes estrategias de control, así como para analizar el impacto de la integración de diversas fuentes de energía renovable y no renovable [70].

2) *REILAC - Argentina:* El laboratorio de automatización y control de la Universidad Nacional de Rosario (UNR) en Argentina, viene desarrollado desde el 2012 trabajos relacionados con la generación y distribución de energía con fuentes renovables. Actualmente la UNR esta trabajando en la implementación de la MR REILAC (Red Eléctrica Inteligente del Laboratorio de Automatización y Control), la cual tiene el propósito de brindar una plataforma que permita validar investigaciones relacionadas con la operación y la aplicación de diferentes técnicas de control [71]. La MR REILAC está compuesta por un sistema de almacenamiento por baterías

(300V7Ah), un volante de inercia de 2Wh, un arreglo fotovoltaico de 1kW y 2 generadores eólicos (uno en DC con una potencia de 2kW y otro en AC con una potencia de 20kVA).

3) *Lab UChile - Chile*: El Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile cuenta con un laboratorio de Control de Microrredes, el cual dispone de una MR híbrida experimental AC/DC de 24kW. El sistema permite evaluar configuraciones de MRs en AC, DC e híbridas, proporcionando una amplia gama de topologías para fines investigativos. El laboratorio está compuesto por 3 unidades de generación distribuida en AC y 6 unidades en DC que se emulan mediante el uso de inversores y filtros de salida configurables. El sistema cuenta con dos redes de comunicaciones en tiempo real independientes, una basada en fibra óptica y otra basada en Ethercat. En este banco se prueban se han realizado investigaciones para evaluar la operación de diferentes tipos de controladores, estrategias del control jerárquico, escenarios ante fallas en las comunicaciones, cambios abruptos de carga y operación *plug-and-play* de las unidades de generación [72].

4) *UTEC - Perú*: En la Universidad de Ingeniería y Tecnología de Perú (UTEC) se diseñó e implementó una MR inteligente que cuenta con una planta hidroeléctrica emulada mediante un generador síncrono, un sistema de generación eólico emulado con un generador de inducción con doble alimentación y un motor de inducción para cargas o consumos controlados. La red cuenta también con una fuente de potencia de 1.7kVA y 380V que opera como barra infinita trifásica. En la MR de la UTEC se han desarrollado estudios sobre confiabilidad, seguridad y eficiencia de sistemas de control de MRs, así como la evaluación del desempeño de estrategias de despacho óptimo de energía [73].

5) *CCTI-B - Ecuador*: El proyecto Centro Científico y Tecnológico de Investigación Balzai (CCTI-B) surgió gracias a la cooperación de los gobiernos de España y Ecuador en el año 2015 y está siendo ejecutado por la Universidad de Cuenca, en Ecuador. Para la investigación en MRs se cuenta con un área de 750m² con equipos para la conversión de energía, sistemas de almacenamiento, sistemas de control, fuentes, cargas eléctricas programables, vehículos eléctricos, generación eléctrica por combustión interna (diésel y gas natural) y transformadores para la interconexión con la red eléctrica [74]. El proyecto CCTI-B posee un amplio repertorio de tecnologías de generación distribuida como solar (35kW), eólica (15kW), mini hidráulica (5kW), celdas de hidrógeno (3kW) y grupos electrógenos a diésel y gas (40kVA y 44kVA); fuentes programables AC (12kVA) y el soporte de la red eléctrica mediante un transformador de 400kVA.

La MR tiene un conjunto de sistemas de almacenamiento entre los que se encuentran: baterías de plomo ácido, baterías de flujo de vanadio redox, baterías de ion-litio, bancos de supercondensadores y almacenamiento de hidrógeno. Además, cuenta con un banco resistivo de 150kW, una estación de carga de vehículos eléctricos de 80kW y un emulador de red de distribución capaz de soportar una potencia de hasta 400kW.

6) *Nanogrid-Univalle - Colombia*: La nanored diseñada e instalada en la Universidad del Valle en Colombia, se desarrolló con la finalidad de estudiar el comportamiento de las

MRs en zonas no interconectadas bajo condiciones del contexto colombiano [75]. Esta red considera el uso del software *ETAP Real-Time*®, lo que permite el monitoreo, la gestión en tiempo real, y la simulación y predicción integral. El proyecto fue financiado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (COLCIENCIAS). Este laboratorio cuenta con 16 paneles fotovoltaicos, 12 de silicio policristalino de 140W y 4 de silicio monocristalino de 85W; utiliza controladores Blue Solar, inversores de 4kW y un banco de almacenadores compuesto de 4 baterías de 12V – 200Ah.

7) *UFRN - Brasil*: La Universidad Federal de Río Grande del Norte (UFRN) en Brasil, cuenta con una MR eléctrica que permite complementar la formación de sus estudiantes y desarrollar investigaciones sobre este tipo de sistemas [76], [81]. Esta MR cuenta con un sistema fotovoltaico de 8kW, un generador síncrono de imanes permanentes impulsado por un sistema de servoaccionamiento que permite emular el comportamiento de un aerogenerador de 1,6kW y máquinas síncronas de polos salientes de 5kVA que emulan a una pequeña central hidroeléctrica. También se cuenta con un sistema de almacenamiento de baterías de 12V – 220Ah. El sistema es controlado por una *dSPACE 1103* y un *DSC TMS320F28355*.

8) *UPRM - Puerto Rico*: El banco de pruebas *AC Microgrid* desarrollado por la Universidad de Puerto Rico Mayagüez (UPRM) cuenta con inversores *DANFOSS VLT-302* trifásicos de 2,2kW que emulan generadores distribuidos. Mediante controladores *dSPACE* y montajes basados en *hardware-in-the-loop* (HIL) el sistema permite ejecutar experimentos en todos los niveles de control jerárquico y evaluar estrategias de respuesta a la demanda [77].

9) *FIE-UMSNH - México*: El proyecto del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (FIE-UMSNH), en México, posee tecnologías de generación solar y eólica integradas a dispositivos de simulación en tiempo real basados en HIL. En la cubierta del laboratorio se encuentran instalados 36 paneles fotovoltaicos con una potencia total de 9kW. Desde estos arreglos se distribuye la energía a tres inversores trifásicos *SMA*, cada uno de 3kW. Adicionalmente, la MR cuenta con 3 aerogeneradores de inducción doblemente alimentados que operan con una potencia pico de 5kW. Desde el punto de vista de la medición y monitorización de las cargas, se cuenta con un analizador de calidad *PowerXplorer PX5 Dranetz BMI*, diversas máquinas rotativas trifásicas y monofásicas, variadores de frecuencia y una unidad multifuncional para sincronización de redes *7VE6110-5EB31-OCB* [78].

10) *UFPR - Brasil*: La Universidad Federal de Paraná (UFPR), ubicada en la ciudad de Curitiba en Brasil, cuenta con una MR enfocada en la investigación de la monitorización (eléctrica y ambiental), el control y la operación de este tipo de redes eléctricas [79]. La MR experimental cuenta con dos plantas de generación fotovoltaicas de 1100kW y 110kW, un generador de biodiésel y un sistema de almacenamiento de baterías. La planta de menor capacidad junto con el sistema de almacenamiento conforman una MR más pequeña denominada DELT. Esta se encuentra ubicada en el Departamento de

TABLA II
RESUMEN DE LOS LABORATORIOS RESEÑADOS

País	Laboratorio	Sistemas de generación y almac.							Modo de operación	FPO	Líneas de investigación	Ref
		PV	W	B	D	CH	CC	FP				
Brasil	Juiz de Fora	X	X				X	X	Híbrido	2012	CO, RD, GD	[70]
Argentina	REILAC	X	X	X					Híbrido	2012	CO	[71]
Chile	Lab UChile	X	X	X				X	Híbrido	2015	CO, RD, GD	[72]
Perú	UTEC	X	X			X		X	Híbrido	2015	CO, GD	[73]
Ecuador	CCTI-B	X	X	X	X	X	X	X	Híbrido	2017	CO, RD, GD	[74]
Colombia	Nanogrid	X							Híbrido	2017	CO	[75]
Brasil	UFRN	X	X	X		X			Híbrido	2017	CO	[76]
Puerto Rico	UPRM							X	Híbrido	2018	CO, RD	[77]
México	FIE-UMSNH	X	X					X	Híbrido	2019	CO, GD	[78]
Brasil	UFPR	X		X	X				Híbrido	2019	CO	[79]
Colombia	LIE-UIS	X	X	X	X		X	X	Híbrido	2021	CO, GD	[80]

Siglas: Sistema fotovoltaico (PV), Generador eólico (W), Sistema de baterías (B), Generador Diesel (D), Central hidroeléctrica (CH), Celda de combustible (CC), Fuente programable (FP), Fecha de puesta en operación (FPO), Control y operación de microrredes (CO), Respuesta a la demanda (RD), Generación distribuida (GD).

Ingeniería Eléctrica y es utilizada para estudios avanzados de los sistemas de control.

También la UFPR cuenta con un centro de operación y monitoreo que se encarga de recibir, almacenar y poner a disposición los datos eléctricos para su visualización. Este recibe la señal de 89 medidores de potencia, 6 analizadores de calidad de la energía y 6 unidades de medición de micro fasores.

11) *LIE-UIS - Colombia*: El Laboratorio de Integración Energética (LIE) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) en Colombia viene desarrollando trabajos relacionados con estrategias de control para generadores distribuidos y filtros activos de potencia [80], control y operación de MRs, caracterización, modelado y monitorización de cargas eléctricas, y movilidad eléctrica. El laboratorio cuenta con un sistema fotovoltaico de $3kW$, una fuente programable AC de $12kVA$, una fuente programable DC bidireccional de $12kVA$ (con funcionalidades para emular generadores fotovoltaicos, celdas de combustible y baterías), 6 inversores trifásicos controlables para la emulación de generadores distribuidos, un generador a gasolina de $1,6kW$, un sistema motor-generador de $2HP$ para la emulación de un aerogenerador, tarjetas de control d-SPACE 1104 y TMS320F2837xD, cargas eléctricas, e infraestructura para la medición y monitorización de sistemas eléctricos. Así mismo, en la actualidad se está trabajando en la implementación de una MR en AC de $12kVA$ para la realización de pruebas experimentales en las diferentes capas de control jerárquico y evaluación de respuesta a la demanda, la cual entrará en operación a finales del 2021.

La Tabla II resume los aspectos claves de cada experiencia reseñada. Se observa que la totalidad de laboratorios mencionados permiten realizar experimentos en modo aislado y conectado a la red. Por su parte, las fuentes de generación más comunes son los sistemas fotovoltaicos, los generadores eólicos y la generación diésel. Además, la gran mayoría de los montajes cuentan con fuentes programables que permiten emular sistemas de generación distribuida garantizando un

mejor control y repetibilidad en los escenarios de implementados. Con respecto a las líneas de investigación, todos los laboratorios reseñados se enfocan principalmente en la investigación relacionada al control y operación de MRs y en menor medida, a otros tópicos como la respuesta a la demanda o la evaluación del desempeño energético.

VII. PROYECTOS PILOTOS

En esta sección se presenta un compendio de algunos de los proyectos pilotos de MRs más importantes de América Latina.

1) *Saqa'saqa - Bolivia*: A través del Programa Andino de Electrificación Rural (PAER) y en colaboración con las organizaciones Ingeniería Sin Fronteras (EWF, España), el Centro de información de energías renovables (CINER, Bolivia) y Mosoj Causay (MC, Bolivia), se logró ejecutar el diseño e implementación de una MR para garantizar el servicio de energía eléctrica a la comunidad quechua de Saqa'saqa, en la provincia de Potosí [82]. Este proyecto de electrificación, que se desarrolló en el año 2008, está diseñado para abastecer 8 familias (una población aproximada de 25 personas) y fue el primer proyecto de MRs fotovoltaicas aisladas de Bolivia. Cuenta con un sistema fotovoltaico de $0,72kW$ y un sistema de almacenamiento que le permite una autonomía de tres días. El diseño de las fuentes de generación y sistemas de almacenamiento se realizó considerando factores de sobre-dimensionamiento que permitieran cierta flexibilidad en el uso de la MR debido a la migración propia de la zona de implementación.

2) *Jacuque - Venezuela*: La MR Jacuque se ubica en la península Paraguaná, en el estado de Falcón en Venezuela. Este proyecto se desarrolló en 2009 a través del programa *Sembrando Luz* impulsado por la Fundación para el Desarrollo del Servicio Eléctrico (Fundelec). La MR Jacuque ha servido como modelo para el desarrollo de 13 proyectos adicionales en el occidente de Venezuela [83].

Debido a las distancias entre los distintos consumidores, el sistema se ha dividido en 4 MRs, identificadas con las

letras SH y la cantidad de usuarios conectados a cada una: SH-10, SH-20, SH-30, SH-40. Cada MR está conformado por generación solar, eólica, bancos de baterías y sistemas de respaldo diésel, y sus capacidades totales por MR van desde los $15kW$ hasta los $45,8kW$.

Desde el 2016 se ha trabajado en la evaluación de la sostenibilidad de algunas de las MRs instaladas en el marco de este programa, lo que ha derivado en la publicación de varios artículos [84]–[86]. En general, los indicadores de sostenibilidad realizados a través de encuestas, datos de las entidades nacionales y simulaciones, han arrojado un incremento en la escolaridad de las regiones, mayor adquisición de TICs y mejoras en los servicios de salud.

3) *El Regalado - Perú*: La MR ubicada en el Regalado, Perú, se desarrolló gracias a la organización *Practical Action* la cual apoya proyectos para mejorar la calidad de vida de poblaciones en condición de pobreza. Este proyecto benefició a más de 175 personas que habitan en esta zona [82]. Para el diseño de esta MR, se estimó una carga de $10,1kW$ de la demanda doméstica de 31 casas y 4 instituciones, junto con el alumbrado público y demandas industriales. Con el fin de cubrir esta carga, se utilizó un generador hidráulico de $12kW$ de capacidad.

4) *Alto Perú - Perú*: El grupo de MRs del Alto Perú es el proyecto más significativo del programa PAER debido a la combinación de tecnologías utilizadas [87]. Desarrollado entre 2009 y 2010, el proyecto es pionero en el enfoque ya que se buscó utilizar la tecnología más adecuada en cada zona, de acuerdo con la ubicación, la demanda de los puntos de consumo y la disponibilidad de recursos energéticos [82]. El sistema implementado incluye 5 tecnologías diferentes: un sistema hidroeléctrico de $2kW$, que benefició a 5 casas y una escuela; una MR alimentada por un aerogenerador de $1200W$ y dos paneles fotovoltaicos de $95W$, beneficiando a 7 casas y una iglesia; un aerogenerador de $1200W$ que alimenta a 6 casas; un sistema fotovoltaico conformado por ocho módulos de $95W$, que alimentan el centro de salud, dos restaurantes y dos casas; por último, se implementaron 39 sistemas individuales fotovoltaicos de $95W$.

En [88] se presentan algunos resultados de la evaluación en términos de bienestar del impacto que ha tenido la implementación del proyecto. Mediante talleres y encuestas a la comunidad ha sido posible identificar mejoras en la educación, la salud, relaciones interpersonales y mayor productividad en la población impactada.

5) *San José del Coca - Ecuador*: A través del programa PAER y con el apoyo de la *Fundación Ecuatoriana de Tecnología Aplicada* (FEDETA), GADMFO y EWB se logró en el 2010 desarrollar la MR de San José del Coca, ubicada en la Amazonia [82]. Este proyecto benefició a 54 familias Kichwa. Las tecnologías usadas permitieron mejorar las condiciones socio económicas de la población y desarrollar capacidades técnicas y de gestión en los usuarios finales. La MR cuenta con 6 paneles solares de $100W$ y una turbina hidrocíntrica de $900W$ cuya operación fue previamente verificada en la comunidad de El Paraíso en la Amazonia peruana [82].

6) *ESUSCON - Chile*: En el marco del proyecto Electricidad Sustentable Cónдор (ESUSCON) se implementó en 2010

por parte del Centro de Energía de la Universidad de Chile, una MR aislada ubicada en la localidad de Huatacondo, al norte de Chile [89]. La MR opera combinando energías renovables junto con generación diésel con el fin de abastecer a una comunidad, implementando un sistema de gestión de la energía que garantiza la operación óptima en términos técnicos y económicos considerando las restricciones operativas [14]. El sistema está compuesta por una planta PV de $23kW$ con 84 módulos y tres inversores con conexión de salida trifásica; un generador diésel de $135kVA$; un banco de baterías con 96 unidades de tipo plomo-ácido con un inversor tipo fuente de tensión de $30kVA$ trifásica; y una planta eólica de $3kW$.

En esta experiencia se resalta el empoderamiento de los habitantes de la comunidad en el mantenimiento y operación de la MR para alcanzar la sostenibilidad del proyecto. Se implementó un SOCIAL SCADA como herramienta de apoyo en el proceso de toma de decisiones de la comunidad. Además, se diseñó un sistema de gestión de demanda a través de un semáforo indicador que muestra con colores los horarios del día en donde se presenta mayor o menor recurso renovable para incentivar el uso racional de la energía [90], [91].

7) *Lençois - Brazil*: En la isla de Cururupu, en el estado de Maranhão al norte de Brasil, se implementó una MR conformada por un sistema de generación solar de $22,5kW$, un sistema de generación eólica de $21kW$ y generadores diésel de $53kW$, los cuales están conectados a un bus de DC y AC. La MR alimenta 90 viviendas que representan una demanda de más de $4,500kWh/mes$ [92].

8) *CERTI - Brazil*: Es una microrred desarrollada por CERTI (*The Foundation Centers of Reference in Innovative Technologies*) con una potencia de $25,5kW$ distribuida entre generación solar, eólica y diésel, además de un sistema de almacenamiento basado en baterías. La MR fue diseñada usando sistemas de control que le permiten operar en modo aislado o conectada a la red principal [93].

9) *El Espino - Bolivia*: En la localidad de El Espino, se implementó la primera MR híbrida aislada para electrificación rural en Bolivia. Esta red hace parte de un ambicioso plan nacional que busca alcanzar la electrificación universal rural para el año 2025 [94]. La MR está conformada por un sistema solar de $60kW$, un sistema de almacenamiento de $464kWh$ y un sistema diésel de $58kW$ y sus respectivos inversores y medidores bidireccionales.

En la V Cumbre Cooperativa de las Américas, realizada en el 2018, se presentó un reporte de los resultados del proyecto [95]. Se destaca la implementación de un proyecto piloto adicional consistente en la instalación de un sistema de facturación con medidores electrónicos pre-pago, que tiene como objetivo mejorar la independencia operativa del sistema considerando su ubicación remota de difícil acceso.

10) *Ilha Grande-Brazil*: La MR Ilha Grande está ubicada en la ciudad de Humberto de Campos, Brasil. Esta fue instalada en el 2012 por la empresa *Companhia Energética do Maranhão* (CEMAR) [96]. La MR fue repotenciada en 2014, luego de que el Instituto de Energía Eléctrica (IEE) de la Universidad Federal de Maranhão (UFMA) presentara una propuesta al CEMAR. Actualmente la MR está conformada por un conjunto fotovoltaico de $50kW$ con controladores

TABLA III
RESUMEN DE LOS PROYECTOS PILOTO RESEÑADOS

País	Proyecto	Sistemas de gen. y almac.					Modo de operación	FPO	Usuarios	Ref
		PV	W	B	D	CH				
Bolivia	Saqa'saqa	X		X			Aislado	2008	25 Personas	[82]
Venezuela	Jacucque	X	X	X	X		Aislado	2009	10 Familias	[83]
Perú	El Regalado			X		X	Aislado	2009	175 Personas	[82]
Perú	Alto Perú	X		X		X	Aislado	2009	65 Usuarios	[82], [87]
Ecuador	San José del Coca	X	X	X		X	Aislado	2010	54 Familias	[82]
Chile	ESUSCON	X	X	X	X		Aislado	2010	Comunidad	[89]
Brasil	Lencois	X	X	X	X		Aislado	2011	90 Viviendas	[92]
Brasil	CERTI	X	X	X	X		Híbrido	2014	Comunidad	[93]
Bolivia	El Espino	X	X	X	X	X	Híbrido	2015	124 Familias	[94]
Brasil	Ilha Grande	X		X	X		Aislado	2015	200 Habitantes	[96], [97]
Perú	Tambopata	X		X	X		Aislado	2016	2 Albergues	[98]
México	Puertecitos	X	X	X	X		Aislado	2016	20 Familias	[99]
Argentina	Armstrong	X				X	Conectado a red	2018	12.000 habitantes	[100]
Colombia	Guajira	X	X	X			Aislado	2019	Comunidad Wayuú	[101]

Siglas: Sistema fotovoltaico (PV), Generador eólico (W), Sistema de baterías (B), Generador Diesel (D), Central hidroeléctrica (CH), Fecha de puesta en operación (FPO).

MPPT, un grupo electrógeno diésel de $81kVA$ y un sistema de almacenamiento compuesto por dos arreglos de 60 baterías de $1250Ah$ [97].

11) *Tambopata - Perú*: La reserva natural de Tambopata se ubica en el departamento Madre de Dios, Perú. La localización privilegiada de esta reserva hace de esta uno de los principales destinos turísticos dentro del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SINANPE). Para la operación turística de los albergues, se implementó una MR que combina generación fotovoltaica y energías convencionales [98]. La MR cuenta con un arreglo fotovoltaico de $8,1kW$, inversores, un sistema de almacenamiento de $825Ah$ y un generador diésel de $10kVA$ utilizado como sistema de respaldo.

12) *Puertecitos - México*: La MR ubicada en Puertecitos, en Baja California, México, está diseñada para abastecer a una comunidad de 20 familias. Este proyecto fue desarrollado en colaboración con el Centro de Estudios de las Energías Renovables (CEENER) del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. La MR esta conformada por arreglos de paneles solares con una potencia instalada de $55,2kW$, turbinas eólicas de $5kW$, una planta diésel de respaldo de $75kVA$ y un sistema de almacenamiento de $522kWh$ [99].

En [102] se presentaron algunos resultados de la puesta en operación del proyecto. La MR ha significado un ahorro del 30% si se compara con la inversión requerida para extender la red eléctrica y del 45% en comparación con la instalación de una solución energética basada exclusivamente en generadores diésel. Además, la red ha sido usada como plataforma para realizar desarrollos de I+D+i que han dado lugar a la creación de redes de colaboración, transferencia tecnológica, así como múltiples publicaciones, patentes y productos tecnológicos.

13) *Armstrong - Argentina*: El proyecto Armstrong corresponde a uno de los primeros proyectos pilotos de redes inteligentes en Argentina. En el marco del proyecto se implementó una MR con una capacidad de $520kW$ a la red

eléctrica principal de la ciudad de Santa Fe que abastece una región de aproximadamente 12000 habitantes (más de 4486 clientes residenciales, 540 comerciales, 418 rurales y 217 industriales). La MR está conectada a la red principal mediante dos circuitos trifásicos de $33kV$, incluyendo una subestación con una capacidad de $14MW$ y está conformada por un sistema de generación fotovoltaico y una pequeña central hidroeléctrica instalada en el río Carcarañá [100].

La implementación del proyecto constó de cuatro ejes: la construcción del sistema de generación distribuida, los informes normativos y técnicos para la puesta en funcionamiento, el estudio de su posible réplica en cooperativas similares y el acompañamiento social relacionado al uso racional de la energía. Con el apoyo de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), el proyecto ha servido para estudiar los impactos técnicos, sociales, ambientales y económicos de las redes inteligentes. Por su parte, el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) participó certificando inversores y módulos fotovoltaicos según la norma IEC61215 y realizando estudios energéticos del sistema.

14) *Guajira - Colombia*: Esta experiencia tuvo como objetivo el diseño e implementación de una MR aislada en el norte de Colombia, para comunidades indígenas Wayúu que no cuentan con servicio de energía. El diseño partió de un análisis participativo de las comunidades, con el fin de identificar las necesidades locales [101]. La solución cuenta con un generador eólico de $1kW$ con un inversor de $2kVA$; un conjunto de paneles fotovoltaicos de $5,76kW$ (dos *strings* de 9 paneles en serie de $320W$ cada uno y un inversor de $5kVA$) y un banco de baterías de 20, $4kWh$. Desde el punto de vista de las cargas, se incluyeron elementos de iluminación, aires acondicionados, refrigeradores, congeladores, electrodomésticos, entre otros y la enramada, lugar de encuentro social de la comunidad, con una potencia total de $4,5kW$ y un consumo energético de $22,7kWh$.

La Tabla III resume los aspectos claves de cada experiencia

reseñada. Se observa que la mayoría de los proyectos piloto operan en modo aislado, buscando suplir las necesidades energéticas de comunidades rurales. Casi todos cuentan con sistemas fotovoltaicos y, debido al modo de operación, con respaldo de almacenamiento basado en baterías. Los generadores eólicos y diésel también son una alternativa interesante de implementación, dependiendo del potencial del recurso energético y la facilidad de abastecimiento de combustible.

VIII. OTROS DESARROLLOS

En esta sección se presentan algunos software y plataformas relacionados con el diseño, control y operación de MRs.

1) *Hymod - Colombia*: El software Hymod (Microgrid Optimal Design) es una herramienta de código abierto que permite el dimensionamiento de MRs aisladas [103]. La herramienta considera generación fotovoltaica, eólica, diésel, baterías y almacenamiento hidro-bombeado. A partir de información de entrada como los parámetros técnicos de operación de los equipos, datos meteorológicos, costo del combustible y parámetros financieros, Hymod está en capacidad de determinar de forma óptima el número de unidades de generación y almacenamiento requeridos para el adecuado funcionamiento del sistema diseñado. Una de las características más importante de este software es la integración de vehículos eléctricos durante la etapa de diseño considerando dos casos: los vehículos eléctricos como cargas diferibles adicionales y los vehículos eléctricos capaces de brindar servicios auxiliares a la MR. La herramienta también permite determinar el plan de administración de carga de vehículos eléctricos presentes en el sistema eléctrico bajo estudio. Hymod se puede descargar desde el repositorio Bitbucket [104]. Para el funcionamiento de la herramienta es necesario tener instalado Matlab®R2015b o versiones posteriores, CVX y Gurobi.

2) *UNIANDÉS - Colombia*: La Universidad de los Andes, en Colombia, desarrolló una plataforma interactiva para evaluar la Automatización de Distribución Avanzada (ADA) de la red. Esta permite estudiar aplicaciones enfocadas en soluciones de retransmisión en redes inteligentes [105]. La plataforma incorpora algoritmos de protecciones de sistemas de automatización en un entorno en tiempo real con técnicas de hardware-in-the-loop. ADA se ha utilizado a nivel académico para realizar simulaciones que permiten el análisis en tiempo real de corrientes de falla, lo que se ha usado para realizar prácticas de laboratorio para estudiantes sobre coordinación y selectividad de transformadores de corriente y ajustes de relés. A nivel industrial se han realizado proyectos para el análisis de la coordinación de protecciones para sistemas de distribución industriales basados en la norma IEEE 242-2001. La herramienta utiliza DSSim-PC [106], software basado en OpenDSS y desarrollado por la misma universidad, para formular el modelo eléctrico de los sistemas de distribución y diseñar una simulación de control de fallas. DSSim-PC puede interactuar con dispositivos electrónicos inteligentes (IED) y dispositivos de protecciones convencionales.

IX. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una revisión de algunas de las más importantes experiencias relacionadas a las MRs en

América Latina. Se describieron laboratorios en los cuales es posible realizar pruebas experimentales y de desarrollo tecnológico, proyectos pilotos enfocados principalmente en electrificación rural y algunos software y plataformas.

Por su ubicación geográfica, América Latina se caracteriza por su alto potencial energético. Se observa que los desarrollos relacionados a la generación distribuida y las MRs vienen dando pasos importantes en la región. El fortalecimiento de los marcos regulatorios en diversos países ha jugado un papel fundamental para el aumento de la penetración de la generación distribuida en las redes de distribución. Por otro lado, las MRs tienen un importante potencial de crecimiento como solución energética aislada en aplicaciones rurales.

Los autores esperan que este trabajo pueda contribuir como medio de visibilización de los proyectos reseñados, como motivación a divulgar en la literatura especializada las capacidades en infraestructura de investigación en MR con la que cuentan las universidades y laboratorios, y como documento de consulta que promueva la creación de lazos de cooperación entre las entidades interesadas en el desarrollo de la generación distribuida y las MRs en América Latina.

AGRADECIMIENTOS

This work was supported by Universidad Industrial de Santander and Minciencias, with project "Programa de Investigación en Tecnologías Emergentes para Microrredes Eléctricas Inteligentes con Alta Penetración de Energías Renovables", contract No. 80740-542-2020.

REFERENCES

- [1] N. Hatzigiorgiou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids," *IEEE Power and Energy Mag.*, vol. 5, no. 4, pp. 78–94, 2007.
- [2] M. Farrokhhabadi, C. A. Cañizares, J. W. Simpson-Porco, E. Nasr, L. Fan, P. A. Mendoza-Araya, R. Tonkoski, U. Tamrakar, N. Hatzigiorgiou, D. Lagos, R. W. Wies, M. Paolone, M. Liserre, L. Meegahapola, M. Kabalan, A. H. Hajimiragha, D. Peralta, M. A. Elizondo, K. P. Schneider, F. K. Tuffner, and J. Reilly, "Microgrid stability definitions, analysis, and examples," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, no. 1, pp. 13–29, 2020.
- [3] "IEEE standard for the specification of microgrid controllers," *IEEE Std 2030.7-2017*, pp. 1–43, 2018.
- [4] P. Asmus, "Why microgrids are moving into the mainstream: Improving the efficiency of the larger power grid," *IEEE Electr. Mag.*, vol. 2, no. 1, pp. 12–19, 2014.
- [5] K. Ubilla, G. A. Jiménez-Estévez, R. Hernández, L. Reyes-Chamorro, C. Hernández Irigoyen, B. Severino, and R. Palma-Behnke, "Smart microgrids as a solution for rural electrification: Ensuring long-term sustainability through cadastre and business models," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1310–1318, 2014.
- [6] A. Kumar, A. R. Singh, Y. Deng, X. He, P. Kumar, and R. C. Bansal, "A novel methodological framework for the design of sustainable rural microgrid for developing nations," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 24925–24951, 2018.
- [7] J. M. Rey, I. Jiménez-Vargas, P. P. Vergara, G. Osmá-Pinto, and J. Solano, "Sizing of an autonomous microgrid considering droop control," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 136, p. 107634, 2022.
- [8] M. Brenna, F. Foiadelli, and H. J. Kaleybar, "The evolution of railway power supply systems toward smart microgrids: The concept of the energy hub and integration of distributed energy resources," *IEEE Electr. Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 12–23, 2020.
- [9] Z. Jin, G. Sulligoi, R. Cuzner, L. Meng, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Next-generation shipboard DC power system: Introduction smart grid and DC microgrid technologies into maritime electrical networks," *IEEE Electr. Mag.*, vol. 4, no. 2, pp. 45–57, 2016.
- [10] S. Fang, Y. Wang, B. Gou, and Y. Xu, "Toward future green maritime transportation: An overview of seaport microgrids and all-electric ships," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 1, pp. 207–219, 2020.

- [11] J. S. Gómez, J. Rodríguez, C. García, L. Tarisciotti, F. Flores-Bahamonde, J. Pereda, F. Nuñez, A. Z. Cipriano, and J. C. Salas, "An overview of microgrids challenges in the mining industry," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 191 378–191 393, 2020.
- [12] A. Lashab, M. Yaqoob, Y. Terriche, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Space microgrids: New concepts on electric power systems for satellites," *IEEE Electr. Mag.*, vol. 8, no. 4, pp. 8–19, 2020.
- [13] D. E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A. H. Etemadi, C. A. Cañizares, R. Iravani, M. Kazerani, A. H. Hajimiragha, O. Gomis-Bellmunt, M. Saeedifard, R. Palma-Behnke, G. A. Jiménez-Estévez, and N. D. Hatziargyriou, "Trends in microgrid control," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, 2014.
- [14] R. Palma-Behnke, C. Benavides, F. Lanas, B. Severino, L. Reyes, J. Llanos, and D. Sáez, "A microgrid energy management system based on the rolling horizon strategy," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 996–1006, 2013.
- [15] S. Chandler, J. Gartner, and D. Jones, "Integrating electric vehicles with energy storage and grids: New technology and specific capabilities spur numerous applications," *IEEE Electr. Mag.*, vol. 6, no. 3, pp. 38–43, 2018.
- [16] M. M. Rana, W. Xiang, and E. Wang, "IoT-based state estimation for microgrids," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 5, no. 2, pp. 1345–1346, 2018.
- [17] Q. Duan, N. V. Quynh, H. M. Abdullah, A. Almalaq, T. Duc Do, S. M. Abdelkader, and M. A. Mohamed, "Optimal scheduling and management of a smart city within the safe framework," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 161 847–161 861, 2020.
- [18] A. Mohammed, S. S. Refaat, S. Bayhan, and H. Abu-Rub, "AC microgrid control and management strategies: Evaluation and review," *IEEE Power Electron. Mag.*, vol. 6, no. 2, pp. 18–31, 2019.
- [19] G. Strbac, N. Hatziargyriou, J. P. Lopes, C. Moreira, A. Dimeas, and D. Papadaskalopoulos, "Microgrids: Enhancing the resilience of the european megagrid," *IEEE Power and Energy Mag.*, vol. 13, no. 3, pp. 35–43, 2015.
- [20] H. Xie, S. Zheng, and M. Ni, "Microgrid development in China: A method for renewable energy and energy storage capacity configuration in a megawatt-level isolated microgrid," *IEEE Electr. Mag.*, vol. 5, no. 2, pp. 28–35, 2017.
- [21] 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.
- [22] J. M. Guerrero, M. Chandorkar, T. Lee, and P. C. Loh, "Advanced control architectures for intelligent microgrids—part I: Decentralized and hierarchical control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1254–1262, 2013.
- [23] J. M. Guerrero, P. C. Loh, T. Lee, and M. Chandorkar, "Advanced control architectures for intelligent microgrids—part II: Power quality, energy storage, and AC/DC microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1263–1270, 2013.
- [24] H. Han, X. Hou, J. Yang, J. Wu, M. Su, and J. M. Guerrero, "Review of power sharing control strategies for islanding operation of AC microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 200–215, 2016.
- [25] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho, and J. M. Guerrero, "Review of active and reactive power sharing strategies in hierarchical controlled microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 3, pp. 2427–2451, 2017.
- [26] S. K. Sahoo, A. K. Sinha, and N. K. Kishore, "Control techniques in AC, DC, and hybrid AC–DC microgrid: A review," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electron.*, vol. 6, no. 2, pp. 738–759, 2018.
- [27] S. Ansari, A. Chandel, and M. Tariq, "A comprehensive review on power converters control and control strategies of AC/DC microgrid," *IEEE Access*, pp. 1–1, 2020.
- [28] J. M. Raya-Armenta, N. Bazmohammadi, J. G. Avina-Cervantes, D. Saez, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Energy management system optimization in islanded microgrids: An overview and future trends," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 149, p. 111327, 2021.
- [29] D. Gutierrez-Rojas, P. H. J. Nardelli, G. Mendes, and P. Popovski, "Review of the state of the art on adaptive protection for microgrids based on communications," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 17, no. 3, pp. 1539–1552, 2021.
- [30] I. Serban, S. Céspedes, C. Marinescu, C. A. Azurdia-Meza, J. S. Gómez, and D. S. Hueichapan, "Communication requirements in microgrids: A practical survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 47 694–47 712, 2020.
- [31] Y. Han, K. Zhang, H. Li, E. A. A. Coelho, and J. M. Guerrero, "Mas-based distributed coordinated control and optimization in microgrid and microgrid clusters: A comprehensive overview," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 8, pp. 6488–6508, 2018.
- [32] E. Espina, J. Llanos, C. Burgos-Mellado, R. Cárdenas-Dobson, M. Martínez-Gómez, and D. Sáez, "Distributed control strategies for microgrids: An overview," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 193 412–193 448, 2020.
- [33] A. Hooshyar and R. Iravani, "Microgrid protection," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1332–1353, 2017.
- [34] S. D. Saldarriaga-Zuluaga, J. M. Lopez-Lezama, and N. Muñoz-Galeano, "Protection coordination in microgrids: Current weaknesses, available solutions and future challenges," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 18, no. 10, pp. 1715–1723, 2020.
- [35] M. Ahmed, L. Meegahapola, A. Vahidnia, and M. Datta, "Stability and control aspects of microgrid architectures—a comprehensive review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 144 730–144 766, 2020.
- [36] M. Kabalan, P. Singh, and D. Niebur, "Large signal Lyapunov-based stability studies in microgrids: A review," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 5, pp. 2287–2295, 2017.
- [37] M. Faisal, M. A. Hannan, P. J. Ker, A. Hussain, M. B. Mansor, and F. Blaabjerg, "Review of energy storage system technologies in microgrid applications: Issues and challenges," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 35 143–35 164, 2018.
- [38] M. N. Alam, S. Chakrabarti, and A. Ghosh, "Networked microgrids: State-of-the-art and future perspectives," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 15, no. 3, pp. 1238–1250, 2019.
- [39] N. Lidula and A. Rajapakse, "Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 186 – 202, 2011.
- [40] T. S. Ustun, C. Ozansoy, and A. Zayegh, "Recent developments in microgrids and example cases around the world—a review," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 15, no. 8, pp. 4030–4041, 2011.
- [41] M. Soshinskaya, W. H. Crijns-Graus, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Microgrids: Experiences, barriers and success factors," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 40, pp. 659–672, 2014.
- [42] E. Hossain, E. Kabalci, R. Bayindir, and R. Perez, "Microgrid testbeds around the world: State of art," *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 132–153, 2014.
- [43] F. Martín-Martínez, A. Sánchez-Miralles, and M. Rivier, "A literature review of microgrids: A functional layer based classification," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 62, pp. 1133–1153, 2016.
- [44] B. Zhao, J. Chen, L. Zhang, X. Zhang, R. Qin, and X. Lin, "Three representative island microgrids in the east China sea: Key technologies and experiences," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 96, pp. 262–274, 2018.
- [45] T. O. Ajewole, O. E. Olabode, O. S. Babalola, and M. O. Omoigui, "Use of experimental test systems in the application of electric microgrid technology across the sub-Saharan Africa: A review," *Sci. Afr.*, 2020.
- [46] V. A. Suryad, S. Doolla, and M. Chandorkar, "Microgrids in India: possibilities and challenges," *IEEE Electr. Mag.*, vol. 5, no. 2, pp. 47–55, 2017.
- [47] L. Behrendt, "Taxes and incentives for renewable energy. kpmg," 2015.
- [48] F. Santamaria, C. L. Trujillo, and J. A. Hernandez, "A proposed index to evaluate the state of legislation fostering distributed generation in Latin America and the caribbean," *The Electricity Journal*, vol. 29, no. 2, pp. 66–74, 2016.
- [49] A. D. IRENA, "Renewable energy market analysis: Latin America," 2016.
- [50] L. N. Guimarães, *The regulation and policy of Latin American energy transitions*. Elsevier, 2020.
- [51] A. Castellanos, J. Hernández, and C. A. Arredondo-O, "Impact of electricity regulation on distributed generation in Latin American and caribbean countries," in *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2020, pp. 0348–0351.
- [52] M. Rodríguez, A. Salazar, D. Arcos-Aviles, J. Llanos, W. Martínez, and E. Motoasca, "A brief approach of microgrids implementation in Ecuador: A review," *Recent Advances in Electrical Eng., Electron. and Energy: Proceedings of the CIT 2020 Volume 1*, vol. 1, p. 149, 2021.
- [53] UPME, "Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica PIEC 2019-2023," *UPME, Colombia*, no. 69, p. 141.
- [54] M. V. Vives, H. R. Chamorro Vera, D. Ortiz-Villalba, F. Jimenez, F. M. Gonzalez-Longatt, G. Jimenez-Estevéz, J. Guerrero, A. Cadena, and V. K. Sood, "Nanogrids: Good practices and challenges in the projects in colombia," in *Microgrids for Rural Areas: Research and case studies*. Institution of Engineering and Technology, 2020, pp. 421–446.
- [55] E. O'Neill-Carrillo, E. Mercado, O. Luhring, I. Jordan, and A. Irizarry-Rivera, "Community energy projects in the caribbean: Advancing

- socio-economic development and energy transitions,” *IEEE Technol. Soc. Mag.*, vol. 38, no. 3, pp. 44–55, 2019.
- [56] L. F. Moreno Castillo, “Renewable energy and energy efficiency in Latin America: a regulatory vision,” *Journal of Energy & Natural Resources Law*, vol. 35, no. 4, pp. 405–416, 2017.
- [57] D. D. L. Soto, A. N. Mejdalani, A. Nogales, M. Tolmasquim, and M. C. M. Hallack, *Advancing the Policy Design and Regulatory Framework for Renewable Energies in Latin America and the Caribbean for Grid-Scale and Distributed Generation*. Inter-American Development Bank, 2019, vol. 785.
- [58] M. Castilla, P. Mercado, J. Negroni, M. Gomes, C. Moreira, J. Sosa, and A. C. Z. de Souza, “The growing state of distributed generation and microgrids in the Ibero-American region: A view from the RIGMEI network,” in *2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA)*. IEEE, 2014, pp. 1–6.
- [59] R. Palma-Behnke, G. A. Jiménez-Estévez, D. Sáez, M. Montedónico, P. Mendoza-Araya, R. Hernández, and C. Muñoz Poblete, “Lowering electricity access barriers by means of participative processes applied to microgrid solutions: The Chilean case,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 9, pp. 1857–1871, 2019.
- [60] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodríguez, “Control of power converters in ac microgrids,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, 2012.
- [61] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho, and J. M. Guerrero, “Review of active and reactive power sharing strategies in hierarchical controlled microgrids,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 3, pp. 2427–2451, 2016.
- [62] J. M. Guerrero, L. G. de Vicuña, J. Matas, M. Castilla, and J. Miret, “A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1205–1213, 2004.
- [63] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuña, and M. Castilla, “Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—a general approach toward standardization,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, 2011.
- [64] J. M. Rey, J. Torres-Martínez, and M. Castilla, “Secondary control for islanded microgrids,” in *Microgrids Design and Implementation*. Springer, 2019, pp. 171–193.
- [65] Y. Khayat, Q. Shafiee, R. Heydari, M. Naderi, T. Dragičević, J. W. Simpson-Porco, F. Dörfler, M. Fathi, F. Blaabjerg, J. M. Guerrero *et al.*, “On the secondary control architectures of AC microgrids: An overview,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 6, pp. 6482–6500, 2019.
- [66] S. Monesha, S. G. Kumar, and M. Rivera, “Methodologies of energy management and control in microgrid,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 9, pp. 2345–2353, 2018.
- [67] P. P. Vergara, J. C. López, J. M. Rey, L. C. da Silva, and M. J. Rider, “Energy management in microgrids,” in *Microgrids Design and Implementation*. Springer, 2019, pp. 195–216.
- [68] Y. Wu, Y. Wu, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, and J. Li, “AC microgrid small-signal modeling: Hierarchical control structure challenges and solutions,” *IEEE Electr. Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 81–88, 2019.
- [69] Z. Cheng, J. Duan, and M.-Y. Chow, “To centralize or to distribute: That is the question: A comparison of advanced microgrid management systems,” *IEEE Power Electron. Mag.*, vol. 12, no. 1, pp. 6–24, 2018.
- [70] M. Rodrigues, A. Moura, L. Borges, P. M. Almeida, P. S. Almeida, R. L. Valle, R. Ferreira, A. Ferreira, P. Barbosa, and H. Braga, “Microrrede híbrida CC/CA baseada em fontes de energia renovável aplicada a um edifício sustentável,” in *XIX Congresso Brasileiro de Automática, CBA*, 2012.
- [71] S. Junco, D. Alba, J. Ezpeleta, and J. Cabello, “Development of an experimental micro smart grid with renewable sources and energy storage through final electronics engineering projects,” in *2020 XIV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference (TAE)*, 2020, pp. 1–10.
- [72] E. Espina, C. Burgos-Mellado, J. S. Gomez, J. Llanos, E. Rute, A. Navas F., M. Martínez-Gómez, R. Cárdenas, and D. Sáez, “Experimental hybrid AC/DC-microgrid prototype for laboratory research,” in *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)*, 2020, pp. 1–9.
- [73] F. Espinoza, M. Mar, E. Ramirez, and J. Noel, “Control of real power in a synchronous machine using a scada system in a smart grid,” in *2016 IEEE ANDESCON*, 2016, pp. 1–4.
- [74] J. L. Espinoza, L. G. González, and R. Sempértégui, “Micro grid laboratory as a tool for research on non-conventional energy sources in Ecuador,” in *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 2017, pp. 1–7.
- [75] E. Franco-Mejia, R. A. Plazas-Rosas, A. Gil-Cacedo, R. Franco-Manrique, and E. Gomez-Luna, “Pilot nanogrid at Universidad del Valle, for research and training in control and management of electrical networks in non-interconnected areas,” in *2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, 2017, pp. 1–6.
- [76] E. A. F. Nunes, D. K. Alves, E. S. Dantas, T. O. A. Rocha, R. L. A. Ribeiro, and F. B. Costa, “Impact of PV systems on microgrids under different levels of penetration and operational scenarios,” in *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, 2017, pp. 1–6.
- [77] J. F. Patarroyo-Montenegro, J. E. Salazar-Duque, S. I. Alzate-Drada, J. D. Vasquez-Plaza, and F. Andrade, “An AC microgrid testbed for power electronics courses in the University of Puerto Rico at Mayagüez,” in *2018 IEEE ANDESCON*, 2018, pp. 1–6.
- [78] J. E. M. Carreño, J. A. Marín, and G. C. T. Santillán, “Research facilities for renewable energy management considering distributed generation based on microgrids,” in *2019 IEEE Int. Autumn Meeting on Power, Electron. and Computing (ROPEC)*, 2019, pp. 1–6.
- [79] G. H. C. Oliveira, R. Kuiava, G. V. Leandro, J. A. Vilela, R. Demonti, E. P. Ribeiro, J. S. Dias, E. M. S. Castro, and A. Pedretti, “UFPR microgrid: A benchmark for distributed generation and energy efficiency research,” in *2020 IEEE Power Energy Society Inn. Smart Grid Tech. Conf. (ISGT)*, 2020, pp. 1–5.
- [80] M. A. Mantilla, J. F. Petit, and G. Ordóñez, “Control of multi-functional grid-connected PV systems with load compensation under distorted and unbalanced grid voltages,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 192, p. 106918, 2021.
- [81] S. C. Paiva, R. L. de Araujo Ribeiro, D. K. Alves, F. B. Costa, and T. de Oliveira Alves Rocha, “A wavelet-based hybrid islanding detection system applied for distributed generators interconnected to AC microgrids,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 121, p. 106032, 2020.
- [82] A. López-González, B. Domenech, D. Gómez-Hernández, and L. Ferrer-Martí, “Renewable microgrid projects for autonomous small-scale electrification in Andean countries,” *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 79, pp. 1255–1265, 2017.
- [83] A. López-González, B. Domenech, and L. Ferrer-Martí, “Sustainability and design assessment of rural hybrid microgrids in Venezuela,” *Energy*, vol. 159, pp. 229–242, 2018.
- [84] A. López-González, B. Domenech, and L. Ferrer-Martí, “Formative evaluation of sustainability in rural electrification programs from a management perspective: A case study from Venezuela,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 95, pp. 95–109, 2018.
- [85] —, “Lifetime, cost and fuel efficiency in diesel projects for rural electrification in Venezuela,” *Energy Policy*, vol. 121, pp. 152–161, 2018.
- [86] A. López-González, L. Ferrer-Martí, and B. Domenech, “Sustainable rural electrification planning in developing countries: A proposal for electrification of isolated communities of Venezuela,” *Energy policy*, vol. 129, pp. 327–338, 2019.
- [87] B. Domenech, L. Ferrer-Martí, P. Lillo, R. Pastor, and J. Chiroque, “A community electrification project: Combination of microgrids and household systems fed by wind, PV or micro-hydro energies according to micro-scale resource evaluation and social constraints,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 23, pp. 275–285, 2014.
- [88] P. Lillo, “Acceso a la energía para el desarrollo humano sostenible. análisis de proyectos con energías renovables y modelos de gestión comunitarios en zonas rurales,” 2016.
- [89] O. Núñez, F. Valencia, P. Mendoza-Araya, R. Palma-Behnke, G. Jiménez, and J. Cotos, “Microgrids protection schemes,” in *2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Eng., Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 2015, pp. 597–602.
- [90] R. Palma-Behnke, D. Ortiz, L. Reyes, G. Jiménez-Estévez, and N. Garrido, “A social scada approach for a renewable based microgrid — the huatacondo project,” in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011, pp. 1–7.
- [91] G. A. Jiménez-Estévez, R. Palma-Behnke, D. Ortiz-Villalba, O. Nuñez Mata, and C. Silva Montes, “It takes a village: Social scada and approaches to community engagement in isolated microgrids,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 12, no. 4, pp. 60–69, 2014.
- [92] L. A. de Souza Ribeiro, O. R. Saavedra, S. L. de Lima, and J. de Matos, “Isolated micro-grids with renewable hybrid generation: The case of Lençóis island,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 1–11, 2011.
- [93] M. Martins, “Design and implementation of a feasible microgrid model in Brazil,” *PCIM South America 2014*, 10 2014.
- [94] S. Balderrama, F. Lombardi, F. Riva, W. Canedo, E. Colombo, and S. Quoilin, “A two-stage linear programming optimization framework

for isolated hybrid microgrids in a rural context: The case study of the “El Espino” community,” *Energy*, vol. 188, p. 116073, 2019.

- [95] Cooperativa Rural de Electrificación RL (CRE), “Planta híbrida El Espino, un proyecto piloto para soluciones sostenibles en áreas remotas,” in *V Cumbre Cooperativa de Las Américas*, 2018.
- [96] P. B. L. Neto, O. R. Saavedra, and L. A. de Souza Ribeiro, “A dual-battery storage bank configuration for isolated microgrids based on renewable sources,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 1618–1626, 2018.
- [97] L. D. Santos Veras, H. A. Oliveira, J. G. de Matos, O. R. Saavedra, L. A. de Sousa Ribeiro, and L. de Paula Assunção Pinheiro, “Análisis de desempeño y oportunidad de mejoras en la microrred de Ilha Grande,” in *15a Conferencia Brasileña de Electrónica de Potencia IEEE 2019 y 5a Conferencia Sur de Electrónica de Potencia IEEE (COBEP / SPEC)*, 2019, pp. 1–6.
- [98] F. Canziani and Ó. Melgarejo, “Design and implementation of rural microgrids,” in *Microgrids Design and Implementation*. Springer, 2019, pp. 477–504.
- [99] J. A. Aguilar-Jiménez, N. Velázquez, A. Acuña, R. Cota, E. Gonzalez San Pedro, L. González Uribe, R. López, and S. Islas, “Techno-economic analysis of a hybrid PV-CSP system with thermal energy storage applied to isolated microgrids,” *Solar Energy*, vol. 174, pp. 55–65, 11 2018.
- [100] P. G. Donato, I. Carugati, J. Strack, S. Maestri, C. Orallo, M. Hadad, and M. Funes, “Overview of the status of smart metering systems in Argentina and future perspectives,” in *2018 IEEE Biennial Congress of Arg. (ARGENCON)*, 2018, pp. 1–7.
- [101] N. Quijano, A. Pedraza, M. Velásquez, G. Jiménez Estévez, Cadena Monroy, and J. B. y Á. Ramírez, “Microrredes aisladas en La Guajira: diseño e implementación,” *Revista de Ingeniería*, no. 48, 2019.
- [102] N. Velázquez Limón and R. Cota Soto, “Las micro redes eléctricas con energías renovables como una forma de combatir la marginación de las comunidades aisladas (caso puertecitos),” in *Tercer encuentro y Primer congreso internacional de la Red SUMAS*, 2017.
- [103] S. R. Alvarez, J. Espinosa Oviedo, and A. A. Gil, “H ymod: A software for hybrid microgrid optimal design,” in *2018 15th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, 2018, pp. 1–6.
- [104] S. Ruiz-Alvarez, “hymod — Bitbucket.” [Online]. Available: <https://bitbucket.org/seruizal/hymod/src/master/>
- [105] D. Celeita, M. Hernandez, G. Ramos, N. Penafiel, M. Rangel, and J. D. Bernal, “Implementation of an educational real-time platform for relaying automation on smart grids,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 130, pp. 156–166, 2016.
- [106] D. Montenegro, “DSSim-PC, electrical distribution system simulator for PC.” [Online]. Available: <https://sourceforge.net/projects/dssimpc/?source=navbar>



Juan M. Rey (Member, IEEE) was born in Bucaramanga, Colombia in 1989. He received the B.Sc. degree in electrical engineering from Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, in 2012, and the Ph.D. degree in electronic engineering from the Technical University of Catalonia, Spain, in 2019. Since 2013, he has been with the Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering School (E3T), Universidad Industrial de Santander, Colombia, where he is currently an Assistant Professor. His research interest include power electronics

and control for distributed generation and microgrids.



Geovanni A. Vera has a degree in energy engineering from Universidad Autónoma de Bucaramanga, Colombia. He is currently working toward the M.Sc. degree in electrical engineering at the Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. His research work are focused in reinforcement learning, microgrids and renewable energies.



Pedro Acevedo-Rueda was born in Zapatocha, Colombia in 1995. He received the electrical engineering degree from Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, in 2019. He is currently pursuing his M.Sc. degree in Electrical Engineering at the same university. His research interests are renewable energies, microgrids, electric vehicles and energy policies.



Javier Solano received his M.Sc. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the University of Franche-Comté, Belfort, France, in 2008 and 2012, respectively. Since 2014, he has been an associated professor at Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. He has been an invited researcher at De Montfort University, United Kingdom; Technical University Berlin, Germany; and the University of Caen, France. His current research focuses on electric hybrid sources, rural electrification, energy management, optimal control,

and computational intelligence.



María Alejandra Mantilla Villalobos is an Electronics Engineer and a Magister in Electronics Engineering. She received the PhD degree in Engineering from the Universidad Industrial de Santander (UIS) in Colombia. Currently, she is a professor at the School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering at UIS, and a researcher at the Electric Power Systems Research Group - GISEL. She also serves as an associate editor for IET power Electronics. Her research areas are: power electronics, photovoltaic systems, control systems, power quality, active power filtering, electronics prototypes, electrical microgrids, and solid state transformers.

and solid state transformers.



Jacqueline Llanos (Member, IEEE) was born in Latacunga, Ecuador. She received the B.Sc. and Engineering degrees in electronic engineering from the Army Polytechnic School, Ecuador, and the M.Sc. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the University of Chile, Santiago. She is currently an Assistant Professor with the Department of Electrical and Electronic, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador. Her current research interests include control and management of microgrids, control of power generation plants, distributed control, and

predictive control.



Doris Sáez (S'93-M'96-SM'05) was born in Panguipulli, Chile. She received the M.Sc. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, in 1995 and 2000, respectively. She is currently a Full Professor with the Department of Electrical Engineering and the Head of the Indigenous People Program, Faculty of Mathematical and Physical Sciences, University of Chile, Santiago. She has coauthored the books *Hybrid Predictive Control for Dynamic Transport Problems* (Springer Verlag, 2013)

and *Optimization of Industrial Processes at Supervisory Level: Application to Control of Thermal Power Plants* (Springer-Verlag, 2002). Her research interests include predictive control, fuzzy control design, fuzzy identification, and control of microgrids. She also serves as an Associate Editor for the *IEEE Transactions on Smart Grid*.