



GOBIERNO DEL
ESTADO DE MÉXICO



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

TES SFP
TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES
SAN FELIPE DEL PROGRESO

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE SAN FELIPE DEL PROGRESO

ORGANISMO PÚBLICO DESCENTRALIZADO DEL ESTADO DE MÉXICO

**“ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA LA
MITIGACIÓN DE PROBLEMAS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA EN
MICRORREDES ELÉCTRICAS “**

TESIS

TITULACIÓN INTEGRAL CON LA MODALIDAD DE TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

QUE PRESENTA

ALEXIS BALAM ALVAREZ MARIN

DIRECTOR DE TESIS:

DR. EMMANUEL HERNÁNDEZ MAYORAL

ASESORA INTERNA:

DRA. ANAHI JOBETH BORRAS ENRIQUEZ

SAN FELIPE DEL PROGRESO, ESTADO DE MÉXICO, AGOSTO 2023

San Felipe del Progreso, México, a 05 de septiembre de 2023.

I.C.E ERICK GARCÍA GONZÁLEZ
JEFE DE DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES
PRESENTE

Por este conducto me es grato informarle que la o el Pasante de **INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES, C. ALEXIS BALAM ALVAREZ MARÍN** con número de cuenta **2018350199**, ha concluido a mi entera satisfacción el trabajo escrito que lleva por título "**ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA LA MITIGACIÓN DE PROBLEMAS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA EN MICRORREDES ELÉCTRICAS**", el cual fue desarrollado como parte del proceso para la Titulación, mediante la opción "**TESIS**", conforme a lo establecido en el Lineamiento para la Titulación Integral Apartado 4.4, Numeral 4.4.3., por lo que autorizo se dé continuidad a su proceso de titulación.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE


Dr. EMMANUEL HERNÁNDEZ MAYORAL
Asesor Externo


Dr. ANAHÍ JOBETH BORRÁS ENCLÉZ
Asesor Interno

c.c.p Archivo personal

Edición: 3
Código: FO-210C2201000501L-01-10-A
Fecha: 16 de Agosto de 2021

San Felipe del Progreso, México, a 11 de septiembre de 2023.

I.C.E ERICK GARCÍA GONZÁLEZ
JEFE DE DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES
P R E S E N T E
P R E S E N T E

Por este conducto la Comisión Revisora informa que el trabajo escrito que lleva por tema **“ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA LA MITIGACIÓN DE PROBLEMAS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA EN MICRORREDES ELÉCTRICAS”**, presentado por el (a) Pasante de Ingeniería en Energías Renovables **C. ALEXIS BALAM ALVAREZ MARÍN** con número de cuenta **2018350199**, el cual fue desarrollado como parte del proceso para la Obtención del Título Profesional, mediante la opción **“TESIS”**, conforme a lo establecido en el Reglamento para la Obtención de Títulos Profesionales de la Institución, **se aprueba para su reproducción en formato digital**, misma que ya fue autorizada por la o el asesor **“DRA. ANAHI JOBETH BORRAS ENRIQUEZ”**.

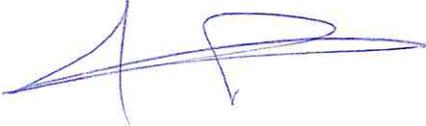
Sin más por el momento.

ATENTAMENTE
Comisión Revisora



I.C.C. FRANCISCO ALBA DIONICIO

REVISOR



DR. CARLOS HONORIO DE LA CRUZ ALEMAN

REVISOR

c.c.p. **I.C.C. FRANCISCO ALBA DIONICIO**
Presidente de Academia de Ingeniería en Energías Renovables

Edición: 3
Código: FO-210C2201000501L-01-15
Fecha: 12 de septiembre de 2023

210C2201000105L-0396/2023
San Felipe del Progreso a 11 de septiembre de 2023, México

Alexis Balam Alvarez Marin
PASANTE DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES
P R E S E N T E

Por este conducto me es grato informar a usted que el trabajo escrito denominado **"ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA LA MITIGACIÓN DE PROBLEMAS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA EN MICRORREDES ELÉCTRICAS"** desarrollado en apego a los lineamientos de esta Institución, fue aprobado por la Comisión Revisora, razón por la cual se le autoriza para que proceda a **reproducir en formato digital dicho documento**, debiendo entregar a esta División **cinco (5)** ejemplares y con ello estar en condiciones de sustentar el Acto de Recepción Profesional

Ruego a usted tomar nota de que, en cumplimiento a lo especificado por el Reglamento para la Obtención de Títulos Profesionales, deberá cumplir con lo estipulado De los Requisitos, presentando documentos originales para cotejo entregando copia al Departamento de Titulación.

ATENTAMENTE



I.C.E. ERICK GARCÍA GONZÁLEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

c.c.p. - Archivo

Edición: 3
Codigo: FO-210C2201000501L-01-16
Fecha: 12 de septiembre de 2022

Dedicatorias

A mis padres y hermana, quienes me han brindado su inquebrantable apoyo y amor a lo largo de este viaje académico.

A mis amigos cercanos, por las risas compartidas y por ser mi refugio en momentos de estrés.

A la innovación y el avance tecnológico. A los recuerdos compartidos y a todos quienes cruzaron nuestras vidas, agradecemos por las lecciones y conexiones.

Agradecimientos

Especial agradecimiento al M.C. Omar Rodríguez por su valiosa participación en este proyecto, por compartir su vasto conocimiento haciendo posible llevar a cabo ésta tesis.

Al Dr. Emmanuel Hernández Mayoral, por compartir su amplio conocimiento y experiencia, en la dirección de ésta tesis.

Finalmente a mis compañeros y amigos de generación: Marcos, Jorge y Oscar, con quien tuve la oportunidad de compartir experiencias y momentos muy agradables.

Índice general

1. Introducción	11
1.1. Preámbulo del Análisis Bibliométrico	12
1.2. Antecedentes	13
1.3. Planteamiento del problema	14
1.4. Justificación	15
1.5. Hipótesis-Objetivos	16
1.6. Metodología	17
1.7. Alcances y limitaciones	19
1.8. Estructura de la Tesis	19
2. Marco Teórico	20
2.1. Conceptos generales	20
2.2. Análisis bibliométrico	22
2.2.1. VOSviewer	23
2.3. Microrredes Eléctricas	24
2.3.1. Componentes	24
2.3.2. Clasificación	26
2.3.3. Modos de operación	27
2.4. Calidad de la energía	28
2.5. Estrategias de control en las microrredes	30
2.5.1. Control de voltaje y frecuencia	30
2.5.2. Control de potencia activa y reactiva	30
2.5.3. Método de control caída	30
2.5.4. Control centralizado	31
2.5.5. Control descentralizado	31
2.5.6. Control jerárquico	32
3. Resultados de la investigación	33
3.1. Evolución de la literatura	33
3.2. Documentos más citados	35

3.3. Análisis de los países con mayor número de publicaciones	37
3.4. Colaboración entre instituciones	39
3.5. Autores con mayor número de publicaciones	42
3.6. Revistas indexadas con mayor número de publicaciones en el área de Microrredes	44
3.7. Análisis por co-conurrencias de palabras	47
4. Conclusiones	51
4.1. Contraste de la hipótesis	52
Bibliografía	53

Índice de figuras

2.1. Microrred eléctrica	21
2.2. Logotipo de VOSviewer	23
2.3. Componentes de la microrred	25
2.4. Mapa de la clasificación de las microrredes	26
2.5. Modos de operación	27
2.6. Dificultades de las microrredes	28
2.7. Estrategias de control de las microrredes	30
2.8. Control centralizado y descentralizado	31
3.1. Diagrama de flujo de las actividades	33
3.2. Gráfica de producción de documentos del 2012 al 2022	34
3.3. Documentos más citados del periodo 2012-2022	35
3.4. Gráfica de citas por país	37
3.5. Mapa de densidades de los países	38
3.6. Mapa bibliométrico de los países	39
3.7. Mapa de densidad de las instituciones	41
3.8. Mapa bibliométrico de las instituciones	41
3.9. Gráfica del número de documentos producido por autor	42
3.10. Gráfica del número de citas por autor	43
3.11. Mapa de densidad de los autores	43
3.12. Mapa bibliométrico de los autores	44
3.13. Gráfica del número de citas por fuente de información	45
3.14. Gráfica del número de documentos por fuente de información	45
3.15. Mapa de densidades de las fuentes de información	46
3.16. Mapa bibliométrico de las fuentes de información	46
3.17. Mapa de co-conurrencias de palabras	48
3.18. Mapa de densidades de las palabras clave	49

Índice de tablas

3.1. Criterios de Búsqueda	34
3.2. Producción científica anual	35
3.3. Producción científica por país	37
3.4. Documentos producidos por institución	40
3.5. Citaciones por institución	40

Resumen

Las microrredes, son sistemas que combinan fuentes de energía renovable y tecnologías de almacenamiento, las cuales han ganado relevancia actualmente debido a su capacidad para mejorar la eficiencia y la resiliencia del suministro eléctrico. El presente estudio se centra en el análisis bibliométrico de las estrategias de control para la mitigación de problemas de calidad de la energía en microrredes eléctricas

Sin embargo, el éxito y la estabilidad de estas microrredes dependen en gran medida de la calidad de la energía que suministran. Problemas como fluctuaciones de voltaje, armónicas y variaciones de potencia pueden afectar la operación y confiabilidad del sistema, así como la satisfacción del usuario.

Por lo que, en este estudio se hará una revisión exhaustiva de la literatura científica, haciendo uso de la base de datos de Web of Science, mediante la cual se recopilaron 198 documentos relevantes utilizando la herramienta VOSviewer. Los resultados obtenidos revelaron las estrategias de control más utilizadas, así como los autores y las instituciones con una mayor producción de investigación en este campo. La identificación de patrones y conexiones entre los términos clave implica una comprensión sólida y fundamental de las áreas más destacadas de estudio.

Finalmente, este estudio bibliométrico ofrece una panorámica integral y objetiva sobre las estrategias de control en microrredes y su relación con la calidad de la energía. Los hallazgos contribuirán a mejorar la eficiencia y resiliencia de las microrredes eléctricas y fomentarán el desarrollo de nuevas estrategias para abordar los desafíos en la calidad de la energía en el contexto energético actual.

Abstract

Microgrids are systems that combine renewable energy sources and storage technologies, which have gained relevance today due to their ability to improve the efficiency and resilience of electricity supply. This study focuses on the bibliometric analysis of control strategies for the mitigation of power quality problems in electrical microgrids

However, the success and stability of these microgrids largely depend on the quality of the power they supply. Problems such as voltage fluctuations, harmonics and power variations can affect the operation and reliability of the system, as well as user satisfaction.

Therefore, in this study an exhaustive review of the scientific literature will be made, making use of the Web of Science database, through which 198 relevant documents were collected using the VOSviewer tool. The results obtained revealed the most used control strategies, as well as the authors and institutions with the highest production of research in this field. Identifying patterns and connections among key terms implies a solid and fundamental understanding of the salient areas of study.

Finally, this bibliometric study offers a comprehensive and objective overview of control strategies in microgrids and their relationship with power quality. The findings will contribute to improving the efficiency and resilience of electrical microgrids and will encourage the development of new strategies to address power quality challenges in the current energy context.

Capítulo 1

Introducción

El análisis bibliométrico es una metodología que se utiliza para cuantificar, evaluar y analizar patrones en la producción científica a través del análisis de documentos bibliográficos, como artículos científicos, patentes, tesis, entre otros. Esta técnica permite extraer información cuantitativa y cualitativa sobre la evolución, la distribución y las tendencias en un campo de investigación particular. En el contexto de las microrredes eléctricas y su impacto en la generación y distribución de energía eléctrica, un análisis bibliométrico puede proporcionar información valiosa sobre la relevancia de este tema, las áreas de enfoque más destacadas y las contribuciones más destacadas en la literatura científica.

La creciente demanda de energía, los problemas ambientales y la necesidad de una mayor eficiencia energética han impulsado el desarrollo de nuevas soluciones en el ámbito de la generación y distribución de energía eléctrica. En este contexto, las microrredes eléctricas han surgido como una alternativa prometedora, ya que permiten una integración más eficiente de fuentes de energía renovable, una mayor autonomía y resiliencia energética, y una mejora en la calidad de la energía suministrada.

Sin embargo, la implementación de microrredes conlleva desafíos significativos en cuanto al control de la calidad de la energía. Dado que las microrredes son sistemas descentralizados y autónomos, es fundamental implementar estrategias de control efectivas que garanticen la estabilidad del voltaje y la frecuencia, minimicen la presencia de armónicas y aseguren un suministro eléctrico confiable y de alta calidad.

1.1. Preámbulo del Análisis Bibliométrico

El análisis bibliométrico representa un enfoque metodológico crucial en esta investigación, que permite explorar de manera sistemática y cuantitativa la extensa y diversa literatura científica relacionada con las estrategias de control en microrredes eléctricas y calidad de la energía. En un mundo caracterizado por la rápida evolución de la tecnología y la innovación, la capacidad de examinar y sintetizar de manera objetiva los avances y las tendencias en un campo de estudio adquiere una importancia inigualable.

En los últimos años, la implementación de microrredes eléctricas ha surgido como una solución prometedora para abordar los desafíos asociados con la generación, distribución y consumo de energía. Estas microrredes, que consisten en sistemas eléctricos autónomos y descentralizados, presentan numerosos beneficios, como la flexibilidad en la integración de fuentes de energía renovable, la mejora en la eficiencia energética y la capacidad de operar de manera independiente o conectada a la red principal.

Sin embargo, a medida que las microrredes se vuelven más comunes, también se presentan desafíos relacionados con la calidad de la energía. La calidad de energía abarca aspectos como la estabilidad del voltaje y la frecuencia, la presencia de armónicas, la compensación de reactiva y otros fenómenos que pueden afectar el funcionamiento adecuado de los equipos y la satisfacción del usuario. En este contexto, las estrategias de control desempeñan un papel crucial en la mitigación de problemas relacionados con la calidad de la energía en las microrredes. Estas estrategias abarcan desde algoritmos de control de voltaje y frecuencia, técnicas de compensación de armónicos, hasta el desarrollo de sistemas de gestión de energía eficientes.

Es así que el análisis bibliométrico se convierte así en una brújula que nos guiará a través del vasto mar del conocimiento, señalando áreas emergentes, conexiones relevantes y posibles brechas en la investigación.

Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo principal realizar un análisis bibliométrico exhaustivo de las estrategias de control utilizadas en las microrredes para la mitigación de problemas de calidad de la energía. Mediante la recopilación y análisis de la información científica disponible en la Web of Science y otras fuentes relevantes, se busca identificar las tendencias actuales en el campo, las principales instituciones y autores líderes, y las áreas de investigación más destacadas.

1.2. Antecedentes

Las estrategias de control juegan un papel fundamental para garantizar la calidad y eficiencia de la energía. Es por ello que se hace necesario realizar una revisión exhaustiva de los enfoques de control de última generación en estas microrredes. [1]

Otros de los desafíos en el control de microrredes es la distribución desigual de potencia activa y reactiva debido a factores como el desajuste de impedancia en los alimentadores. Los métodos de control convencionales pueden tener dificultades por lo que se exploran enfoques adaptativos mejorados de control de caída para abordar estos problemas esto se describe en [2].

En el artículo [3] los investigadores realizaron una revisión de publicaciones sobre control de voltaje distribuido y descentralizado de redes de distribución inteligentes, resume sus modelos de control y clasifica la metodología para garantizar un control efectivo del voltaje y una operación eficiente de la red eléctrica.

En el artículo [4] los investigadores investigaron si el control distribuido tiene mejores resultados o mayores ventajas sobre los esquemas de control centralizado como confiabilidad, flexibilidad, etc.

Algunos otros investigadores han analizado y propuesto otras alternativas en las estrategias de control para mitigar los problemas de calidad de la energía como la de los investigadores Mahesh Kumar ; SC Srivastava ; SN Singh quienes hicieron la propuesta de un algoritmo y una estrategia de control coordinado en una Microrred de corriente continua (DCMG), tanto en modos de operación en isla como conectados a la red eléctrica [5].

En el artículo [6] los investigadores se centran en revisar y clasificar las diferentes técnicas de control primario y secundario utilizadas en las MG DC. Se menciona que los mecanismos de distribución de carga empleados en el control primario se distinguen en métodos pasivos y métodos activos. Además, se clasifican los distintos métodos para el control secundario.

En el artículo [7] investigaron exhaustivamente las topologías y las estrategias de control en inversores multifuncionales conectados a la red ya que estos pueden mejorar la calidad de la energía, son especialmente adecuados para aplicaciones en DGS y MG debido a su buen rendimiento y beneficios.

Otras de las soluciones propuesta para la mitigación de los problemas de la calidad de la energía que se han propuesto es el uso de tecnologías de almacenamiento basado en volantes de inercia (FESS, por sus siglas en inglés) ya que es una opción adecuada para diversas aplicaciones en el

sistema de potencia, como mejorar la calidad de la energía, suavizar la energía, apoyar la integración de energías renovables y mejorar la estabilidad. [8]

Se revisan y clasifican diferentes métodos de control utilizados en la generación distribuida (DG) y microrredes, con el objetivo de mejorar la calidad de la energía, la estabilidad y el enfoque para compartir energía en las microrredes como en el artículo [9]. El documento también destaca diferentes enfoques de control, evaluando sus ventajas y desventajas. Además, se discuten las tendencias futuras de investigación y las oportunidades de mejora para implementar en sistemas reales.

La literatura científica en el campo de las microrredes eléctricas y la calidad de la energía ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años. Numerosos investigadores han abordado este tema desde diferentes enfoques y han propuesto una variedad de estrategias de control. Sin embargo, hasta el momento, no se ha realizado un análisis bibliométrico exhaustivo para evaluar el estado actual de la investigación en esta área y identificar las tendencias y enfoques más destacados.

El presente estudio realiza un análisis bibliométrico de las estrategias de control utilizadas en microrredes eléctricas para mitigar problemas de calidad de la energía. Mediante el análisis de la literatura científica existente, se buscará identificar los estudios más relevantes, los enfoques metodológicos utilizados, las tendencias emergentes. Esto permitirá obtener una visión general del estado actual de la investigación y brindará información valiosa para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de las microrredes eléctricas y la calidad de la energía.

1.3. Planteamiento del problema

En el contexto actual de la generación y distribución de energía eléctrica, las microrredes se han destacado como una solución prometedora para abordar los desafíos energéticos y ambientales. Estos sistemas descentralizados ofrecen una mayor integración de fuentes renovables, autonomía energética y resiliencia, lo que los convierte en una alternativa atractiva para mejorar la eficiencia y la calidad del suministro eléctrico.

En este sentido la investigación en el ámbito de las microrredes eléctricas y la calidad de la energía, se evidencia una carencia significativa en el abordaje metodológico de análisis bibliométricos específicos. A medida que la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles y eficientes se intensifica, la necesidad de una comprensión precisa y estructurada de las estrategias de control implementadas para mitigar los problemas relacionados con la calidad de la energía en las microrredes adquiere una importancia crítica.

La ausencia de análisis bibliométricos específicos en esta temática conlleva un escenario en el que los estudios existentes pueden carecer de una orientación objetiva y rigurosa, limitando la identificación de tendencias, avances y lagunas en el campo.

La bibliometría, como herramienta de análisis cuantitativo de la literatura científica, ofrece una valiosa oportunidad para examinar la investigación existente sobre estrategias de control en microrredes y calidad de la energía.

Por lo tanto, este estudio plantea la necesidad de realizar un análisis bibliométrico para identificar las tendencias de investigación, y las estrategias de control más utilizadas.

1.4. Justificación

El análisis bibliométrico de la literatura científica relacionada con las estrategias de control en microrredes y calidad de la energía ofrece varias ventajas para este estudio. En primer lugar, permite identificar las tendencias de investigación en el campo, destacando las áreas más relevantes y emergentes. Asimismo, facilita la identificación de las estrategias de control más utilizadas y su eficacia en la mitigación de problemas de calidad de la energía.

Al utilizar la bibliometría, se puede acceder a una gran cantidad de datos objetivos y cuantitativos, lo que brinda una visión más completa y fundamental del estado del arte en el tema de estudio. Esto permitirá identificar posibles lagunas en la investigación, áreas con potencial de mejora.

Además, los resultados obtenidos a partir del análisis bibliométrico servirán como base para la toma de decisiones informadas en el diseño y desarrollo de microrredes eléctricas más eficientes y confiables. Asimismo, contribuirán al avance del conocimiento en el campo de las energías renovables y la gestión de la calidad de la energía.

En resumen, este estudio tiene una relevancia significativa al abordar un tema de gran actualidad y relevancia en el ámbito energético. La utilización de la bibliografía como herramienta de análisis permitirá obtener resultados objetivos y fundamentales, que contribuirán al desarrollo y mejora de las estrategias de control en microrredes eléctricas y la consecución de un sistema energético más sostenible y resiliente.

1.5. Hipótesis-Objetivos

Hipótesis

Este análisis bibliométrico servirán como base para la toma de decisiones informadas en el diseño y desarrollo de microrredes eléctricas más eficientes y confiables.

Esto permitirá obtener una visión general del estado actual de la investigación y brindará información valiosa para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de las microrredes eléctricas y la calidad de la energía.

Objetivo General

Realizar un análisis bibliométrico exhaustivo que permita evaluar y comprender el estado actual de las estrategias de control utilizadas en microrredes eléctricas, y su impacto en la mitigación de problemas de calidad de la energía.

Objetivo Específico

- Realizar una revisión exhaustiva de la literatura científica relacionada con las estrategias de control en microrredes eléctricas y problemas de calidad de la energía.
- Identificar y recopilar un conjunto de documentos relevantes utilizando criterios de búsqueda específicos en la bases de datos del la Web of Science.
- Aplicar técnicas bibliométricas, incluyendo el análisis de co-citación y el mapeo de densidad de términos clave para analizar y visualizar las tendencias, los patrones de citación para identificar las principales estrategias de control utilizadas en microrredes eléctricas.

1.6. Metodología

En la siguiente sección se describirá la metodología utilizada para realizar el análisis bibliométrico.

Etapa 1

Estado del arte

En esta etapa se utiliza el software VOSviewer, el cual utiliza técnicas de análisis de redes para explorar, visualizar la estructura y el contenido de una colección de documentos científicos. Es útil para identificar temas clave, relaciones entre términos, evaluar el impacto y la influencia de los documentos científicos en un campo de investigación específico. Adicionalmente generar mapas de co-citaciones que representan las interrelaciones entre los términos clave utilizados en los títulos y resúmenes de los artículos.

Etapa 2

Selección de la base de datos

En esta etapa, se utiliza Web of Science como base de datos principal para realizar la búsqueda bibliográfica, considerando un intervalo de tiempo establecido desde el año 2012 hasta el año 2022, para obtener los artículos más actualizados en el campo de estudio. Excluyendo los siguientes tipos de documentos: Acceso temprano, Capítulos de libros, Material editorial. Los resultados obtenidos tendrán que exportarse en formato txt para ser procesados con la ayuda de la herramienta de visualización y análisis de redes VOSviewer.

Etapa 3

Preparación de datos

En esta etapa se deberá importar la lista de documentos en el formato adecuado para VOSviewer. Esto puede implicar convertir los datos a un formato como CSV o BibTeX que sea compatible con la herramienta.

Etapa 4

Creación del thesaurus

En esta etapa, desarrollamos un thesaurus esencial para el análisis bibliométrico. Este instrumento facilita la identificación y clasificación de términos similares en los datos. En el análisis, el thesaurus de sinónimos guía a la herramienta al reconocer variantes de un mismo concepto.

Comenzamos seleccionando la base de datos en VOSviewer y generamos la sección de co-conurrencias, eligiendo todas las palabras clave. Estas se exportan en un archivo CSV para su posterior procesamiento en Excel.

Etapa 5

Generación de análisis

En esta etapa se lleva a cabo el análisis de contenido mediante el estudio de países, instituciones, fuentes de información y autores, con el objetivo de identificar los elementos más relevantes según su índice de citación y generación de literatura. Además, se generan mapas de densidad y se construyen redes bibliométricas para visualizar las relaciones entre los diferentes elementos analizados.

Etapa 6

Generación del mapa de co-conurrencias

Se utiliza el apartado de co-conurrencias de VOSviewer para la creación de un mapa con los términos clave que más se frecuentan en los documentos. Las co-conurrencias son ciertas palabras o ideas que aparecen juntas a menudo en textos relacionados, esto revela cómo los conceptos están conectados en la literatura y se visualizan como nubes de palabras o mapas de calor.

Etapa 7

Análisis de resultados

Se analizan los datos obtenidos en el análisis bibliométrico para identificar las tendencias y los avances en el campo de nuestra investigación

1.7. Alcances y limitaciones

El análisis bibliométrico propuesto pretende dar a conocer las estrategias de control mas importantes que ayuden a mitigar los problemas de calidad de la energía en las microrredes así como los países, autores e instituciones mas sobresalientes en este aspecto de la investigación, sin embargo la falta de automatización del programa requiere que se tengan conocimientos previos para hacer el estudio debido a que hay selecciones en la que se requiere la intervención manual para conseguir un resultado optimo.

Debido a las limitaciones de la automatización el análisis bibliométrico presentado no muestra métodos de control específicos si no mas bien las estrategias de control empleadas para la mitigación de los problemas de la calidad de la energía.

1.8. Estructura de la Tesis

En esta sección, se presenta un adelanto del contenido de cada uno de los capítulos que conformarán la tesis formal. La tesis está estructurada en 4 capítulos, los cuales se describirán a continuación:

Capítulo 1.- Se plantea el contexto que motiva la realización de un análisis bibliométrico de diversas estrategias de control en microrredes. Además, se proporciona una breve introducción a este tipo de estudio. Posteriormente, se presenta información de investigaciones previas que sirven de base para justificar la realización de este nuevo estudio. Asimismo, se exponen las hipótesis derivadas del estado del arte y se fundamentan los objetivos de esta investigación.

Capítulo 2.- Se describen las generalidades de los temas a abordar: microrredes, análisis bibliométrico, estrategias de control, calidad de la energía, etc .

Capítulo 3.- En esta sección, se detallan los distintos resultados derivados del análisis bibliométrico llevado a cabo utilizando la herramienta VOSviewer. .

Capítulo 4.- Se generan las conclusiones pertinentes basadas en el análisis de los resultados y la comprobación de la hipótesis .

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Conceptos generales

La bibliometría es la ciencia que estudia cuantitativamente las características de las publicaciones científicas. Los primeros estudios bibliométricos se remontan a principios del siglo XX, consistiendo en recuentos manuales muy sencillos de los trabajos publicados. [10]

Existen dos categorías principales para clasificar los indicadores bibliométricos: los indicadores de actividad y los indicadores de impacto. Los indicadores de actividad proporcionan una representación del estado actual de la ciencia y abarcan aspectos como el número y la distribución de publicaciones, la productividad, la dispersión de las publicaciones, la colaboración entre autores, la vida media de las citas o envejecimiento, así como las conexiones entre autores, entre otros. Por otro lado, los indicadores de impacto incluyen la evaluación de documentos altamente citados, conocidos como "Hot papers", y el factor de impacto.[11].

El análisis bibliométrico contemporáneo se nutre de herramientas avanzadas que permiten explorar y visualizar de manera efectiva la complejidad de las redes de conocimiento. En este sentido, VOSviewer emerge como una herramienta tecnológica esencial que facilita la representación visual y el análisis de patrones y relaciones ocultas en conjuntos de datos bibliométricos.

VOSviewer es una herramienta de visualización y análisis bibliométrico utilizada para explorar y representar gráficamente la estructura de la literatura científica y analizar patrones y tendencias en las publicaciones académicas. Permite realizar análisis de co-citación, co-autoría y análisis de palabras clave para identificar las relaciones entre los documentos y los autores en un determinado campo de investigación.

VOSviewer utiliza técnicas de visualización interactiva, como mapas de redes y diagramas de nubes de palabras, para representar visualmente la información extraída de bases de datos bibliográficas. Esto ayuda a los investigadores a identificar los temas clave, las conexiones entre los documentos y los autores más influyentes en un área específica.

En el contexto específico de las microrredes eléctricas, la aplicación de VOSviewer adquiere una relevancia particular. En la búsqueda de estrategias de control y la mejora de la calidad de la energía en microrredes, esta herramienta se convierte en un instrumento esencial para esclarecer y estructurar la vasta cantidad de información dispersa en la literatura científica. A través de mapas de redes, se puede trazar una representación visual de las interconexiones entre las estrategias de control, sus implicaciones y sus efectos en la calidad de la energía.

European Technology Platform of Smart Grid: Define a una microrred eléctrica (figura 2.1), como la plataforma que facilita la integración de redes con generación distribuida, sistemas de almacenamiento de energía así como también cargas, para garantizar que la red eléctrica pueda suministrar energía sostenible, confiable y competitiva en precio, aunque otros autores o investigaciones la definen como un sistema de energía a pequeña escala que suele utilizarse para suministrar energía a una pequeña comunidad o grupo de edificios. Las microrredes pueden estar conectadas a la red eléctrica principal, que puede funcionar de forma independiente.[12]

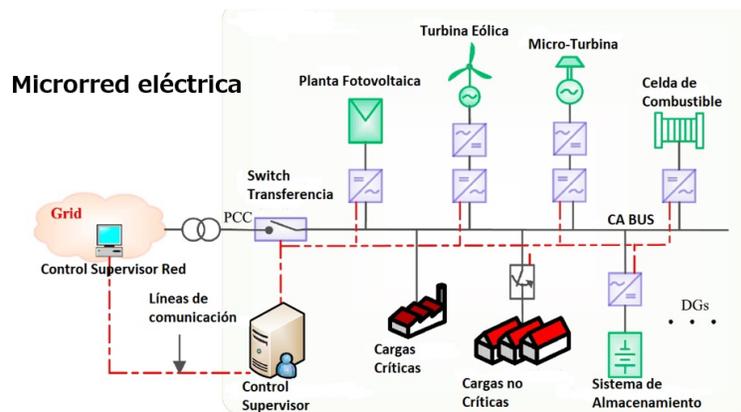


Figura 2.1: Microrred eléctrica

Un sistema de control en las microrredes es un conjunto de algoritmos, software y hardware diseñado para supervisar y regular el funcionamiento de la Microrred. El sistema de control de una microrred tiene varios objetivos principales: Gestión de la generación de energía, Administración de la carga, Gestión del almacenamiento de energía, Gestión de la conexión con la red principal y

supervisión y seguridad.[13]

La calidad de la energía se refiere a una amplia variedad de variaciones en la energía eléctrica suministrada a los clientes conectados a redes eléctricas públicas. Puede cubrir problemas de cableado, problemas de conexión a tierra, transitorios de conmutación, variaciones de carga y generaciones de armónicos, el factor de potencia, huecos de tensión, sobre-tensiones e interrupciones, transitorios y desequilibrio (especialmente en aplicaciones con motores).[14]

2.2. Análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico es una metodología que utiliza técnicas cuantitativas para estudiar la producción científica y su impacto en un campo específico. Se basa en el análisis de datos bibliográficos, como artículos de revistas científicas, para obtener información numérica sobre diversos aspectos de la investigación. Para ello, se utilizan indicadores bibliométricos que proporcionan medidas cuantitativas. Algunos de estos indicadores son el número de documentos publicados, que permite conocer la actividad científica en un área determinada, las citas recibidas por un documento, que reflejan su influencia y reconocimiento en la comunidad científica, el índice H, que combina la productividad y el impacto de un investigador, y el factor de impacto de las revistas, que indica la importancia relativa de una revista basándose en las citas recibidas por sus artículos. Además, el análisis bibliométrico también estudia las redes de colaboración entre investigadores, instituciones y países, lo cual proporciona información sobre las relaciones y la difusión del conocimiento en la comunidad científica.

Para llevar a cabo el análisis bibliométrico es importante seleccionar una muestra representativa que sea lo suficientemente amplia y relevante para obtener conclusiones significativas. Se debe tener en cuenta que el tamaño de la muestra de documentos puede influir en la precisión y validez de los resultados obtenidos. Una muestra más grande generalmente proporcionará una imagen más representativa de la producción científica en un campo determinado, pero también requerirá más tiempo y recursos para su análisis.

No obstante, se debe reconocer que el análisis bibliométrico tiene limitaciones, ya que se enfoca principalmente en aspectos cuantitativos y puede no capturar completamente la calidad y el impacto cualitativo de la investigación científica.

2.2.1. VOSviewer

Otro concepto importante a conocer es la plataforma VOSviewer (figura 2.2) esta es una herramienta científica utilizada para visualizar y analizar la estructura de la información científica. Permite explorar y comprender de manera visual las relaciones entre documentos científicos, autores, palabras clave y otras entidades relevantes en un campo de investigación específico.



Figura 2.2: Logotipo de VOSviewer

La forma en que funciona VOSviewer es la siguiente:

Recopilación de datos: Primero, se recopilan los datos bibliográficos relevantes, como los documentos científicos de interés. Estos datos pueden obtenerse de bases de datos académicas o de otras fuentes.

Preparación de datos: A continuación, los datos se preparan y organizan de manera adecuada para su análisis. Esto incluye seleccionar las variables relevantes, como las palabras clave o los autores, y asignar pesos o valores a cada elemento en función de su importancia o frecuencia.

Visualización: VOSviewer utiliza algoritmos avanzados para crear visualizaciones interactivas en forma de mapas o gráficos. Estos mapas representan las relaciones entre los elementos analizados, como la proximidad entre documentos que comparten palabras clave o la cercanía entre autores que colaboran con frecuencia.

Análisis: Una vez que se obtiene la visualización, es posible realizar diferentes análisis y exploraciones. Por ejemplo, se pueden identificar los temas más relevantes en el campo, detectar comunidades de investigación, identificar autores influyentes o analizar la evolución temporal de los temas.

VOSviewer utiliza técnicas de análisis de redes y algoritmos de agrupamiento para generar visualizaciones claras y comprensibles de la estructura de la información científica. Estas visualizaciones permiten a los investigadores identificar patrones, descubrir nuevas conexiones y obtener una comprensión más profunda de un campo de investigación específico.

La visualización interactiva proporcionada por VOSviewer permite a los investigadores identificar los temas clave en el ámbito de las microrredes, explorar las conexiones entre diferentes documentos y autores, y resaltar aquellos que han tenido una influencia significativa en el desarrollo de este campo. Esta información, a su vez, nutre el análisis bibliométrico, brindando una base sólida para el estudio de las estrategias de control y su impacto en la calidad de la energía en microrredes eléctricas.

Así pues, la transición de las funcionalidades de VOSviewer a la aplicación en el ámbito de las microrredes permite aprovechar al máximo esta herramienta para desentrañar las complejidades y los avances en un dominio de investigación en constante evolución

2.3. Microrredes Eléctricas

Una microrred se compone de un conjunto de cargas y microfuentes energéticas, como turbinas eólicas, microturbinas, paneles solares fotovoltaicos y celdas de combustible, que operan como un sistema unificado y controlable.

Las microrredes frecuentemente ofrecen diversas ventajas tanto a los usuarios como a los gestores del sistema eléctrico. Estas ventajas incluyen la disminución de las pérdidas en la transmisión eléctrica, la potenciación de la calidad energética y la optimización de la eficacia global del sistema[15].

Esta entidad proporciona tanto calor como energía a una región local específica [16]. Aparte de sus muchos beneficios, existen muchos problemas y desafíos en la integración de este concepto en los sistemas de potencia, como su control y estabilidad [15], debido a la naturaleza intermitente de los recursos de energía renovable y los perfiles de carga fluctuantes, la fuente de alimentación en la microrred a veces no logra mitigar las demandas de carga y provoca la fluctuación de la frecuencia del sistema [17]. que pueden ser resueltos por los sistemas de almacenamiento de energía. Es decir que aunque las ventajas de la microrred sean muchas las desventajas también son extensas pero se pueden mitigar o controlar.

2.3.1. Componentes

Las microrredes se caracterizan por tener componentes específico como lo podemos ver (figura 2.3).

Puntos de generación:Las microrredes admiten todo tipo de generación adaptada a las necesidades, pueden ser generadores diésel, generación renovable(eólica, solar).

Redes de distribución: principalmente eléctricas, tanto aéreas como subterráneas.

Punto de Acoplamiento Común (PCC por sus siglas en inglés): Son instrumentos como interruptores que permiten conectarse y desconectarse de la red pública.

Elementos de gestión y control: Incluyendo los elementos encargados de estos procesos de regulación para los diferentes estados de la microrred (conectada, desconectada y de transición entre ambas).

Elementos de protección: Normalmente trabajando individualmente o coordinados con algunos otros elementos de protección.

Sistemas de almacenamiento de energía (ESS por sus siglas en inglés): Aunque no es esencial, es importante cuando la MG se regula en modo isla.

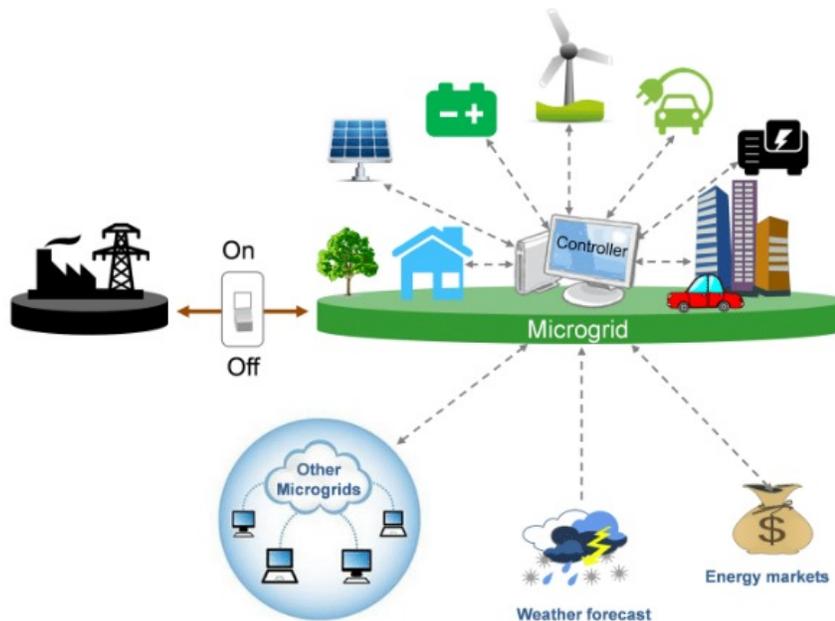


Figura 2.3: Componentes de la microrred

2.3.2. Clasificación

Las microrredes son capaces de proporcionar soporte de voltaje y frecuencia, mejorar la calidad de la energía y lograr una distribución de energía adecuada, lo que las lleva a clasificarse en diferentes tipos de microrredes(figura 2.4) de CA, CC e híbridas [18].

Microrredes remotas: también se denominan microrredes fuera de la red. Las microrredes remotas pueden operar en modo “isla” y estar físicamente aisladas de la red pública en caso de que no haya infraestructuras de transmisión o de distribución asequibles y disponibles en el área.

Microrredes conectadas a la red eléctrica: disponen de una conexión física a la red pública a través de un mecanismo de conmutación en el punto de acoplamiento común (PCC); sin embargo, pueden desconectarse en modo isla y volver a conectarse a la red principal cuando sea necesario.

Microrredes híbridas: combinan las dos anteriores y pueden funcionar tanto en modo isla como conectadas a la red pública.

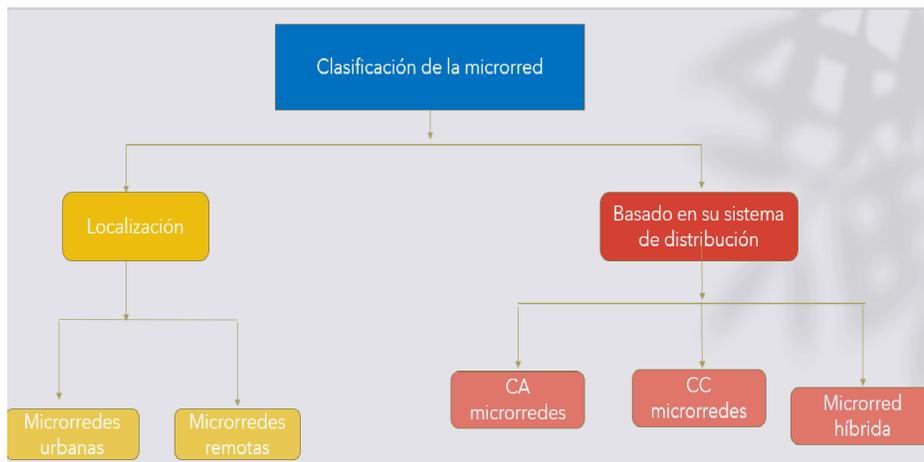


Figura 2.4: Mapa de la clasificación de las microrredes

2.3.3. Modos de operación

Los modos de operación de la microrred dependen de si esta en modo isla o conectada a la red (figura 2.5). La microrred tiene características operativas flexibles en los modos conectado a la red y en isla, por lo tanto, puede mejorar la eficiencia y la seguridad de la red.

En el modo de operación conectado a la red, las microrredes pueden mantener estable la frecuencia del sistema intercambiando energía con una red principal, no se requiere el controlador de voltaje, ya que lo dicta la red principal[19]. Sin embargo, en el modo islas, las microrredes están diseñadas como sistemas fuera de la red donde el control de frecuencia principal es fundamental.

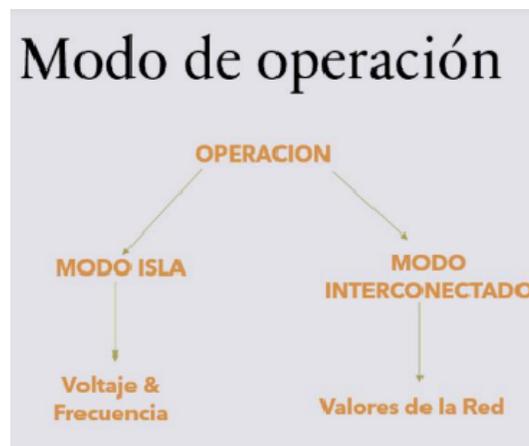


Figura 2.5: Modos de operación

2.4. Calidad de la energía

Los problemas de calidad de la energía en las microrredes se refieren a las condiciones no deseadas o inaceptables en relación con la generación, distribución y uso de energía eléctrica. Estos problemas pueden afectar la eficiencia, confiabilidad y rendimiento de la microrred [20], así como la calidad de la energía suministrada a los usuarios. En la (figura 2.6) se muestran los problemas de calidad de la energía más comunes en microrredes eléctricas.



Figura 2.6: Dificultades de las microrredes

A continuación, se definen algunos de los problemas de la figura 2.6 dividiéndolos en el modo de operación de la microrred :

Problemas de calidad de la energía en modo isla:

Variaciones de voltaje: Se producen fluctuaciones en el nivel de voltaje, lo que puede afectar el funcionamiento de los equipos eléctricos sensibles. Estas variaciones pueden manifestarse como sobretensiones o subvoltajes.

Desbalance de carga: Ocurre cuando la distribución de carga eléctrica entre las fases o componentes de la Microrred no es uniforme. Esto puede generar corrientes desequilibradas y afectar el rendimiento de los equipos.

Distorsión Armónica: La generación heterogénea en las microrredes puede dar lugar a distorsiones armónicas en la forma de onda de la corriente y el voltaje. Estas distorsiones pueden afectar el rendimiento de los dispositivos sensibles a la calidad de energía.

Fluctuaciones de frecuencia: Las variaciones en la frecuencia eléctrica pueden causar problemas en la sincronización de equipos y afectar el funcionamiento de dispositivos sensibles que requieren una frecuencia constante.

Interferencia electromagnética: Se refiere a la interferencia generada por equipos eléctricos y electrónicos en la Microrred que puede afectar el rendimiento de otros equipos cercanos, causando errores de funcionamiento o degradación del rendimiento.

Pérdidas de energía: Las pérdidas no deseadas en la transmisión y distribución de energía pueden reducir la eficiencia general de la microrred y disminuir su rendimiento.

Problemas de calidad en modo conectado a la red:

Inyección de Armónicos: Las cargas no lineales en la microrred, como los convertidores electrónicos, pueden inyectar armónicos en la red eléctrica principal. Estos armónicos pueden propagarse a otros equipos y afectar su funcionamiento.

Variabilidad de Carga: Las fluctuaciones en la demanda de energía pueden afectar la estabilidad de la red. Esto es especialmente notable si la microrred tiene una gran cantidad de cargas variables.

Fluctuaciones de Voltaje y Frecuencia: Aunque en modo conectado a la red, la microrred debería estar sincronizada con la red principal, todavía puede haber fluctuaciones en el voltaje y la frecuencia debido a problemas en la red principal. Esto puede afectar los equipos conectados a la microrred.

Calidad de Energía de la Red Principal: La calidad de energía de la red principal a la que está conectada la microrred puede verse afectada por problemas como caídas de voltaje, interrupciones y armónicos. Estos problemas pueden propagarse a la microrred.

Estos problemas de calidad de la energía pueden tener efectos negativos en la operación de la microrred y en los equipos conectados a ella. Por lo tanto, es importante implementar medidas de control y mitigación para asegurar una calidad de energía adecuada y garantizar un suministro confiable y eficiente a los usuarios.

2.5. Estrategias de control en las microrredes

Las estrategias de control en las microrredes son enfoques y técnicas utilizados para supervisar, regular y gestionar el funcionamiento de una Microrred. Estas estrategias se implementan con el objetivo de optimizar la generación, el almacenamiento y la distribución de energía, así como mantener la estabilidad y confiabilidad del sistema. En la (figura 2.7) se muestran las estrategias de control más comunes en el área de las microrredes.



Figura 2.7: Estrategias de control de las microrredes

2.5.1. Control de voltaje y frecuencia

Esta estrategia se encarga de controlar la frecuencia y el voltaje en la Microrred para asegurar un suministro de energía estable. Monitorea y ajusta la generación y carga para mantener estos parámetros dentro de los límites aceptables [16].

2.5.2. Control de potencia activa y reactiva

El control de potencia activa y reactiva (generalmente denominado control PQ) es un aspecto de control importante para un controlador de MG en ambos modos de operación de MG, especialmente en el modo conectado a la red. El esquema efectivo de control de distribución de energía garantiza la operación confiable de la MG al administrar de manera efectiva la energía importada y exportada entre la MG y la red principal.

2.5.3. Método de control caída

El método de control de caída convencional es un método que se puede aplicar a los ESS de una MG usando control centralizado y descentralizado la frecuencia y la caída de tensión proporcio-

nalmente con la activa generada y potencia reactiva, respectivamente.

2.5.4. Control centralizado

El arte de controlar una microrred flexible tanto en modo conectado a la red como en modo aislado, el conocimiento de arquitectura del sistema, la planificación del sistema y la son necesarias topologías relacionadas con la microrred Este controlador central es la columna vertebral del sistema que realiza todos los cálculos y produce acción de control para todas las unidades conectadas en un solo punto[21].

2.5.5. Control descentralizado

Estas las unidades son controladas independientemente por su propio controlador local. El controlador local recibe información local y produce acción de control para mantener las unidades locales los controladores no dependen del control de la acción de otro controlador. Se requiere un fuerte acoplamiento entre las unidades del sistema [21, 22].

En la (figura 2.8) podemos ver como son las estrategias de control centralizadas y descentralizadas de una manera gráfica.

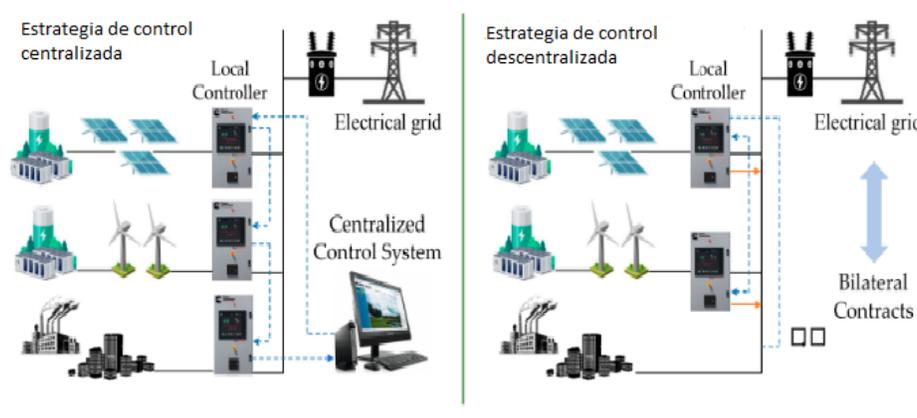


Figura 2.8: Control centralizado y descentralizado

2.5.6. Control jerárquico

se divide en tres niveles de controles [22, 23].

Control primario: El primer nivel de control jerárquico es el enfoque de control primario, también conocido como control interno o local. El enfoque de control primario es controlar el voltaje y la frecuencia del voltaje de referencia que se alimenta a los lazos internos de control de voltaje y corriente.

Control secundario: El nivel de control secundario también se conoce como sistema de gestión de energía (EMS) que supervisa el sistema y recoge información de las unidades de la DG para regular la microrred. El nivel de control primario produce alguna desviación de tensión y frecuencia que se compensa por el nivel de control secundario.

Control terciario: El nivel más alto de control jerárquico es el enfoque de control terciario. Ajusta el punto de consigna de los inversores en la microrred para controlar el flujo de energía. El enfoque de control terciario envía información a el nivel de control secundario que coordina el primario nivel de control y subsistemas en la microrred dentro de un poco minuto. Después de eso, el controlador principal puede reaccionar instantáneamente a los eventos locales de una manera predefinida. El enfoque de control terciario también reduce el armónico de voltaje por inyección de armónicos.

Capítulo 3

Resultados de la investigación

En esta sección, se presentan y analizan los resultados obtenidos a través de la aplicación de la metodología descrita en el Capítulo 1 como lo podemos ver en la figura 3.1 . El objetivo principal de esta discusión es examinar los hallazgos de la investigación en relación con los objetivos planteados. La discusión de resultados se estructura en torno a los temas y hallazgos más relevantes emergentes de los datos recopilados y analizados. Se presentarán los resultados de manera clara y concisa, utilizando gráficos, tablas u otros recursos visuales apropiados para facilitar la comprensión y la interpretación de los datos.

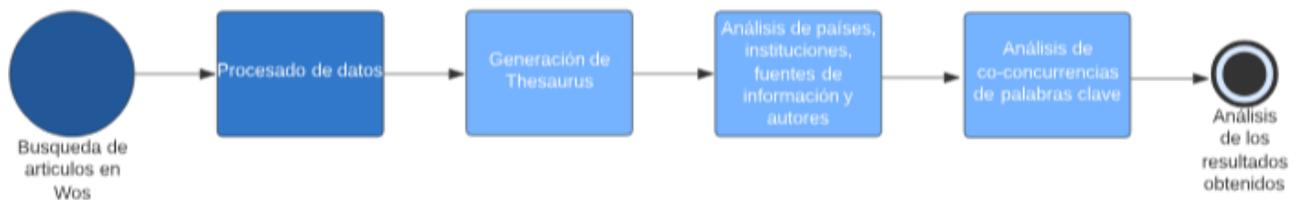


Figura 3.1: Diagrama de flujo de las actividades

3.1. Evolución de la literatura

Para analizar la evolución de la literatura en el tema de estrategias de control de las microrredes para la mitigación de los problemas de la calidad de la energía se creó un gráfico que muestra la cantidad de artículos generados en base a la búsqueda de los criterios de la tabla 3.1 obtenidos de la base de datos de la Web of Science en un periodo del 2012 al 2022, presentando una línea que muestra la cantidad de artículos generados por año, la figura 3.2 muestra un claro aumento desde el 2012 hasta el 2022, aunque la gráfica cuente los años de dos en dos se puede ver que el aumento es muy notable exceptuando el 2019 donde la producción disminuyo en contra del año anterior, el declive final corresponde al año 2023 pero ese no se contempla en el estudio, como se puede mostrar en

la tabla 3.2. Esta información nos ayuda a captar la importancia y relevancia del tema investigado.

Criterios de búsqueda
Microgrid
Microgrids
Control strategies
Control techniques
Control methods
Control schemes
Power quality
Harmonic distortion
Voltage variation
Current distortion
Frequency variation
Unbalance voltage
Imbalance voltage

Tabla 3.1: Criterios de Búsqueda

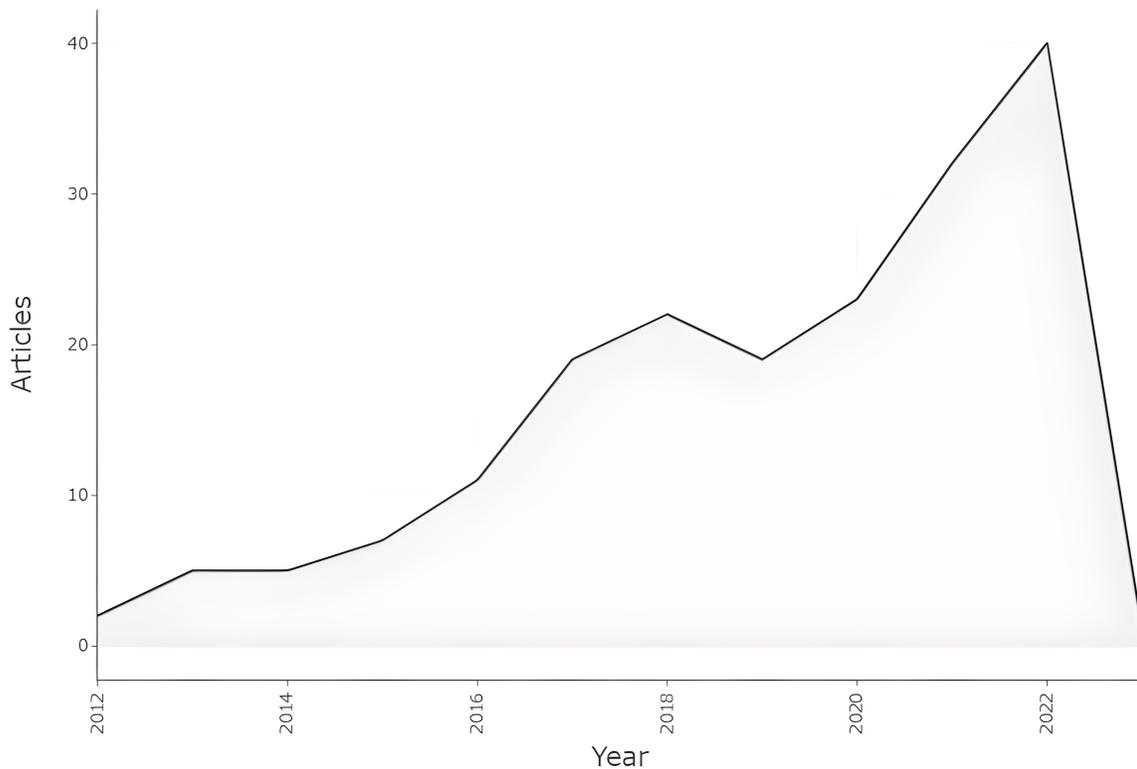


Figura 3.2: Gráfica de producción de documentos del 2012 al 2022

Producción científica anual	
Año	Artículos
2022	40
2021	32
2020	23
2019	19
2018	22
2017	19
2016	11
2015	7
2014	5
2013	5
2012	2

Tabla 3.2: Producción científica anual

3.2. Documentos más citados

Una forma de evaluar la importancia y la eficacia de la investigación es analizar las citas de los artículos publicados. Se recopiló información de citas de artículos para los términos de búsqueda de la tabla 3.1. Descargados de la base de datos de la Web of Science (WoS). En la figura 3.3 se muestran los 10 documentos más citados en este campo.

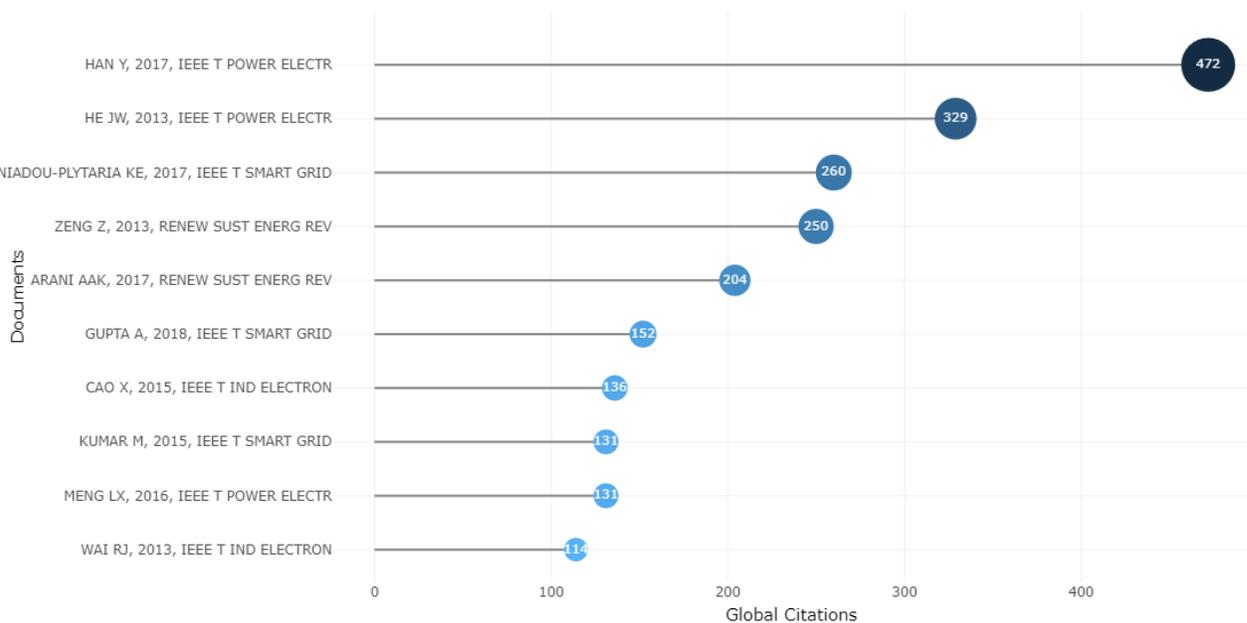


Figura 3.3: Documentos más citados del periodo 2012-2022

Las citas de los artículos proporcionan una perspectiva valiosa sobre la relevancia y el impacto de los estudios en estudio de las microrredes, el control y la calidad de la energía de estas. Esto puede orientar a investigaciones futuras enfocadas al desarrollo de las estrategias de control y la

mitigación de problemas en la calidad de la energía en microrredes.

Se puede observar que en el lugar número 3 se destaca [2], el texto destaca el desafío de lograr una distribución adecuada de la potencia activa y reactiva entre las múltiples unidades de generación distribuida conectadas en paralelo, especialmente en las microrredes aisladas. Para abordar estos problemas, se han propuesto diversas estrategias de control, como el control de caída adaptativo/mejorado, métodos basados en la red y esquemas de caída basados en costos, así como enfoques de control jerárquico, sistemas multiagente y control predictivo. Estos métodos buscan asegurar una distribución adecuada de la potencia reactiva y superar los efectos de los retrasos en la comunicación inherentes al control jerárquico.

Por otra parte quienes ostentan el segundo lugar [24] y el tercer lugar [3] nos presentan problemas de calidad de la energía en microrredes y revisan las publicaciones recientes sobre control de voltaje distribuido y descentralizado de redes de distribución inteligentes respectivamente.

EL cuarto artículo [25] describe los beneficios y control adecuado para mejorar la calidad de la energía.

El quinto artículo [8] nos cuenta de problemas de resonancia en microrredes interactivas de red y de las estrategias de control que es el sistema de almacenamiento de energía mediante volante de Inercia (FESS por sus siglas en inglés).

En los artículos [26, 27], se abordan diversas temáticas relacionadas con la mejora de la calidad de la energía en microrredes y sistemas de almacenamiento. El artículo [28] se centra en métodos de intercambio de corriente de secuencia negativa distribuida para optimizar la calidad de la energía en microrredes de corriente continua. El artículo [5] presenta un esquema de control adaptativo en inversores de alto rendimiento, buscando una menor distorsión armónica y mayor factor de potencia en microrredes. El artículo [29] explora estrategias de control para la regulación del voltaje, análisis de estabilidad y protección en microrredes híbridas ac-dc.

Cada uno de los textos enfatiza la importancia de las estrategias de control para mejorar la calidad de la energía en microrredes, así como la resolución de problemas específicos relacionados con la calidad de la energía en cada contexto particular.

3.3. Análisis de los países con mayor número de publicaciones

Se presenta una clasificación de los países más relevantes según el número de documentos y citas obtenido en la literatura científica relacionada con el tema de estudio figura 3.4. El primer lugar en producción de documentos lo ostenta China con 68 documentos publicados y 1784 citaciones, Aunque la tendencia no esta inclinada a alguna región es específico los países como Estados Unidos, Canadá, Dinamarca y Australia también tiene una fuerte presencia.

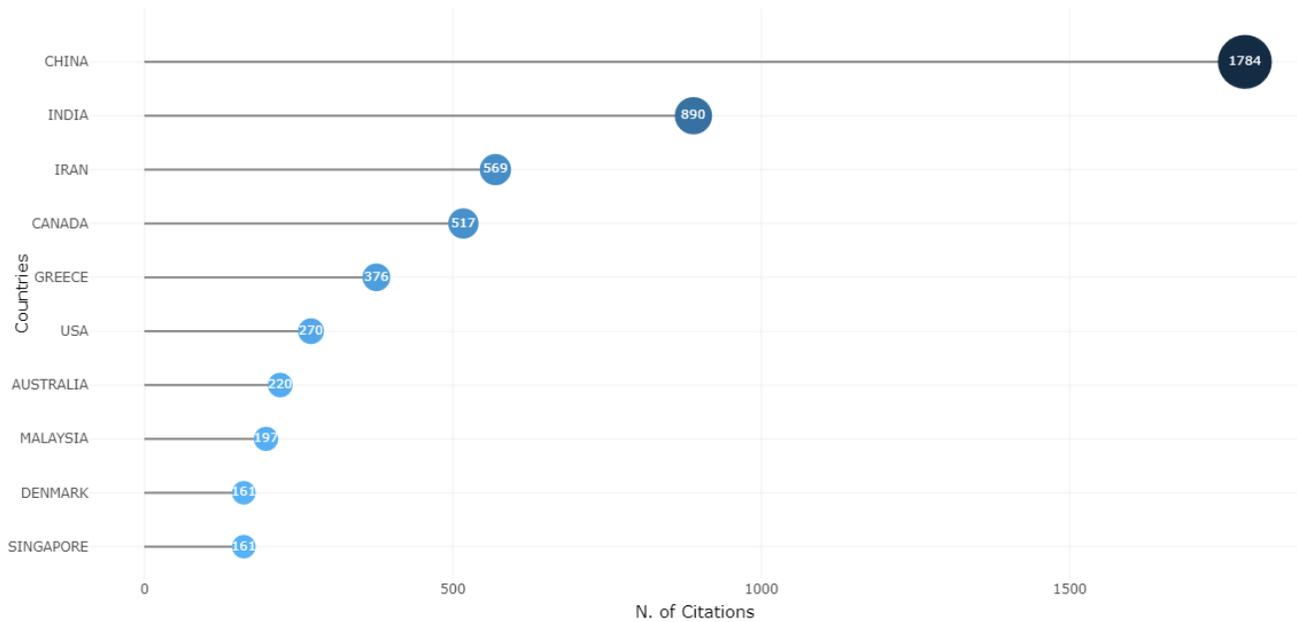


Figura 3.4: Gráfica de citaciones por país

Producción científica por país	
País	Frecuencia
China	68
India	64
Irán	35
Dinamarca	25
USA	25
Pakistán	19
Canadá	18
Arabia Saudí	17
Malasia	14
Australia	12

Tabla 3.3: Producción científica por país

Los datos presentados en la figura 3.4 se pueden observar de otra forma en la tabla 3.3 y representarlos gráficamente en un mapa de densidad figura 3.5 basado en el número de documentos

producidos por país, se confirma la preponderancia de China, India e Irán en términos de producción científica. También se puede destacar a Estados Unidos y Dinamarca, ya que tienen una posición ligeramente más destacada que otros países, aunque no alcanzan una posición dominante como los países mencionados anteriormente.

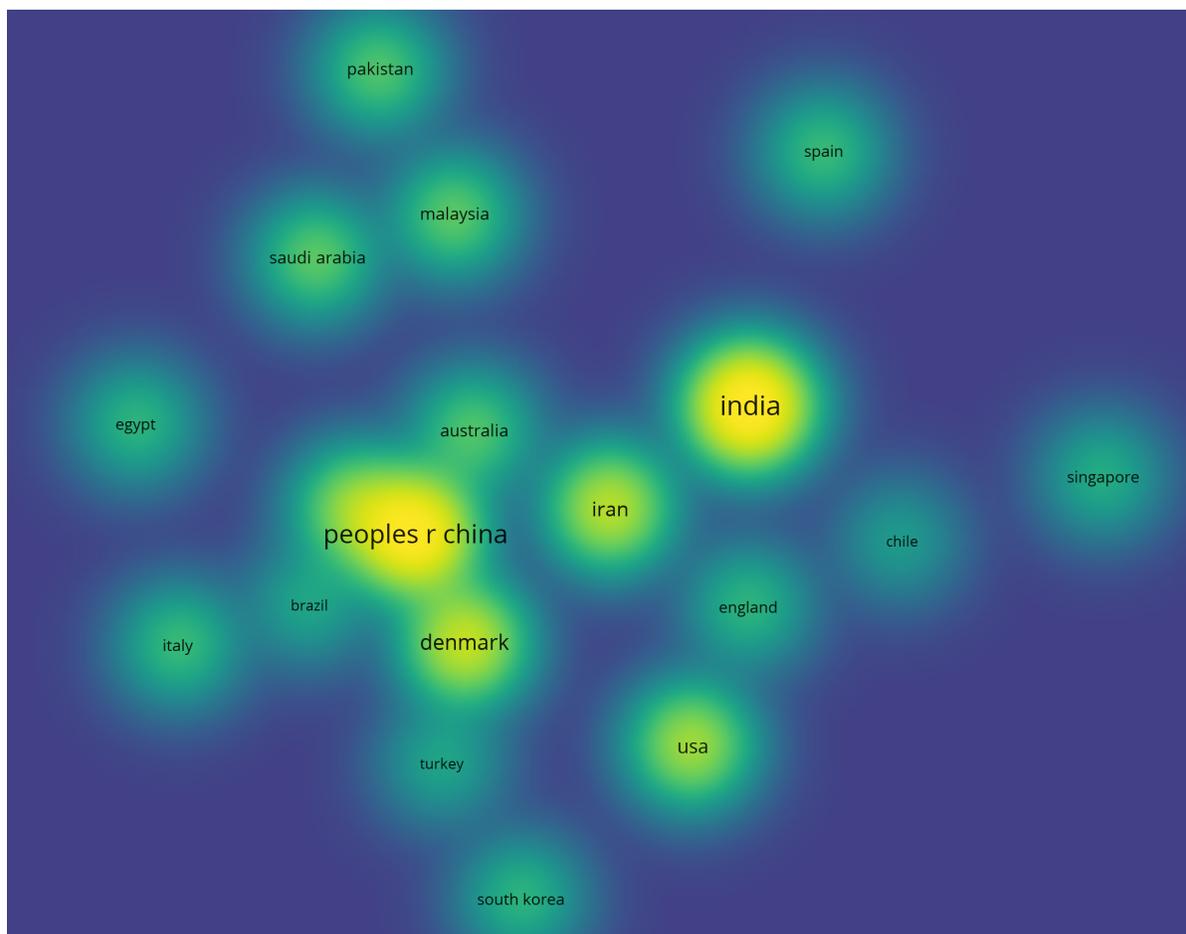


Figura 3.5: Mapa de densidades de los países

En cuanto a la relación de colaboraciones de los países, se a creado una red bibliométrica como se muestra en la figura 3.6, en el cual se aprecia que los países dominantes forman su propio grupo y tienen participaciones estrechas, también se puede notar que Irán tiene relaciones estrechas con la India y China por lo que se observa el porque se encuentra entre los tres primeros, algunos otros países punteros como Dinamarca se les nota una mayor colaboración con Estados Unidos y China, mientras que Estados Unidos tiene más relación con Dinamarca, Inglaterra e Irán.

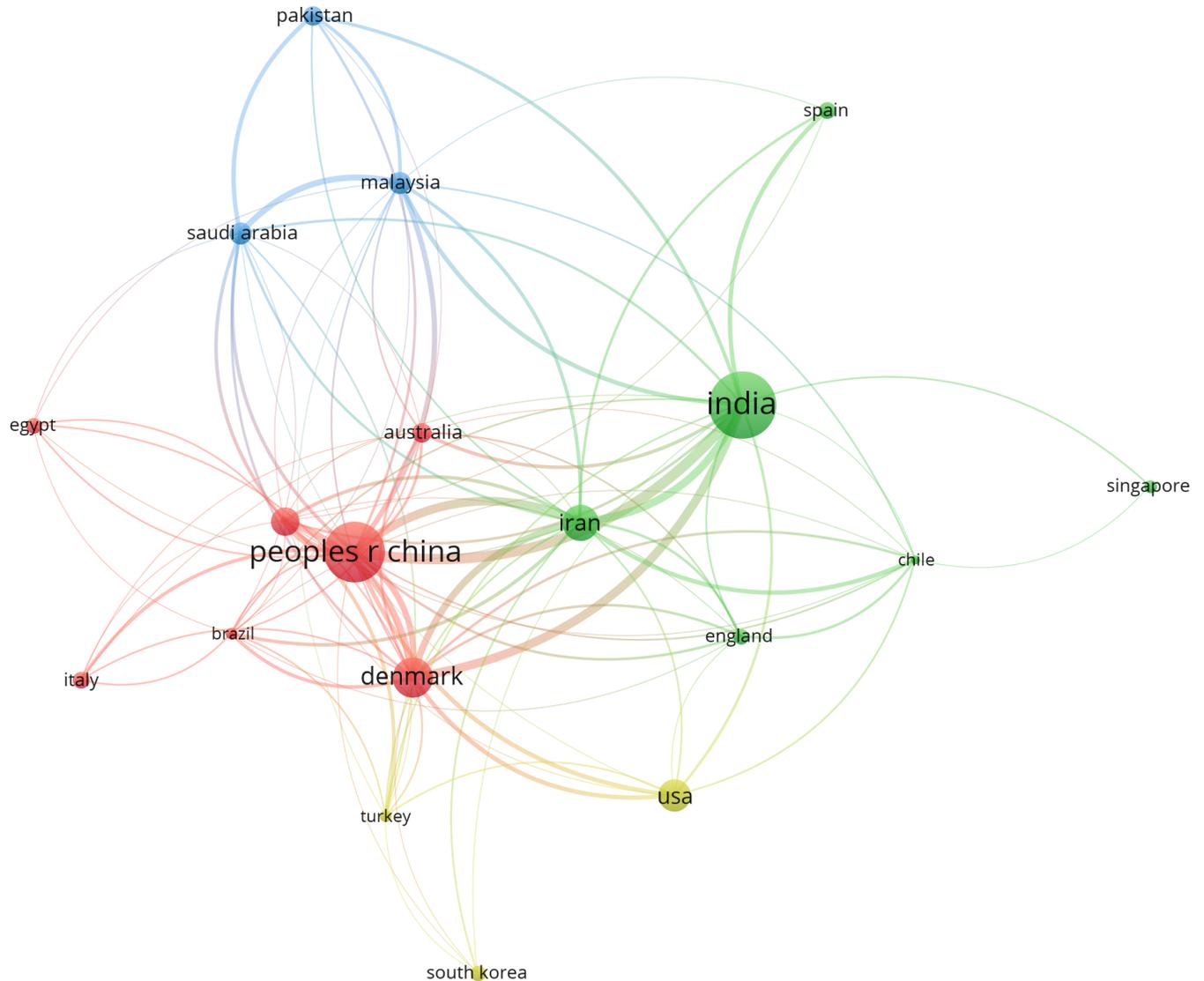


Figura 3.6: Mapa bibliométrico de los países

3.4. Colaboración entre instituciones

La tabla 3.4 enlista las 20 instituciones más destacadas en términos de publicaciones, la tabla 3.5 enlista las 20 instituciones con más citas relacionadas con las estrategias de control y la mitigación de problemas en la calidad de energía en microrredes. Quien encabeza la lista es una universidad Danesa, sin embargo las instituciones Chinas e Indias también están en el top de la lista, lo que da coherencia con el análisis de países realizado

En el mapa de densidades figura 3.7 se puede ver la predominancia de la universidad de Aalborg, más sin embargo también hay una fuerte presencia de universidades de la India como el Indian Institute Technology Delhi o el Instituto Tecnológico de la India, también hay presencia de universidades chinas y americanas.

Documentos producidos por institución		
Institución	Documentos	País de la institución
universidad de aalborg	21	Dinamarca
indian inst techno	8	India
india inst technol delhi	5	India
univ elect sci & technol china	4	China
universidad de alberta	4	Canadá
universidad de zhejiang	4	China
amirkabit univ technol	4	Irán
universidad salerno	4	Italia
univ teknol malaysia	4	Malaysia
universidad islámica azad	4	Irán
univ politecn cataluna	4	España
Universidad de Tabriz	3	Irán
universidad de hunan	3	China
Universidad Tecnológica de Nanyang	3	Singapur
colorado sch mines	3	EE. UU
universidad de shanghai jiao tong	3	China
mehran univ eng & techno	3	Pakistán
huazhong univ sci & technol	3	China

Tabla 3.4: Documentos producidos por institución

Citaciones por institución	
Institución	Citaciones
universidad de aalborg	1065
univ elect sci & technol china	564
univ fed uberlandia	472
indian inst technol	464
universidad de alberta	446
universidad de zhejiang	414
natl tech univ athens	371
sustainable energy techno/ Itd	329
arnirkabir univ technol	256
univ kashan	212
univ nottingham	181
macquarie Univ	137
univ new south wales	137
china elect power res inst	136
nanjing univ aeronaut & astronaut	136
univ sheffield	136
univ tabeiz	133
hunan univ	129

Tabla 3.5: Citaciones por institución



Figura 3.7: Mapa de densidad de las instituciones

Unos de los parámetros más importantes para determinar el tamaño de la figura es la cantidad de citas, es por eso por lo que, aunque Dinamarca no estuviera en los primeros lugares de los países en el análisis anterior la universidad de Aalbor es un eje central en la parte de las instituciones como se observa en la figura 3.8, se destaca la formación de 4 clústeres los cuales son encabezados por universidades indias y chinas.

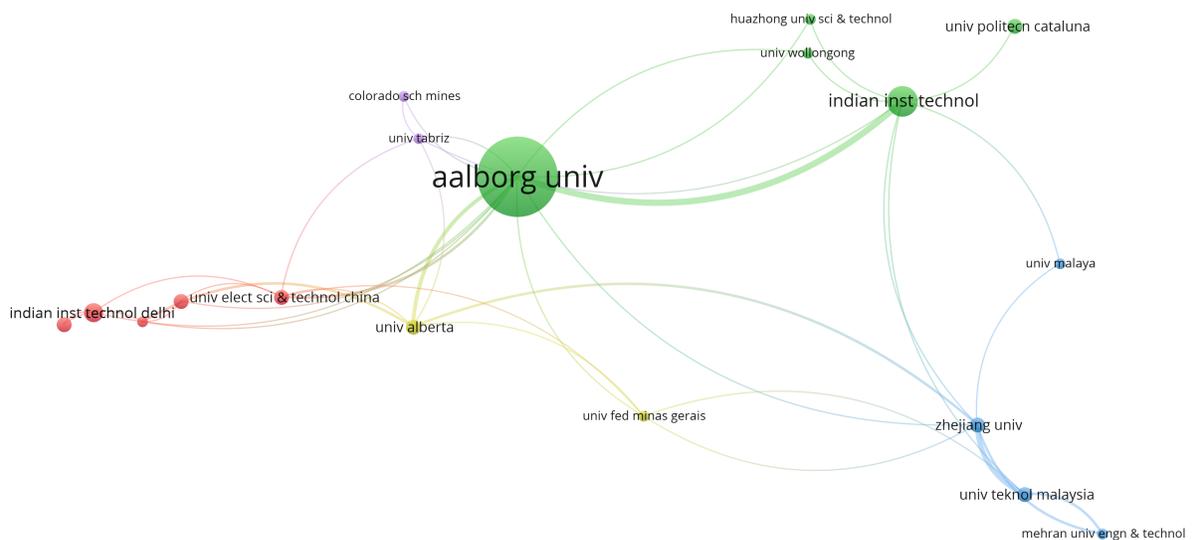


Figura 3.8: Mapa bibliométrico de las instituciones

3.5. Autores con mayor número de publicaciones

En el análisis de los autores, se identifica al Dr. Josep M. Guerrero, de la Universidad de Aalborg, como el autor más sobresaliente en la generación de literatura especializada. Ha colaborado con un total de 15 documentos, los cuales han recibido un notable número de 916 citas. Por otro lado, el Dr. Frede Blaabjerg ha colaborado con la creación de 6 documentos, pero se encuentra en la posición 42 en términos de citas, con un total de 117. En contraste, el investigador Han Yang se sitúa en el puesto 13 de la lista en cuanto a colaboración con 2 documentos, pero se posiciona en el segundo lugar en términos de citas, con un número total de 552. Estos hallazgos nos infieren que el Dr. Josep M. Guerrero posee una gran influencia en su campo de estudio, y debido a su afiliación con la Universidad de Aalborg, la institución también se encuentra altamente, como hemos observado en nuestro análisis de instituciones. Podemos observar de manera mas clara esta información en la figura 3.9 y la figura 3.10 las cuales nos indican el numero de citas y documentos por cada autor

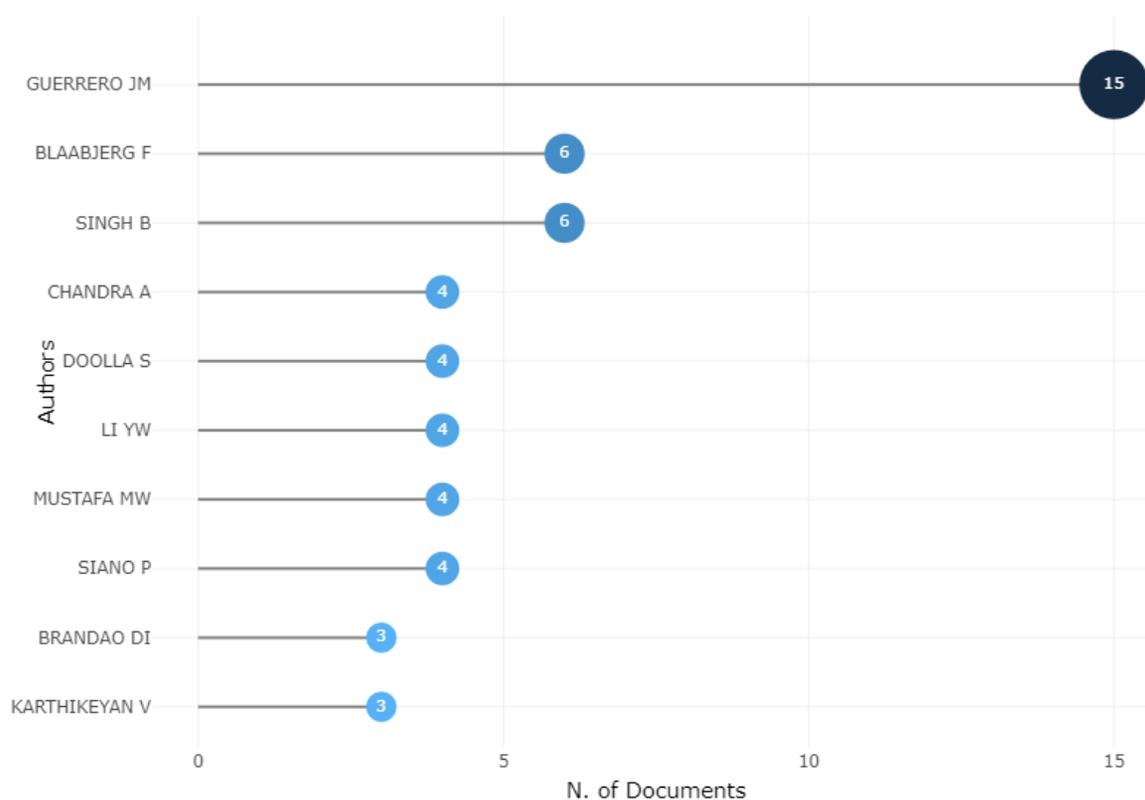


Figura 3.9: Gráfica del número de documentos producido por autor



Figura 3.10: Gráfica del número de citas por autor

Visualizando el mapa de densidades figura 3.11 es observable que Josep M.Guerrero tiene una gran participación corroborando lo que dicen las figuras 3.9 y 3.10.

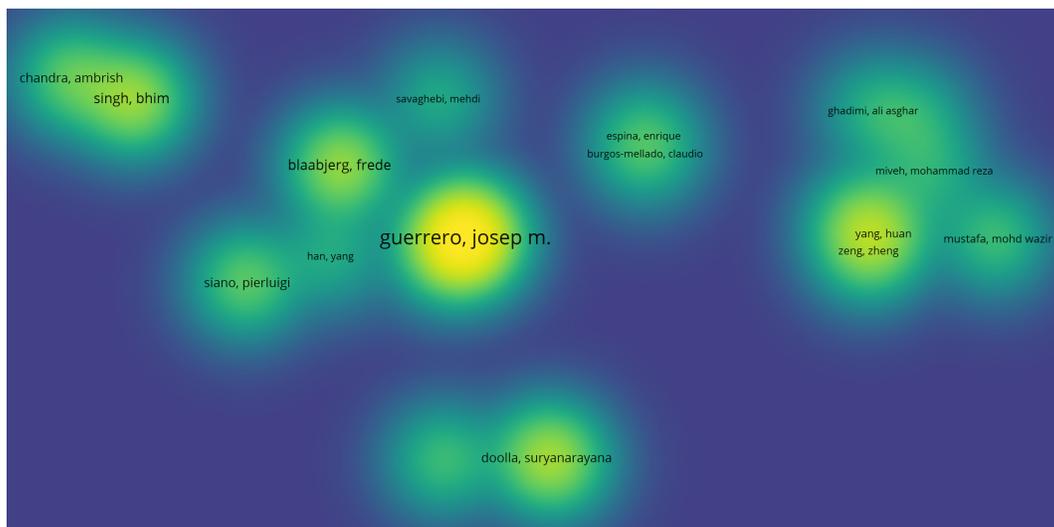


Figura 3.11: Mapa de densidad de los autores

En el análisis bibliométrico figura 3.12 realizado, cabe mencionar que los tres investigadores mencionados, el Dr. Josep M. Guerrero, el Dr. Frede Blaabjerg y el Dr. Han Yang, tienen una fuerte conexión en términos de colaboraciones y citas en sus trabajos.

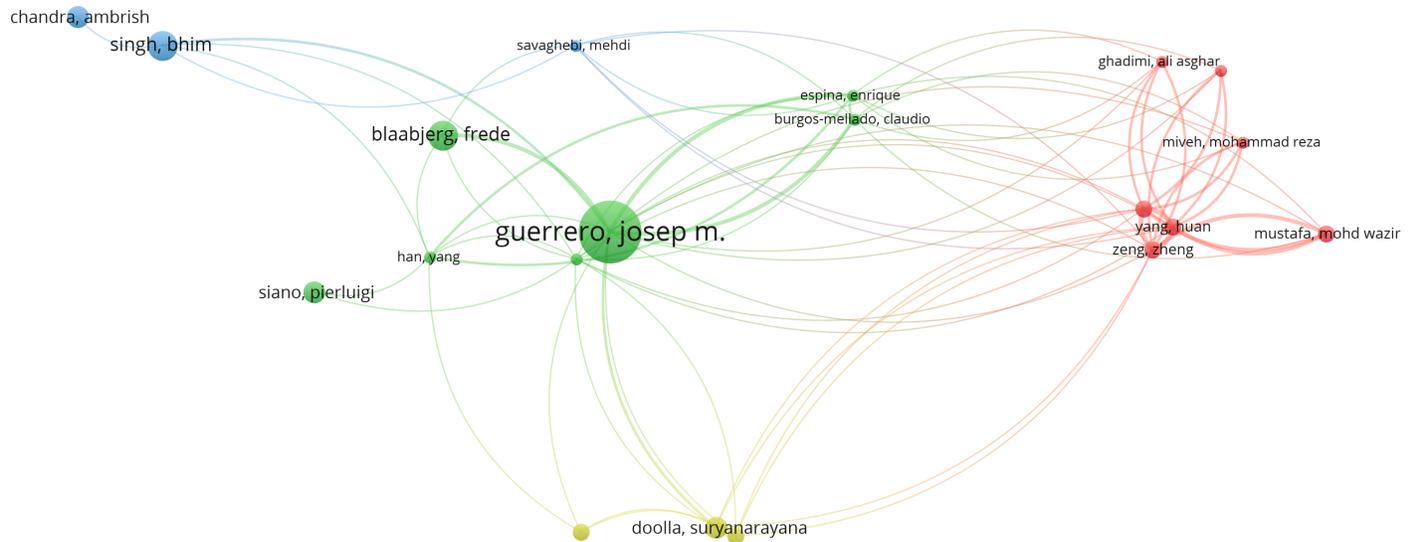


Figura 3.12: Mapa bibliométrico de los autores

3.6. Revistas indexadas con mayor número de publicaciones en el área de Microrredes

Dentro de las fuentes de información más sobresaliente sobre los temas de interés tenemos a las revistas especializadas de Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE por sus siglas en inglés) en cuestión de citaciones y por parte de la generación de documentos la revista ENERGIES del Instituto Multidisciplinario de Edición Digital (MDPI por sus siglas en inglés) ostenta el primer lugar, se puede observar en la figura 3.13 y 3.14 las revistas indexadas más relevantes.

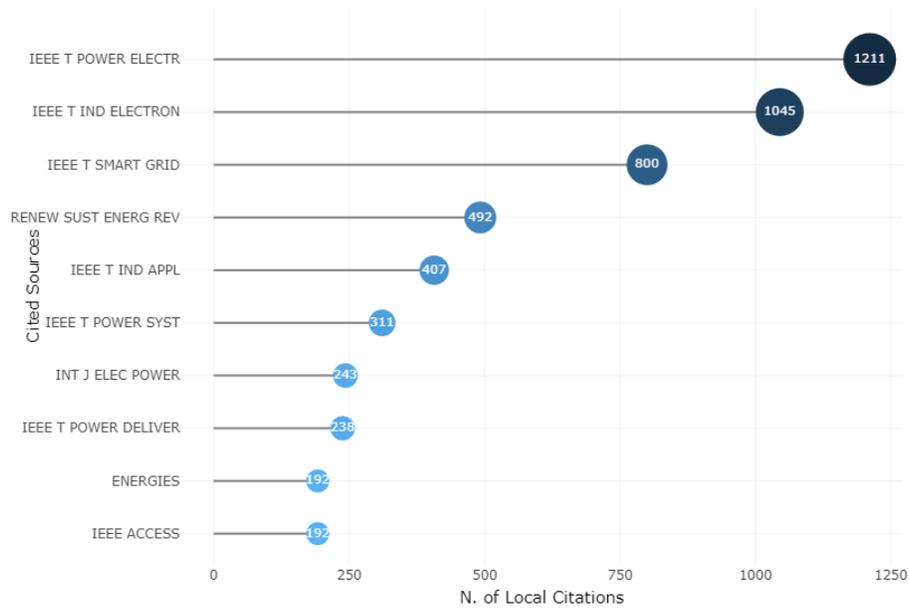


Figura 3.13: Gráfica del número de citas por fuente de información

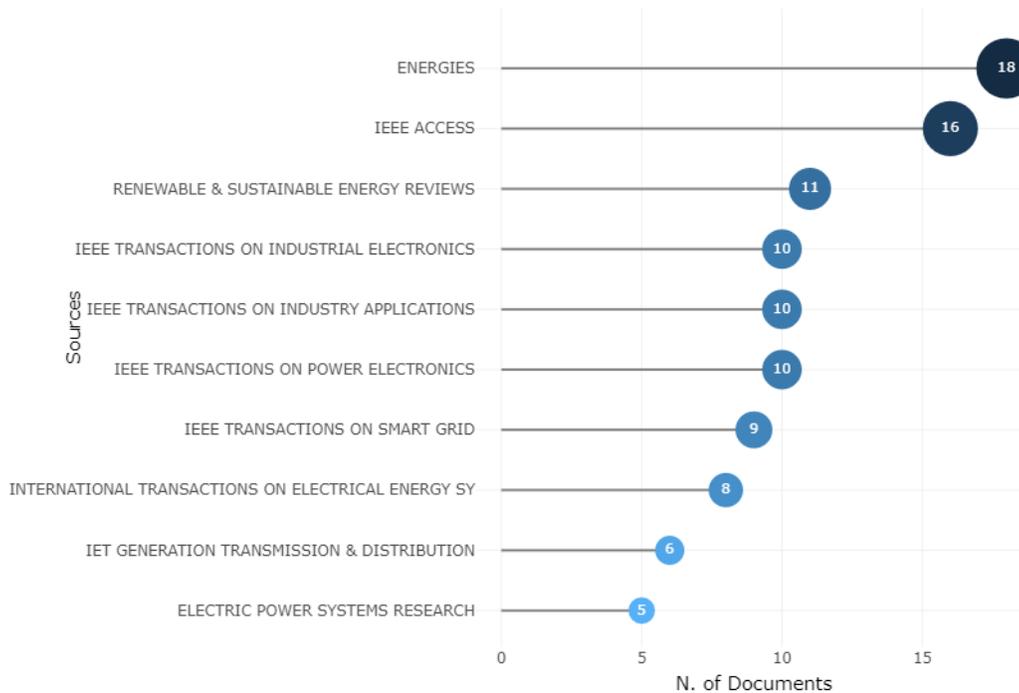


Figura 3.14: Gráfica del número de documentos por fuente de información

En el mapa de densidades figura 3.15 se aprecia que las revistas de la IEEE tienen un gran impacto, la distribución de este mapa bibliométrico no presenta características inusuales. La mayoría de las revistas incluidas en el mapa se especializan en temas relacionados con electricidad y electrónica, lo cual es esperado y coherente con el área de estudio analizada.

3.7. Análisis por co-concurrencias de palabras

Los mapas bibliométricos de palabras clave mediante la métrica de co-ocurrencia brindan una representación visual de las tendencias de investigación de un tema específico al mostrar las palabras clave más utilizadas en la literatura relacionada. Sin embargo, debido a la gran cantidad de conexiones existentes entre las palabras, estos mapas pueden resultar sobrecargados de información. Con el fin de mejorar la utilidad de esta visualización, se ha reducido el número de palabras clave a las 32 más sobresalientes.

En la figura 3.17 se presenta el mapa bibliométrico que muestra las 32 palabras clave más relevantes en el campo de las estrategias de control y la mitigación de problemas en la calidad de la energía en microrredes durante el período comprendido entre 2012 y 2022. Este mapa resalta la importancia y la interconexión de estas palabras clave, proporcionando una visión general de los temas de investigación más importantes en este ámbito.

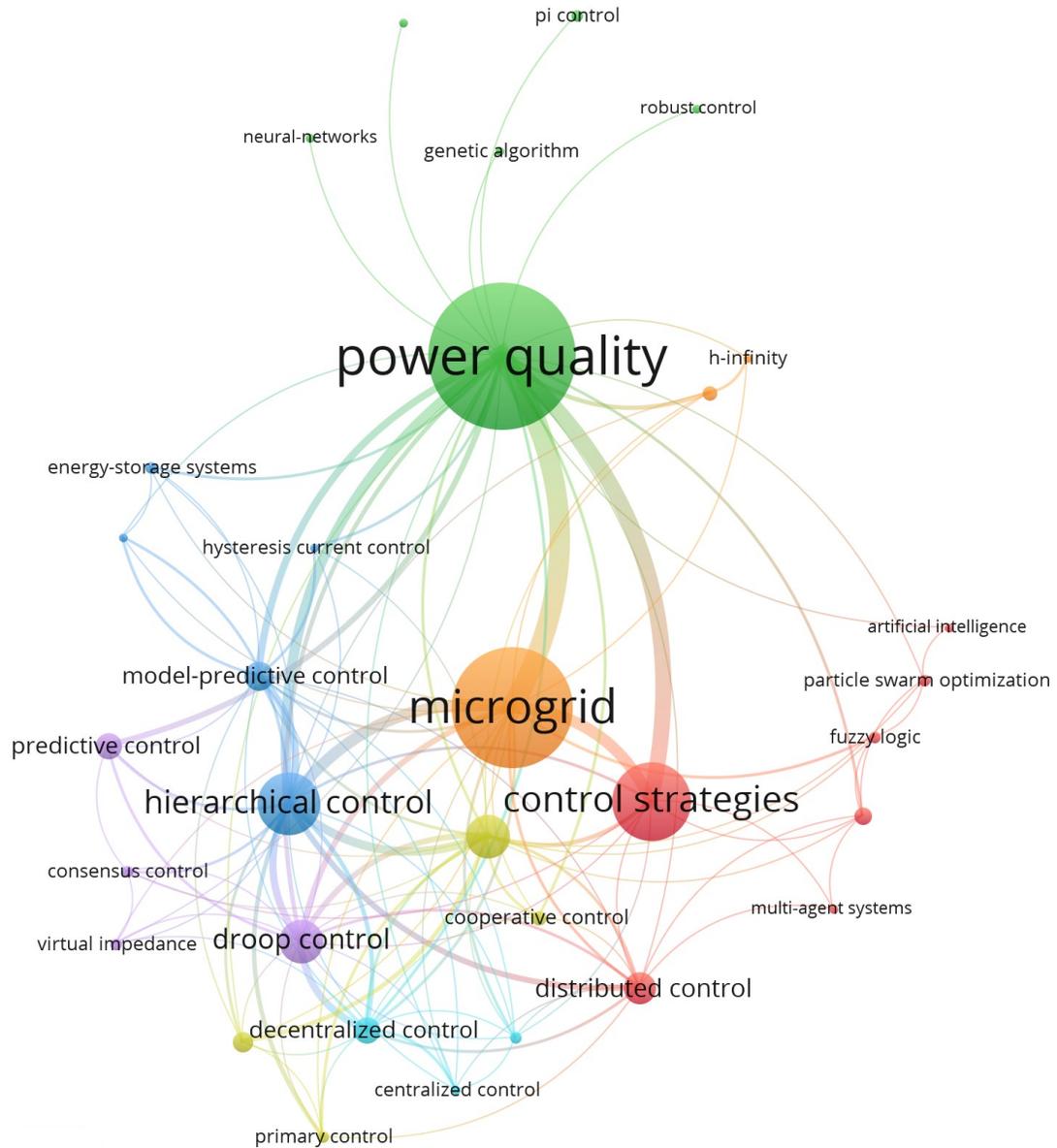


Figura 3.17: Mapa de co-conurrencias de palabras

Como se puede apreciar en la figura 3.17 el tema central es la microrred la cual es mencionada en todos los artículos de la base de datos siendo los artículos más destacados [2, 30, 18, 31, 32, 33].

La siguiente palabra más sobresaliente la cual encabeza otro clóster es control strategies siendo parte fundamental del análisis siendo de los artículos que mayormente sobresalen por su numero de citas y su relación con el termino son:[18, 34, 26, 25, 35, 36].

Otra palabra que encabeza un clóster y si es parte fundamental de la investigación es power quality en:[37, 38, 39, 40, 41, 42, 43] los cuales nos pueden ampliar el panorama un poco sobre su importancia y el porque de su importancia.

Por otra parte, los controles que resaltan más y encabezan un clóster es el hierichal control el cual es de suma importancia y uno de los controles más utilizados ya que su fracción de niveles te permite controlar la microrred de forma eficiente nos explican más de esto en [44, 45, 46, 47, 48, 2, 49, 29, 50], la segunda estrategia que mas citasiones tiene es al droop control siendo uno de los más utilizados [51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 29].

El mapa de densidades figura 3.18 ofrece un panorama más amplio con otra formación en la se visualiza que las estrategias de control tiene la misma relevancia por la formación de co-conurrencias sin embargo hierichal control, droop control y secondary level tienen una ligera mayor relevancia, sin olvidar las tres palabras más resaltadas quienes encabezan los clósteres.

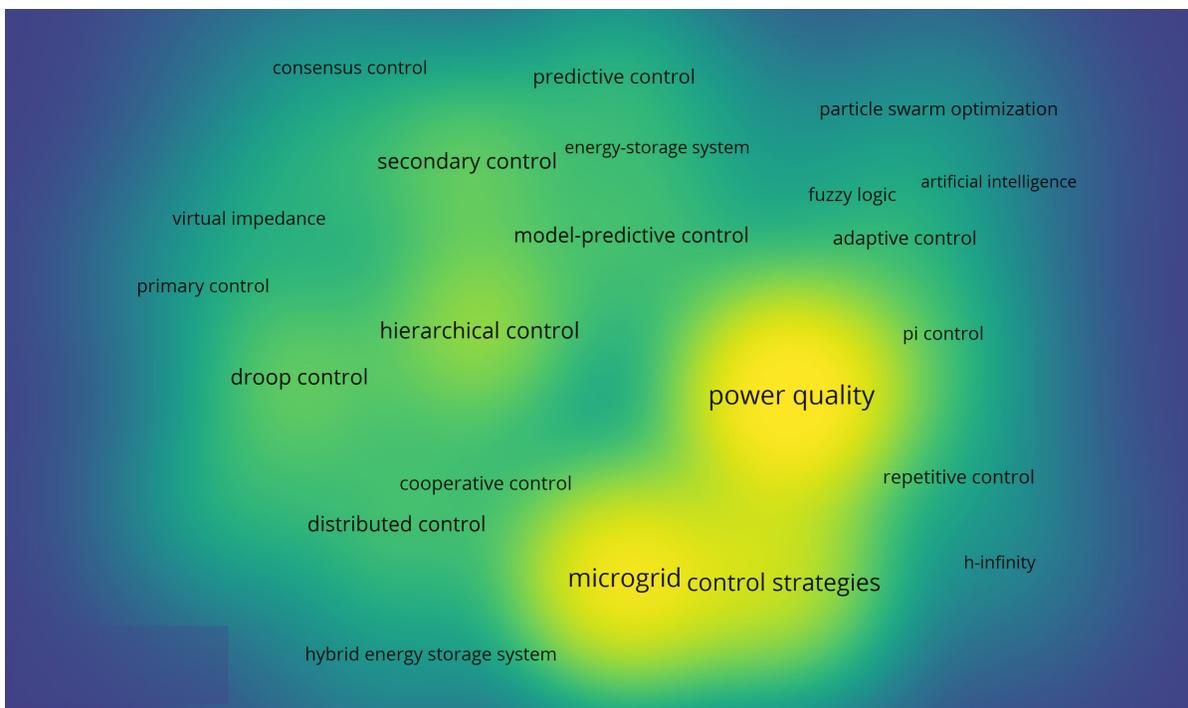


Figura 3.18: Mapa de densidades de las palabras clave

De tal manera se presentan otros sistemas de control como el control consensuado (Consensus control), el control cooperativo (Cooperative control)[58], el control centralizado (Centralized control)[4, 33, 24], control descentralizado (Dezentralized control)[59, 60], el controlador PI (PI control)[61, 62, 63], el control de impedancia virtual (virtual impedance)[64, 65, 4, 33], el control Primario y Secundario (primary and secondary control)[46, 4], el control Distribuido (distributed control)[66, 4], el sistemas de almacenamiento de energía(Energy-Storage System) [67, 33, 68, 69, 70], el control adaptativo (Adaptive control)[71], el sistema de control difuso (Fuzzy logic)[72, 73, 74, 75, 76, 61, 71], control de algoritmo genético (Genetic algorithm)[72, 61], el control predictivo (Predictive control) [77, 78], el Hysteresis current control[79], el modelo predictivo (Model Predictive control)[80, 81, 82, 78, 83], el sistema multiagente (Multi-agent system)[84, 2], el control de redes neuronales(Neural networks)[85, 86], el control de enjambre de partículas optimizadas (Particle swarm optimization)[38, 87, 88, 89, 90, 91], el control H infinito (H infinity)[92], el control de potencia compartida (Power sharing)[29, 93, 94], el control repetitivo (Repetitive control)[95], el control robusto (Robust control)[96, 97]. Cada una de estas estrategias de control presenta características y ventajas específicas, y su elección depende de los objetivos y requisitos particulares de las microrredes eléctricas. Algunas estrategias se enfocan en la estabilidad y regulación del voltaje y la frecuencia, mientras que otras se centran en la compensación de armónicos o la gestión eficiente de la energía almacenada. Cada estrategia tiene su papel y aplicación específica, y su implementación adecuada puede contribuir significativamente a la eficiencia y confiabilidad del sistema eléctrico.

Capítulo 4

Conclusiones

El análisis bibliométrico realizado en esta tesis ha proporcionado una visión amplia y actualizada de las estrategias de control utilizadas en las microrredes para abordar problemas de calidad de la energía. A través de la revisión de la literatura científica, se han identificado tendencias y patrones importantes que permiten comprender mejor el estado del arte en este campo en constante evolución.

Se ha observado que las arquitecturas control más comunes son el control jerárquico, el control distribuido, el control centralizado y el control descentralizado, abarcando estrategias de control que incluyen el control P_i , H_∞ , al control robusto, el control predictivo, el control predictivo basado en modelo, algoritmo genético, lógica difusa entre otros. para abordar objetivos de control enfocados a mejorar la calidad de la energía, el desempeño de los sistemas de almacenamiento y la interconectividad.

Sin embargo, también se han identificado áreas de investigación emergentes que requieren una mayor atención. Por ejemplo, el desarrollo de aplicaciones más inteligentes y eficientes para la creación de este tipo de análisis, el de desarrollo de controles más adaptativos y eficientes, la integración óptima de fuentes de energía renovable.

Estas áreas de investigación emergentes ofrecen oportunidades para mejorar y optimizar aún más las estrategias de control en las microrredes, lo que contribuirá a fortalecer la resiliencia del sistema eléctrico y a avanzar hacia una transición energética más sostenible.

4.1. Contraste de la hipótesis

Aunque el análisis bibliométrico puede proporcionar información valiosa, es solo uno de varios factores que influyen en el éxito de la implementación de estrategias de control en microrredes eléctricas. Estos factores incluyen la adecuación de las estrategias a las condiciones y características específicas de la microrred, la disponibilidad de tecnologías avanzadas y confiables, la capacidad técnica y de capacitación del personal involucrado en la operación, su éxito real dependerá de cómo se adapten e implementen estas estrategias en el contexto específico de cada microrred y las condiciones cambiantes del entorno energético.

Bibliografía

- [1] R. y. C. J. y. Y. T. GAO, Fei y KANG, “Control primario y secundario en microrredes de cc: una revisión,”
- [2] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho, and J. M. Guerrero, “Review of active and reactive power sharing strategies in hierarchical controlled microgrids,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 3, pp. 2427–2451, 2017.
- [3] K. E. Antoniadou-Plytaria, I. N. Kouveliotis-Lysikatos, P. S. Georgilakis, and N. D. Hatziargyriou, “Distributed and decentralized voltage control of smart distribution networks: Models, methods, and future research,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2999–3008, 2017.
- [4] E. Espina, J. Llanos, C. Burgos-Mellado, R. Cardenas-Dobson, M. Martinez-Gomez, and D. Saez, “Distributed control strategies for microgrids: An overview,” *IEEE ACCESS*, vol. 8, pp. 193412–193448, 2020.
- [5] M. Kumar, S. C. Srivastava, and S. N. Singh, “Control strategies of a dc microgrid for grid connected and islanded operations,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1588–1601, 2015.
- [6] C. Papadimitriou, E. Zountouridou, and N. Hatziargyriou, “Review of hierarchical control in dc microgrids,” *Electric Power Systems Research*, vol. 122, pp. 159–167, 2015.
- [7] Z. Zeng, H. Yang, R. Zhao, and C. Cheng, “Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 223–270, 2013.
- [8] A. K. Arani, H. Karami, G. Gharehpetian, and M. Hejazi, “Review of flywheel energy storage systems structures and applications in power systems and microgrids,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 9–18, 2017.
- [9] M. A. Hossain, H. R. Pota, W. Issa, and M. J. Hossain, “Overview of ac microgrid controls with inverter-interfaced generations,” *Energies*, vol. 10, no. 9, 2017.

-
- [10] https://archivosdeprevencion.eu/view_document.php?tpd=2&i=2500
- [11] <http://www.scielo.org.co/pdf/unsc/v13n3/v13n3a02.pdf>
- [12] <https://techlib.net/techedu/microrred/>
- [13] H. Bevrani, *Microgrid Dynamics and Control*. 2017.
- [14] Andres, Retrieved July 3, 2023. <https://www.electricaplicada.com/calidad-energia-problemas-estandares/>. Accessed: July 3, 2023.
- [15] A. Khodadoost Arani, G. B. Gharehpetian, and M. Abedi, “Review on energy storage systems control methods in microgrids,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 107, pp. 745–757, 2019.
- [16] T. A. Jumani, M. W. Mustafa, A. S. Alghamdi, M. M. Rasid, A. Alamgir, and A. B. Awan, “Swarm intelligence-based optimization techniques for dynamic response and power quality enhancement of ac microgrids: A comprehensive review,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 75986–76001, 2020.
- [17] M. Faisal, M. A. Hannan, P. J. Ker, A. Hussain, M. B. Mansor, and F. Blaabjerg, “Review of energy storage system technologies in microgrid applications: Issues and challenges,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 35143–35164, 2018.
- [18] F. Mohammadi, B. Mohammadi-Ivatloo, G. B. Gharehpetian, M. H. Ali, W. Wei, O. Erdinç, and M. Shirkhani, “Robust control strategies for microgrids: A review,” *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 2401–2412, 2022.
- [19] T. A. Jumani, M. W. Mustafa, M. Md. Rasid, W. Anjum, and S. Ayub, “Salp swarm optimization algorithm-based controller for dynamic response and power quality enhancement of an islanded microgrid,” *Processes*, vol. 7, no. 11, 2019.
- [20] N. González, C. Cusguen, E. Mojica-Nava, and A. Pavas, “Estrategias de control de calidad de energía en microrredes rurales,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 16, no. 2, pp. 93–104, 2017.
- [21] Y. Khayat, Q. Shafiee, R. Heydari, M. Naderi, T. Dragičević, J. W. Simpson-Porco, F. Dörfler, M. Fathi, F. Blaabjerg, J. M. Guerrero, and H. Bevrani, “On the secondary control architectures of ac microgrids: An overview,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 6, pp. 6482–6500, 2020.
- [22] E. Hernández-Mayoral, M. Madrigal-Martínez, J. D. Mina-Antonio, R. Iracheta-Cortez, J. A. Enríquez-Santiago, O. Rodríguez-Rivera, G. Martínez-Reyes, and E. Mendoza-Santos, “A comprehensive review on power-quality issues, optimization techniques, and control strategies of microgrid based on renewable energy sources,” *Sustainability*, vol. 15, no. 12, 2023.
-

-
- [23] T. L. Van Doorn, K. M. De, B. Meersman, and L. Vandeveldel, “Review of primary control strategies for islanded microgrids with power-electronic interfaces,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 613–628, 2013.
- [24] J. He, Y. W. Li, D. Bosnjak, and B. Harris, “Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 1, pp. 234–246, 2013.
- [25] Z. Zeng, H. Yang, R. Zhao, and C. Cheng, “Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 223–270, 2013.
- [26] A. Gupta, S. Doolla, and K. Chatterjee, “Hybrid ac–dc microgrid: Systematic evaluation of control strategies,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3830–3843, 2018.
- [27] R.-J. Wai, C.-Y. Lin, Y.-C. Huang, and Y.-R. Chang, “Design of high-performance stand-alone and grid-connected inverter for distributed generation applications,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1542–1555, 2013.
- [28] X. Cao, Q.-C. Zhong, and W.-L. Ming, “Ripple eliminator to smooth dc-bus voltage and reduce the total capacitance required,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 4, pp. 2224–2235, 2015.
- [29] L. Meng, X. Zhao, F. Tang, M. Savaghebi, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, “Distributed voltage unbalance compensation in islanded microgrids by using a dynamic consensus algorithm,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 1, pp. 827–838, 2016.
- [30] A. Gupta, S. Doolla, and K. Chatterjee, “Hybrid ac–dc microgrid: Systematic evaluation of control strategies,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3830–3843, 2018.
- [31] S. Ansari, A. Chandel, and M. Tariq, “A comprehensive review on power converters control and control strategies of ac/dc microgrid,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 17998–18015, 2021.
- [32] M. Biglarahmadi, A. Ketabi, H. Reza Baghaee, and J. M. Guerrero, “Integrated nonlinear hierarchical control and management of hybrid ac/dc microgrids,” *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 902–913, 2022.
- [33] G. Tapia-Tinoco, A. Garcia-Perez, D. Granados-Lieberman, D. Camarena-Martinez, and M. Valtierra-Rodriguez, “Hardware structures, control strategies, and applications of electric springs: a state-of-the-art review,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 23, pp. 5349–5363, 2020.
-

-
- [34] E. Espina, J. Llanos, C. Burgos-Mellado, R. Cárdenas-Dobson, M. Martínez-Gómez, and D. Sáez, “Distributed control strategies for microgrids: An overview,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 193412–193448, 2020.
- [35] R. Lamedica, A. Geri, F. M. Gatta, S. Sangiovanni, M. Maccioni, and A. Ruvio, “Integrating electric vehicles in microgrids: Overview on hosting capacity and new controls,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 6, pp. 7338–7346, 2019.
- [36] M. S. Roslan, M. A. Hannan, P. J. Ker, and M. N. Uddin, “Microgrid control methods toward achieving sustainable energy management,” *Applied Energy*, vol. 240, pp. 583–607, 2019.
- [37] A. Ordono, E. Unamuno, J. A. Barrena, and J. Paniagua, “Interlinking converters and their contribution to primary regulation: a review,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 111, pp. 44–57, 2019.
- [38] Y. Han, X. Ning, P. Yang, and L. Xu, “Review of power sharing, voltage restoration and stabilization techniques in hierarchical controlled dc microgrids,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 149202–149223, 2019.
- [39] Z. Zeng, H. Yang, R. Zhao, and C. Cheng, “Topologies and control strategies of multifunctional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 223–270, 2013.
- [40] Y. Yang, S.-C. Tan, and S. Y. R. Hui, “Mitigating distribution power loss of dc microgrids with dc electric springs,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 5897–5906, 2018.
- [41] O. Palizban, K. Kauhaniemi, and J. M. Guerrero, “Microgrids in active network management – part ii: System operation, power quality and protection,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 36, pp. 440–451, 2014.
- [42] W. Choi, W. Lee, D. Han, and B. Sarlioglu, “New configuration of multifunctional grid-connected inverter to improve both current-based and voltage-based power quality,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 6, pp. 6374–6382, 2018.
- [43] A. Luo, Q. Xu, F. Ma, and Y. Chen, “Overview of power quality analysis and control technology for the smart grid,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 1–9, 2016.
- [44] C. Papadimitriou, E. Zountouridou, and N. Hatziargyriou, “Review of hierarchical control in dc microgrids,” *Electric Power Systems Research*, vol. 122, pp. 159–167, 2015.

-
- [45] B. Adineh, R. Keypour, P. Davari, and F. Blaabjerg, "Review of harmonic mitigation methods in microgrid: From a hierarchical control perspective," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 3, pp. 3044–3060, 2021.
- [46] F. Gao, R. Kang, J. Cao, and T. Yang, "Primary and secondary control in dc microgrids: a review," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 227–242, 2019.
- [47] M. Biglarahmadi, A. Ketabi, H. Reza Baghaee, and J. M. Guerrero, "Integrated nonlinear hierarchical control and management of hybrid ac/dc microgrids," *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 902–913, 2022.
- [48] Y. Han, X. Ning, P. Yang, and L. Xu, "Review of power sharing, voltage restoration and stabilization techniques in hierarchical controlled dc microgrids," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 149202–149223, 2019.
- [49] B. Adineh, R. Keypour, P. Davari, and F. Blaabjerg, "Review of harmonic mitigation methods in microgrid: From a hierarchical control perspective," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 3, pp. 3044–3060, 2021.
- [50] M. A. Hossain, H. R. Pota, W. Issa, and M. J. Hossain, "Overview of ac microgrid controls with inverter-interfaced generations," *Energies*, vol. 10, no. 9, 2017.
- [51] W. Jiang and P. Li, "A novel pre-synchronization control strategy for microgrid connections based on improved droop control," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1257–1264, 2022. 2022 The 5th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy.
- [52] A. S. Vijay and S. Doolla, "Performance of droop control techniques under nonlinear loading conditions: Uniform and nonuniform configurations," *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 2245–2256, 2021.
- [53] P. Ray and S. R. Salkuti, "Smart branch and droop controller based power quality improvement in microgrids," *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 21, no. 6, p. 20200094, 2020.
- [54] N. disponible, "Influence of output impedance of an inverter on its droop control strategies in a microgrid," *Nombre de la revista*, vol. 29, no. 04, 2022.
- [55] W. Jiang and P. Li, "A novel pre-synchronization control strategy for microgrid connections based on improved droop control," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1257–1264, 2022. 2022 The 5th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy.

-
- [56] A. Eisapour-Moarref, M. Kalantar, and M. Esmaili, "Power sharing in hybrid microgrids using a harmonic-based multidimensional droop," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 1, pp. 109–119, 2020.
- [57] I. Sadeghkhan, M. E. Hamedani Golshan, A. Mehrizi-Sani, and J. M. Guerrero, "Low-voltage ride-through of a droop-based three-phase four-wire grid-connected microgrid," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 8, pp. 1906–1914, 2018.
- [58] J. Lai, X. Lu, W. Yao, J. Wen, and S. Cheng, "Robust distributed cooperative control for dc microgrids with time delays, noise disturbances, and switching topologies," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 354, no. 18, pp. 8312–8332, 2017.
- [59] C. Ahn and H. Peng, "Decentralized and real-time power dispatch control for an islanded microgrid supported by distributed power sources," *Energies*, vol. 6, no. 12, pp. 6439–6454, 2013.
- [60] Y. Xia, Y. Peng, H. Hu, Y. Wang, and W. Wei, "Advanced unified decentralised control method with voltage restoration for dc microgrids," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 6, pp. 861–871, 2016.
- [61] M. U. Jan, A. Xin, M. A. Abdelbaky, H. U. Rehman, and S. Iqbal, "Adaptive and fuzzy pi controllers design for frequency regulation of isolated microgrid integrated with electric vehicles," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 87621–87632, 2020.
- [62] B. Adineh, R. Keypour, P. Davari, and F. Blaabjerg, "Review of harmonic mitigation methods in microgrid: From a hierarchical control perspective," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 3, pp. 3044–3060, 2021.
- [63] S. H. Badruhisham, M. S. Abu Hanifah, S. H. Yusoff, N. F. Hasbullah, and M. Yaacob, "Pi controller for hybrid biomass- solar photovoltaic- wind in microgrid: A case study of mersing, malaysia," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 95151–95160, 2022.
- [64] H. Qian, Q. Xu, Y. Xia, J. Zhao, and P. Du, "Analysis and implementation of virtual impedance for fixed-frequency control strategy in microgrid," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 15, no. 15, pp. 2262–2276, 2021.
- [65] A. Bakar, E. Pathan, M. I. Khan, M. A. Sadiq, M. I. Rabani, S. B. Goli, and M. A. Shaikh, "Decentralized virtual impedance-based circulating current suppression control for islanded microgrids," *Energies, Transitions, Advanced Systems, and Renewable Energy*, vol. 11, no. 1, pp. 6734–6739, 2021.

-
- [66] E. Espina, J. Llanos, C. Burgos-Mellado, R. Cárdenas-Dobson, M. Martínez-Gómez, and D. Sáez, “Distributed control strategies for microgrids: An overview,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 193412–193448, 2020.
- [67] S. Punna, U. B. Manthati, and A. Chirayarukil Raveendran, “Modeling, analysis, and design of novel control scheme for two-input bidirectional dc-dc converter for hess in dc microgrid applications,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 10, p. e12774, 2021.
- [68] T. Sutikno, W. Arsadiando, A. Wangsupphaphol, A. Yudhana, and M. Facta, “A review of recent advances on hybrid energy storage system for solar photovoltaics power generation,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 42346–42364, 2022.
- [69] S. Punna, U. B. Manthati, and A. Chirayarukil Raveendran, “Modeling, analysis, and design of novel control scheme for two-input bidirectional dc-dc converter for hess in dc microgrid applications,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 10, p. e12774, 2021.
- [70] K.-W. Hu and C.-M. Liaw, “Incorporated operation control of dc microgrid and electric vehicle,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 1, pp. 202–215, 2016.
- [71] N. Babu P, J. M. Guerrero, P. Siano, R. Peesapati, and G. Panda, “An improved adaptive control strategy in grid-tied pv system with active power filter for power quality enhancement,” *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 2859–2870, 2021.
- [72] T. A. Jumani, M. W. Mustafa, N. N. Hamadneh, S. H. Atawneh, M. M. Rasid, N. H. Mirjat, M. A. Bhayo, and I. Khan, “Computational intelligence-based optimization methods for power quality and dynamic response enhancement of ac microgrids,” *Energies*, vol. 13, no. 16, 2020.
- [73] G. O. Suvire, M. G. Molina, and P. E. Mercado, “Improving the integration of wind power generation into ac microgrids using flywheel energy storage,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1945–1954, 2012.
- [74] P. K. Barik, G. Shankar, and P. K. Sahoo, “Power quality assessment of microgrid using fuzzy controller aided modified srf based designed sapf,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 4, p. e12289, 2020. e12289 ITEES-19-0778.R1.
- [75] S. Ahmad, S. Mekhilef, H. Mokhlis, M. Karimi, A. Pourdaryaei, T. Ahmed, U. K. Jhuma, and S. Afzal, “Fuzzy logic-based direct power control method for pv inverter of grid-tied ac microgrid without phase-locked loop,” *Electronics*, vol. 10, no. 24, 2021.

-
- [76] H. W. D. Hettiarachchi, K. T. M. U. Hemapala, and A. G. B. P. Jayasekara, "Review of applications of fuzzy logic in multi-agent-based control system of ac-dc hybrid microgrid," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 1284–1299, 2019.
- [77] S. Shahzad, M. A. Abbasi, M. A. Chaudhry, and M. M. Hussain, "Model predictive control strategies in microgrids: A concise revisit," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 122211–122225, 2022.
- [78] B. Long, T. Cao, D. Sheng, J. Rodriguez, J. M. Guerrero, and K. T. Chong, "Sequential model predictive fault-tolerance control for t-type three-level grid-connected converters with lcl filters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 9, pp. 9039–9051, 2022.
- [79] Y. Naderi, S. H. Hosseini, S. G. Zadeh, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Savaghebi, and J. M. Guerrero, "An optimized direct control method applied to multilevel inverter for microgrid power quality enhancement," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 107, pp. 496–506, 2019.
- [80] D. Razmi and T. Lu, "A literature review of the control challenges of distributed energy resources based on microgrids (mgs): Past, present and future," *Energies*, vol. 15, no. 13, 2022.
- [81] F. Yazdi and S. H. Hosseini, "Variable cost model predictive control strategies for providing high-quality power to ac microgrids," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 16, pp. 3623–3633, 2019.
- [82] M. Alhasheem, A. Abdelhakim, F. Blaabjerg, P. Mattavelli, and P. Davari, "Model predictive control of grid forming converters with enhanced power quality," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 18, 2020.
- [83] Y. Yang, S.-C. Tan, and S. Y. R. Hui, "Mitigating distribution power loss of dc microgrids with dc electric springs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 5897–5906, 2018.
- [84] A. D. Bintoudi, L. Zylgakis, A. C. Tsolakis, D. Ioannidis, L. Hadjidemetriou, L. Zacharia, N. Al-Mutlaq, M. Al-Hashem, S. Al-Agtash, E. Kyriakides, C. Demoulias, and D. Tzouvaras, "Hybrid multi-agent-based adaptive control scheme for ac microgrids with increased fault-tolerance needs," *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 1, pp. 13–26, 2020.
- [85] J. Alshehri, M. Khalid, and A. Alzahrani, "An intelligent battery energy storage-based controller for power quality improvement in microgrids," *Energies*, vol. 12, no. 11, 2019.
- [86] J. L. Flores-Garrido, P. Salmerón, and J. A. Gómez-Galán, "Nonlinear loads compensation using a shunt active power filter controlled by feedforward neural networks," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 16, 2021.
-

-
- [87] V. V. Prabhakaran and A. Singh, "Enhancing power quality in pv-sofc microgrids using improved particle swarm optimization," *Engineering, Technology and amp; Applied Science Research*, vol. 9, p. 4616–4622, Oct. 2019.
- [88] M. S. Mahmoud, N. M. Alyazidi, and M. I. Abouheaf, "Adaptive intelligent techniques for microgrid control systems: A survey," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 90, pp. 292–305, 2017.
- [89] T. A. Jumani, M. W. Mustafa, A. S. Alghamdi, M. M. Rasid, A. Alamgir, and A. B. Awan, "Swarm intelligence-based optimization techniques for dynamic response and power quality enhancement of ac microgrids: A comprehensive review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 75986–76001, 2020.
- [90] B. Mohapatra, B. K. Sahu, S. Pati, M. Bajaj, V. Blazek, L. Prokop, S. Misak, and M. Alharthi, "Real-time validation of a novel iaoo technique-based offset hysteresis band current controller for grid-tied photovoltaic system," *Energies*, vol. 15, no. 23, 2022.
- [91] A. Sangari, R. Umamaheswari, M. G Umamaheswari, and L. Sree B, "A novel sosmc based svpwm control of z-source inverter for ac microgrid applications," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 75, p. 103045, 2020.
- [92] A. Mortezaei, M. G. Simões, A. S. Bubshait, T. D. C. Busarello, F. P. Marafão, and A. Al-Durra, "Multifunctional control strategy for asymmetrical cascaded h-bridge inverter in microgrid applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 2, pp. 1538–1551, 2017.
- [93] C. Deng, Y. Chen, J. Tan, P. Xia, N. Liang, W. Yao, and Y.-a. Zhang, "Distributed variable droop curve control strategies in smart microgrid," *Energies*, vol. 11, no. 1, 2018.
- [94] M. Eskandari, L. Li, M. H. Moradi, P. Siano, and F. Blaabjerg, "Active power sharing and frequency restoration in an autonomous networked microgrid," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 6, pp. 4706–4717, 2019.
- [95] Y.-G. Gao, F.-Y. Jiang, J.-C. Song, L.-J. Zheng, F.-Y. Tian, and P.-L. Geng, "A novel dual closed-loop control scheme based on repetitive control for grid-connected inverters with an lcl filter," *ISA Transactions*, vol. 74, pp. 194–208, 2018.
- [96] F. Mohammadi, B. Mohammadi-Ivatloo, G. B. Gharehpetian, M. H. Ali, W. Wei, O. Erdiñç, and M. Shirkhani, "Robust control strategies for microgrids: A review," *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 2401–2412, 2022.

-
- [97] S. Benhalima, R. Miloud, and A. Chandra, “Real-time implementation of robust control strategies based on sliding mode control for standalone microgrids supplying non-linear loads,” *Energies*, vol. 11, no. 10, 2018.