

Revisión de contenido teórico sobre microrredes y estudios previos acerca de su implementación como suministro de energía en Colombia (octubre de 2022)

Fabian José Ojeda Peña, Facultad de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia, Fabian.ojeda@ustabuca.edu.co.

Resumen - En la presente monografía se presenta un estudio de contenido teórico sobre microrredes y una revisión de trabajos previos acerca de su implementación como suministro de energía en Colombia, para mostrar su funcionalidad. La revisión tiene en cuenta inicialmente un abordaje de las microrredes desde un punto teórico con su definición y principales características, para seguidamente exponer casos prácticos en el país. Uno de los casos de estudio indagados se ubica en el departamento de la Guajira, siendo una región definida como zona no interconectada en el país.

Adicionalmente se recurre a una búsqueda de información relacionada con la gestión de las microrredes por medio de IoT, como elemento clave para el mejoramiento del servicio de energía. Finalmente se desarrolla una matriz comparativa de los casos de implementación estudiados y se extraen conclusiones.

Palabras clave: Microrredes, Casos prácticos de microrredes, Suministro de energía, Arquitecturas de control, IOT.

Review of theoretical contents on microgrids and previous studies on its implementation as an energy supply in Colombia

Abstract - This monograph presents a study of theoretical content on microgrids and a review of previous works on its implementation as an energy supply in Colombia, to show its functionality. The review initially considers an approach to microgrids from a theoretical point of view with its definition and main characteristics, to later present practical cases in the country. One of the case studies investigated is in the department of La Guajira, being a region defined as a non-interconnected area of the country. Additionally, a search for information related to the management of microgrids through IoT is used, as a key element for the improvement of the energy service. Finally, a comparative matrix of the implementation cases studied is developed and conclusions are drawn.

Keywords: microgrids, microgrid case studies, power supply, control architectures, IOT.

I. INTRODUCCIÓN

Desde un enfoque histórico, la sociedad se ha visto involucrada con el uso de las diferentes formas de energía renovables como no renovables, entre las que destacan: petróleo y carbón, energía eólica, energía solar, energía hidráulica, entre otras. En Colombia, la principal producción de energía proviene de las fuentes hidroeléctricas con un 69,0% aproximadamente debido a la abundancia de agua en la mayoría de las zonas del país, seguido de las fuentes de energía fósiles con un 29,0% [1].

Sin embargo, el Gobierno Nacional y la Unidad de Planeación Minero-Energética estiman que son más de 460.000 hogares los que carecen de electricidad en Colombia [2], estando estas zonas no interconectadas compuestas por generación diésel en un 92%, y un 8% de fuentes no convencionales de energía [3], provocando emisiones superiores a las generadas por el sistema interconectado nacional.

Como alternativa de fuente de energía con menor impacto ambiental, surge la oportunidad de implementar microrredes eléctricas para la entrega del servicio en las zonas no interconectadas, logrando una reducción de las emisiones de dióxido de carbono [4]. El estudio de esta fuente de energía es relevante para el desarrollo de investigaciones en torno a sistemas energéticos, su funcionalidad, viabilidad y aplicabilidad en el país.

Para la supervisión de las microrredes en la actualidad, los modelos de gestión basados en la red tales como IoT, juegan un papel fundamental a la hora de facilitar la adquisición de datos y el control de las diversas variables en este tipo de sistemas [5].

Por ende, en el presente documento, se realizará un estado del arte centrado en las microrredes en Colombia, partiendo de la definición en forma general, sus elementos, tipologías, arquitecturas de control, implementación, su gestión por medio de sistemas basados en IoT; para finalmente concluir con

Artículo científico presentado como opción de grado para optar por el título de Ingeniero Mecatrónico.

Autor: Fabian José Ojeda Peña, Estudiante de ingeniería Mecatrónica, fabian.ojeda@ustabuca.edu.co.

Director: Jose Jorge Carreño Zagarra, Ingeniero Electrónico, Universidad Industrial de Santander, jose.carreno01@ustabuca.edu.co

diferentes casos de implementación a lo largo del territorio nacional.

II. DEFINICIÓN

En esencia, una microrred se puede definir como un sistema eléctrico constituido por generadores distribuidos (GD) que trabajan en conjunto con respaldos de almacenamiento para suplir la demanda de cierta cantidad de carga energética. Este tipo de sistemas pueden determinarse desde su nivel de potencia de suministro, el cual va desde los 10kW y no supera los 100kW [6].

En [7] se sintetizan diferentes tipos de red y sus características según su rango de potencia (Ver Tabla I). Las microrredes convencionales se encuentran entre los sistemas con un rango de potencia medio y son compuestas por diferentes tipos de sistemas de generación. De forma similar, existen sistemas capaces de suministrar una potencia superior a 100KW compuestos por diversos sistemas de generación, los cuales son denominados “Minirredes”.

Tabla 1. Tipo de red según su rango de potencia

Potencia del Sistema	Denominación	Generación	Características
Hasta 0,5 Kw	Sistemas autónomos individuales	Fotovoltaica	Distribución en CC o CC+CA en vivienda
0,5 hasta 10 Kw	Sistemas autónomos individuales	Fotovoltaica	Normalmente distribución en CA en vivienda
10 hasta 100 Kw	Sistemas centralizados-MICRORREDES	Fotovoltaica - Grupo Aerogenerador	Distribución en CA a grupo de consumidores. Generación centralizada
100kW en adelante	MINIRREDES	Las anteriores más otras fuentes energéticas	Distribución en CA a grupo de consumidores. Generación descentralizada

Nota. Se presenta un análisis de potencias que describe el tipo de sistema junto con sus características y posibles elementos de generación. Adaptado de [7].

De forma complementaria, una microrred puede ser bidireccional y permitir la distribución del suministro de energía a las cargas utilizando tecnología digital e implementando fuentes de generación de origen tanto renovable como no renovable (eólica, fotovoltaica, diésel y convertidores de energía de las olas (WEC)). Además, cuentan con sistemas de control, gestión y monitorización tanto de cargas como también de flujo de potencia [8].

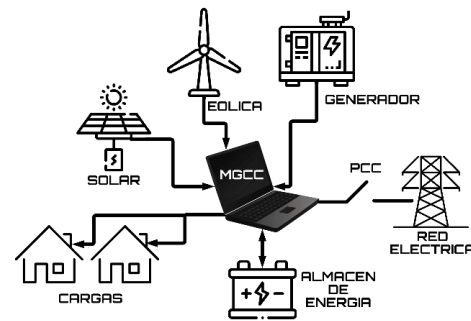
III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Como se ha mencionado antes, las microrredes están constituidas por ciertos subsistemas, los cuales se pueden dividir en 4 grupos principales [9]:

- Sistema de suministro energético para las cargas.
- Sistema de generación.
- Sistema de almacenamiento.
- Sistema de supervisión, control y adquisición de datos.

Es importante resaltar que estos subsistemas están en constante comunicación con el sistema principal de control (ver Fig. 1.).

Figura 1. Esquema general de una microrred



Nota. La posibilidad de convertirse en una microrred aislada se representa en el PCC (Punto de acoplamiento común) y el MGCC (controlador central de la microrred) gestiona el cambio.

En las microrredes existen dos modos de funcionamiento principales dado que en muchas ocasiones este tipo de sistemas trabaja en conjunto con la red eléctrica principal; el primer modo es conocido como “no autónomo” ya que aquí el suministro de energía es entregado directamente por la red principal a través del denominado PCC. Por otro lado, existe la posibilidad de que haya un corte en la tensión de suministro, donde la microrred juega un papel importante debido a que puede trabajar en modo “autónomo” o también conocido como modo “isla”, suministrando la energía que requieren las cargas sin depender de un sistema de alimentación externo. La representación de cada modo se puede determinar como un switch que permite o no la conexión entre la red eléctrica principal y la microrred (ver Fig. 1.) [9], [10].

Además de las microrredes mencionadas anteriormente, existen otros tipos de microrredes destinadas para servicios públicos o comunitarios, comerciales o industriales, ligadas a bases militares u hospitales y las denominadas nano redes, las cuales sirven para puntos de consumo definidos y no para conglomerados; este tipo de aplicaciones se relacionan con a fines de uso específicos, en los cuales el objetivo puede ser mejorar el suministro energético o mantener la disponibilidad del servicio, entre otros. [11]

IV. TIPOLOGÍAS DE RED

En la implementación de una microrred, se pueden aplicar tres tipos de tipologías de red de potencia dependiendo del requerimiento; en algunas ocasiones puede ser más rentable utilizar una u otra tipología debido a las características de las cargas como también de los generadores.

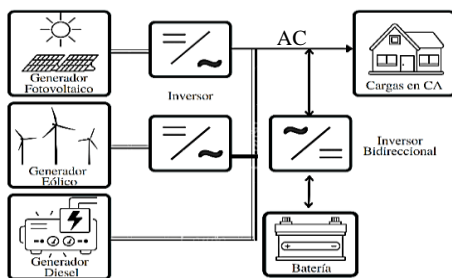
En general, se pueden encontrar tipologías de corriente continua, alterna y en ciertas ocasiones tipologías híbridas que implementan ambos tipos de corriente en sus buses, esto de

manera monofásica o trifásica. En la práctica, es necesario tener en cuenta que algunos elementos de generación como la fotovoltaica funciona con corriente continua y que por otro lado existen generadores que producen corriente alterna, como los eólicos, es por lo anterior que se hace necesaria la implementación de inversores de tensión [6], [12].

A. Topología de bus AC

Arquitectura en la cual los elementos de la microrred se conectan a un bus AC común y las cargas que requieran de corriente DC deben utilizar un convertidor AC/DC. Los generadores y sistemas de almacenamiento deben estar adaptados al bus mediante convertidores; Lo anterior se puede evidenciar en la Fig. 2.

Figura 2. Topología de bus en AC con cargas en AC



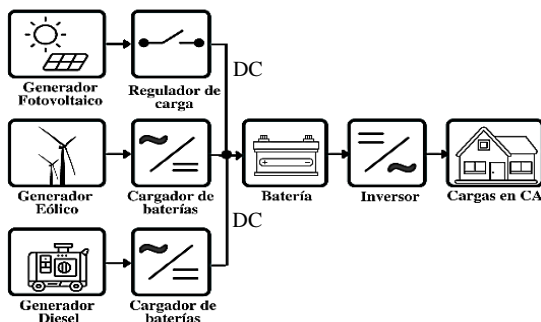
Nota. El inversor bidireccional permite el flujo en ambas direcciones y posibilita a la batería suministrar y almacenar la tensión. Adaptado de [7].

Es importante mencionar que al implementar esta topología es necesario contar con un conversor bidireccional para permitir el funcionamiento de la microrred de forma autónoma, es decir, cuando los generadores distribuidos no pueden alimentar a la red [7].

B. Topología de bus DC

Arquitectura en la cual los elementos de la microrred se conectan a un bus DC común y las cargas que requieran de corriente AC deben utilizar un convertidor DC/AC. Los generadores y sistemas de almacenamiento deben estar adaptados al bus mediante convertidores, como se puede observar en Fig. 3.

Figura 3. Topología de bus en DC con cargas en AC

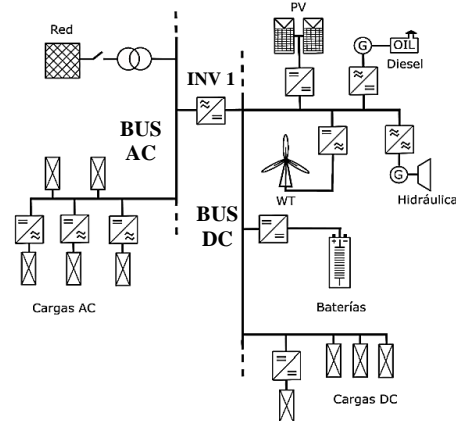


Nota. Al ser un bus DC la batería no requiere un inversor bidireccional, sin embargo, las cargas en AC necesitan un inversor DC/AC unidireccional. Adaptado de [7].

C. Topología de bus Mixto

En esta arquitectura de red se presentan dos buses (tanto AC como DC) los cuales se interconectan a través de un convertidor AC/DC; aquí los elementos como generadores, sistemas de almacenamiento y cargas se adaptan a la red a partir de su requerimiento (Fig. 4).

Figura 4. Posible tipología de microrred mixta



Nota. Los elementos como almacenadores, cargas y sistemas generación se interconectan a la microrred por medio de convertidores de tensión independientes para que en el bus existan los mismos niveles de voltaje, corriente y frecuencia. La relación entre el bus AC y DC es posible por medio del inversor AC/DC bidireccional (INV 1). Adaptado de [12].

Debido a que en este tipo de topología se implementan dos buses que manejan una corriente diferente, resulta relevante tener en cuenta la disposición con la que los elementos dentro de la microrred se interconectarán, ya que se pueden tener repercusiones a nivel económico a partir de la utilización de una mayor cantidad de componentes.

V. ELEMENTOS DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO

En la topología de una microrred es común encontrarse con sistemas de generación distribuida (GD) los cuales pueden ser de tipo renovables o no renovables. Por consiguiente, no siempre las microrredes son sistemas 100% amigables con el medio ambiente; no obstante, se puede reducir y controlar la emisión de gases procedentes de la combustión debido a una mayor supervisión de todo el sistema [11], [13], [14].

1. Generadores renovables

- Generación solar fotovoltaica.
- Generación eólica.
- Hidroeléctrica a pequeña escala.
- Biomasa.

2. Generadores no renovables

- Motor de combustión interna.
- Motor Stirling.
- Microturbinas.
- Baterías de combustible.

El uso de sistemas de almacenamiento es crucial a la hora de sustentar el consumo energético que demanden las cargas para así conservar la autonomía y la calidad del suministro [13].

En [11] se abordan 5 grupos existentes referentes a los elementos de almacenamiento, entre los cuales se encuentran:

- Almacenamiento mecánico.
- Almacenamiento químico.
- Almacenamiento térmico.
- Almacenamiento electroquímico.
- Almacenamiento electromagnético.

VI. ARQUITECTURAS DE CONTROL

Un punto notable en las microrredes es el sistema de gestión y control, dado que este debe asegurar el suministro de la energía demandada y el uso eficiente de la carga almacenada. Por otra parte, es importante que el sistema de control sea capaz de explotar correctamente todos los recursos posibles de la microrred, incluyendo aspectos económicos, sociales y medioambientales, garantizando la calidad del servicio [6], [10].

Es necesario tener presente que, a la hora de implementar una microrred, se deben asumir los desafíos que esta acarrea en cuanto al sistema de control, entre los cuales se encuentran [10], [14]:

- Flujo de potencia.
- Estabilidad.
- Modelo de la red.
- Baja inercia.
- Incertidumbre.

De forma complementaria, el sistema de control de la microrred debe ser capaz de controlar, supervisar y gestionar variables tales como [14]:

- Corrientes y tensiones en los generadores distribuidos.
- Frecuencia y tensión en cada modo de operación.
- Potencia.
- Cargas.
- Transición entre modos de operación.
- Rentabilidad económica.
- Flujo de potencia entre la microrred y el exterior.

Esta sección del capítulo abarca las arquitecturas de control utilizadas en las microrredes y sus distintas técnicas de control. A partir de dicha premisa, los sistemas de control en las microrredes pueden presentar diferentes variantes con respecto

a su arquitectura, la cual puede ser a) centralizada, b) descentralizada y c) jerárquica.

A) Arquitectura centralizada.

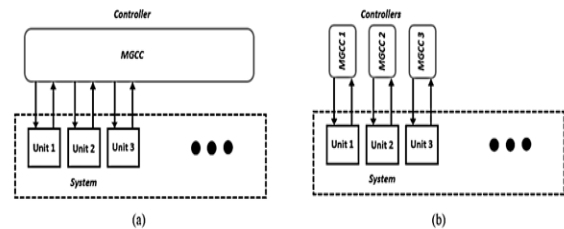
Se realiza una supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) desde un punto único central, el cual es el encargado de gestionar la demanda de potencia, la generación, el almacenamiento, la distribución y transferencia de la energía dentro y fuera de la microrred como se observa en Fig. 5. El MGCC (Control central de la microrred) para esta arquitectura, se suele ubicar en el punto común de conexión (PCC) [15], [16].

Este tipo de sistemas requiere una compleja red de comunicación, y puede llegar a ser vulnerable a fallos [10].

B) Arquitectura descentralizada.

En este tipo de arquitecturas cada elemento de generación posee un controlador independiente que cumple la función de distribuir la carga entre generadores, y mantener la frecuencia ante perturbaciones, comúnmente conocido como “droop control”, en el cual se aplica control a cada inversor para así mantener los valores de frecuencia y tensión estables, comportándose como generadores síncronos [11], [17], [18], [19]. Este tipo de arquitectura no requiere una comunicación tan compleja, sin embargo, presenta una desventaja dado a que no existe una visión general del sistema (ver Fig. 5.) [10].

Figura 5. Estructuras de control de una microrred



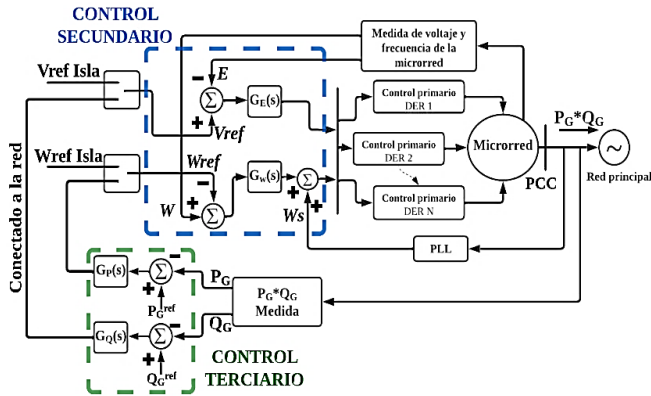
a) Controlador único centralizado encargado de gestionar a todos los DER's. b) Controladores descentralizados que gestionan cada DER individualmente. Tomado de [20].

C) *Arquitectura jerárquica.*

Este tipo de arquitectura generalmente considera 3 niveles dentro de la jerarquía (ya que pueden existir variaciones) los cuales están asociados a distintas escalas de tiempo. En Fig. 6. Se plasman los 3 niveles de control dentro del diagrama de bloques [21], [22].

El nivel primario trabaja en una escala de tiempo rápida, de milisegundos a minutos y cumple la función de mantener la estabilidad de la tensión y la frecuencia, influyendo directamente sobre cada uno de los DER's (Recursos de energía distribuida) y contando con la capacidad de ser plug and play [23].

Figura 6. Estructura jerárquica de control en una microrred



Nota. El esquema generalizado muestra los 3 niveles de control en la microrred y su relación. La arquitectura jerárquica en esencia controla los inversores de cada DER teniendo en cuenta los distintos parámetros dentro de la jerarquía. Adaptado de [23].

El nivel secundario opera en el rango de minutos a horas y es el encargado de reducir a cero el error en estado estable producto del control primario (Ver Fig. 6.), ajustando las variaciones en el nivel de tensión y frecuencia que se puedan presentar a raíz de una perturbación de la carga o en el sistema de generación [24].

Por último, el nivel terciario es el responsable de controlar el flujo de potencia entre la microrred y la red principal [23], esto lo logra ajustando la amplitud y la frecuencia de los recursos de energía distribuida en el PCC [25]. Dicho control ayuda a compensar y optimizar el despacho económico que se pueda generar, operando en el rango de horas a días.

Técnicas de control: en este apartado del capítulo se exponen 5 estrategias de control las cuales suelen ser implementadas en las microrredes:

1) Control PQ.

Propuesta en 1983 por Akagi et al [26], [27], Esta estrategia de control se implementa para regular y mantener constantes la potencia activa y reactiva de la microrred, de forma que puede entregar la tensión de referencia del inversor elevador [28]. El control PQ hace que la microrred se comporte como una fuente de corriente controlada por tensión, comparando los parámetros de salida con los valores de referencia tales como tensión, corriente y potencia, para así tomar acciones de control que acerquen el valor actual al punto de consigna [29]. La estrategia posee una alta respuesta dinámica al implementar valores instantáneos, su carga computacional suele ser mínima dado que utiliza expresiones algebraicas sencillas en sus cálculos y puede ser aplicada a cualquier sistema trifásico [30].

2) Control PID.

Esta estrategia de control es altamente utilizada en la industria debido a su fácil implementación y su capacidad de mejorar la respuesta transitoria de los sistemas [31]. Estos controladores se diseñan principalmente para controlar la tensión, reducir el error en estado estable y obtener una respuesta transitoria rápida [32].

Pueden presentarse diversas variaciones del controlador, como es el caso de [33] en donde se implementó una estrategia de control en cascada del tipo PID no lineal en forma de estabilización de voltaje para un aerogenerador, la cual muestra mejores resultados al ser comparada con un control PID lineal. En [31] se presenta un controlador de voltaje PID robusto para una microrred en modo isla, utilizando diferentes métodos de asignación de parámetros, y se concluye que el método Cohen-Coon logra un rendimiento superior en comparación a los demás métodos.

3) Control por modos deslizantes (SMC).

Esta técnica de control conocida como control en modos deslizantes, tiene como objetivo forzar el error y la derivada del error a un punto de equilibrio, para que así los estados del sistema permanezcan sobre la superficie [34].

Este esquema de control se puede implementar para administrar microrredes con múltiples DER, como es el caso de [35] en el cual se diseñó un controlador SMC de orden fraccional, encargado de controlar la tensión, la estabilidad y mejorar el despacho de potencia. De la misma forma, en [36] se dispone de un controlador SMC encargado de administrar el consumo y la generación de energía en una microrred en modo isla, constituida por diferentes DER's.

Un controlador por modos deslizantes de segundo orden diseñado en [37] fue utilizado para controlar la tensión y la frecuencia en CA para una microrred aislada, con distintas unidades DER conectadas en una topología arbitraria, demostrando la efectividad del controlador.

4) Control predictivo (MPC).

Esta estrategia de control basada en el modelo tiene la característica de responder en un instante actual a partir de una predicción del comportamiento próximo del sistema [38]. Este tipo de técnica se compone de diversos métodos y no puede considerarse como una estrategia independiente. En [37] fue necesaria la presencia de un controlador MPC para estabilizar una microrred aislada de tipo AC, donde el controlador SMC subóptimo rastrea en forma descentralizada las referencias de tensión que son generadas por un supervisor MPC [39]. En [40] y [41] se desarrolla un EMS basado en un control predictivo para múltiples microrredes, encargado de administrar el suministro y la demanda de energía, para así disminuir los costos por cada microrred [42].

5) *Droop Control.*

El droop control, trabaja regulando la tensión y la frecuencia que generan los distintos recursos de energía distribuida, esto con el fin de que cada uno de los DER pueda compartir su potencia tanto activa como reactiva sin necesidad de existir un medio de comunicación entre ellos [43]. Como es el caso de [44] en donde se desarrolla un droop control distribuido en una configuración jerárquica, para un sistema a escala, el cual permite regular el despacho de potencia activa y reactiva, además de regular la sincronización de frecuencia y tensión mostrando robustez al ser un controlador descentralizado.

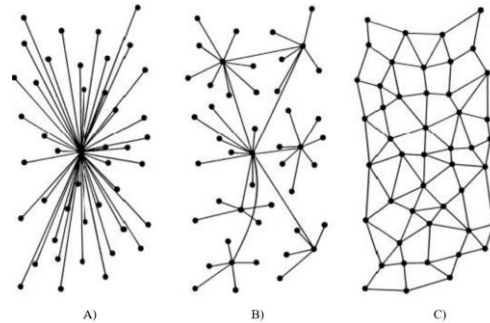
Pueden presentarse inconvenientes en cuanto al desempeño de la combinación entre el droop control y un control secundario; en [45] se expone un controlador con dichas características, encargado de regular y mantener la tensión, la frecuencia y la potencia en el PCC de una microrred autónoma. No obstante, a esta estrategia se pueden asociar a la presencia de fallas en la comunicación y respuestas dinámicas lentas. Por esto, se propone un droop control mejorado que aumenta la precisión de distribución de energía, el cual ofrece una respuesta dinámica más rápida en comparación con un droop control convencional; de la misma forma se diseña un control secundario robusto que puede asegurar la continuidad del suministro de energía durante fallas en la comunicación, utilizando la predicción del comportamiento de la tensión en el PCC.

VII. GESTIÓN DE MICRORREDES A TRAVÉS DE IOT

En la actualidad, el internet de las cosas (IoT) se ha convertido en parte fundamental a la hora de comunicar equipos electrónicos entre si a través de internet, y por supuesto que su adaptación dentro de una microrred ofrece diversos beneficios. Por tal motivo, la importancia de implementar este tipo de estrategias de comunicación descentralizadas se enfoca hacia el mejoramiento de la fiabilidad del servicio, su robustez, flexibilidad y sobre todo su escalabilidad, lo cual resulta complejo en arquitecturas de control centralizadas [46].

El control y monitoreo de los diferentes recursos energéticos distribuidos usualmente se suele realizar por medio de un sistema centralizado comúnmente conocido como MGCC. Este elemento (en algunos casos SCADA) es considerado como el cerebro de la microrred y por ende debe garantizar el rechazo de perturbaciones, la flexibilidad, el monitoreo y control y la escalabilidad de esta [20]. No obstante, las arquitecturas centralizadas no son escalables y puede llegar a dificultarse la supervisión de una gran cantidad de dispositivos en tiempo real dado el limitado ancho de banda del SCADA. Además, al ser un elemento central en el cual convergen la gran mayoría de DERs, ocasiona que el sistema sea poco seguro ya que, en caso de presentarse un fallo en el MGCC, toda la red podría incluso colapsar por completo [46], [47], [48], [49].

Figura 7. Arquitecturas de red en microrredes inteligentes



A) Centralizada, con un único punto de gestión. B) Jerárquica, con puntos de gestión dependientes dentro de la jerarquía. C) Distribuida, con puntos de gestión en cada nodo. Adaptado de [50].

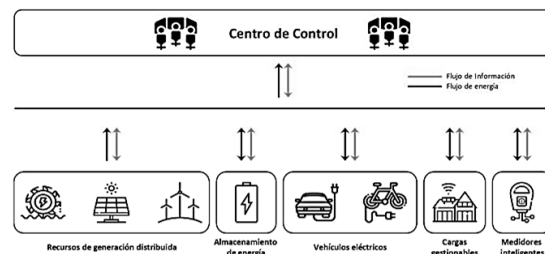
Entrando un poco en el campo de las comunicaciones industriales, es importante tener en cuenta las topologías de red que se pueden presentar dentro de una microrred inteligente (Fig. 7).

La arquitectura de red centralizada utiliza un servidor central, el cual se encarga de administrar y controlar los nodos; a pesar de ello, su desventaja radica en que posee un único punto de falla, a partir de allí se desprende otra serie de problemas tales como un límite de escalabilidad, bajo rendimiento y falta de robustes [22].

Por otra parte, la arquitectura jerárquica posee algunos nodos denominados super-nodos encargados de controlar otros agentes, esto de forma jerárquica, ya que ciertos super-nodos cumplen diferentes tareas dentro de la red, desde interactuar con sensores y actuadores, pasando por nodos de control de habilitación de tareas en la microrred hasta nodos encargados de tomar decisiones críticas [22].

Por último, la arquitectura de red descentralizada se destaca por permitir que cada nodo sea autónomo, otorgando la capacidad de comunicarse y adquirir información de todo su entorno de forma individual y coordinada sin necesidad de utilizar un nodo central, brindándole la característica de ser fácilmente escalable [51]. No obstante, la selección de una topología centralizada o descentralizada va a depender tanto del requerimiento que se tenga como del presupuesto.

Figura 8. Flujo de energía e información en una microrred



Nota. El bus del flujo de energía es el encargado de distribuir la potencia que se genera, utiliza o almacena en cada DER. El bus de flujo de información se encarga de transportar los datos recogidos en cada DER para la toma de decisiones. Tomado de [52].

El internet de las cosas permite lograr la interoperabilidad dentro de una smart-grid, debido a que da la capacidad a diferentes elementos del sistema, de transferir y recibir datos por medio de la red (Ver Fig. 8.), identificando a cada uno de estos con un id único [52].

VIII. METODOLOGÍA GENERAL DE IMPLEMENTACIÓN

En general, una microrred se puede entender como un sistema que trabaja en conjunto para dar una respuesta a la demanda de energía que se le solicite, utilizando la diversa infraestructura y lógica de control que posea. No obstante, para hacer esto posible, dentro de su diseño es necesario que exista un plan de trabajo que abarque todas las variables de la ZNI y que permita estimar los recursos necesarios que puedan ser requeridos para satisfacer sus necesidades.

En la literatura, es común encontrarse con una etapa de dimensionamiento y diseño inicial [53] la cual va desde una recopilación de datos hasta la realización de simulaciones asistidas por software, para posteriormente ser implementadas, abarcando tanto la instalación como la supervisión del sistema.

En la etapa de diseño se pueden encontrar múltiples similitudes entre los autores, las cuales podrían agruparse en 4 fases dependientes en el orden de ejecución [54]:

1) Recolección de información

- Condiciones ambientales
- Condiciones de carga
- Condiciones económicas
- Fuentes de energía existentes
- Disponibilidad de recursos renovables

2) Dimensionado y estimación

- Curva de demanda según el tipo de servicio
- Tamaño de equipos de generación
- Tamaño de equipos de almacenamiento

3) Modelamiento

- Topología
- Diagrama unifilar
- Modelo matemático
- Calibre de conductores

4) Simulación y análisis

- Análisis energético
- Análisis económico
- Análisis de viabilidad
- Optimización

Es de gran importancia ir de la mano con un software que permita modelar sistemas de energía que utilicen fuentes tanto renovables como no renovables y que facilite la optimización de todos los componentes de la microrred. Es por esto por lo que frecuentemente se suele disponer del software HOMER el cual posibilita la realización de tareas tales como optimización, simulación y modelado de sistemas de micro generación, permitiendo dimensionar e implementar las distintas fuentes de producción como de almacenamiento de energía [55].

Luego de realizar un diseño que se ajuste a los requerimientos, se procede a instalar y realizar el montaje y conexión de todos los componentes de la microrred hasta dejarlo en su estado de puesta a punto [53]. Por último, es de suma importancia hacer un seguimiento constante al sistema, analizando las fallas y proponiendo mejoras a la red.

IX. CASOS DE APLICACIÓN EN COLOMBIA

En Colombia, a pesar de que el 52% del territorio nacional es catalogado como zona no interconectada [56], son pocas las investigaciones con respecto al impacto de la implementación de microrredes [57], como las que se expondrán a continuación

Comunidad Wayuu – Guajira

Uno de los casos más importantes, corresponde al aporte de Quijano et al. [58] donde se realizó el diseño e implementación de una microrred aislada en la Guajira para el año 2019, específicamente en comunidades Wayuu que no cuentan con el servicio de energía.

El desarrollo de esta microrred sentó sus bases en una metodología que inició haciendo un análisis de las comunidades, seguido de un estudio energético y que concluye con la propuesta de solución e implementación. Entre los principales recursos de energía distribuida se encuentran:

- 2 strings de 9 paneles fotovoltaicos en serie de 5.76 KWp
- 1 generador eólico de 1 kW
- 24 baterías de 425 Ah a 2V

Las cargas que componen la microrred son elementos tales como electrodomésticos, sistemas de iluminación y equipos de refrigeración. Además, se implementó una topología de bus AC utilizando inversores de tensión con los elementos; sobre el bus va acoplado un sistema de control centralizado, encargado de regular la frecuencia, administrar la disposición de recursos de generación y el censado de variables como radiación y viento. El sistema recoge y gestiona los datos de la microrred y los envía a un servidor modbus; sin embargo, por la ubicación de la comunidad, no se cuenta con una buena señal de GPRS para hacer una supervisión remota [58].

Universidad Distrital – Bogotá

Otro aporte destacado fue realizado en la universidad distrital de Bogotá, en la cual se implementó una microrred híbrida con fines académicos y que tiene la capacidad de suministrar 5kVA [59]. Esta microrred cuenta con elementos tales como:

- Transformador de aislamiento
- TPCC - Tablero de punto de conexión común
- 2 módulos solares fotovoltaicos
- 20 baterías de 12Vdc en serie

Los elementos de acoplamiento a la red tales como convertidores de tensión e inversores son requeridos ya que esta microrred cuenta con una topología de bus mixta y posee barrajes tanto AC como DC; no obstante, el sistema de control de tipo centralizado sigue a la espera de una futura investigación [59].

Universidad del Valle – Cali

En el año 2017, el Grupo de Investigación en Control Industrial-GICI junto con el Grupo de Investigación GITICAP de la universidad del valle, ubicada en Cali Valle del Cauca, desarrolló e instaló una microrred con el objetivo de indagar su funcionalidad y obstáculos relacionados con los sistemas no interconectados pero enfocados en el contexto colombiano [60].

La presente microrred es aislada y se caracteriza por trabajar una topología de microrred mixta con arquitectura centralizada tipo SCADA; emplea el software etap® para integrar la respectiva información en un único diagrama unifilar, permitiendo el monitoreo, la gestión en tiempo real y la simulación e incluso predicción de forma integral [61].

El proyecto abarca 12 paneles de silicio policristalino de 140W, y 4 paneles de silicio monocristalino de 85W; además de utilizar controladores Blue Solar y almacenadores de 4 baterías de 12V- 200Ah, acopladas al sistema con su respectivo inversor de tensión [60], [62].

Andagoya – Chocó

Esta microrred fotovoltaica desarrollada en el año 2017 en Andagoya, Chocó, fue instalada en el edificio de energías renovables y cuenta con la capacidad de trabajar tanto en modo isla como en modo no autónomo [63].

El sistema en configuración de bus AC cuenta con 80 paneles fotovoltaicos de 250W, 48 baterías sunligh y 6 inversores bidireccionales AC/DC [63]. Adicionalmente, posee un sistema de monitorización, diagnóstico a distancia, almacenamiento de datos y visualización (SUNNY WEBBOX) enlazado a internet que permite la supervisión de forma remota de la microrred. [64]. Es importante mencionar que la microrred no depende específicamente de un punto único de control para los DERs, lo que la hace descentralizada.

Universidad de Nariño – Pasto

La presente microrred fue desarrollada por el grupo de investigación en ingeniería eléctrica y electrónica -GIIIE- con fines de estudio sobre temas relacionados con energías sostenibles. Este plan piloto está constituido por 3 sistemas de inyección fotovoltaicos de 12,5kW c/u, un aerogenerador de 5kW integrado en conjunto con un sistema fotovoltaico, y un elemento de respaldo de energía acoplado a uno de los sistemas de generación fotovoltaica [65].

Diseñada sobre una topología de bus AC, en la cual existen cargas del tipo monofásicas y trifásicas; esta microrred posee la capacidad de estar conectada o no a la red convencional, y utiliza una arquitectura de control centralizada para el MGCC [65]. Además de tener un sistema de control centralizado, cuenta con un sistema de gestión de medida del tipo SCADA para el control de cargas de la marca survalent [65].

Universidad industrial de Santander – Bucaramanga

El laboratorio de integración energética (LIE) de la Universidad Industrial de Santander, ubicada en la ciudad de Bucaramanga, ha desarrollado un prototipo que incluye un generador fotovoltaico con paneles KYOCERA de 240 Wp, un SEPIC, una carga perturbadora, un inversor trifásico de cuatro hilos con condensadores divididos, una fuente de tensión que se puede programar (12Kva), dos tarjetas controladoras d-SPACE, una etapa de medida, un generador a gasolina de 1,6kW y un motor-generador de 2HP para emular un aerogenerador. Es importante mencionar que este laboratorio se desarrolló con fines educativos y que utiliza las fuentes de tensión como sistemas de emulación de recursos de energía distribuida [62].

El sistema se considera una arquitectura centralizada para el generador fotovoltaico que se encuentra enlazado a un convertidor DC-DC. El circuito implementa una topología de bus AC trifásico, la cual requiere de un inversor [66].

En el proyecto se desarrolla el algoritmo de generación de señales proponiendo que el sistema de control empleado debe garantizar la potencia activa, mantener la tensión del bus CC según la referencia, compensar cargas, corregir el factor de potencia, mitigar la corriente armónica, equilibrar la carga y asegurar la calidad de las corrientes de red [66].

Universidad Pontificia Bolivariana – Medellín

Considerada como la microrred inteligente de mayor tamaño y capacidad del país [67], constituida por 10 subsistemas entre los cuales se encuentran [68], [69]:

- Generación distribuida SFV
- Generación distribuida Eólica
- Biodigestor anaeróbico de 150 L
- Estación de carga de vehículos
- Iluminación led
- Sistema de control automático de temperatura e iluminación un edificio
- Almacenamiento de energía gestionable

- Estaciones meteorológicas
- Centro de control

Esta microrred cuenta con un MGCC del tipo SCADA centralizado, encargado de gestionar todas las variables del sistema. En cuanto a la gestión basada en IOT, se han realizado aportes tales como el de Betancur [70], en el cual se desarrolla una aplicación para el procesamiento, almacenamiento y consulta de datos recogidos de la microrred, los cuales son enviados a una base de datos y permiten su administración de forma remota.

Otros proyectos

Mejoramiento del sistema híbrido de la comunidad Nazareth y Puerto Estrella en la Guajira.

El Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas inauguró en el año 2021, un sistema en el departamento de la guajira con un

total de 1572 paneles solares con capacidad instalada de 443,56 KWp y una capacidad total de 909 kW de dos grupos electrógenos [71].

Microrred en zona rural de Paratebueno, Cundinamarca.

En el año 2017, Condesa desarrolló en zona rural de Paratebueno, Cundinamarca, un sistema de distribución de energía compuesto por 72 paneles solares de 310 Wp, un sistema de generación diésel de 300 galones (18kW), y un banco de 24 baterías de almacenamiento de 2267 ah/día [72], [73]. Este proyecto benefició a más de 20 familias que no disponían de electricidad [74].

X. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

A partir de 7 los casos de implementación y el contenido teórico, se desarrolla la Tabla II, la cual sirve como base para la extracción de información y conclusiones relevantes en cuanto a la aplicación de microrredes en el país.

Tabla 2. Matriz comparativa de casos de implementación de microrredes en Colombia

Ubicación	Sistemas de generación y almacenamiento utilizados					Modo de operación		Topología de bus principal	Arquitectura de control	Gestionado por IOT
	PV	W	B	D	BD	Autónomo	No autónomo			
Guajira	X	X	X			X		AC	CENTRALIZADA	SI
Bogotá	X		X			X	X	MIXTA	CENTRALIZADO	NO
Cali	X		X			X		MIXTA	CENTRALIZADA	SI
Chocó	X		X			X	X	AC	DESCENTRALIZADA	SI
Pasto	X	X	X			X	X	AC	CENTRALIZADA	NO
Bucaramanga	X	X				X	X	AC	CENTRALIZADO	NO
Medellín	X	X	X		X	X	X	NO ESPECIFICADO	NO ESPECIFICADO	SI

Abreviaturas. Generación fotovoltaica (PV), Generación eólica (W), Sistema de baterías (B), Generador Diesel (D), Generador biodigestor (BD).

En todos los casos de implementación estudiados, se puede observar que existe la presencia del sistema de generación solar fotovoltaico, y esto es un indicador de que el recurso energético entrega resultados. De la misma forma, se puede observar que cada microrred puede trabajar de forma autónoma, y esto es debido a que, en su gran mayoría las microrredes cuentan con sistemas de respaldo de energía, lo cual es indispensable en este tipo de sistemas.

Es frecuente la presencia de arquitecturas de control centralizadas en los distintos casos de implementación de microrredes en Colombia, y esto puede deberse a factores como la infraestructura o los costos quienes afectan directamente en el diseño; de forma alterna, en la mayoría de los casos, la distancia entre los distintos DERs no es muy grande, lo cual posibilita su gestión de forma cercana.

A pesar de que existen pocos casos de implementación de microrredes en Colombia, se puede destacar que la gestión a través de IoT se encuentra presente en más del 50% de los casos, independiente del tipo de topología de red que se utilice.

Se estudiaron las distintas características generales que poseen las microrredes, como también los casos de implementación en Colombia, para así plasmarlos en este documento y poder dar a los futuros investigadores una idea general sobre cómo se encuentra el país con respecto a las microrredes.

REFERENCIAS

- [1] “Gestión de energía en Colombia.” <https://www.datosmundial.com/america/colombia/balancede-energetico.php> (Accesado Sep. 13, 2022).
- [2] L. Vallejo Barbosa, M. Bueno López, and V. Flores García, “Promoción de soluciones energéticas en el sector rural colombiano: una oportunidad para el desarrollo y la sostenibilidad energética de las regiones”.
- [3] E. E. Gaona, C. L. Trujillo, and J. A. Guacaneme, “Rural microgrids and its potential application in Colombia,” *Renewable and Sustainable Energy*

- Reviews*, vol. 51, pp. 125–137, Jun. 2015, doi: 10.1016/J.RSER.2015.04.176.
- [4] “el abc de los compromisos de colombia para la cop21. Diego m. Garcés / wwf - pdf Descargar libre.” <https://docplayer.es/9062471-El-abc-de-los-compromisos-de-colombia-para-la-cop21-diego-m-garces-wwf.html> (Accesado Sep. 13, 2022).
- [5] J. Hernán and V. Díaz, “Desempeño de la interoperabilidad, escalabilidad y seguridad en las comunicaciones de una microrred de energía eléctrica”.
- [6] P. (Escuela de I. I. Pérez Fernández, “Descripción e infraestructura de una microrred para un entorno residencial,” 2017, Accesado: Sep. 13, 2022. [En línea]. Available: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/24085>
- [7] J. De *et al.*, “estudio sobre las microrredes y su aplicación a proyectos de electrificación de zonas rurales aisladas”.
- [8] T. S. Ustun, C. Ozansoy, and A. Zayegh, “Recent developments in microgrids and example cases around the world - A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 8, pp. 4030–4041, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.033.
- [9] European Commission within the Sixth Framework Program for RTD, “Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids,” 2006.
- [10] C. Bordons, F. García-Torres, and L. Valverde, “Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable,” *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, vol. 12, no. 2, pp. 117–132, 2015, doi: 10.1016/J.RIAI.2015.03.001.
- [11] Mónica López and Tafall Criado, “análisis de la viabilidad de la implantación de micro redes en españa. Consideraciones técnicas, regulatorias y económicas,” 2018.
- [12] Rodion Dubceac, “criterios de diseño de una instalación microrred,” 2017. Accesado: Sep. 13, 2022. [En línea]. Available: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/105180/Memoria%20y%20Anexos_Dubceac.R.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [13] Irene matilde trujillos vázquez, “Estado del arte de microrredes energéticas en España,” Sevilla, 2020.
- [14] D. E. Olivares *et al.*, “Trends in Microgrid Control,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2295514.
- [15] I. Wasiak, R. Pawelek, and R. Mienski, “Energy storage application in low-voltage microgrids for energy management and power quality improvement,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 8, no. 3, pp. 463–472, 2014, doi: 10.1049/IET-GTD.2012.0687.
- [16] S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, and P. Crossley, “Microgrids and Active Distribution Networks,” *Microgrids and Active Distribution Networks*, pp. 215–226, Aug. 2009, Accesado: Sep. 13, 2022. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/6562346/Microgrids_and_Active_Distribution_Networks
- [17] Chris Marnay *et al.*, “Microgrid Evolution Roadmap,” vol. 14, no. 10, pp. 10–16, 2015.
- [18] “Revista ElectroIndustria - MICRO-REDES: Caminando hacia redes inteligentes y sustentables.” <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2585&ni=micro-redes-caminando-hacia-redes-inteligentes-y-sustentables> (Accesado Sep. 14, 2022).
- [19] Felipe Andrés Barrera Lobo, “control primario con pendiente variable aplicado en microrredes aisladas,” Santiago De Chile, 2016. Accesado: Sep. 14, 2022. [En línea]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/140620/Control-primario-con-pendiente-variable-aplicado-en-microrredes-aisladas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [20] Y. Zahraoui *et al.*, “Energy Management System in Microgrids: A Comprehensive Review,” *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 10492*, vol. 13, no. 19, p. 10492, Sep. 2021, doi: 10.3390/SU131910492.
- [21] K. de Brabandere, K. Vanthournout, J. Driesen, G. Deconinck, and R. Belmans, “Control of microgrids,” 2007 *IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES*, 2007, doi: 10.1109/PES.2007.386042.
- [22] S. Marzal, R. Salas, R. González-Medina, G. Garcerá, and E. Figueres, “Current challenges and future trends in the field of communication architectures for microgrids,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3610–3622, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2017.10.101.
- [23] A. Bidram and A. Davoudi, “Hierarchical Structure of Microgrid Control Systems,” New Mexico, 2012.
- [24] M. ; Savaghebi, J. C. Vasquez, A. ; Jalilian, and J. M. Guerrero, “Secondary Control for Compensation of Voltage Harmonics and Unbalance in Microgrids,” pp. 46–53, 2012, doi: 10.1109/PEDG.2012.6253978.
- [25] G. Tembo, “Overview of the Microgrid Concept and its Hierarchical Control Architecture,” 2016, Accesado: Sep. 28, 2022. [En línea]. Available: <http://www.ijert.org>
- [26] A. Hirofumi, K. Yoshihira, F. Koetsu, And N. Akira, “Generalized theory of instantaneous reactive power and its Application,” Jan. 1983, Accesado: Oct. 25, 2022. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/1081562/Generalized_theory_of_the_instantaneous_reactive_power_in_three_phase_circuits
- [27] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, “Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. IA-20, no. 3, pp. 625–630, 1984, Accesado: Oct. 25, 2022. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/9569710/Instantaneous_Reactive_Power_Compensators_Comprising_Switching_Devices_without_Energy_Storage_Components
- [28] “What is PQ Control | IGI Global.” <https://www.igi-global.com/dictionary/operation-of-microgrid-and-control-strategies/70990> (Accesado Oct. 25, 2022).
- [29] M. Aminu and K. Solomon, “A Review of Control Strategies for Microgrids,” *Adv Res*, vol. 7, no. 3, pp. 1–9, Jan. 2016, doi: 10.9734/AIR/2016/25722.

- [30] J. Afonso, C. Couto, and J. Martins, "Active Filters with Control Based on the p-q Theory".
- [31] S. K. Sarkar, F. R. Badal, and S. K. Das, "A comparative study of high performance robust PID controller for grid voltage control of islanded microgrid," *Int J Dyn Control*, vol. 6, no. 3, pp. 1207–1217, Sep. 2018, doi: 10.1007/S40435-017-0364-0.
- [32] F. Mohammadi *et al.*, "Robust Control Strategies for Microgrids: A Review," *IEEE Syst J*, vol. 16, no. 2, pp. 2401–2412, Jun. 2022, doi: 10.1109/JSYST.2021.3077213.
- [33] P. Proaño, O. Camacho, and M. Pozo, "Estrategias de control no lineal para la regulación de corriente y estabilización de voltaje DC para un aerogenerador operando en una microrred," vol. 3, no. 1, pp. 45–53, 2020, doi: 10.37135/ns.01.05.05.
- [34] M. C. Pérez Pirela and J. P. García Sandoval, "Control por modos deslizantes de un sistema de intercambio de calor: validación experimental," *Enfoque UTE*, vol. 9, no. 4, pp. 110–119, Dec. 2018, doi: 10.29019/ENFOQUEUTE.V9N4.404.
- [35] H. R. Baghaee, M. Mirsalim, G. B. Gharehpetian, and H. A. Talebi, "Decentralized Sliding Mode Control of WG/PV/FC Microgrids under Unbalanced and NEn linear Load Conditions for On- and Off-Grid Modes," *IEEE Syst J*, vol. 12, no. 4, pp. 3108–3119, Dec. 2018, doi: 10.1109/JSYST.2017.2761792.
- [36] M. H. Khooban *et al.*, "Robust frequency regulation in mobile microgrids: HIL implementation," *IEEE Syst J*, vol. 13, no. 4, pp. 4281–4291, Dec. 2019, doi: 10.1109/JSYST.2019.2911210.
- [37] M. Cucuzzella, G. P. Incremona, and A. Ferrara, "Decentralized Sliding Mode Control of Islanded AC Microgrids With Arbitrary Topology," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 8, pp. 6706–6713, Aug. 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2694346.
- [38] "Control Predictivo DMC." <https://controlautomaticoeducacion.com/control-predictivo/dmc/> (Accesado Oct. 25, 2022).
- [39] H. Yopez and D. Yopez, "Vista de Control de modo deslizante para microrredes: una revisión." http://www.investigacionistct.ec/ojs/index.php/investigacion_tecnologica/article/view/52/54 (Accesado Oct. 25, 2022).
- [40] P. Mc Namara, R. R. Negenborn, B. de Schutter, and G. Lightbody, "Weight optimisation for iterative distributed model predictive control applied to power networks," *Eng Appl Artif Intell*, vol. 26, no. 1, pp. 532–543, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.ENGAPPAI.2012.06.003.
- [41] A. Parisio, C. Wiezorek, T. Kyntaja, J. Elo, and K. H. Johansson, "An MPC-based Energy Management System for multiple residential microgrids," *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, vol. 2015-October, pp. 7–14, Oct. 2015, doi: 10.1109/COASE.2015.7294033.
- [42] Y. Du, J. Wu, S. Li, S. Member, C. Long, and I. Ch Paschalidis, "Distributed MPC for Coordinated Energy Efficiency Utilization in Microgrid Systems," pp. 1949–3053, 2017, doi: 10.1109/TSG.2017.2777975.
- [43] E. A. Espina González, "Control droop por fase aplicado a Micro-Redes de 4 hilos," 2017, Accesado: Oct. 25, 2022. [En línea]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146665>
- [44] J. Hu and A. Lanzon, "Distributed Finite-Time Consensus Control for Heterogeneous Battery Energy Storage Systems in Droop-Controlled Microgrids," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 10, no. 5, pp. 4751–4761, Sep. 2018, doi: 10.1109/TSG.2018.2868112.
- [45] R. M. Imran, S. Wang, and F. M. F. Flaih, "DQ-Voltage Droop Control and Robust Secondary Restoration with Eligibility to Operate during Communication Failure in Autonomous Microgrid," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 6353–6361, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2889806.
- [46] S. M. Romeu, "Concepción e Integración de Arquitecturas y Protocolos de Comunicación dentro de Sistemas de Supervisión y Control de Microrredes Inteligentes," 2019.
- [47] Q. Yang, J. A. Barria, and T. C. Green, "Communication infrastructures for distributed control of power distribution networks," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 7, no. 2, pp. 316–327, May 2011, doi: 10.1109/TII.2011.2123903.
- [48] C. M. Colson and M. H. Nehrir, "A review of challenges to real-time power management of microgrids," *2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting, PES '09*, 2009, doi: 10.1109/PES.2009.5275343.
- [49] Ekhas Hossain, Ersan Kabalci, Ramazan Bayindir, and Ronald Perez, "A comprehensive study on microgrid technology," *Researchgate*, 2014, Accesado: Sep. 27, 2022. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/286382695_A_comprehensive_study_on_microgrid_technology
- [50] Stipe Belak, Anita Peša, and Branko Belak, "Future of Business Intelligence System Regarding the Protection of Privacy of Individuals, Organizations, Companies and Society as a Whole," 2008. Accesado: Sep. 28, 2022. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/293945153_Future_of_Business_Intelligence_System_Regarding_the_Protection_of_Privacy_of_Individuals_Organizations_Companies_and_Society_as_a_Whole
- [51] A. Kantamneni, L. E. Brown, G. Parker, and W. W. Weaver, "Survey of multi-agent systems for microgrid control," *Eng Appl Artif Intell*, vol. 45, pp. 192–203, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.ENGAPPAI.2015.07.005.
- [52] D. Betancur, "desarrollo de aplicación para el procesamiento, almacenamiento y consulta de datos de la micro-red inteligente upb," 2019, Accesado: Oct. 11, 2022. [En línea]. Available: <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/4940/Desarrollo%20aplicaci%c3%b3n%20procesamiento....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [53] C. Catuogno, G. Frias, L. R. Torres, and G. O. García, "Metodología de Diseño e Implementación de una Microrred Aislada para Escuelas Rurales," 2019,

- Accesado: Oct. 08, 2022. [En línea]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/336265588>
- [54] G. Juan and S. Andrés, “Una metodología de diseño de micro redes para zonas no interconectadas de Colombia,” 2017, Accesado: Oct. 08, 2022. [En línea]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992017000200003
- [55] National Renewable Energy Laboratory, “HOMER, el modelo de optimización de micro energía.”, Accesado: Oct. 08, 2022. [En línea]. Available: <http://www.nrel.gov/homer>
- [56] “Soluciones Energéticas Para Las Zonas No Interconectadas De Colombia Ipse.” <https://docplayer.es/17971329-Soluciones-energeticas-para-las-zonas-no-interconectadas-de-colombia-ipse.html> (Accesado Oct. 10, 2022).
- [57] L. M. Leon, “Estrategia para el diseño de una microrred enfocada en el abastecimiento de energía a cargas críticas bajo condiciones de intermitencia de generación,” 2021.
- [58] N. Quijano *et al.*, “Microrredes aisladas en La Guajira: diseño e implementación,” *Revista de Ingeniería*, vol. 0, no. 48, pp. 54–65, Jun. 2019, doi: 10.16924/riua.v0i48.998.
- [59] A. Chaparro and J. Liscano, “diseño e implementación de una microrred en la universidad distrital francisco José de caldas sede de ingeniería,” 2017, Accesado: Oct. 12, 2022. [En línea]. Available: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/6500/Dise%C3%B1o%20e%20implementacion%20deuna%20microrred%20en%20la%20universidad%20distrital.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [60] E. Franco-Mejía, 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,” *2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control, CCAC 2017 - Conference Proceedings*, vol. 2018-January, pp. 1–6, Jan. 2018, doi: 10.1109/CCAC.2017.8276487.
- [61] R. Franco, E. Gomez, and E. Franco, “Sistema de Monitoreo de una microrred aislada usando ETAP Real Time ,” 2017, Accesado: Oct. 13, 2022. [En línea]. Available: <https://docplayer.es/87864656-Sistema-de-monitoreo-de-una-microrred-aislada-usando-etap-real-time.html>
- [62] J. Rey *et al.*, “A Review of Microgrids in Latin America: Laboratories and Test Systems ”, Accesado: Oct. 13, 2022. [En línea]. Available: <https://latam.ieceer9.org/index.php/transactions/article/view/6235>
- [63] E. Banguero, A. J. Aristizábal, A. Habib, and D. Ospina, “Experimental investigation and optimal power flow modelling of the first renewable microgrid in Chocó, Colombia,” *Energy Procedia*, vol. 157, pp. 953–965, 2019, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2018.11.262.
- [64] “Pioneros en tecnología para aplicaciones fotovoltaicas | SMA Solar.” <https://www.sma-iberica.com/> (Accesado Oct. 13, 2022).
- [65] A. F. Arciniegas M., D. E. Imbajoa R., J. Revelo F., A. F. Arciniegas M., D. E. Imbajoa R., and J. Revelo F., “Diseño e implementación de un Sistema de Medición Inteligente para AMI de la microrred de la Universidad de Nariño,” *Enfoque UTE*, vol. 8, no. 1, pp. 300–314, Feb. 2017, doi: 10.29019/ENFOQUEUTE.V8N1.136.
- [66] 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,” *Electric Power Systems Research*, vol. 192, p. 106918, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.EPSR.2020.106918.
- [67] m. D. L. Á. Pinto, “propuesta y evaluación de una microrred para las islas de Providencia y Santa Catalina, colombia,” 2018, Accesado: Oct. 14, 2022. [En línea]. Available: https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/1500/2018_Tesis_Pinto_Calderon_Maria_de_los_Angeles.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [68] M. M. Llano, “La Micro-Red inteligente: una ciudad eficiente, en miniatura”, Accesado: Oct. 14, 2022. [En línea]. Available: <https://www.upb.edu.co/es/documentos/doc-ciudadeficienteminiatura-inv-1464100344537.pdf>
- [69] G. J. López Jiménez, I. A. Isaac, J. W. González Sanchez, and H. Cardona Agudelo, “Integración de energías renovables (solar fotovoltaica) en campus upb laureles-micro red inteligente,” *Investigaciones Aplicadas, ISSN-e 2011-0413, Vol. 8, N°. 2, 2014 (Ejemplar dedicado a: Revista Investigaciones Aplicadas)*, págs. 152-159, vol. 8, no. 2, pp. 152–159, 2014, Accesado: Oct. 14, 2022. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5001530&info=resumen&idioma=SPA>
- [70] d. Betancur, “desarrollo de aplicación para el procesamiento, almacenamiento y consulta de datos de la micro-red inteligente upb ,” 2019, Accesado: Oct. 16, 2022. [En línea]. Available: <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/4940/Desarrollo%20aplicaci%C3%B3n%20procesamiento....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [71] “Inauguran planta de energía en la Alta Guajira.” <https://www.elheraldo.co/la-guajira/inauguran-planta-de-energia-en-la-alta-guajira-828977> (Accesado Oct. 16, 2022).
- [72] “Con energía solar proveen luz a habitantes de Paratebueno, Cundinamarca. - Bogotá - ELTIEMPO.COM.” <https://www.eltiempo.com/bogota/con-energia-solar-proveen-luz-a-habitantes-de-paratebueno-cundinamarca-205518> (Accesado Oct. 14, 2022).
- [73] E. Duque Fernández, “Viabilidad de una Micro-red en la isla de San Andrés, Colombia,” 2021, doi: 10.1/JQUERY.MIN.JS.
- [74] J. Javier Díaz González, “Viabilidad regulatoria para implementar sistemas de micro redes con fuentes no convencionales de energía renovable – FNCER – por Intercolombia S.A. E.S.P,” 2018, Accesado: Oct. 14, 2022. [En línea]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/182

