



Universidad de Valladolid

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA
INDUSTRIAL**

TESIS DOCTORAL:

**MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN
DE FUENTES DE GENERACIÓN,
SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y
CONSUMOS EN UNA MICRORRED.**

Presentada por Óscar Izquierdo Monge para
optar al grado de
Doctor por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:
Luis Hernández Callejo
Ángel Zorita Lamadrid
Víctor Alonso Gómez

AGRADECIMIENTOS

Quisiera acordarme en estas líneas, de todas las personas que han contribuido, directa e indirectamente, en esta tesis doctoral.

Agradezco a mis directores de tesis, Dr. Luis Hernández Callejo, Dr. Ángel Zorita Lamadrid y Dr. Víctor Alonso Gómez su ayuda y sus consejos.

También quisiera agradecer a todos los coautores de los artículos aquí presentados, por su colaboración y por supuesto a mis compañeros de CEDER-CIEMAT, a mis familiares y amigos.

Gracias a todos.

PRÓLOGO

De acuerdo con la normativa vigente de presentación y defensa de la tesis doctoral de la Universidad de Valladolid, esta Tesis Doctoral se presenta como compendio de publicaciones.

A continuación, se enumeran los artículos que se han publicado para conformar el compendio de publicaciones que integran esta tesis doctoral. Los artículos completos se incluirán en el capítulo final de este documento. Las numeraciones que aparecen en este listado serán las mismas utilizadas en el texto para referirse a los artículos.

Artículo 1: Publicado 28 mayo 2021.

Título:	Conversion of a Network Section with Loads, Storage Systems and Renewable Generation Sources into a Smart Microgrid
Autores:	Izquierdo-Monge, O., Peña-Carro, P., Villafafila-Robles, R., Duque-Pérez, O., Zorita-Lamadrid, A. y Hernández-Callejo, L.
Revista:	Applied Science. 2021, 11(11), 5012
Doi:	https://doi.org/10.3390/app11115012
Categoría:	Engineering, Multidisciplinary. (39/92); Q2
Índice & Factor de impacto:	Q2: Journal Citation Reports (JCR) 2021; 2.8

Artículo 2: Publicado 30 mayo 2023.

Título:	Open Source Monitoring and Alarm System for Smart Microgrids Operation and Maintenance Management
Autores:	Izquierdo-Monge, O., Redondo-Plaza, A., Peña-Carro, P., Alonso-Gómez, V., Zorita-Lamadrid, A. y Hernández-Callejo, L.
Revista:	Electronics 2023, 12(11), 2471
Doi:	https://doi.org/10.3390/electronics12112471
Categoría:	Electrical & Electronic Engineering (131/275); Q2 (2022)
Índice & Factor de impacto:	Q2: Journal Citation Reports (JCR) 2022; 2.9

Artículo 3: Publicado 27 febrero 2024.

Título:	Methodology for energy management in a smart microgrid based on the efficiency of dispatchable renewable generation sources and distributed storage systems.
Autores:	Izquierdo-Monge, O., Peña-Carro, P., Hernández Jiménez, A., Zorita-Lamadrid, A. y Hernández-Callejo, L.,
Revista:	Applied Science 2024, 14(5), 1946
Doi:	https://doi.org/10.3390/app14051946
Categoría:	Engineering, Multidisciplinary; (42/90); Q2
Índice & Factor de impacto:	Q2: Journal Citation Reports (JCR) 2022; 2.7

MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y CONSUMOS EN UNA MICRORRED

Además de los artículos mencionados, se incluyen otros trabajos realizados en el marco de esta línea de investigación y que han contribuido al desarrollo de esta tesis doctoral.

Artículo adicional 1:

Título: Small wind turbines study and integration in a peri-urban microgrid

Revista: Revista Facultad de Ingeniería Universidad De Antioquia, (104)

Fecha de publicación: 18 mayo 2022

DOI: <https://www.doi.org/10.17533/udea.redin.20210845>

Autores: Izquierdo-Monge, O., Peña-Carro, P., Martín Jiménez, G. y Hernández-Callejo, L.

Categoría:	Engineering, Multidisciplinary; Q3
Índice & Factor de impacto:	Q3: Scimago Journal & Country Rank (SJR) 2022; 0.24

Artículo adicional 2:

Título: Integration of LFP-second life batteries as a storage in a smart microgrid

Revista: Revista Facultad de Ingeniería Universidad De Antioquia, (110)

Fecha de publicación: 15 diciembre 2023

DOI: <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20230211>

Autores: Izquierdo-Monge, O., Alonso González, N., Martín Jiménez, G. y Peña-Carro, P.

Categoría:	Engineering, Multidisciplinary; Q3
Índice & Factor de impacto:	Q3: Scimago Journal & Country Rank (SJR) 2022; 0.24

Artículo adicional 3:

Título: Low-Cost and Real-Time Measurement System for Electrical Energy Measuring of a Smart Microgrid

Revista: Communications in Computer and Information Science 1359. Springer

Fecha de publicación: noviembre 2020

DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-69136-3>

Autores: Izquierdo-Monge, O.; Peña-Carro, P.; Martín Martínez, M; Hernández-Callejo, L; Duque-Pérez, Oscar y Zorita-Lamadrid, A.

Categoría:	Computer Science; Miscellaneous Q4
Índice & Factor de impacto:	Q4: Scimago Journal & Country Rank (SJR) 2021; 0.209

Artículo adicional 4:

Título: A Methodology for the Conversion of a Network Section with Generation Sources, Storage and Loads into an Electrical Microgrid Based on Raspberry Pi and Home Assistant

Revista: Communications in Computer and Information Science 1359. Springer

Fecha de publicación: noviembre 2020

DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-69136-3>

Autores: Izquierdo-Monge, O.; Peña-Carro, P.; Villafafila-Robles, R; Hernández-Callejo, L; Duque Pérez, Oscar y Zorita-Lamadrid, A.

Categoría:	Computer Science; Miscellaneous Q4
Índice & Factor de impacto:	Q4: Scimago Journal & Country Rank (SJR) 2021; 0.209

Artículo adicional 5:

Título: Development and Improvement of a Data Storage System in a Microgrid Environment with HomeAssistant and MariaDB

Revista: Communications in Computer and Information Science 1555. Springer

Fecha de publicación: enero 2022

DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-96753-6>

Autores: Izquierdo-Monge, O.; Martín Jiménez, G. y Peña-Carro, P.

Categoría:	Computer Science; Miscellaneous; Q4
Índice & Factor de impacto:	Q4: Scimago Journal & Country Rank (SJR) 2022; 0.196

Artículo adicional 6:

Título: Control Strategies in Microgrid Management. A state of Art

Revista: Proceedings del V Congreso Iberoamericano de Ciudades Inteligentes (ICSC-CITIES 2022)

Fecha de publicación: noviembre 2022

Autores: Izquierdo-Monge, O.; Fraile Martín, I., Martín Rodríguez, G.M., Hernández-Callejo, L; Zorita-Lamadrid, A. y Peña-Carro, P.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	3
PRÓLOGO.....	4
TABLA DE CONTENIDOS	8
ÍNDICE DE FIGURAS	9
RESUMEN.....	10
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
1.1.- Marco conceptual	11
1.3.- Hipótesis y Objetivos	16
1.4.- Principales contribuciones.....	17
1.5.- Metodología	18
1.6.- Resultados y discusión.....	31
1.7.- Referencias.....	37
CAPÍTULO II. ARTÍCULOS PUBLICADOS	41
2.1.- Conversion of a Network Section with Loads, Storage Systems and Renewable Generation Sources into a Smart Microgrid	41
2.2.- Open Source Monitoring and Alarm System for Smart Microgrids Operation and Maintenance Management	42
2.3.- Methodology for energy management in a smart microgrid based on the efficiency of dispatchable renewable generation sources and distributed storage systems	43
CAPÍTULO III. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	44
3.1.- Conclusiones	44
3.2.- Trabajos futuros.....	46
ANEXO I: PUBLICACIONES ADICIONALES.....	48
AI.1.- Small wind turbines study and integration in a peri-urban microgrid	48
AI.2.- Integration of LFP-second life batteries as a storage in a smart microgrid	49
AI.3.- Low-Cost and Real-Time Measurement System for Electrical Energy Measuring of a Smart Microgrid.....	50
AI.4.- A Methodology for the Conversion of a Network Section with Generation Sources, Storage and Loads into an Electrical Microgrid Based on Raspberry Pi and Home Assistant.....	51
AI.5.- Development and Improvement of a Data Storage System in a Microgrid Environment with HomeAssistant and MariaDB	52
AI.6.- Control Strategies in Microgrid Management. A state of Art.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Esquema de la metodología empleada.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2. Distribución de la media tensión entre los centros de transformación de CEDER.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3. Esquema de bloques del sistema de gestión de energía de una microrred</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4 Curva de vertido a red con y sin programación.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 5. Curva generación - consumo con y sin sistemas de almacenamiento.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 6. Recarga de vehículos eléctricos con excedentes.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 7. Curva consumo red de la distribución utilizando almacenamiento y sin usarlo.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8. Panel de control del sistema de gestión de la microrred.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 9. Panel de control de un sistema de baterías de litio ferro fosfato.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 10. Ejemplo detección de fallos en instalación fotovoltaica.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 11. Consumo de la microrred, reducción del consumo de la red de distribución.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 12. Consumo de la microrred, eliminación picos de potencia.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 13. Relación entre los objetivos de la tesis doctoral y los artículos publicados.</i>	<i>44</i>

RESUMEN

Las microrredes son sistemas eléctricos de pequeña escala que pueden operar de manera independiente o conectarse a la red eléctrica principal, compuestas por fuentes de energía distribuida, sistemas de almacenamiento y consumos.

En los últimos años su importancia va en aumento debido a su capacidad para mejorar la fiabilidad del sistema eléctrico, otorgándoles resiliencia al garantizar un suministro continuo de energía en situaciones de emergencia. También facilitan la integración de las energías renovables en la red, optimizando el uso de recursos locales y empoderando por tanto a las comunidades locales al permitirles controlar su propia generación y distribución de energía, fomentando el desarrollo económico local y aumentando la seguridad energética y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

Además, su flexibilidad permite adaptarse rápidamente a cambios en la demanda y condiciones de generación, optimizando así la operación del sistema y aumentando su eficiencia.

En resumen, las microrredes son fundamentales para la transformación hacia sistemas eléctricos más eficientes, resilientes y descentralizados en la transición hacia un futuro energético más sostenible.

Esta tesis doctoral presenta un sistema de monitorización, control y gestión de microrredes que permite ver en tiempo real todos los valores de cada uno de los elementos de generación, sistemas de almacenamiento y consumos que forman parte de ella y controlar aquellos que lo permitan, mediante el envío de las consignas de operación deseadas en cada momento. Todos los datos monitorizados se almacenan en una base de datos para su posterior análisis que permita definir diferentes estrategias de gestión de la energía que mejoren el funcionamiento de la microrred. Además, se ha desarrollado un sistema de alarmas que avisa al operador de la microrred de cualquier incidencia que se produzca en la misma para reducir el tiempo de respuesta en las labores de mantenimiento y mejorar su funcionamiento.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1.- Marco conceptual

El grado de madurez alcanzado por las energías renovables está desencadenando un profundo cambio en el sistema energético actual, desplazando y sustituyendo a las tecnologías convencionales basadas en los combustibles fósiles [1][2]. La implementación de las energías renovables está siendo el eje vertebral para el cumplimiento de los objetivos marcados para la transición energética [3] al ser fuentes de energía limpia, sostenible y accesible. En este contexto de cambio, las microrredes eléctricas se postulan como un elemento principal en el diseño y ajuste del sistema eléctrico [4], pudiéndose definir como un grupo de cargas interconectadas y recursos energéticos distribuidos dentro de unos límites eléctricos claramente definidos que actúan como una única entidad controlable respecto a la red. Puede conectarse y desconectarse de la red de distribución para funcionar en modo red o en modo isla.

En aquellos puntos donde son implantadas, las microrredes representan una solución que garantiza el acceso a la energía eléctrica de forma continua y segura basándose en el uso de fuentes de generación renovable distribuidas y sistemas de almacenamiento distribuidos [2]. Además, el reciente desarrollo de las tecnologías de comunicación, información e inteligencia artificial y su integración en las microrredes significa una nueva evolución del concepto: las microrredes inteligentes [5-7].

Estas microrredes eléctricas van a desempeñar un papel crucial en el desarrollo de las redes eléctricas del futuro al proporcionar resiliencia y fiabilidad, integración de energías renovables, optimización del uso de energía, soporte a la electrificación descentralizada y apoyo a la red principal. Y además van a permitir una gestión más eficiente de la generación y consumo de energía a nivel local, facilitando la transición hacia un sistema eléctrico más flexible, sostenible y descentralizado.

Sin embargo, no siempre es sencillo transformar una red con elementos de generación, sistemas de almacenamiento y consumos en una microrred inteligente que puede gestionarse de manera eficiente. Existen diferentes soluciones y herramientas que permiten desarrollar un sistema de monitorización y control de una microrred, pero todas tienen un coste elevado tanto de hardware como de software y su implantación resulta compleja.

La monitorización y el control de una microrred presenta numerosos retos. Las microrredes pueden operarse conectadas con a la red de distribución, a través del punto de acoplamiento común, (PCC) o desconectadas de ella, en modo isla y también puede interconectarse entre sí, dando lugar a sistemas más complejos. Así, la microrred, necesita contar con un sistema de control, que permita operarla de manera estable eficiente desde un punto de vista económico en todos los escenarios que puedan producirse. El objetivo de este sistema de control será alcanzar el equilibrio entre generación y demanda, alimentando las cargas y almacenando los excedentes de energía para su posterior utilización. El grado de penetración de las microrredes en el sistema eléctrico y su aceptación vendrán determinados por los sistemas de control, ya que serán los responsables de alcanzar beneficios económicos y medioambientales que persiguen las microrredes.

Además, hay que tener presente que las limitaciones intrínsecas de las fuentes de energía renovable [8] suponen una serie de retos para la operatividad y control de las microrredes inteligentes. Y al igual que ocurre en la red, en la microrred inteligente pueden aparecer diferentes fenómenos [9][10], como el desajuste entre generación y

demanda por los picos de consumo prolongados [11,12]. Consecuentemente, para garantizar el correcto funcionamiento de las microrredes, es necesario realizar estrategias/metodologías de gestión de energía en la microrred inteligente [13]. Estas estrategias variarán de acuerdo con los condicionantes de cada microrred: topología, recursos disponibles, necesidades, limitaciones...[14,15] y/o del criterio empleado por cada gestor, teniendo siempre como objetivos principales garantizar el balance energético entre generación y demanda maximizando la eficiencia del sistema [16].

La estrategia de gestión más extendida se centra en la optimización de diversos aspectos económicos. Ésta estrategia trata de maximizar la eficiencia del sistema a la par que se minimizan los costes, siendo el coste de operación uno de los indicadores más estudiados para la gestión energética de las microrredes. En ocasiones se plantea el sistema de gestión de la energía de una microrred, para minimizar los costes de operación a través de la programación de las cargas [17]. En otras ocasiones se minimizan los costes de operación reduciendo las fuentes de generación basadas en los combustibles fósiles [18]. Con el sistema de gestión se optimizan los costes según las condiciones de operación existentes para coordinar eficazmente tanto los recursos energéticos gestionables como los no gestionables y así mantener la estabilidad de la microrred [19].

El coste de energía es empleado en otras estrategias de gestión para comparar el desempeño generador de una microrred con la tarifa eléctrica [20]. Estos sistemas de gestión realizan la conexión de la microrred a la red consumiendo de ella cuando el precio de la energía es bajo. Durante estos periodos la generación se destina a la carga de los sistemas de almacenamiento de energía, descargándolos en los periodos en los que el precio de la electricidad es elevado. Esta estrategia basada en los precios del mercado se denomina arbitraje energético [16] y es de las principales formas de aumentar la eficiencia del sistema y optimizar el rendimiento económico [11].

Otra de las principales estrategias de operación de las microrredes se centra en realizar la gestión desde el lado de la demanda. Esta metodología se centra en la integración y la participación activa de los usuarios en la gestión para optimizar el consumo energético [22]. Ésta optimización y aumento de la eficiencia energética se puede conseguir a través de un sistema de gestión con diferentes estrategias: realizando la mejor asignación del recurso posible coordinando el lado de la demanda [23]. Se puede emplear un criterio diferente donde se determina el perfil de las cargas a partir de predicciones de generación [24]. Por otra parte, ante casos en los que se den escenarios de escasez de recurso se puede aplicar metodologías como el energy curtailment [25].

La gestión desde el lado de la demanda tiene como extensión la estrategia de respuesta a la demanda [26], donde la gestión busca un cambio en los patrones de consumo de los usuarios por cuestiones económicas. De este modo, se implementan sobre el consumo incentivos económicos y se establece una comunicación bidireccional con la red en tiempo real, conectando y desconectando la microrred según los costes de operación y el periodo de tarificación eléctrica. Este tipo de gestión interconecta los objetivos de eficiencia económica y energética además del propósito de minimizar la demanda energética durante periodos de alto consumo y/o baja generación [27].

Otro criterio de gestión empleado en las estrategias de gestión energética de microrredes es el de maximizar la generación renovable. Por ello, es necesario buscar la mejor combinación de fuentes de generación renovable disponibles, integrando tecnologías complementarias para evitar los valles de generación [28] que desajusten el balance energético. Paralelamente a otras estrategias, la maximización de los recursos renovables de la microrred puede estar orientada a distintos objetivos y criterios. En el marco de la transición energética y la descarbonización, uno de estos

objetivos es reducir la dependencia en los combustibles fósiles para alcanzar microrredes 100% renovables [29] y [18]. Además, tomando ventaja de la competitividad económica de las energías renovables frente a las fuentes de energía convencional [1][3], implementar sistemas de gestión que maximicen el uso de las energías renovables conlleva una reducción en los costes operativos [20][30]. Consecuentemente, maximizar la generación y consumo a partir de fuentes de generación renovables distribuidas en la microrredes tiene como resultado la capacidad de operar durante extensos intervalos temporales bajo un régimen de autoconsumo [31][32].

La siguiente metodología de gestión energética de las microrredes se centra en la operación de las baterías. En todos los casos destacados, la gestión energética de las microrredes comparte como elemento común la utilización de sistemas de almacenamiento de energía, siendo las baterías la tecnología más extendida. Estos equipos permiten equilibrar la producción y consumo, aportan flexibilidad al sistema y aumentan el aprovechamiento energético [33]. Esto se traduce en un aumento de la eficiencia económica y una reducción de los costes totales de operación [34]. La optimización económica se alcanza adecuando la carga y descarga de las baterías al precio entre la generación y la tasa de remuneración [35]. Este caso de estudio destaca cómo el estado de carga y la capacidad utilizable de la batería pueden limitar la rentabilidad de este sistema de gestión de energía [36]. Cuando se comparan distintos sistemas de gestión, la metodología óptima es la basada en el ciclo de carga de las baterías [37]. También existen casos donde la gestión de la energía tiene como objetivo el cuidado de las baterías, buscando extender su vida útil y optimizar el rendimiento a lo largo de esta [38].

Teniendo como objetivo principal la estabilidad de la microrred, la estrategia de seguimiento de la carga se basa en el ajuste de la generación por parte del operador/gestor de la microrred para satisfacer las demandas de consumo en todo momento, respondiendo en tiempo real a las variaciones, y mantener el balance energético. En los casos existentes de microrredes aisladas, las cuales disponen de recursos y fuentes de generación limitadas [39], tienen como principal criterio de gestión este tipo de estrategia para garantizar el suministro energético a las cargas [40]. En las microrredes conectadas a red, la estabilidad no es tan sensible como en el caso aislado. Sin embargo, es cierto que puede verse afectada por los fenómenos provenientes de la red. En los casos con conexión en los que garantizar la estabilidad sea un factor crítico, la implementación de la estrategia de seguimiento de la carga para cubrir las variaciones de demanda puede ser el objetivo único [41][19]. No obstante, esta estrategia suele ser complementada con otros criterios de gestión como la minimización de costes, el incremento de la vida de los equipos [31], el cumplimiento de las predicciones de consumo [42] o la optimización de la carga de las baterías de equipos específicos como los coches eléctricos [43].

Para finalizar, se muestran dos metodologías centradas en los picos de consumo. Una estrategia de gestión implementada para reducir los efectos este fenómeno sobre la microrred es la relocalización de cargas. El enfoque de esta metodología se basa en la identificación de las cargas flexibles y programables del sistema y su utilización para ajustar de manera global el balance energético. El principio de funcionamiento se basa en programar la activación/puesta en marcha de las cargas generadoras de picos, y que previamente han sido identificadas como gestionables en los diferentes periodos de bajo consumo, de tal manera que el incremento de demanda no genere picos de desajuste en estos periodos y sea asumible por la generación [44]. Por ello, a través de la implementación de esta estrategia, se persigue establecer la mejor organización y programación de las cargas en la microrred, maximizando la eficiencia y la estabilidad [45]. Estos sistemas de gestión son especialmente interesantes en las microrredes ya

MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y CONSUMOS EN UNA MICRORRED

que permiten la integración eficiente de nuevas cargas tales como los vehículos eléctricos [46].

Por otro lado, la estrategia de reducción de picos de consumo tiene como base la eliminación total, o en su defecto la reducción de los picos de consumo gestionando la energía almacenada en los sistemas de almacenamiento de energía [16][47]. Estos picos pueden tener efectos especialmente perjudiciales para la microrred, ya que representan una amenaza para su estabilidad al desequilibrar significativamente la relación entre generación y demanda durante lapsos temporales que pueden alcanzar hasta varias horas de duración [11], siendo especialmente característicos a determinadas franjas horarias. De igual modo, el efecto más significativo de los picos es el gran incremento en los costes de operación al ocurrir en franjas horarias características que coinciden con los de alta tarificación donde el precio de la energía es más alto. Por ello, esta estrategia de gestión es empleada para evitar este efecto al ser especialmente beneficiosa en términos técnicos y económicos [48]. Esta aplicación es exactamente la implementada en los sistemas de gestión donde se ha tratado de minimizar el coste de energía y el coste de operación [49]. De nuevo, la tecnología que desempeña la función de sistemas de almacenamiento de energía para contrarrestar los picos son las baterías [50][51].

1.2.- Motivación

En un contexto energético actual donde la transición hacia fuentes de energía limpias es imperativa, las microrredes eléctricas se presentan como una solución prometedora para mejorar la eficiencia, la resiliencia y la integración de energías renovables en sistemas energéticos locales.

La implementación de estas microrredes eléctricas como elementos fundamentales en la transición hacia las redes eléctricas del futuro, más inteligentes y sostenibles, presenta varios desafíos importantes.

Uno de estos retos es la gestión eficiente de las fuentes de energía renovables (principalmente fotovoltaica y eólica) que son variables y están muy distribuidas. Esto requiere de complejos sistemas de monitorización, control y gestión y del desarrollo de tecnologías avanzadas de gestión de la energía, así como sistemas de almacenamiento de energía que permitan equilibrar la oferta y la demanda.

Otro desafío crítico es la necesidad de establecer estándares comunes y protocolos de comunicación para garantizar la interoperabilidad entre los diversos componentes de las microrredes. La falta de estándares puede dificultar la integración de sistemas y limitar la eficiencia operativa de la red en su conjunto. Además, la resiliencia y la fiabilidad de las microrredes frente a eventos climáticos extremos y otros riesgos deben ser prioridades, lo que implica la implementación de estrategias de redundancia y sistemas de respaldo robustos.

En el ámbito regulatorio y político, se requieren marcos normativos flexibles y favorables que fomenten la innovación y la inversión en microrredes eléctricas. Esto incluye la creación de incentivos para la adopción de tecnologías sostenibles, así como la promoción de modelos de negocio que faciliten la financiación de proyectos de microrredes. Además, la ciberseguridad emerge como una preocupación crítica, dada la creciente interconexión de dispositivos y la digitalización de las infraestructuras energéticas.

Para superar todos estos desafíos se requiere un enfoque holístico que combine innovación tecnológica, colaboración entre las partes interesadas (públicas y privadas), y políticas regulatorias favorables que impulsen la expansión de las microrredes eléctricas.

Debido a lo anterior, esta tesis doctoral se centra en el desarrollo de sistemas de monitorización, control y gestión de la energía en microrredes eléctricas que contribuyan a la integración de las microrredes en el sistema energético.

1.3.- Hipótesis y Objetivos

Hipótesis

La monitorización y el control de los elementos de generación, los sistemas de almacenamiento y los consumos en una red eléctrica son claves para convertirla en una microrred inteligente y mejorar su gestión, permitiendo optimizar su eficiencia y reducir los costes de operación y mantenimiento, así como el coste de la electricidad.

Objetivo principal

Desarrollar un sistema de monitorización y control de una red que permita convertirla en una microrred y realizar la gestión de las fuentes de generación, los sistemas de almacenamiento y consumos conectados a ella.

Objetivos parciales

Para alcanzar el objetivo general, se requiere el cumplimiento de una serie de objetivos parciales:

1. Estudio del estado del arte de las metodologías y las herramientas de monitorización y control existentes para convertir un tramo de red con elementos de generación, sistemas de almacenamiento y consumos en una microrred inteligente y de los diferentes métodos en la gestión de microrredes, incluyendo sus diferentes objetivos.
2. Desarrollar una metodología para convertir una red con elementos de generación, sistemas de almacenamiento y consumos en una microrred inteligente, que permita su monitorización en tiempo real y el control de sus componentes.
3. Desarrollar, a partir de la monitorización de los equipos, un sistema de supervisión y alarmas para la operación y el mantenimiento de una microrred.
4. Desarrollar diferentes metodologías para la gestión de la energía en una microrred.

1.4.- Principales contribuciones

Las principales aportaciones de la investigación llevada a cabo durante el desarrollo de esta tesis doctoral son las siguientes:

- Una metodología para convertir una red con elementos de generación, sistemas de almacenamiento y consumos en una microrred inteligente.
- Un sistema de medida en tiempo real de la energía consumida por una microrred inteligente de la red de distribución de bajo coste.
- Un sistema de almacenamiento de datos de una microrred con HomeAssistant y MariaDB.
- Un sistema de supervisión y alarmas para la operación y el mantenimiento de una microrred.
- Una estrategia de gestión en microrredes sin almacenamiento para evitar vertidos a la red de distribución.
- Una estrategia de gestión en microrredes para la recarga de vehículos eléctricos con excedentes de energía.
- Una metodología para la gestión de la energía en una microrred basada en la eficiencia de los sistemas de almacenamiento integrados en la microrred.
- Una metodología para la gestión de la energía en una microrred basada en los tiempos de respuesta de los sistemas de almacenamiento en la microrred.

1.5.- Metodología

Esta sección explica la metodología seguida en el desarrollo de la tesis doctoral, así como los elementos utilizados para desarrollar un sistema de monitorización y control de una red que permita realizar la gestión de las fuentes de generación, los sistemas de almacenamiento y consumos conectados a ella. Esta metodología está dividida en cuatro etapas se muestra en la Figura 1.

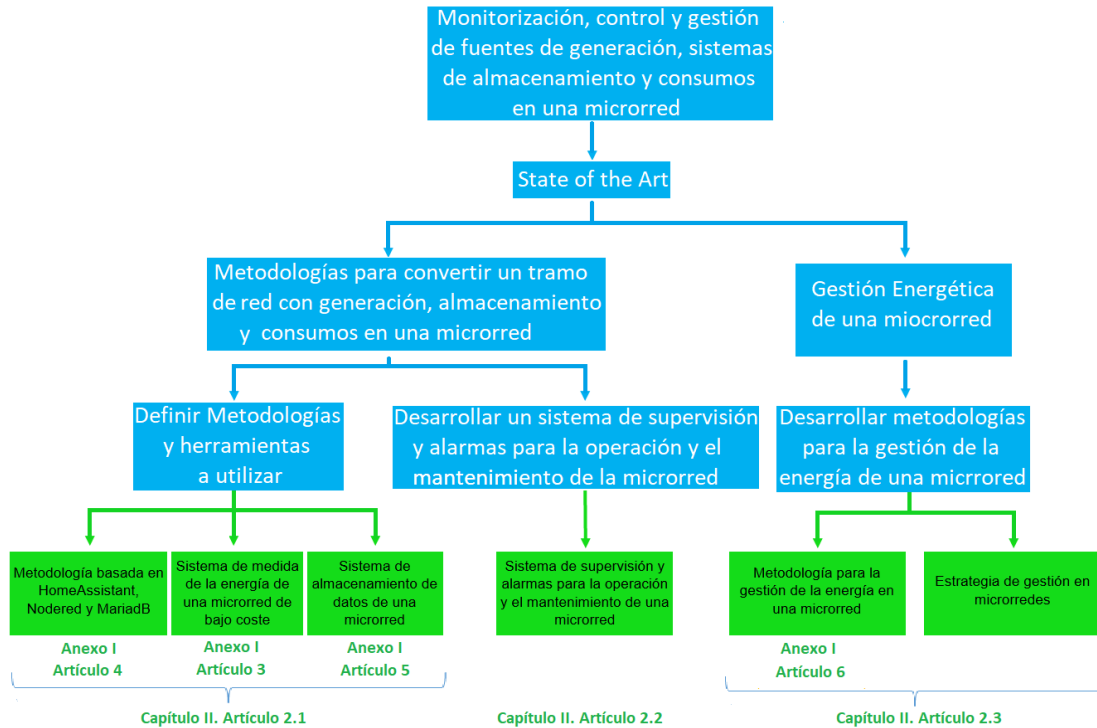


Figura 1. Esquema de la metodología empleada.

En la primera etapa se realizó un estudio del estado del arte que comenzó con una revisión de la literatura, que ayudó a conocer las metodologías para dotar de inteligencia a una red con elementos de generación, sistemas de almacenamiento y consumos y las estrategias de gestión energética en microrredes.

La segunda etapa corresponde al desarrollo del sistema de monitorización y control de una red con todos sus elementos de generación, almacenamiento y consumos.

La tercera etapa consistió en la aplicación de estrategias de gestión a la microrred eléctrica del Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER) basadas en el análisis de los datos recogidos en la etapa anterior.

La cuarta y última etapa fue la difusión de los resultados de la investigación realizada.

1.5.1.- Estudio del estado del arte

La revisión bibliográfica de este trabajo consta de dos partes. En la primera parte se realizó un estudio del arte de las metodologías y las herramientas de monitorización y control que permiten convertir un tramo de red eléctrica con elementos de generación, sistemas de almacenamiento y consumos en una microrred inteligente.

MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y CONSUMOS EN UNA MICRORRED

Durante este estudio se detectó que las tecnologías de comunicación más utilizadas son Zigbee, WLAN/Wifi, Comunicación serie (Ethernet/RS-232), WiMAX, Power line y GSM/GPRS. Además, se identificó el uso de Arduinos y Raspberrys como hardware de bajo coste como parte de los sistemas de medición necesarios para el control de las microrredes.

En cuanto al software para monitorizar y controlar los elementos de la microrred, se vieron herramientas como Advance EMS - Platform, ETAP Energy Management System, Monarch TM - Open Systems International, Wattics, etc., Todos ellos requieren el pago de una licencia y no permiten modificación por parte del usuario de la microrred.

Por ello se decidió desarrollar un software propio que pudiese ir adaptándose a los cambios que se produjeran en la microrred con el paso del tiempo (integración de nuevos elementos, eliminación de sistemas obsoletos, etc.). Y se observó que los programas que se utilizan más habitualmente para esta finalidad son Matlab, Labview, Simulink y Python, que permiten el desarrollo de código a medida, por lo que se pueden adaptar a cada caso particular.

En nuestro caso, se decidió utilizar una herramienta menos habitual para este fin, como es HomeAssistant debido a que se trata de un software de código abierto y por tanto gratuito, y sencillo de utilizar porque tiene un interfaz gráfico muy intuitivo que facilita el trabajo de programación.

Este primer estado del arte centrado en las metodologías y herramientas para monitorización y control de microrredes eléctricas forma parte del artículo:

A Methodology for the Conversion of a Network Section with Generation Sources, Storage and Loads into an Electrical Microgrid Based on Raspberry Pi and Home Assistant. (Anexo I, Artículo 4).

En la segunda parte se realizó un estudio del arte de la gestión energética de microrredes, que ayudó a conocer las diferentes estrategias de gestión utilizadas y los objetivos que persigue cada una de ellas.

Durante este estudio se observó que se pueden establecer estrategias de control atendiendo a diferentes aspectos entre los que destacan el aseguramiento de la estabilidad del sistema, maximizar la generación de fuentes de generación renovables, gestión desde el lado de la demanda, maximizar la vida útil de los sistemas de almacenamiento, el seguimiento de las cargas, la relocalización de cargas, la reducción de picos de consumo y por supuesto la estrategia para la reducción del coste de la energía que es en la que se va a centrar este trabajo.

Este segundo estado del arte, enfocado en la gestión de la energía forma parte de la comunicación:

Control Strategies in Microgrid Management. A state of Art (Anexo I, Artículo 6).

1.5.2.- Desarrollo del sistema de monitorización y control

Para la realización de esta tesis doctoral se ha utilizado la red eléctrica de CEDER ubicado en Lobia, provincia de Soria y que pertenece al Centro de Investigación Energéticas, Ambientales y Tecnológicas (C.I.E.M.A.T.).

MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y CONSUMOS EN UNA MICRORRED

La red de CEDER parte de una línea de distribución de 45 kV que da servicio a una subestación de 1.000 kVA y 45/15 kV y desde ahí se distribuye en media tensión mediante una red subterránea a 8 centros de transformación que ajustan el voltaje a 400 V de baja tensión trifásica (Figura 2). La red puede operar tanto en anillo como de modo radial, y tiene una longitud de unos 4.200 metros. Todos los elementos de generación, sistemas de almacenamiento y consumos que veremos más adelante están conectados a baja tensión (trifásica o monofásica).

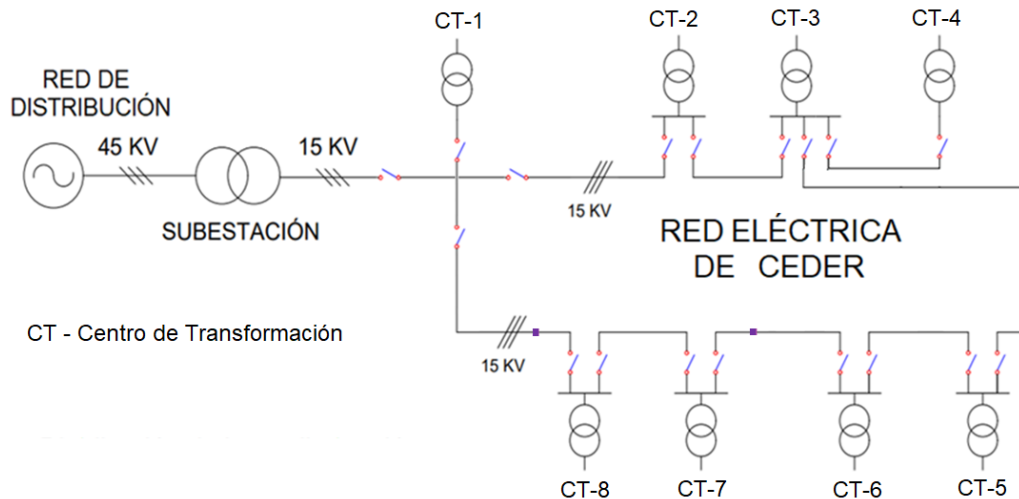


Figura 2. Distribución de la media tensión entre los centros de transformación de CEDER.

Para poder llevar a cabo una gestión eficiente de una microrred, el primer paso es definirla y caracterizarla, teniendo en cuenta las fuentes de generación y los sistemas de almacenamiento que se van a utilizar, así como los consumos existentes en la misma.

Al comienzo de este trabajo, a la red eléctrica de CEDER estaban conectados 7 sistemas fotovoltaicos, al que luego se añadieron otros cuatro como señalaremos posteriormente. Estos 7 sistemas fotovoltaicos iniciales son los siguientes

- PV "Edificio 1": 80 módulos monocristalinos de 150 W cada uno. Potencia total instalada 12 kW. Conectado a un inversor de 10 kW en el CT-1. Están montados en una estructura sobre la cubierta del edificio con un ángulo de inclinación fijo de 32°.
- PV "Edificio 3": 36 módulos monocristalinos de 240 W y 18 módulos policristalinos de 230 W cada uno. Potencia total instalada 12,78 kW. Conectado a un inversor de 10 kW en el CT-3. Están montados en una estructura sobre la cubierta del edificio con un ángulo de inclinación fijo de 32°.
- PV "Edificio 9": 238 módulos policristalinos de 97 W cada uno. Potencia total instalada 23,09 kW. Conectado a un inversor de 20 kW en el CT-3. Están integrados en la cubierta del edificio con un ángulo de inclinación fijo de 10°.
- PV "Edificio LECA 1": 63 módulos policristalinos de 310 W cada uno. Potencia total instalada 19,53 kW. Conectado a un inversor de 20 kW en el CT-4. Están integrados en la cubierta del edificio con un ángulo de inclinación fijo de 24°.
- PV "Edificio LECA 2": 63 módulos policristalinos de 310 W cada uno. Potencia total instalada 19,53 kW. Conectado a un inversor de 20 kW en el CT-4. Están integrados en la cubierta del edificio con un ángulo de inclinación fijo de 24°.

MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y CONSUMOS EN UNA MICRORRED

- PV “Edificio Turbina”: 64 módulos monocristalinos de 250 W cada uno. Potencia total instalada 16 kW. Conectado a un inversor de 15 kW en el CT-4. Están instaladas en suelo en una estructura de ángulo variable manualmente para poder hacer seguimiento estacional.
- PV “Planta Ensayos III”: 24 módulos policristalinos de 210 W cada uno. Potencia total instalada 5,04 kW. Conectado a un inversor de 5 kW en el CT-8. Están instaladas en suelo en una estructura de ángulo variable manualmente para poder hacer seguimiento estacional.

Estos sistemas fotovoltaicos permitían ver valores de generación utilizando el software Ingecon Sun manager que se comunicaba con los inversores Ingeteam de cada uno de ellos.

Además de las fuentes de generación, estaba conectado a la red de CEDER un sistema de almacenamiento de baterías de Pb-ácido:

- Baterías Pb-Acido Planta Ensayos I: Está formado por una bancada de baterías de 120 vasos Tudor OPZS de 2 V cada uno. La capacidad es de las celdas 1080 Ah a 120 horas (C120) o bien 807 Ah para 10 horas (C10). Está conectado a un inversor/cargador/regulador desarrollado por CEDER conjuntamente con el CIRCE de 50 kW. Conectado al CT-5.

Este sistema funcionaba en modo local, es decir, solo se podía monitorizar y controlar con un software desarrollado ad-hoc para su control desde un ordenador conectado mediante un cable RS485 con el inversor/regulador.

En cuanto a las cargas de la red, podía verse el consumo/vertido en cada uno de los centros de transformación gracias a 8 analizadores de red (modelo PQUBE) instalados en cada uno de ellos, mediante un servidor web del propio analizador de red. Sin embargo, no se conocía el consumo total de la red porque los analizadores de red estaban conectados en el lado de baja tensión y no se conoce su consumo ni las pérdidas debidas al cableado a lo largo de los más de 4 kilómetros de la red y tampoco se tenía acceso en tiempo real al medidor de la empresa de distribución.

Para poder gestionar la energía, es necesario integrar los elementos de generación, los sistemas de almacenamiento y los consumos en el sistema de monitorización y control en la microrred. Así tendremos una comunicación interactiva entre el operador de la microrred y cada uno de sus elementos, permitiendo la visualización de los datos de cada uno de ellos en tiempo real, el almacenamiento de la información en una base de datos que permita su estudio posterior y la transmisión de consignas para gestionar la microrred.

Un ejemplo de integración de fuentes de generación en una microrred, en este caso de un aerogenerador de pequeña potencia en un entorno periurbano, se recoge en el artículo:

*Small wind turbines study and integration in a peri-urban microgrid.
(Anexo I, Artículo 1).*

En él se describen cuáles son los criterios para determinar la ubicación de un aerogenerador de pequeña potencia (adecuados para una microrred) en una localización determinada, como debe realizarse la selección del aerogenerador en función de las condiciones del recurso eólico en el emplazamiento, como llevar a cabo

MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y CONSUMOS EN UNA MICRORRED

la instalación y conexión a la red del aerogenerador y, por último, se explica cómo realizar la integración del aerogenerador en el sistema de gestión de la microrred.

Así mismo, un ejemplo de integración de sistemas de almacenamiento se presenta en el artículo:

Integration of LFP-second life batteries as a storage in a smart microgrid. (Anexo I, Artículo 2).

En este artículo se hace un estudio similar al anterior, pero para un sistema de almacenamiento basado en baterías de ion litio (en este caso baterías de litio-ferro-fosfato, LFP, en una segunda vida). Se presenta como realizar la recuperación de las celdas dañadas durante la primera vida de las baterías y como realizar su integración en el sistema de gestión de la microrred.

También es necesario conocer los consumos de la microrred, es decir las cargas que están conectadas a ella y que pueden demandar energía. En caso de disponer de un medidor inteligente de la empresa de distribución en el punto de acoplamiento común de la microrred con la red de distribución se podría acceder a él para conocer los valores de los consumos, sin embargo, esto no siempre es posible. Además, estos medidores no proporcionan información en tiempo real, por lo que muchas veces es necesario desarrollar un sistema de medida propio que permita conocer en tiempo real el comportamiento de la microrred respecto de la red de distribución (demanda energía/inyecta energía), para la toma de decisiones instantáneas. Esta cuestión se presenta en el artículo:

Low-Cost and Real-Time Measurement System for Electrical Energy Measuring of a Smart Microgrid. (Anexo I, Artículo 3).

En este artículo se presenta un sistema de medida basado en un sensor de infrarrojos y un Arduino, con un software específico, desarrollado para conocer el valor de la potencia instantánea consumida o inyectada por la microrred a la red de distribución, a partir de la lectura del LED indicador de metrología del medidor de la compañía distribuidora. El error en la medida es inferior al 2% diario. Esto supone una importante mejora en el conocimiento del consumo energético de la microrred.

Una vez definida la microrred y conocidos todos los elementos de generación, sistemas de almacenamiento y los consumos que forma parte de ella, es necesario establecer la comunicación con cada uno de esos elementos, para poder monitorizarlos en tiempo real y desarrollar un sistema de gestión de la energía que permita optimizar su funcionamiento.

En los artículos siguientes se presenta una metodología para convertir un tramo de red con elementos de generación, almacenamiento y consumos en una microrred y dotarla de inteligencia:

Conversion of a Network Section with Loads, Storage Systems and Renewable Generation Sources into a Smart Microgrid. (Capítulo II, Artículo 2.1).

En este artículo se explica cómo comunicarse con diferentes elementos de generación, sistema de almacenamiento y consumos para monitorizarlos e integrarlos en el sistema de gestión de energía de la microrred.

MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y CONSUMOS EN UNA MICRORRED

Inicialmente se desarrolló una metodología de bajo coste utilizando una Raspberry y software de código abierto obteniéndose excelentes resultados. Pero a medida que la microrred crecía en número de elementos conectados se vio la necesidad sustituir la Raspberry por un clúster de servidores. Esto ha conferido una mayor fluidez al sistema de gestión dado que el servidor tiene mucha más potencia de computación y seguridad ante posibles fallos puesto que, al estar el servidor con el software en un clúster, si falla el servidor, el sistema de gestión de energía sigue funcionando en otro servidor del mismo clúster. Además, también se ha conseguido mayor seguridad frente al suministro de energía, puesto que el clúster de servidores está conectado a un sistema de alimentación ininterrumpida para evitar pérdidas de datos o apagado de equipos en caso de un corte de suministro eléctrico.

Al sistema de monitorización y control inicial con los elementos descritos anteriormente, se le fueron añadiendo nuevos elementos de generación y sistemas de almacenamiento para dar más flexibilidad a la red que permita una mejor gestión y también se monitorizan las cargas más significativas separadas de los centros de transformación para tener más información acerca de los consumos.

A los siete sistemas fotovoltaicos iniciales han añadido otros cuatro:

- PV “Edificio 2”: 10 módulos monocristalinos de 450 W cada uno. Potencia total instalada 4,5 kW. Conectado a un inversor de 5 kW en el CT-2. Están integrados en la cubierta de una pérgola de aparcamiento con un ángulo de inclinación fijo de 5°.
- PV “Edificio Central Térmica”: 56 módulos monocristalinos de 360 W cada uno. Potencia total instalada 20,16 kW. Conectado a un inversor de 20 kW en el CT-1. Están integrados en la cubierta del edificio con un ángulo de inclinación fijo de 15°.
- PV “Planta Ensayos II”: 52 módulos monocristalinos de 410 W cada uno. Potencia total instalada 21,32 kW. Conectado a un inversor de 20 kW en el CT-6. Están instaladas en suelo en una estructura con un ángulo de inclinación fijo de 35°.
- PV “Ríos renovables”: 56 módulos monocristalinos bifaciales de 540 W cada uno. Potencia total instalada 30,24 kW. Conectado a un inversor de 30 kW en el CT-2. Están instaladas en suelo en una estructura con seguidor solar diario.

Respecto de la generación eólica, se han integrado cinco aerogeneradores de pequeña potencia (uno de ellos el descrito en Anexo I Artículo 1), todo ellos aerogeneradores tripala de eje horizontal:

- Aerogenerador Atlantic AOC: Potencia 50 kW. Diámetro de rotor 15 m. Altura de torre 25 m. Funciona a sotavento. Conectado al CT-5.
- Aerogenerador Norvento NED100: Potencia 100 kW. Diámetro de rotor 22 m. Altura de torre 40 m. Funciona a barlovento. Conectado al CT-7.
- Aerogenerador Ennera Windera S: Potencia 4,2 kW. Diámetro de rotor 4,36 m. Altura de torre 12 m. Funciona a barlovento. Conectado al CT-6.
- Aerogenerador Ennera: Potencia 3,5 kW. Diámetro de rotor 4,36 m. Altura de torre 12 m. Funciona a barlovento. Conectado al CT-6.

MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y CONSUMOS EN UNA MICRORRED

- Aerogenerador Ryse E5: Potencia 3,5 kW. Diámetro de rotor 4,3 m. Altura de torre 10 m. Funciona a barlovento. Conectado al CT-6.

También se ha integrado un sistema de turbinado-bombeo formado por los siguientes elementos:

- Turbina Pelton acoplada a generador trifásico asíncrono de 60 kW, con instrucciones de potencia activa y regulación a través de inyectores de flujo continuo
- Tres depósitos de agua con capacidad total de 200 m³ y un desnivel de 65 metros.
- Sistema de bombeo formado por 4 bombas verticales de 7.5 kW cada una.

Por último, se ha incluido un grupo electrógeno para poder funcionar en modo isla, aislado de la red de distribución, de 100 kVA.

En cuanto al almacenamiento, se ha aumentado su capacidad con dos nuevos sistemas, el descrito en Anexo I Artículo 2 presentado anteriormente y el que se indica a continuación:

- Baterías Pb-Acido Planta Ensayos II: Está formado por una bancada de baterías de 120 vasos Tudor OPZS de 2 V cada uno. La capacidad es de las celdas 765 Ah a 120 horas (C120). Está conectado a un inversor/cargador/regulador desarrollado por CEDER conjuntamente con el CIRCE de 20 kW. Conectado al CT-6.
- Baterías Litio Ferro Fosfato (LFP): Formado por dos racks de 14 módulos cada uno. Cada módulo tiene 14 celdas de 50 Ah cada una, para un total de 196 celdas por rack. Está conectado a un inversor/cargador/regulador de 20 kW. Conectado al CT-4.

En cuanto a los consumos, se han instalado analizadores de red en los equipos de mayor consumo, como plantas de molienda, triturado, secado y pelletizado de biomasa, y se incluyen dos vehículos eléctricos como cargas, una Renault Kangoo y un Nissan Leaf.

Cuando todos los elementos están comunicados con el sistema de gestión de energía y se tienen valores en tiempo real de cada uno de ellos, es muy importante almacenar esos valores en una base de datos que permita su posterior análisis, para la definición de estrategias a medio y largo plazo que mejoren la eficiencia energética de la microrred, como se explica en el artículo:

Development and Improvement of a Data Storage System in a Microgrid Environment with HomeAssistant and MariaDB. (Anexo I, Artículo 5).

Este documento explica el proceso para almacenar datos recogidos a través de un software de monitorización y control de una microrred. También se detalla la estructura del sistema de almacenamiento creado para un almacenamiento robusto de los datos en el Sistema Gestor de Bases de Datos, y cómo corregir los diferentes errores típicos que se cometen en el proceso de desarrollo de este sistema de almacenamiento.

Al igual que con el hardware, el software también ha tenido que ir adaptándose al crecimiento de la microrred utilizada para la realización de esta tesis. Inicialmente se

utilizaba únicamente software HomeAssistant para comunicar, monitorizar y almacenar los datos, pero a medida que aumentaba el número de elementos que integraban la microrred, el sistema de gestión perdía fluidez y capacidad de respuesta por lo que hubo que ir haciendo modificaciones hasta llegar al sistema de gestión actual que utiliza diferentes programas y está dividido en tres bloques (ver Figura 2):

- Bloque de comunicaciones: Está basado en dos softwares libres de código abierto: NodeRed y un servidor de correo electrónico (Gmail) o de mensajería móvil (Whatsapp o Telegram).
 - NodeRed: integra diferentes protocolos de comunicación (Modbus, MQTT, HTTP, etc.) que permite la conexión del sistema de gestión con los diferentes elementos de generación, sistemas de almacenamiento y consumos que forman una microrred. Así se puede recoger la información que se desee de cada uno de ellos y de mandarles las consignas de funcionamiento que se establezcan.
 - Telegram o Whatsapp: son servicio de mensajería instantánea, multiplataforma, basados en la nube y centralizados de acceso global, que proporcionan chats cifrados de extremo a extremo. Permite la comunicación del sistema de gestión con los operadores de la microrred mediante su teléfono móvil, para el envío de alarmas y de avisos relativos al funcionamiento de la microrred.
 - Gmail: servicio de correo electrónico que permite enviar email a los operadores de la microrred.

Para que este sistema funcione correctamente, es necesario realizar el despliegue de una red de comunicación que llegue a todos los elementos de la red. Para ello será necesario llevar la red hasta unos switches que permitan conectar cada uno de los elementos con el Centro de Procesamiento de Datos, es decir con el sistema de gestión de la microrred. Para distancias superiores a 100 metros se utiliza fibra óptica y para distancias inferiores se puede utilizar cable de par trenzado.

- Bloque de gestión (EMS): Está basado en un software libre de código abierto que funciona como un interfaz de usuario (HMI): HomeAssistant. Permite la monitorización en tiempo real de todos los elementos (generación, almacenamiento y consumo) que forman la microrred, dar consignas de funcionamiento a cada uno de ellos y programar las estrategias energéticas que definan los operadores de la red. Además, es accesible desde cualquier punto con conexión a internet.
- Bloque de almacenamiento de datos: Está basado en software libre de código abierto: MariaDB y en Samba.
 - MariaDB: Se trata de una base de datos relacional que permite el almacenamiento de la información de todos los elementos de generación, almacenamiento y consumo de la microrred para su análisis y tratamiento. Permite guardar valores instantáneos, es decir, datos por segundo en tiempo real gracias a eventos programados o hacer cálculos (medias minuto o medias 15-minutos, como los que suelen utilizar las

empresas distribuidoras de energía), todo esto mediante programas en SQL. Esto es importante porque, además de monitorizar en tiempo real para tomar decisiones inmediatas, es de gran interés almacenar y analizar los datos para establecer estrategias de gestión a medio y largo plazo.

- Samba: software libre que implementa el protocolo de archivos compartidos de Windows para Sistemas operativos de tipo UNIX. Permite guardar los archivos (*.csv) creados por la base de datos.

Cada programa está instalado en una máquina virtual en Linux que corre bajo hypervisor Hyper-V de Microsoft, y están montadas en un clúster con Storage Spaces Direct (S2D) de dos servidores físicos (con Windows Server 2019) por conmutación de error para dotarlas de alta disponibilidad al permitir que uno de los servidores falle o se apague para realizar actualizaciones o mantenimientos informáticos.

Esto proporciona resiliencia ante los posibles fallos de los discos al tener discos de espera activos y actuar sobre el sistema creando Cluster Shared Volume (CSV), donde están disponibles los datos y las máquinas virtuales para los dos servidores.

Los servidores están conectados entre sí y con la red de datos mediante tarjetas de red con dos puertos de fibra óptica de 10/25 Gb cada una para proporcionar:

- Disponibilidad a la hora de acceder a los sistemas por medio de los switches del centro de procesamiento de datos (CPD) en caso de fallo en algún puerto en uno de los dos extremos.
- Alta capacidad a la hora de migrar los recursos (como las máquinas virtuales o los discos compartidos de un servidor a otro).

Además, cada servidor tiene dos fuentes de alimentación, proporcionando redundancia a nivel de alimentación eléctrica.

La Figura 3 muestra el esquema del sistema de gestión desarrollado para esta tesis con los programas que lo componen y la relación entre ellos.

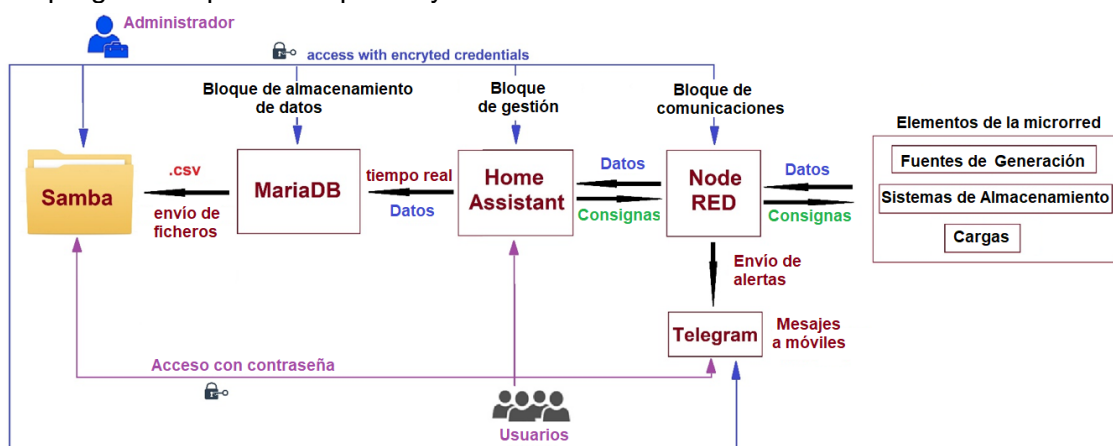


Figura 3. Esquema de bloques del sistema de gestión de energía de una microrred

El siguiente paso es definir los protocolos de operación y mantenimiento de la microrred para que todos los elementos estén operativos el mayor tiempo posible y conseguir así optimizar el funcionamiento de la microrred. Esto se detalla en el artículo:

Open Source Monitoring and Alarm System for Smart Microgrids Operation and Maintenance Management (Capítulo II, Artículo 2.2).

En él, se describe un sistema de monitorización y alarmas desarrollado para optimizar el funcionamiento y mantenimiento de una microrred basado en el software de código abierto definido anteriormente (NodeRed, HomeAssistant, MariaDB, y Telegram) que permite una fácil programación de alarmas y avisos. Este sistema es capaz de detectar fallos en los elementos de una microrred (fuentes de generación, sistemas de almacenamiento y cargas) y enviar mensajes al teléfono móvil del operador de la microrred y/o al personal de mantenimiento para solucionar el problema lo antes posible y reducir al mínimo los tiempos de parada. El software también permite gestionar el mantenimiento preventivo de la microrred enviando recordatorios periódicos sobre las tareas planificadas al personal de mantenimiento.

1.5.3.- Estrategias de gestión de la microrred

Cuando el sistema de monitorización y control de la microrred está plenamente desarrollado, es el momento de analizar la información recogida para poder definir las estrategias de gestión de la energía más adecuadas.

Inicialmente, el único sistema de almacenamiento era la bancada de baterías de plomo-ácido y tenía varios vasos dañados, por lo que no podía utilizarse. Por eso se programó el sistema de gestión para evitar excedentes de energía, de manera que regulaba la generación fotovoltaica para que no hubiera inyección a la red de distribución.

En la Figura 4 puede verse la curva de consumo en rojo, la de vertido real en azul con el programa en marcha, y en verde la curva de vertido si no se hubiera ejecutado el programa.

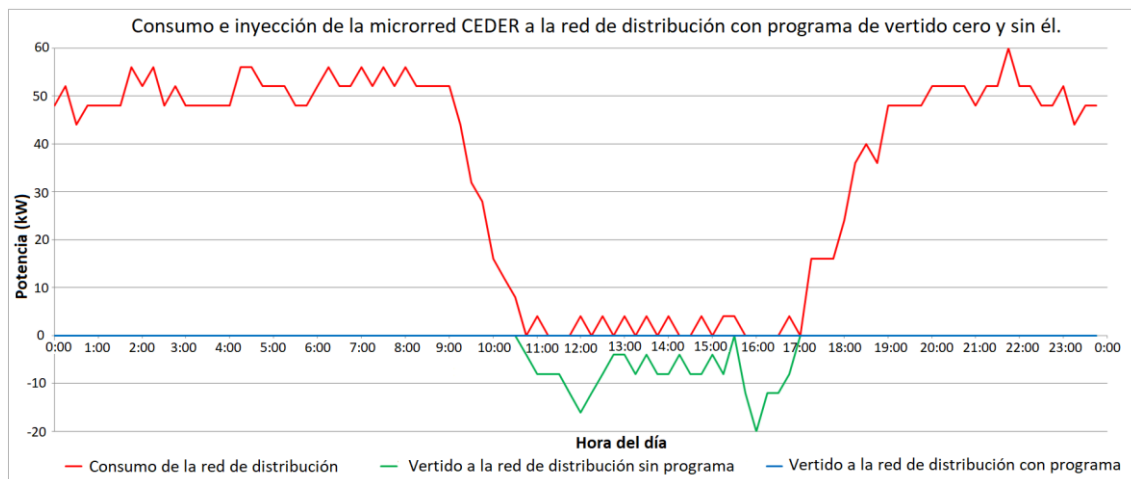


Figura 4 Curva de vertido a red con y sin programación.

Una vez que se integraron en la microrred elementos de almacenamiento con baterías y con bombeo hidráulico, se programó el sistema para que cuando la microrred tuviera excedentes de energía comenzara a almacenarla, cargando las baterías y bombeando agua del depósito inferior a los superiores, de tal manera que se van actualizando las consignas de carga de las baterías y de funcionamiento del sistema de bombeo en función de la energía inyectada de la microrred a la red de distribución para maximizar el almacenamiento.

MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y CONSUMOS EN UNA MICRORRED

En la Figura 5 puede verse la curva de generación, la curva de consumo utilizando los sistemas de almacenamiento (bombeo y baterías), y como sería la curva de consumo si no se hubiesen utilizado estos sistemas.

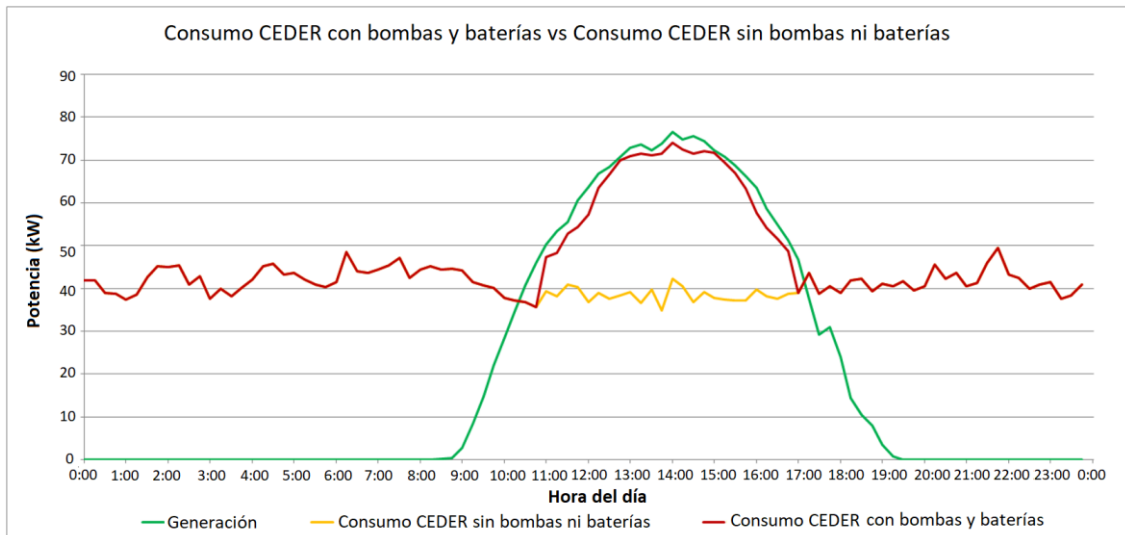


Figura 5. Curva generación - consumo con y sin sistemas de almacenamiento.

De igual manera, se ha programado el sistema para que la recarga de los vehículos eléctricos de CEDER se realice con excedente de energía, salvo en los casos que se requiera realizar un desplazamiento y el vehículo no tenga carga suficiente, en cuyo caso se realizaría una carga sin excedentes, intentando maximizar el uso de energía renovables o de la energía acumulada en los sistemas de almacenamiento.

En la Figura 6, incluida en este estudio, se ve como se realiza la carga de los vehículos solamente cuando hay excedentes de energía y se está vertido a la red de distribución.

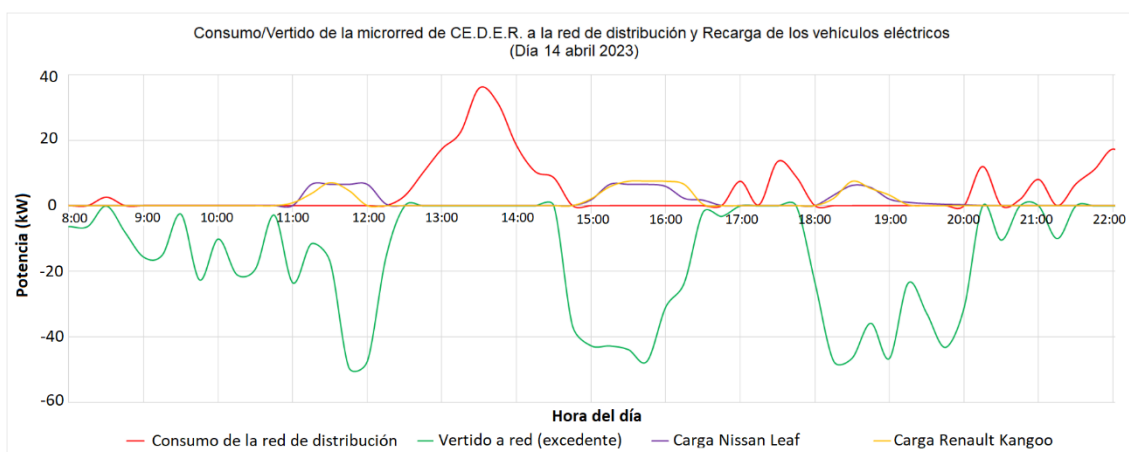


Figura 6. Recarga de vehículos eléctricos con excedentes.

A continuación, cuando el volumen de datos almacenados de la microrred permitió hacer un estudio de su funcionamiento (más de dos años, para evitar efectos estacionales y sucesos aislados) se comenzaron a definir nuevas estrategias de gestión para dar respuesta a los diferentes aspectos que vimos en el estudio del estado del arte, principalmente picos de potencia y ahorro de energía, basadas en diferentes criterios.

MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y CONSUMOS EN UNA MICRORRED

En este caso se propone un enfoque para gestionar el consumo de energía en una microrred aprovechando los sistemas de almacenamiento disponibles, optimizando su uso para reducir la energía consumida anualmente.

Otra estrategia estudiada durante el desarrollo de esta tesis, está recogida en el artículo:

Methodology for energy management in a smart microgrid based on the efficiency of dispatchable renewable generation sources and distributed storage systems. (Capítulo II, Artículo 2.3).

En él, se presenta una metodología para la gestión energética de una microrred inteligente basada en la eficiencia de las fuentes de generación gestionables y los sistemas de almacenamiento, con tres objetivos diferentes: eliminación de los picos de potencia; optimización del funcionamiento y rendimiento de la microrred; y reducción del consumo de energía de la red de distribución.

Con la aplicación de esta metodología se ha reducido el consumo significativamente en periodos de tarificación alta y se han eliminado los picos de potencia, permitiendo una reducción anual de más de 25.000 kWh al año. En la Figura 7 pueden verse las curvas de consumo de la red de distribución utilizando sistemas de almacenamiento (amarillo) y la curva que tendríamos sin utilizarlos (en rojo). El área verde es la energía ahorrada.

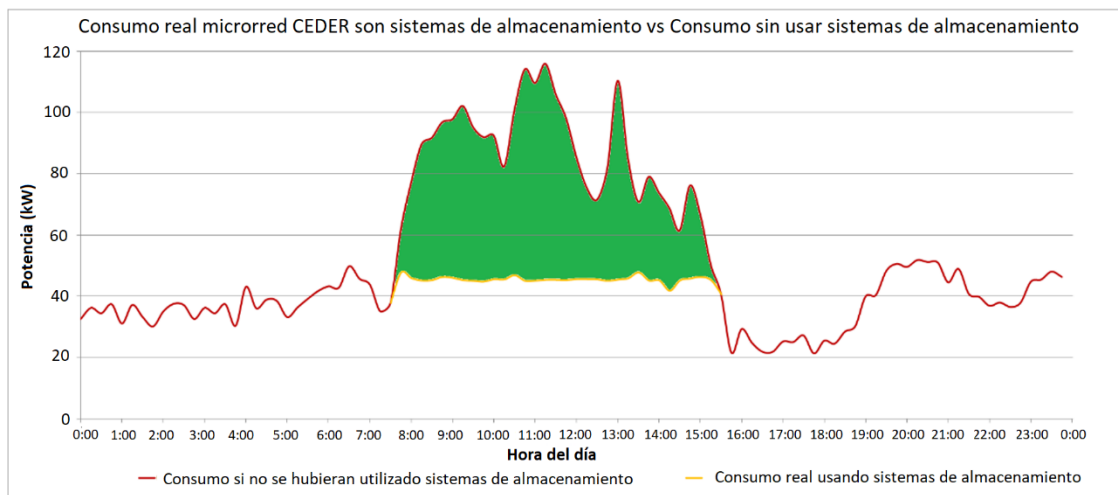


Figura 7. Curva consumo red de la distribución utilizando almacenamiento y sin usarlo.

Por último, se explora una gestión energética en una microrred inteligente con los mismos objetivos que en el artículo anterior, pero basada en el tiempo de respuesta de las fuentes de generación controlables y los sistemas de almacenamiento conectados a ella, en lugar de en su eficiencia. En este caso se ha conseguido eliminar eficazmente los picos de consumo y se ha reducido la demanda de la red de distribución, lo que se ha traducido en una disminución de la factura total de electricidad.

1.5.4.- Divulgación de los resultados

Una parte fundamental de la investigación es la difusión de los resultados obtenidos. Esta divulgación se ha ido realizando a lo largo de todo el desarrollo de la tesis doctoral y se ha intensificado al final de la misma una vez que se han obtenidos resultados de la aplicación de las diferentes estrategias de gestión, monitorización y control energética de la microrred. Esta fase también incluye la redacción del documento de tesis doctoral.

A continuación, se relacionan los congresos y las revistas científicas en las que se han publicado los resultados obtenidos. Más información sobre los trabajos publicados se detalla en el Prólogo y en el Capítulo 2, Artículos publicados:

- Conferencias y congresos:
 - ICSC-CITIES 2023: VI Congreso Iberoamericano de Ciudades Inteligentes (ICSC-CITIES 2023) en Ciudad de México (México) del 13 al 17 de noviembre de 2023.
 - PCIM Europe 2023 en Núremberg (Alemania) del 9 al 11 de mayo de 2023.
 - ICSC-CITIES 2022: V Congreso Iberoamericano de Ciudades Inteligentes (ICSC-CITIES 2022) en Cuenca (Ecuador) del 13 al 17 de noviembre de 2022.
 - Congreso Futured 2022: I congreso de redes inteligentes en Madrid (España) el 14 de diciembre de 2022.
 - ICSC-CITIES 2021: IV Congreso Iberoamericano de Ciudades Inteligentes (ICSC-CITIES 2021) en Cancún (México) del 29 de noviembre al 1 de diciembre de 2021.
 - Congreso Tecmared 2021: VII Congreso Smart Grids en Madrid el 16 de diciembre de 2020.
 - ICSC-CITIES 2020: III Congreso Iberoamericano de Ciudades Inteligentes (ICSC-CITIES 2020) en San José (Costa Rica) del 9 al 11 de noviembre de 2020.

- Revistas y libros:
 - Applied Science. 2024.
 - Open Research Europe. 2023.
 - Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. 2023.
 - Electronics. 2023.
 - Energetic Efficiency Sustainability Infrastructures Energy and the Environment Mobility and IoT Governance and Citizenship. 2022.
 - Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. 2021.
 - Applied Science. 2020.
 - Communications in Computer and Information Science. Springer. 2020

1.6.- Resultados y discusión

El principal logro de este trabajo ha sido el desarrollo de un sistema de monitorización, control y gestión para una microrred, que ha permitido implementar y probar diferentes estrategias de gestión de la energía, con lo que se ha cumplido el objetivo principal y los objetivos parciales de esta tesis.

Las investigaciones que concluyeron con los trabajos de revisión Anexo I, Artículo 4 y Anexo I, Artículo 6 permitieron cumplir con el primero de los objetivos parciales, que era el estudio del estado del arte de las metodologías y las herramientas de monitorización y control existentes para convertir un tramo de red con elementos de generación, sistemas de almacenamiento y consumos en una microrred inteligente y de los diferentes métodos en la gestión de microrredes, incluyendo sus diferentes objetivos.

Algunos datos de interés que se pueden obtener de la revisión bibliográfica basada en las metodologías y las herramientas para la monitorización y el control de microrredes eléctricas, publicados en el Anexo I, Artículo 4 “A Methodology for the Conversion of a Network Section with Generation Sources, Storage and Loads into an Electrical Microgrid Based on Raspberry Pi and Home Assistant”, son:

- Hay una serie de tecnologías de comunicación utilizadas preferentemente para la monitorización y control de los elementos conectados a una microrred entre los que destacan: Zigbee, WLAN, Wifi, Comunicación serie, WiMAX, Power line y GSM/GPRS.
- En algunos casos se emplea hardware de bajo coste como Arduino y Raspberry para instalar en ellos el Sistema de monitorización y control.
- Existen diferentes herramientas de pago para monitorizar y controlar los elementos de la microrred: Advance EMS - Platform, ETAP Energy Management System, Monarch TM - Open Systems International y Wattics.
- Hay programas, que exigen el pago de una licencia, que permiten desarrollar un software propio y adaptable para la monitorización y el control de una microrred como Matlab, Labview, Simulink y Python.

El artículo de revisión Anexo I, Artículo 6 “Control Strategies in Microgrid Management. A state of Art”, que presenta una revisión bibliográfica basada en las diferentes estrategias en la gestión de microrredes eléctricas, permitió conocer las estrategias de gestión de la energía más utilizadas y que son:

- Estrategia de optimización de costes: su objetivo principal minimizar los costes de operación, mediante la programación de las cargas o reduciendo el consumo de combustibles fósiles, sin perder de vista la eficiencia del sistema.
- Estrategias de gestión basadas en el coste de mercado de la energía (arbitraje energético): la microrred consume de la red de distribución cuando el precio de la energía es barato, incluso pueden cargarse los sistemas de almacenamiento de energía. Cuando el precio es alto, se fomenta el autoconsumo y se descargan los sistemas de almacenamiento. Así se aumenta la eficiencia del sistema y optimizar el rendimiento económico.

MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y CONSUMOS EN UNA MICRORRED

- Estrategias de gestión desde el lado de la demanda: promueven la participación de los usuarios en la gestión de la energía para optimizar el consumo. Se puede definir el patrón de consumo a partir de predicciones de producción.
- Estrategia de respuesta a la demanda: es una extensión de la estrategia anterior que pretende modificar los perfiles de carga de los consumidores ofreciendo incentivos económicos.
- Estrategias de maximización de la generación renovable: es necesario estudiar los recursos disponibles para encontrar la mejor combinación de sistemas de generación renovables que favorezcan el autoconsumo la mayor parte del tiempo posible, permitiendo reducir las emisiones y los costes operativos.
- Estrategias centradas en la operación de las baterías: pretenden optimizar su rendimiento y maximizar su vida útil, cuidando los ciclos de carga y descarga, sin perder de vista la eficiencia del sistema.
- Estrategia de seguimiento de la carga: se basan en el ajuste de la demanda y la generación en tiempo real para mantener el balance energético y conseguir la estabilidad de la microrred. Se utiliza principalmente en microrredes aisladas, con fuentes de generación limitadas para garantizar el suministro energético a las cargas. La estabilidad no es un factor tan determinante en microrredes conectadas a la red de distribución.
- Estrategia de relocalización de cargas: permite dotar de flexibilidad al sistema mediante la desconexión de cargas no críticas en periodos de consumo alto y su conexión en periodos de poco consumo.
- Estrategia de reducción de picos de consumo mediante la gestión de la energía almacenada en los sistemas de almacenamiento. Evita sobrecostes de operación por exceso de potencia y efectos perjudiciales para la estabilidad de la microrred. Esta estrategia es especialmente beneficiosa en términos técnicos y económicos.

Con las investigaciones que concluyeron con el trabajo de investigación Capítulo II, Artículo 2.1 “Conversion of a Network Section with Loads, Storage Systems and Renewable Generation Sources into a Smart Microgrid”, fue posible cumplir con el segundo de los objetivos parciales, que era desarrollar una metodología para convertir una red con elementos de generación, sistemas de almacenamiento y consumos en una microrred inteligente, que permita su monitorización en tiempo real y el control de sus componentes.

Utilizando los programas HomeAssistant, NodeRed y MariaDB, vistos en el apartado 1.5.2., se ha conseguido desarrollar una herramienta que permite la monitorización y el control de todos los elementos de generación, almacenamiento y consumo que forman parte de una microrred. En la Figura 8 puede verse la pantalla principal del sistema de control, monitorización y gestión desarrollado en esta tesis.

MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y CONSUMOS EN UNA MICRORRED

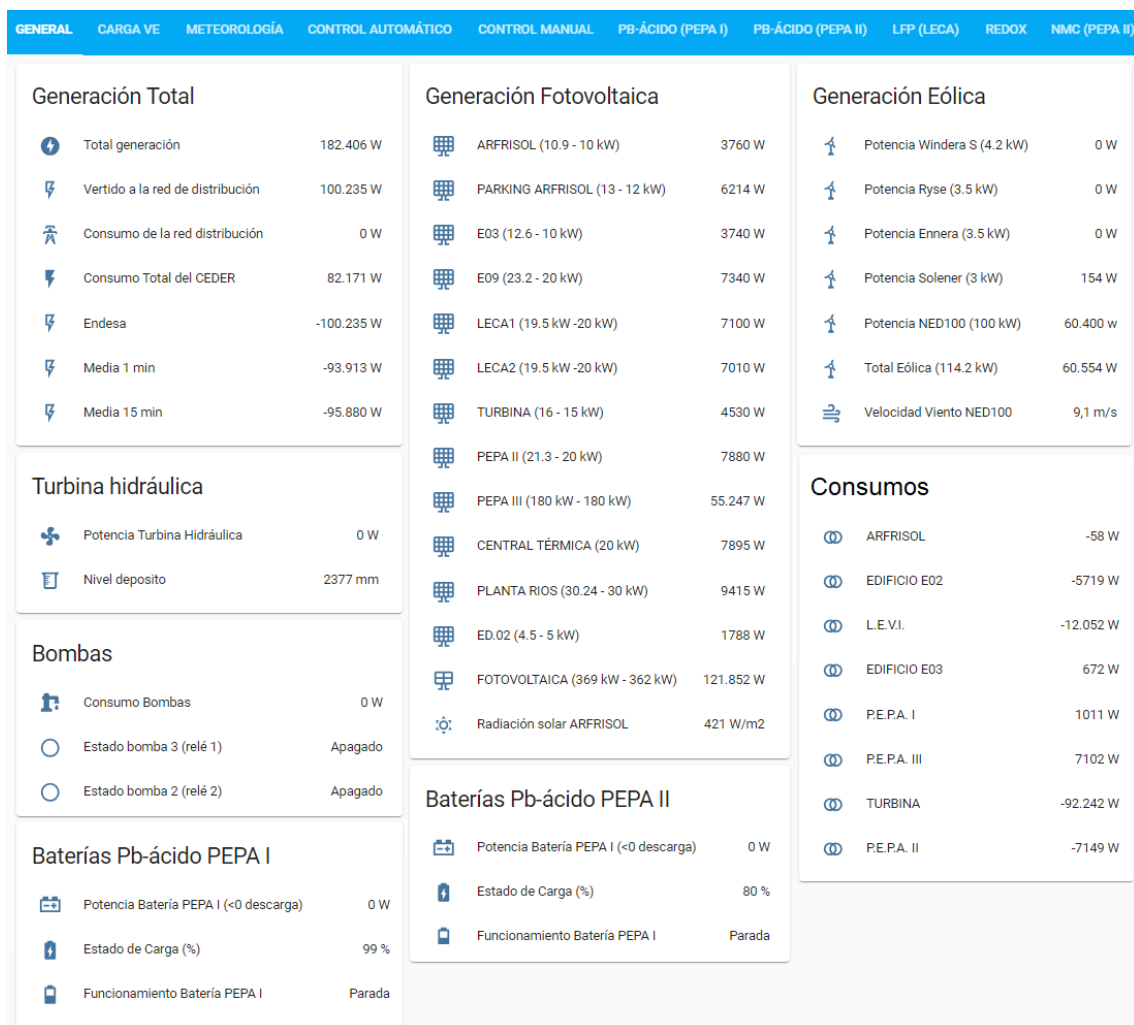


Figura 8. Panel de control del sistema de gestión de la microrred.

En la Figura 8, en las diferentes tarjetas, pueden verse los valores monitorizados de todos los elementos de generación (Generación Fotovoltaica, Generación Eólica, Turbina hidráulica y Grupo Diésel), de los sistemas de almacenamiento (Baterías Pb-ácido PEPA I, Baterías Pb-ácido PEPA II, Baterías LFP LECA, Bombas) y de los consumos (Consumos y Cargadores Coches). En la tarjeta Generación Total pueden verse otros valores como la generación total de los elementos de la microrred, el consumo total de la microrred, el consumo de la red de distribución, y valores promedios en 1 minuto y en 15 minutos que permiten tomar decisiones a corto plazo para la gestión energética de la microrred.

El sistema permite, no solo monitorizar los valores de todos los elementos, sino controlar cada uno de los elementos gestionables. Estos elementos no son solo los sistemas de almacenamiento, sino también los elementos de generación que lo permiten como algunos inversores fotovoltaicos y eólicos, que, si bien no son gestionables desde el punto de vista del recurso, sí que podemos gestionar la energía generada siempre que estemos por debajo del límite del recurso. También entrarían dentro de este apartado cargas flexibles que podemos controlar como los cargadores de los vehículos eléctricos.

En la Figura 9 puede verse, como ejemplo, la pestaña correspondiente al sistema de control de una de las baterías disponibles. Para cada uno de los elementos gestionables hay una pestaña diferente.

MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y CONSUMOS EN UNA MICRORRED

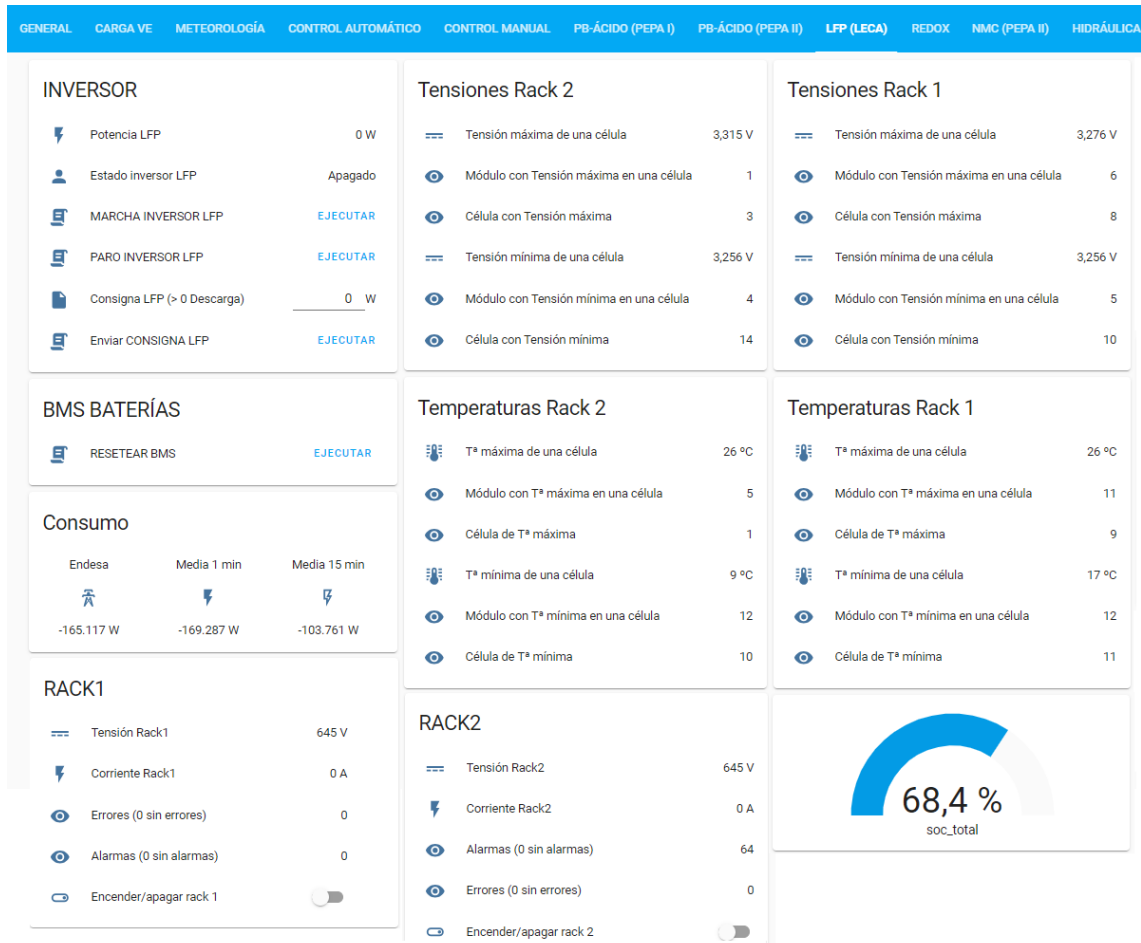


Figura 9. Panel de control de un sistema de baterías de litio ferro fosfato.

En la Figura 9 pueden verse todos los valores monitorizados de las baterías, tensiones, temperaturas, potencia, corrientes, etc. Y también los botones para encender/apagar cada uno de los dos racks que componen el sistema, para poner en marcha y parar el inversor y para enviar las consignas de carga y descarga deseadas.

Con las investigaciones que concluyeron con el trabajo de investigación Capítulo II, Artículo 2.2 “Open Source Monitoring and Alarm System for Smart Microgrids Operation and Maintenance Management”, fue posible cumplir con el tercero de los objetivos parciales, que era desarrollar un sistema de supervisión y alarmas para la operación y el mantenimiento de una microrred.

La supervisión continua de los parámetros clave permite detectar fallos. El sistema implantado utilizando los programas NodeRed y HomeAssistant ha permitido programar con éxito más de cuarenta alarmas. Entre ellas se incluyen alarmas de mantenimiento correctivo, como las que indican fallos en el funcionamiento de alguno de los elementos de la microrred, así como alarmas informativas que proporcionan datos sobre su rendimiento.

Además, permitió la creación alarmas de mantenimiento preventivo que avisan al operador de la microrred y/o al personal de mantenimiento de las tareas programadas.

La Figura 10 muestra un ejemplo de alarma. Representa la potencia de salida de una instalación fotovoltaica (en color azul) y la radiación solar (color amarillo) de un día. NodeRed monitoriza estos parámetros y se ha programado para que haga

comprobaciones periódicas entre ambos. Cuando la radiación solar es suficientemente alta para que la fotovoltaica produzca energía, pero la potencia de salida del inversor es nula, el sistema genera una alarma. En la figura se puede observar el momento en que se genera la alarma y el momento en el que el fallo se ha resuelto y la salida de potencia del inversor vuelve a su funcionamiento normal.

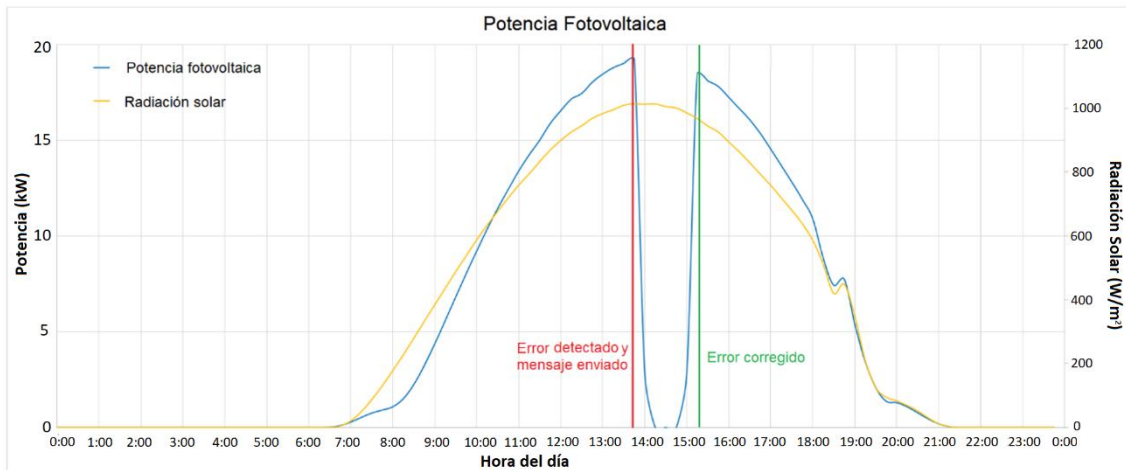


Figura 10. Ejemplo detección de fallos en instalación fotovoltaica.

Con las investigaciones que concluyeron con el trabajo de investigación Capítulo II, Artículo 2.3 “Methodology for energy management in a smart microgrid based on the efficiency of dispatchable renewable generation sources and distributed storage systems”, fue posible cumplir con el cuarto y último de los objetivos parciales, que era desarrollar diferentes metodologías para la gestión de la energía en una microrred.

En el artículo, se probaron dos estrategias de gestión de la energía diferentes: reducción del consumo de la red de distribución (durante unas 8 horas) y eliminación de picos de potencia (durante 1 hora aproximadamente).

En el primer caso, reducción del consumo de la red de distribución, este puede llevarse a cabo en cualquier momento del día, en horas consecutivas o alternas, dependiendo de lo que más interese desde el punto de vista de la gestión de la microrred. Lo más habitual es reducir el consumo en las horas de tarificación más alta, para tratar de conseguir el mayor ahorro económico, o en horas de consumo muy alto para poder reducir la potencia contratada con la empresa de distribución y conseguir así nuevos ahorros a parte de los derivados del menor consumo de energía.

La Figura 11 muestra los datos de consumo de la microrred de un día utilizando y sin utilizar los sistemas de almacenamiento para poder comparar los resultados obtenidos. El consumo es superior a la media entre las 8:00 de la mañana y las 15:00 de la tarde y además coincide con los periodos de tarificación más altos. La línea de color rojo muestra el consumo que hubiera tenido la microrred si no se hubieran aplicado la estrategia de gestión y por tanto no se hubieran utilizado los sistemas de almacenamiento. La línea de color amarillo representa el consumo real de la microrred aplicando la estrategia de gestión, es decir, con los sistemas de almacenamiento de energía funcionando. Por último, el área de color verde representa el ahorro de energía obtenido gracias al uso de sistemas de almacenamiento.

MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y CONSUMOS EN UNA MICRORRED

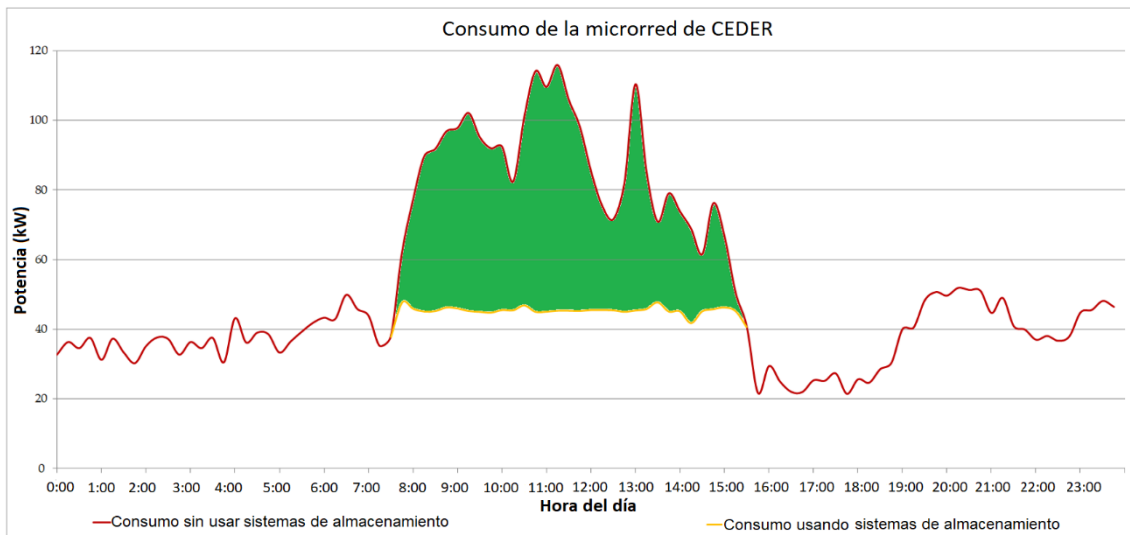


Figura 11. Consumo de la microrred, reducción del consumo de la red de distribución.

En el segundo caso, eliminación de picos de potencia, para poder implementar la estrategia es necesario tener un pico de consumo en un momento determinado del día. En caso de que haya previsión de tener más de un pico de consumo en un mismo día lo óptimo es eliminar el que se produzca en el periodo de tarificación más caro, para maximizar el ahorro económico.

La Figura 12 muestra los datos de consumo de una microrred un día con un pico de potencia utilizando y sin utilizar los sistemas de almacenamiento, es decir, aplicando la estrategia de gestión definida y si no la hubiésemos ejecutado. Puede verse un pico de consumo ya que pasa de estar en valores en torno a los 80-90 kW a valores de hasta casi 180 kW.

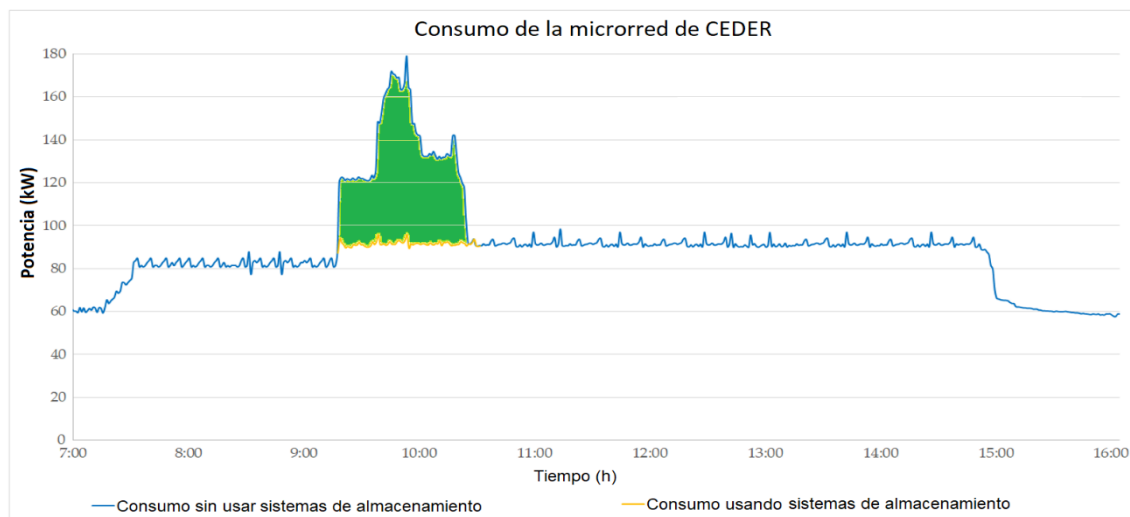


Figura 12. Consumo de la microrred, eliminación picos de potencia.

La línea de color azul representa el consumo de la microrred si los sistemas de almacenamiento de energía estuvieran parados y por tanto no se hubiese eliminado el pico de consumo. La línea de color amarillo representa el consumo real de la microrred ejecutando la estrategia de eliminación de picos de consumo, es decir utilizando los sistemas de almacenamiento de energía para reducir la potencia. La zona verde representa el ahorro de energía al eliminar el pico, debido a la utilización de los sistemas de almacenamiento.

1.7.- Referencias

- [1] International Energy Agency, “World Energy Outlook 2022,” 2022. Accessed: Jul. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- [2] K. Twaisan and N. Barışçı, “Integrated Distributed Energy Resources (DER) and Microgrids: Modeling and Optimization of DERs,” *Electronics (Basel)*, vol. 11, no. 18, 2022, doi: 10.3390/electronics11182816.
- [3] International Energy Agency, “Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector,” 2021. Accessed: Jul. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [4] A. Bernstein *et al.*, “Microgrids as a Building Block for Future Grids,” *DOE OE 2021 Strategy White Papers on Microgrids*, 2022.
- [5] U. S. D. of Energy, “2020 Smart Grid System Report,” *Energy*, no. February, 2022.
- [6] S. Jain, A. Kulkarni, and Y. Sawle, “Overview of Energy Management Systems for Microgrids and Smart Grid,” in *Planning of Hybrid Renewable Energy Systems, Electric Vehicles and Microgrid: Modeling, Control and Optimization*, A. K. Bohre, P. Chaturvedi, M. L. Kolhe, and S. N. Singh, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 61–88. doi: 10.1007/978-981-19-0979-5_4.
- [7] S. S. Rangarajan *et al.*, “DC Microgrids: A Propitious Smart Grid Paradigm for Smart Cities,” *Smart Cities*, vol. 6, no. 4, pp. 1690–1718, 2023, doi: 10.3390/smartcities6040079.
- [8] Md. S. Alam, F. S. Al-Ismaïl, A. Salem, and M. A. Abido, “High-Level Penetration of Renewable Energy Sources into Grid Utility: Challenges and Solutions,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 190277–190299, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031481.
- [9] S. Vijayalakshmi, R. Shenbagalakshmi, C. P. Kamalini, M. Marimuthu, and R. Venugopal, “Power Quality Issues in Smart Grid/Microgrid,” in *Planning of Hybrid Renewable Energy Systems, Electric Vehicles and Microgrid: Modeling, Control and Optimization*, A. K. Bohre, P. Chaturvedi, M. L. Kolhe, and S. N. Singh, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 403–442. doi: 10.1007/978-981-19-0979-5_17.
- [10] Y. Zhou and C. Ngai-Man Ho, “A review on Microgrid architectures and control methods,” in *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, 2016, pp. 3149–3156. doi: 10.1109/IPEMC.2016.7512799.
- [11] V. J. Mawson and B. R. Hughes, “Optimisation of HVAC control and manufacturing schedules for the reduction of peak energy demand in the manufacturing sector,” *Energy*, vol. 227, p. 120436, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120436>.
- [12] F. Mohammadi *et al.*, “Robust Control Strategies for Microgrids: A Review,” *IEEE Syst J*, vol. 16, no. 2, pp. 2401–2412, 2022, doi: 10.1109/JSYST.2021.3077213.
- [13] M. A. Jirdehi, V. S. Tabar, S. Ghassemzadeh, and S. Tohidi, “Different aspects of microgrid management: A comprehensive review,” *J Energy Storage*, vol. 30, p. 101457, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101457>.
- [14] K. Cabana-Jiménez, J. E. Candeló-Becerra, and V. Sousa Santos, “Comprehensive Analysis of Microgrids Configurations and Topologies,” *Sustainability*, vol. 14, no. 3, 2022, doi: 10.3390/su14031056.
- [15] S. B. Sepúlveda-Mora and S. Hegedus, “Resilience analysis of renewable microgrids for commercial buildings with different usage patterns and weather conditions,” *Renew Energy*, vol. 192, pp. 731–744, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.090>.

- [16] G. Chaudhary, J. J. Lamb, O. S. Burheim, and B. Austbø, "Review of Energy Storage and Energy Management System Control Strategies in Microgrids," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 16, 2021, doi: 10.3390/en14164929.
- [17] W. Dong *et al.*, "Stochastic optimal scheduling strategy for a campus-isolated microgrid energy management system considering dependencies," *Energy Convers Manag*, vol. 292, p. 117341, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117341>.
- [18] K. S. El-Bidairi, H. Duc Nguyen, S. D. G. Jayasinghe, and T. S. Mahmoud, "Multiobjective Intelligent Energy Management Optimization for Grid-Connected Microgrids," in *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/EEEIC.2018.8493751.
- [19] D. Ahmed, M. Ebeed, A. Ali, A. S. Alghamdi, and S. Kamel, "Multi-Objective Energy Management of a Micro-Grid Considering Stochastic Nature of Load and Renewable Energy Resources," *Electronics (Basel)*, vol. 10, no. 4, 2021, doi: 10.3390/electronics10040403.
- [20] L. Al-Ghussain, R. Samu, O. Taylan, and M. Fahrioglu, "Sizing renewable energy systems with energy storage systems in microgrids for maximum cost-efficient utilization of renewable energy resources," *Sustain Cities Soc*, vol. 55, p. 102059, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102059>.
- [21] D. J. B. Harrold, J. Cao, and Z. Fan, "Data-driven battery operation for energy arbitrage using rainbow deep reinforcement learning," *Energy*, vol. 238, p. 121958, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121958>.
- [22] D. Mariano-Hernández, L. Hernández-Callejo, A. Zorita-Lamadrid, O. Duque-Pérez, and F. Santos García, "A review of strategies for building energy management system: Model predictive control, demand side management, optimization, and fault detect & diagnosis," *Journal of Building Engineering*, vol. 33, p. 101692, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101692>.
- [23] R. Palma-Behnke, C. Benavides, E. Aranda, J. Llanos, and D. Sáez, "Energy management system for a renewable based microgrid with a demand side management mechanism," in *2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications In Smart Grid (CIASG)*, 2011, pp. 1–8. doi: 10.1109/CIASG.2011.5953338.
- [24] A. K. Erenoğlu, İ. Şengör, O. Erdiñç, A. Taşçikaraoğlu, and J. P. S. Catalão, "Optimal energy management system for microgrids considering energy storage, demand response and renewable power generation," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 136, p. 107714, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107714>.
- [25] P. Wang, Y. Cao, and Z. Ding, "Flexible Multi-Energy Scheduling Scheme for Data Center to Facilitate Wind Power Integration," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 88876–88891, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2990454.
- [26] S. Nolan and M. O'Malley, "Challenges and barriers to demand response deployment and evaluation," *Appl Energy*, vol. 152, pp. 1–10, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.083>.
- [27] A. R. Jordehi, "Optimisation of demand response in electric power systems, a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 103, pp. 308–319, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.054>.
- [28] M. Farrokhhabadi *et al.*, "Microgrid Stability Definitions, Analysis, and Examples," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 13–29, 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2925703.

- [29] L. Al-Ghussain, A. Darwish Ahmad, A. M. Abubaker, and M. A. Mohamed, "An integrated photovoltaic/wind/biomass and hybrid energy storage systems towards 100% renewable energy microgrids in university campuses," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 46, p. 101273, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101273>.
- [30] S. Dorahaki, R. Dashti, and H. R. Shaker, "Optimal energy management in the smart microgrid considering the electrical energy storage system and the demand-side energy efficiency program," *J Energy Storage*, vol. 28, p. 101229, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101229>.
- [31] S. Basnet, K. Deschinkel, L. Le Moyne, and M. Cécile Péra, "A review on recent standalone and grid integrated hybrid renewable energy systems: System optimization and energy management strategies," *Renewable Energy Focus*, vol. 46, pp. 103–125, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.06.001>.
- [32] B. Zou, J. Peng, S. Li, Y. Li, J. Yan, and H. Yang, "Comparative study of the dynamic programming-based and rule-based operation strategies for grid-connected PV-battery systems of office buildings," *Appl Energy*, vol. 305, p. 117875, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117875>.
- [33] R. Broderick, B. M. Garcia, S. E. Horn, and M. S. Lave, "Microgrid Conceptual Design Guidebook," *Energy Transitions Initiative*, pp. 1–48, 2022.
- [34] C. Liu, X. Wang, X. Wu, and J. Guo, "Economic scheduling model of microgrid considering the lifetime of batteries," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 3, pp. 759–767, 2017, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0772>.
- [35] C. N. Truong, M. Naumann, R. Ch. Karl, M. Müller, A. Jossen, and H. C. Hesse, "Economics of Residential Photovoltaic Battery Systems in Germany: The Case of Tesla's Powerwall," *Batteries*, vol. 2, no. 2, 2016, doi: [10.3390/batteries2020014](https://doi.org/10.3390/batteries2020014).
- [36] J. Jurasz, M. Guezgouz, P. E. Campana, and A. Kies, "On the impact of load profile data on the optimization results of off-grid energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 159, p. 112199, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112199>.
- [37] S. Upadhyay and M. P. Sharma, "Selection of a suitable energy management strategy for a hybrid energy system in a remote rural area of India," *Energy*, vol. 94, pp. 352–366, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.134>.
- [38] A. Ndiaye, F. Locment, A. De Bernardinis, M. Sechilariu, and E. Redondo-Iglesias, "A Techno-Economic Analysis of Energy Storage Components of Microgrids for Improving Energy Management Strategies," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 4, 2022, doi: [10.3390/en15041556](https://doi.org/10.3390/en15041556).
- [39] T. Jamal, T. Urmee, G. M. Shafiullah, and F. Shahnia, "Using Experts' Opinions and Multi-Criteria Decision Analysis to Determine the Weighing of Criteria Employed in Planning Remote Area Microgrids," in *2018 International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE)*, 2018, pp. 1–7. doi: [10.23919/ICUE-GESD.2018.8635734](https://doi.org/10.23919/ICUE-GESD.2018.8635734).
- [40] A. X. Y. Mah *et al.*, "Optimization of a standalone photovoltaic-based microgrid with electrical and hydrogen loads," *Energy*, vol. 235, p. 121218, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121218>.
- [41] M. W. Khan, J. Wang, and L. Xiong, "Optimal energy scheduling strategy for multi-energy generation grid using multi-agent systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 124, p. 106400, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106400>.

- [42] G. Liu, Y. Xu, and K. Tomsovic, "Bidding Strategy for Microgrid in Day-Ahead Market Based on Hybrid Stochastic/Robust Optimization," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 227–237, 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2476669.
- [43] L. de Oliveira-Assis *et al.*, "Optimal energy management system using biogeography based optimization for grid-connected MVDC microgrid with photovoltaic, hydrogen system, electric vehicles and Z-source converters," *Energy Convers Manag*, vol. 248, p. 114808, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114808>.
- [44] M. S. Javed, J. Jurasz, M. McPherson, Y. Dai, and T. Ma, "Quantitative evaluation of renewable-energy-based remote microgrids: curtailment, load shifting, and reliability," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 164, p. 112516, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112516>.
- [45] J. Ebrahimi, M. Abedini, and M. M. Rezaei, "Optimal scheduling of distributed generations in microgrids for reducing system peak load based on load shifting," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 23, p. 100368, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100368>.
- [46] H. Yang *et al.*, "Operational Planning of Electric Vehicles for Balancing Wind Power and Load Fluctuations in a Microgrid," *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 592–604, 2017, doi: 10.1109/TSTE.2016.2613941.
- [47] Y. Levron and D. Shmilovitz, "Power systems' optimal peak-shaving applying secondary storage," *Electric Power Systems Research*, vol. 89, pp. 80–84, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.02.007>.
- [48] M. M. Rana, M. Atef, M. R. Sarkar, M. Uddin, and G. M. Shafiullah, "A Review on Peak Load Shaving in Microgrid—Potential Benefits, Challenges, and Future Trend," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 6, 2022, doi: 10.3390/en15062278.
- [49] L. Zhang, Y. Yang, Q. Li, W. Gao, F. Qian, and L. Song, "Economic optimization of microgrids based on peak shaving and CO2 reduction effect: A case study in Japan," *J Clean Prod*, vol. 321, p. 128973, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128973>.
- [50] J. Londák, R. Vargic, and P. Podhradský, "Peak Shaving in Microgrids Using Hybrid Storage," in *Proceedings of Seventh International Congress on Information and Communication Technology*, X.-S. Yang, S. Sherratt, N. Dey, and A. Joshi, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 63–73.
- [51] A. Abbasi, H. A. Khalid, H. Rehman, and A. U. Khan, "A Novel Dynamic Load Scheduling and Peak Shaving Control Scheme in Community Home Energy Management System Based Microgrids," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 32508–32522, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3255542.

CAPÍTULO II. ARTÍCULOS PUBLICADOS

2.1.- Conversion of a Network Section with Loads, Storage Systems and Renewable Generation Sources into a Smart Microgrid

Revista: Applied Science. 2021, 11(11), 5012

Fecha de publicación: 28 de mayo de 2021

DOI: <https://doi.org/10.3390/app11115012>

Autores: Izquierdo-Monge, O., Peña-Carro, P., Villafafila Robles, R., Duque Pérez, O., Zorita-Lamadrid, A. y Hernández-Callejo, L.

Abstract:

This paper shows an experimental application case to convert a part of the grid formed by renewable generation sources, storage systems, and loads into a smart microgrid. This transformation will achieve greater efficiency and autonomy in its management. If we add to this the analysis of all the data that has been recorded and the correct management of the energy produced and stored, we can achieve a reduction in the electricity consumption of the distribution grid and, with this, a reduction in the associated bill. To achieve this transformation in the grid, we must provide it with intelligence. To achieve this, a four steps procedure are proposed: identification and description of the elements, integration of the elements in the same data network, establishing communication between the elements and the control system, creating an interface that allows control of the entire network. The microgrid of CEDER-CIEMAT (Renewable Energy Centre in Soria, Spain) is presented as a real case study. This centre is made up of various sources of generation, storage, and consumption. All the elements that make up the microgrid are incorporated into free software, Home Assistant, allowing real-time control and monitoring of all of them thanks to the intelligence that has been provided to the grid. The novelty of this paper is that it describes a procedure that is not reported in the current literature and that, being developed with Home Assistant, is free and allows the control and management of a microgrid from any device (mobile, PC) and from any place, even though not on the same data network as the microgrid.

Keywords:

Smart microgrid; Home Assistant; monitoring and control system.

2.2.- Open Source Monitoring and Alarm System for Smart Microgrids Operation and Maintenance Management

Revista: Electronics 2023, 12(11), 2471

Fecha de publicación: 30 de mayo de 2023

DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12112471>

Autores: Izquierdo-Monge, O., Redondo-Plaza, A., Peña-Carro, P., Alonso-Gómez, V., Zorita-Lamadrid, A. y Hernández-Callejo, L.

Abstract:

Microgrids are becoming increasingly important for improving the dependability, stability, and quality of the electrical system, as well as for integrating renewable technologies. This paper describes a novel monitoring and alarm system that has been developed to optimize the operation and maintenance of microgrids. The system is unique in that it has been developed using open source software, including Node-RED, Home Assistant, Maria DB, and Telegram, and it allows for easy programming of alarms or warnings. Testing of the system has taken place within the CEDER microgrid and is capable of detecting faults in various components of the microgrid, such as generation units, storage systems, and loads. Upon detecting a fault, the system immediately sends a text message to the mobile phones of the microgrid operator or maintenance crew, enabling them to promptly address the problem. The software can also manage preventive maintenance of the microgrid by sending periodic reminders to the maintenance crew regarding necessary tasks.

Keywords:

Renewable energies; microgrids; monitoring; maintenance; management; open source.

2.3.- Methodology for energy management in a smart microgrid based on the efficiency of dispatchable renewable generation sources and distributed storage systems

Revista: Applied Science. 2024, 14(5), 1946

Fecha de publicación: 27 de febrero de 2024

DOI: <https://doi.org/10.3390/app14051946>

Autores: Izquierdo-Monge, O., Peña-Carro, P., Hernández Jiménez, A., Zorita-Lamadrid, A. y Hernández-Callejo, L.

Abstract:

This paper presents a methodology for energy management in a smart microgrid based on the efficiency of dispatchable generation sources and storage systems, with three different aims: elimination of power peaks; optimisation of the operation and performance of the microgrid; and reduction of energy consumption from the distribution network. The methodology is based on four steps: identification of elements of the microgrid, monitoring of the elements, characterization of the efficiency of the elements, and finally, microgrid energy management. A specific use case is shown at CEDER-CIEMAT, where consumption has been reduced during high tariff periods and power peaks have been eliminated, allowing an annual reduction of more than 25,000 kWh per year, which is equal to savings of more than 8500 €. It also allows the power contracted from the distribution company by CEDER (135 kW) not to be exceeded, which avoids penalties in the electricity bill.

Keywords:

Smart microgrid (SMG); energy management system (EMS); efficiency; distributed storage system; dispatchable generation; distributed renewable generation sources

CAPÍTULO III. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este capítulo presenta las conclusiones de la investigación descrita en la tesis. Se revisan la finalidad y los objetivos de la investigación, esbozados en la Introducción, y se aborda su consecución. Por último, se sugieren trabajos para el futuro.

3.1.- Conclusiones

El objetivo principal que se estableció inicialmente en el planteamiento de esta Tesis Doctoral consistió en desarrollar un sistema de monitorización y control de una red que permita convertirla en una microrred y realizar la gestión de las fuentes de generación, los sistemas de almacenamiento y consumos conectados a ella.

Para conseguir este logro, se ha realizado a lo largo de estos últimos años una detallada investigación que ha permitido cumplir con los objetivos parciales establecidos mediante la publicación de hasta un total de nueve artículos, mencionados en el prólogo de esta memoria.

En el esquema que se muestra en la Figura 13, se presenta de forma resumida y esquemática, como se han ido atendiendo los objetivos parciales a través de las publicaciones mencionadas.

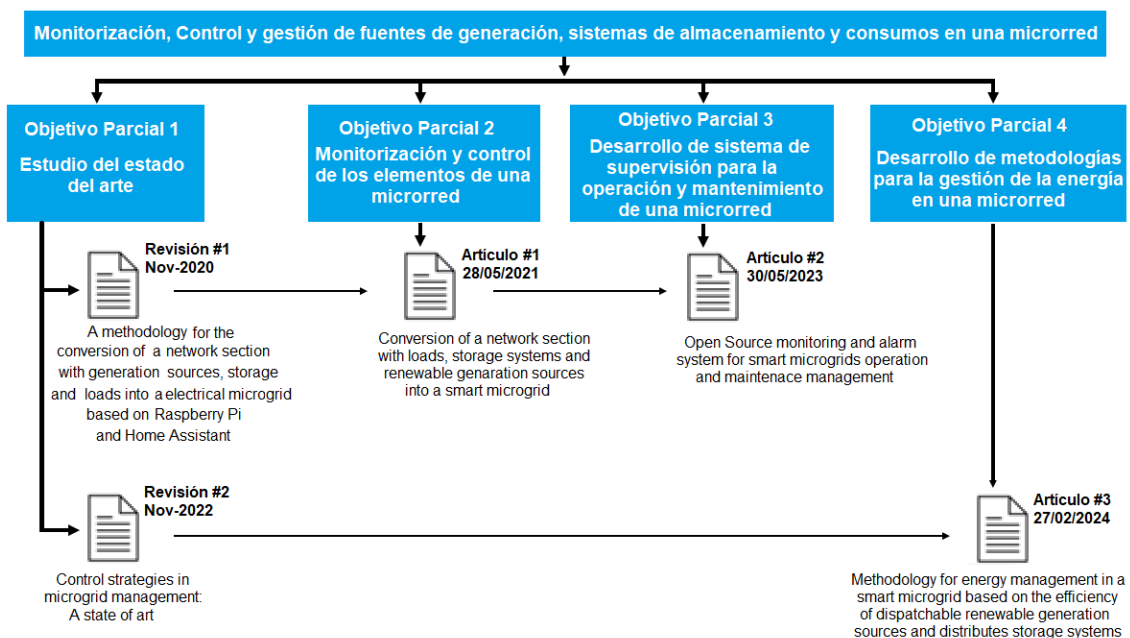


Figura 13. Relación entre los objetivos de la tesis doctoral y los artículos publicados.

Las publicaciones Anexo I, Artículo 4 y Anexo I, Artículo 6 fueron dos revisiones bibliográficas que, aunque no forman parte del núcleo principal de la tesis, fueron las bases que permitieron establecer un estado del arte y sentar las bases para toda la investigación que posteriormente se realizó al objeto de optimizar el sistema de monitorización, control y gestión de una microrred, ayudando a alcanzar el primer objetivo parcial.

El artículo #1 (Capítulo II, Artículo 2.1), corresponde al desarrollo del sistema de monitorización y control de una microrred, alcanzando así el segundo objetivo parcial.

MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y CONSUMOS EN UNA MICRORRED

El artículo #2 (Capítulo II, Artículo 2.2), permitió desarrollar un sistema de supervisión y alarmas para la operación y el mantenimiento de una microrred, lo que ayudó a alcanzar el tercer objetivo parcial.

Por último, el cuarto objetivo parcial se logró con el artículo #3 (Capítulo II, Artículo 2.3), en el que se desarrolla una metodología para la gestión de la energía en una microrred inteligente.

Con la consecución de estos cuatro objetivos parciales, se pudo alcanzar el objetivo principal de la tesis, que consistía en el desarrollo de sistema de monitorización, control y gestión de una microrred que permitiese implantar diferentes estrategias de gestión de la energía.

Podemos por lo tanto extraer, con el desarrollo de esta Tesis Doctoral, las siguientes conclusiones:

Monitorización y control:

- El software HomeAssistant, de código abierto y, por tanto, gratuito, tiene funcionalidades que permiten monitorizar en tiempo real e integrar en un único interfaz hombre-máquina todos los elementos que componen una microrred y desarrollar el sistema de control de cada uno de ellos. Además, permite la gestión de la microrred desde cualquier dispositivo y en cualquier lugar gracias a su servidor web y a su aplicación para dispositivos móviles (Android e iOS).
- HomeAssistant representa una ventaja frente a otras herramientas utilizadas que requieren el pago de una licencia, y suelen tener algunas limitaciones para conectar cierto tipo de dispositivos. Además, el desarrollo del sistema de monitorización y control con alguna de estas herramientas lo realiza una ingeniería, por lo que no existe la opción de modificarlo para incluir nuevos sistemas o quitar sistemas eliminados de la microrred, sin contar con ellos al no dar acceso a su código (normalmente, no son de código abierto).
- El SCADA de monitorización y control desarrollado con HomeAssistant permite implementar estrategias de gestión de energía, una vez que se han analizado los datos almacenados, para optimizar el rendimiento de la microrred, maximizando el uso de fuentes de generación renovables y reduciendo el consumo de energía procedente de la red de distribución con la ayuda de sistemas de almacenamiento. Esto puede hacerse almacenando el excedente de energía producido por las fuentes de generación renovables para su utilización en momentos de menor producción en los que se consume más energía de la red de distribución. Así se pueden lograr ahorros de hasta el 15-20% en la factura de electricidad.
- Es posible crear un sistema de alarma y alertas utilizando NodeRed, HomeAssistant y Telegram, todos ellos programas de código abierto, lo que lo convierte en una solución asequible para la mayoría de las microrredes. Este sistema permite para mejorar el rendimiento de una microrred y agilizar las tareas de mantenimiento de sus componentes.
- Este sistema garantiza la máxima utilización de la energía renovable y mejora la fiabilidad de la microrred. Ya que permite conocer cualquier incidencia en la microrred de manera instantánea, es decir en el momento que se produce, y permite reducir significativamente el tiempo de respuesta para solucionarla.

- Además, es capaz de gestionar el mantenimiento preventivo de los equipos de las instalaciones de la microrred avisando al personal de mantenimiento cuando hay que realizar estas tareas de mantenimiento periódicas. También puede programarse para generar alarmas informativas que pueden ser útiles para el operador de la microrred o el personal de mantenimiento.
- Este sistema de alarmas ha eliminado la necesidad de monitorización continua del panel de control de la microrred por parte del operador de la red, ya que cualquier incidencia se le notifica de manera inmediata, lo que permite al operador realizar otras tareas aumentando su eficiencia.

Gestión de la energía:

- Una de las metodologías definidas en los artículos presentados en esta tesis, para la gestión inteligente de una microrred basada en la eficiencia de los sistemas de almacenamiento disponibles permite optimizar el funcionamiento de la microrred reduciendo el consumo energético de la red de distribución en los periodos de tarifa más alta y eliminando los picos de potencia (hasta 2 horas). Se pueden conseguir ahorros de energía de hasta de 25.000 kWh al año.
- Esta metodología se ha llevado a cabo utilizando un sistema de gestión energética basado en software de código abierto y por tanto gratuito y de fácil implementación con HomeAssistant y NodeRed.
- Otra metodología descrita en esta tesis permite hacer una gestión de inyección cero en la red de distribución que se puede utilizar una vez que los sistemas de almacenamiento están al límite de su capacidad.
- Utilizando este sistema de gestión permite optimizar la carga de una flota de vehículos, consumiendo mayoritariamente energía de origen renovable cuando hay excedentes en la microrred. Esto permite ahorrar más de 2500 kWh por vehículo eléctrico ya que permite cargar con excedentes hasta el 70% de la carga

3.2.- Trabajos futuros

En esta tesis se ha presentado un sistema de monitorización y control para convertir una red con elementos de generación, almacenamiento y consumos en una microrred inteligente que ha permitido implementar diferentes estrategias para la gestión de la energía. También se ha desarrollado un sistema de supervisión y alarmas para mejorar la operación y el mantenimiento de la microrred.

Aunque se considera que se ha cumplido el objetivo de la tesis, dado el avance de la inteligencia artificial en los últimos tiempos, una línea de investigación futura sería el desarrollo de soluciones de mantenimiento predictivo basadas en inteligencia artificial, implementado modelos que analicen los datos operativos y de rendimiento de los equipos en tiempo real, identificando patrones y tendencias que puedan indicar fallos potenciales. La capacidad de anticipar y abordar posibles problemas permitirá una gestión proactiva del mantenimiento, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo el tiempo de inactividad y, por tanto, los costes operativos.

MONITORIZACIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y CONSUMOS EN UNA MICRORRED

En el desarrollo de esta tesis también se han implantado diferentes estrategias de gestión de la energía basadas en diferentes criterios, para dar flexibilidad a la microrred, eliminar picos de consumo, reducir el coste, etc. En este sentido existen diferentes líneas de investigación futuras que podrían resultar de gran interés.

Por un lado, todas las estrategias de gestión que se han presentado en esta tesis, se han implantado en una microrred conectada a la red de distribución, por lo que sería interesante llevar a cabo un estudio similar con una microrred funcionando en modo isla, es decir, desconectada de la red de distribución, donde van a aparecer nuevas dificultades que hay que resolver.

La gestión de la energía que se hace en una microrred eléctrica, depende de los recursos disponibles, así como de la demanda, por lo que otra línea de investigación sería trabajar en el desarrollo de modelos predictivos que permitan hacer estimaciones precisas de la demanda diaria de energía en la microrred y de la capacidad de generación en base a la predicción de los recursos renovables (eólico y solar principalmente) que permita una planificación más eficiente.

ANEXO I: PUBLICACIONES ADICIONALES

AI.1.- Small wind turbines study and integration in a peri-urban microgrid

Revista: Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia, (104), 108–117

Fecha de publicación: 19 de agosto de 2021

DOI: <https://www.doi.org/10.17533/udea.redin.20210845>

Autores: Peña-Carro, P., Izquierdo-Monge, O., Martín Jiménez, G. y Hernández-Callejo, L.

Abstract:

The use of wind resources has always gone hand in hand with high wind speeds in open fields. This paper develops the decisions to be taken for the selection, installation, and connection of small wind turbines in peri-urban environments, where wind speeds are medium or low. The guidelines are detailed throughout the document, starting with the study of the wind resource, the selection of the turbine, installation, and real-time monitoring of production for integration into a micro power grid. The installation of small wind systems in places as close as possible to the point of demand makes it possible to achieve a reduction in the cost of the electricity bill. This is thanks to the instantaneous control of generation and demand at a particular level through the installation of software, in this case, Home Assistant. The novelty of this paper is the use of this software Home Assistant to integrate of a small wind turbine in a microgrid and its control system.

Keywords:

Wind power; renewable energy sources; microgrids

AI.2.- Integration of LFP-second life batteries as a storage in a smart microgrid

Revista: Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia

Fecha de publicación: 6 de febrero de 2023

DOI: <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20230211>

Autores: Izquierdo-Monge, O., Alonso González, N., Peña-Carro, P. y Martin Jiménez, G.

Abstract:

In recent years, there has been an increasing commitment to give batteries a second life, as they are being consumed for different uses and the recycling methods are not defined. This work aims to show how a storage system based on disused Lithium Iron Phosphate (LFP) batteries has been recovered and integrated into the CE.D.E.R- CIEMAT smart microgrid over a period of ten years during which the operation of the system has been affected. During the recovery process, the cells have been classified according to their voltage, and a series of charge-discharge processes have been carried out on them at different voltages to determine their state of health and capacity. Once characterised, the system was assembled and commissioned with the appropriate cells. In addition, for the storage system, a Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) has been developed in Home Assistant for its integration into the CEDER's microgrid management system. This allows the microgrid to be managed more efficiently, storing surplus energy from distributed generation sources and discharging the stored energy during peak consumption periods to reduce peaks, reduce discharges to the distribution grid and reduce the cost of electricity bills.

Keywords:

Smart microgrid, LFP batteries, second life, storage system.

AI.3.- Low-Cost and Real-Time Measurement System for Electrical Energy Measuring of a Smart Microgrid

Revista: Communications in Computer and Information Science 1359. Springer.

Fecha de publicación: noviembre 2020

DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-69136-3>

Autores: Izquierdo-Monge, O.; Peña-Carro, P.; Martín Martínez, M; Hernández-Callejo, L; Duque-Pérez, Oscar y Zorita-Lamadrid, A.

Abstract:

One of the most important things in a microgrid is the real-time measurement of all its elements, whether they are consumers or energy producers so that at the end of an established period, the total balance of production-consumption is carried out. It is at this moment when the energy distribution company and its costs become important. Focusing on it, a measurement system based on an infrared sensor and Arduino has been developed, to which a specific software is installed that allows obtaining the value of the instantaneous power consumed by the microgrid from the reading of the LED indicator of metrology of the meter of the distribution company with an error less than 1% daily. This means an important improvement in the knowledge of the energy consumption of the microgrid and implies an advance in the understanding of the electric bill allowing reducing its cost in the contracted terms.

Keywords:

Electric smart microgrids, Arduino, Consumption, Measurement system.

AI.4.- A Methodology for the Conversion of a Network Section with Generation Sources, Storage and Loads into an Electrical Microgrid Based on Raspberry Pi and Home Assistant

Revista: Communications in Computer and Information Science 1359. Springer.

Fecha de publicación: noviembre 2020

DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-69136-3>

Autores: Izquierdo-Monge, O.; Peña-Carro, P.; Villafafila-Robles, R; Hernández-Callejo, L; Duque Pérez, Oscar y Zorita-Lamadrid, A.

Abstract:

This paper presents a methodology to convert a network section with generation sources, storage, and loads into an electrical microgrid. This conversion will allow greater autonomy and efficiency in its management. Besides, after the analysis of the recorded data, a reduction in the consumption of the distribution network can be achieved, and therefore, a reduction in the costs of the electricity bill. To achieve this transformation, it is necessary to provide the network with intelligence, proposing a methodology based on four steps: identification and description of the elements that form it, choice of hardware and software for monitoring and controlling the system, establishment of communication between the different elements and creation of a control network framework for visualization. As a case study, the microgrid of the Renewable Energy Development Centre (CEDER) located in the province of Soria (Spain) is shown, formed by different sources of generation, storage systems, and consumption. All the elements of this microgrid are integrated with single free software, Home Assistant, installed in a Raspberry Pi 4 to provide the network with basic intelligence, control and monitoring in real-time through different communication protocols.

Keywords:

Smart electric microgrids, Home assistant, Monitoring and control system

AI.5.- Development and Improvement of a Data Storage System in a Microgrid Environment with HomeAssistant and MariaDB

Revista: Communications in Computer and Information Science 1555. Springer.

Fecha de publicación: enero 2022

DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-96753-6>

Autores: Izquierdo-Monge, O.; Martín Martínez, M y Peña-Carro, P.

Abstract:

In a microgrid environment, it's suitable to store data obtained from the different devices that make up the microgrid in order to have the ability to perform a detailed data analysis later. This article will detail the process followed to store the data that has been collected through the monitoring and control software 'Home Assistant' in the microgrid of the CEDER-CIEMAT (Renewable Energy Centre in Soria, Spain). The structure of the storage system created for a robust storage of data in the Database Management System MariaDB will be detailed and how to correct the different typical errors that are made in the development process of this storage system. Aspects the operation of the connection between Home Assistant and MariaDB, the configuration to establish communication with each other correctly and the organization of the different structures to be formed in the database created using the programming language SQL (Structured Query Language). It will detail the performance offered by this system together with the transformed data that has been generated for further analysis. Due to the emergence of new storage systems that are better adapted to the field of microgrids, the different alternatives that can be used will be described, which may replace the system developed to improve it.

Keywords:

Microgrids, Data storage, Home Assistant, MariaDB, Data analytics, SCADA

AI.6.- Control Strategies in Microgrid Management. A state of Art

Revista: Proceedings del V Congreso Iberoamericano de Ciudades Inteligentes (ICSC-CITIES 2022)

Fecha de publicación: enero 2022

Autores: Izquierdo-Monge, O.; Fraile Martín, I., Martín Rodríguez, G.M., Hernández-Callejo, L; Zorita-Lamadrid, A. y Peña-Carro, P.

Abstract:

The imminent need to incorporate renewable energy sources as a useful solution to the scarcity of conventional resources and the environmental problems that they entail has motivated the development of new systems capable of producing, storing and serving energy based on demand, called microgrids. They are mainly made up of distributed generators and energy storage systems and due to their great advantages, they are being implemented throughout the world and could be a great means for the development of renewable energy sources. However, the intermittence of renewable energy sources and general characteristics of microgrids, constitute an important challenge for the scientific community in order to optimally manage the resources. For this, control strategies are being developed, putting attention in reducing operational costs, reducing damage in energy storage systems, insuring the stability of the system, etc. All this questions, the motivations that lead to develop a management system in each case and the solutions found so far are presented in this paper, as an overview of the progress achieved until now. Furthermore, a prediction about future trends in this field is done, based on the current situation and the estimations made on the energy future and the needs of communities in the coming years.

Keywords:

Energy management system, microgrid, optimization algorithms, control strategies.