



Análisis de un medidor bidireccional utilizado en un sistema de generación fotovoltaico conectado a la red

Analysis of a bidirectional meter used in a grid-connected photovoltaic generation system

Análise de um medidor bidireccional utilizado em um sistema de geração fotovoltaica conectado à rede

Danny Joel Changoluisa-Toapanta ^I
danny.changoluisa1710@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0001-2233-4373>

Paco Jovanni Vásquez-Carrera ^{II}
paco.vasquez@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-4734-8584>

William Armando Hidalgo-Osorio ^{III}
william.hidalgo7885@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-6783-0947>

Correspondencia: danny.changoluisa1710@utc.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 03 de mayo de 2024 * **Aceptado:** 20 de junio de 2024 * **Publicado:** 25 de julio de 2024

- I. Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, Ecuador.
- II. Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, Ecuador.
- III. Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, Ecuador.

Resumen

En esta investigación se presenta una revisión sistemática de la literatura sobre el análisis de medidores bidireccionales utilizados en sistemas de generación fotovoltaica conectados a la red eléctrica. Siguiendo el Método Kitchenham, se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas reconocidas, identificando 27 estudios primarios relevantes. Los principales desafíos identificados incluyeron la precisión de las mediciones en condiciones variables, la mitigación de armónicos y desequilibrios, la sincronización y el desfase, y la integración en redes inteligentes. Se exploraron técnicas propuestas, como algoritmos de sincronización, compensación de desequilibrios y procesamiento de señales, los hallazgos revelaron aspectos relacionados que podrían ser relevantes, proporcionando información valiosa sobre enfoques, desafíos y limitaciones en proyectos de ingeniería de software y sistemas de potencia, También se podría complementar estos hallazgos con una revisión de la literatura de hace aproximadamente 10 años atrás para hacer un análisis completo del tema planteado en el presente artículo.

Palabras clave: Medidores bidireccionales; Sistemas fotovoltaicos; Redes eléctricas; Revisión sistemática; Método Kitchenham.

Abstract

This research presents a systematic review of the literature on the analysis of bidirectional meters used in photovoltaic generation systems connected to the electrical grid. Following the Kitchenham Method, an exhaustive search was conducted in recognized academic databases, identifying 27 relevant primary studies. The main challenges identified included measurement accuracy under varying conditions, mitigation of harmonics and imbalances, synchronization and lag, and integration into smart grids. Proposed techniques were explored, such as synchronization algorithms, imbalance compensation and signal processing, the findings revealed related aspects that could be relevant, providing valuable information on approaches, challenges and limitations in software engineering and power systems projects. You could complement these findings with a review of the literature from approximately 10 years ago to make a complete analysis of the topic raised in this article.

Keywords: Bidirectional meters; Photovoltaic systems; Electrical networks; Systematic review; Kitchenham method.

Resumo

Esta pesquisa apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre análise de medidores bidirecionais utilizados em sistemas de geração fotovoltaica conectados à rede elétrica. Seguindo o Método Kitchenham, foi realizada uma busca exaustiva em bases de dados acadêmicas reconhecidas, identificando 27 estudos primários relevantes. Os principais desafios identificados incluíram a precisão da medição sob diversas condições, a mitigação de harmônicas e desequilíbrios, a sincronização e o atraso, e a integração em redes inteligentes. Foram exploradas técnicas propostas, como algoritmos de sincronização, compensação de desequilíbrio e processamento de sinais, os resultados revelaram aspectos relacionados que poderiam ser relevantes, fornecendo informações valiosas sobre abordagens, desafios e limitações em projetos de engenharia de software e sistemas de energia. revisão da literatura de aproximadamente 10 anos atrás para fazer uma análise completa do tema levantado neste artigo.

Palavras-chave: Medidores bidirecionais; Sistemas fotovoltaicos; Redes elétricas; Revisão sistemática; Método Kitchenham.

Introducción

En la actualidad, la transición hacia fuentes de energía renovables y sistemas de generación distribuida ha cobrado una importancia fundamental para disminuir el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero [1], [2]. Dentro de este contexto, los sistemas fotovoltaicos (FV) conectados a la red eléctrica han emergido como una de las tecnologías más prometedoras y de mayor crecimiento en el sector de las energías renovables [3].

Los sistemas FV conectados a red, también denominados sistemas fotovoltaicos de inyección a red, permiten la integración de la energía solar fotovoltaica en las redes eléctricas convencionales [4]. Estos sistemas constan de un conjunto de paneles solares, un inversor de potencia y una interfaz de conexión a la red. Los paneles solares convierten la energía solar en electricidad en forma de corriente continua (CC), mientras que el inversor transforma esta corriente CC en corriente alterna (CA) sincronizada con la red, permitiendo así la inyección de la energía generada [5], [6].

Un componente principal en estos sistemas es el inversor fotovoltaico, cuyo diseño, control y optimización son áreas de investigación activas y relevantes [7], [8], [9]. Estos inversores desempeñan funciones clave, como la maximización de la eficiencia de conversión energética, la

sincronización con la red, la disminución de armónicos y la entrega de energía de alta calidad [10], [11]. Además, los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) integrados en los inversores son cruciales para extraer la máxima potencia disponible de los paneles solares en condiciones variables [12], [13].

Otra área de investigación fundamental es la integración de los sistemas fotovoltaicos en las redes de distribución y las microrredes [14]. A medida que aumenta la penetración de estas fuentes renovables, surgen desafíos relacionados con la gestión de flujos de potencia bidireccionales, la regulación de tensión, la calidad de la energía y la estabilidad del sistema [15], [16]. Se necesitan estrategias de control y operación avanzadas para garantizar una integración segura, confiable y eficiente de los sistemas FV en las redes eléctricas existentes [[17], [18].

En este contexto, el medidor bidireccional juega un papel importante en los sistemas de generación fotovoltaica conectados a la red. Este dispositivo permite medir con precisión los flujos de energía en ambas direcciones, tanto la energía inyectada a la red desde los paneles solares como la energía consumida de la red por las cargas locales [19]. La medición precisa y confiable de estos flujos de energía es esencial para una operación óptima del sistema, la facturación adecuada y la implementación de esquemas de compensación o créditos por la energía renovable inyectada [20]. Numerosos estudios han abordado diferentes aspectos del diseño, funcionamiento y análisis de medidores bidireccionales para sistemas fotovoltaicos conectados a red. [21], [22], [23], [24] presenta un enfoque de diseño y calibración de un medidor bidireccional de bajo costo para aplicaciones residenciales. [25] analiza los requisitos y desafíos de los medidores bidireccionales en el contexto de las redes inteligentes y la integración de energías renovables distribuidas.

Por otro lado, [26] evalúa el impacto de los armónicos y la distorsión de la forma de onda en la precisión de los medidores bidireccionales, proponiendo técnicas de mitigación. [27] aborda la cuestión de la sincronización y el desfase de los medidores bidireccionales en sistemas fotovoltaicos, analizando su efecto en la medición de la energía inyectada y consumida.

A pesar de los avances existentes, aún persisten desafíos y oportunidades de investigación en relación con los medidores bidireccionales utilizados en sistemas de generación fotovoltaica conectados a la red. Es prioridad garantizar la precisión y confiabilidad de estos dispositivos, especialmente en condiciones de operación variables y en presencia de fenómenos eléctricos como armónicos, desequilibrios y fluctuaciones de tensión [28]. Además, el desarrollo de técnicas de

medición avanzadas, basadas en procesamiento de señales y aprendizaje automático, podría mejorar aún más el rendimiento y la eficiencia de estos medidores [29], [30].

Uno de los aspectos fundamentales a considerar en el análisis de medidores bidireccionales es su respuesta ante diferentes condiciones de operación del sistema fotovoltaico. La variabilidad inherente de la radiación solar y los cambios en la temperatura ambiente pueden provocar fluctuaciones en la potencia generada por los paneles solares [31]. Estos cambios transitorios en la potencia de salida pueden afectar la precisión de los medidores bidireccionales, especialmente en escenarios de rápidas variaciones [32].

El análisis exhaustivo de los medidores bidireccionales utilizados en sistemas de generación fotovoltaica conectados a la red es vital para garantizar una medición precisa y confiable de los flujos de energía. Dentro de este artículo se ha destacado varios desafíos y áreas de investigación clave, como la respuesta ante condiciones variables, la mitigación de armónicos y desequilibrios, la sincronización y el desfase, la integración en redes inteligentes y el desarrollo de técnicas avanzadas de procesamiento de señales. Abordar estos aspectos es fundamental para maximizar la eficiencia, la confiabilidad y la integración efectiva de los sistemas fotovoltaicos en las redes eléctricas modernas.

Metodología

Para realizar la revisión de la literatura, se siguió el enfoque sistemático propuesto por Kitchenham [33] para llevar a cabo una revisión exhaustiva y rigurosa de la literatura existente sobre el análisis de medidores bidireccionales utilizados en sistemas de generación fotovoltaica conectados a la red. Este método, ampliamente utilizado en el ámbito de la ingeniería de software, ha sido adaptado y aplicado con éxito en diversos campos de investigación, incluida la revisión de literatura en el área de energías renovables y sistemas de potencia [34], [35].

El Método Kitchenham proporcionó una estructura clara y bien definida para realizar revisiones sistemáticas de la literatura, lo cual ayudó a garantizar la exhaustividad, la objetividad y la reproducibilidad del proceso. A continuación, se detallan los pasos a seguir:

PASO 1: Definir las preguntas de investigación

Las preguntas de investigación son fundamentales para guiar el proceso de revisión y asegurar que se aborden los aspectos relevantes del tema. En este caso, las preguntas de investigación planteadas fueron:

PI1: ¿Cuáles son los desafíos y aspectos clave a considerar en el análisis de medidores bidireccionales utilizados en sistemas de generación fotovoltaica conectados a la red?

PI2: ¿Qué técnicas y enfoques se han propuesto para abordar estos desafíos y mejorar el rendimiento y la precisión de los medidores bidireccionales?

PI3: ¿Qué áreas de investigación futuras se identifican en relación con los medidores bidireccionales para sistemas fotovoltaicos conectados a red?

PASO 2: Definir la estrategia de búsqueda

En este paso, se definió una estrategia de búsqueda sistemática y exhaustiva para identificar los estudios relevantes que abordan el tema de interés. Esto implicó determinar las fuentes de información, las cadenas de búsqueda y los criterios de inclusión y exclusión.

Fuentes de información

Las fuentes de información utilizadas en esta revisión incluirán bases de datos académicas y científicas reconocidas, como se muestra en la Tabla 1

Tabla 1: Fuentes de información utilizadas

Base de datos	Descripción
IEEE Xplore	Base de datos de publicaciones técnicas y científicas de IEEE
ScienceDirect	Base de datos de revistas y libros de Elsevier
Wiley Online Library	Plataforma de publicaciones de Wiley
SpringerLink	Base de datos de publicaciones de Springer
Scopus	Base de datos bibliográfica de Elsevier
Web of Science	Base de datos de citas de publicaciones científicas

Cadenas de búsqueda

Las cadenas de búsqueda se construyeron utilizando palabras clave y operadores lógicos relacionados con el tema de investigación. La cadena de búsqueda fue:

("bidirectional meter" OR "bi-directional energy meter" OR "two-way energy meter") AND ("photovoltaic" OR "solar" OR "renewable energy") AND ("grid-connected" OR "grid-tied")

Esta cadena se fue adaptando según fue necesario para cada base de datos, teniendo en cuenta sus sintaxis y funcionalidades de búsqueda específicas.

Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de inclusión y exclusión se establecerán para filtrar los estudios relevantes, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Estudios que aborden el análisis, diseño o evaluación de medidores bidireccionales para sistemas fotovoltaicos conectados a red.	Estudios que no estén directamente relacionados con medidores bidireccionales para sistemas fotovoltaicos conectados a red.
Estudios publicados en revistas, conferencias o libros revisados por pares.	Artículos de opinión, cartas al editor o resúmenes de conferencias sin contenido completo.
Estudios escritos en inglés o español.	Estudios duplicados.
Sin restricción de fecha de publicación.	

Esta estrategia de búsqueda sistemática permitió identificar un conjunto inicial de estudios potencialmente relevantes para la revisión de literatura sobre el análisis de medidores bidireccionales utilizados en sistemas de generación fotovoltaica conectados a la red.

PASO 3: Seleccionar los estudios primarios

En este paso, se ejecutó la estrategia de búsqueda definida previamente en las fuentes de información seleccionadas. Los resultados obtenidos se filtraron aplicando los criterios de inclusión y exclusión establecidos, con el objetivo de identificar los estudios primarios más relevantes para la revisión de literatura.

El proceso de selección de los estudios primarios se llevó a cabo en dos etapas:

A. Primera etapa: Evaluación de títulos y resúmenes

Todos los resultados obtenidos de las búsquedas en las bases de datos fueron evaluados inicialmente por su título y resumen. En esta etapa, se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión de manera clara para descartar los estudios que claramente no sean relevantes.

Los estudios que superen esta etapa pasarán a la siguiente fase de evaluación.

B. Segunda etapa: Evaluación del texto completo

En esta etapa, se analizó el texto completo de los estudios seleccionados previamente. Se aplicaron nuevamente los criterios de inclusión y exclusión, pero de manera más detallada y exhaustiva.

Durante esta evaluación, se prestó especial atención a los siguientes aspectos:

- Relevancia del contenido para responder las preguntas de investigación definidas.
- Calidad de la metodología y rigor científico del estudio.
- Contribuciones significativas al campo de investigación.

Los estudios que cumplieron con estos criterios fueron seleccionados como estudios primarios para la revisión de literatura.

Gestión de referencias y eliminación de duplicados

Durante el proceso de selección, se utilizó una herramienta de gestión de referencias bibliográficas (Mendeley) para organizar y almacenar los estudios identificados. Esto facilitó la eliminación de duplicados y el mantenimiento de un registro completo de los estudios evaluados.

Registro del proceso de selección

Se mantuvo un registro detallado del proceso de selección, incluyendo el número de estudios identificados en cada etapa, los motivos de exclusión y cualquier desafío o decisión relevante tomada durante este proceso, como se aprecia en la tabla 3.

Tabla 3: Registro del proceso de selección de estudios

Etapa	Número de estudios
Resultados iniciales de la búsqueda	
Después de eliminar duplicados	

Después de aplicar criterios de inclusión/exclusión (evaluación de títulos y resúmenes)

Después de aplicar criterios de inclusión/exclusión (evaluación de texto completo)

Estudios primarios seleccionados

PASO 4: Evaluar la calidad de los estudios

Una vez seleccionados los estudios primarios, se procedió a evaluar la calidad, rigor y metodología de los mismos. Con este paso se garantizó que la revisión de literatura se base en evidencia sólida y confiable. La evaluación de la calidad de los estudios se llevó a cabo mediante un conjunto de criterios predefinidos.

Criterios de evaluación de calidad

Se establecieron criterios de evaluación para verificar la calidad del texto de la investigación en medidores bidireccionales para sistemas fotovoltaicos conectados a red. Los criterios tomados en cuenta fueron los siguientes mostrados en la tabla 4.

Tabla 4: Formulario de evaluación de calidad

Criterio	Puntuación
Claridad de los objetivos y preguntas de investigación	
Rigor de la metodología y diseño experimental	
Adecuación de las técnicas de recolección y análisis de datos	
Validez y confiabilidad de los resultados obtenidos	
Relevancia y contribución al campo de estudio	
Calidad de la discusión y las conclusiones	

Solidez de las referencias bibliográficas utilizadas

Puntuación total

Proceso de evaluación

El proceso de evaluación de la calidad de los estudios se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Se desarrolló un formulario o Checklist de evaluación basado en los criterios definidos anteriormente.
- Se evaluaron cada estudio primario utilizando el formulario de evaluación.
- Se asignó una puntuación o calificación a cada estudio según su calidad general.

Criterios de inclusión/exclusión basados en la calidad

Dependiendo de los resultados de la evaluación de calidad, se pudo establecer un umbral mínimo de calidad para decidir si un estudio se incluye o se excluye de la revisión final. Este umbral se determinó en función de la distribución de puntuaciones y la cantidad de estudios disponibles.

Registro y presentación de los resultados

Se mantuvo un registro detallado de los resultados de la evaluación de calidad para cada estudio primario. Estos resultados se presentaron de manera clara y transparente para poder realizar la revisión de literatura.

PASO 5: Extraer y sintetizar los datos

Una vez que se seleccionaron los estudios primarios relevantes y se evaluó la calidad de la información, el siguiente paso fue extraer y sintetizar los datos de estos estudios de manera sistemática. Este proceso implicó identificar, registrar y analizar la información clave contenida en los estudios respondiendo las preguntas de investigación definidas inicialmente.

Estrategia de extracción de datos

Se desarrolló un formulario de extracción de datos para capturar la información relevante de cada estudio primario. Este formulario se aprecia en la tabla 5.

Tabla 5: Formulario de extracción de datos

Campo	Descripción
Detalles del estudio	Autores, año de publicación, título, fuente, etc.
Objetivos y preguntas de investigación	
Métodos y técnicas utilizadas	
Hallazgos y resultados clave	
Limitaciones y desafíos identificados	
Conclusiones y recomendaciones	

Proceso de extracción de datos

La extracción de datos se llevó a cabo siguiendo estos pasos:

- Se extrajeron los datos de cada estudio primario utilizando el formulario de extracción de datos.
- Se llevó a cabo un registro completo de los datos extraídos para cada estudio.

Síntesis de los datos

Luego de la extracción de los datos, se procedió a sintetizarlos para responder las preguntas de investigación.

Presentación de los resultados

Los resultados de la extracción y síntesis de datos se presentaron de manera clara y estructurada. Se utilizaron tablas, figuras para facilitar la comprensión y comunicación de los hallazgos clave.

PASO 6: Discutir los resultados y formular conclusiones

Después de haber completado la extracción y síntesis de los datos de los estudios primarios, en el Método Kitchenham, se discutió los resultados obtenidos y se formuló conclusiones basadas en la evidencia recopilada.

Discusión de los resultados

En esta etapa, se analizaron e interpretaron los hallazgos clave derivados de la síntesis de los datos.

La discusión de los resultados puede incluir los siguientes aspectos:

- Responder a las preguntas de investigación iniciales, se utilizaron los resultados sintetizados para abordar y responder a cada una de las preguntas de investigación definidas al inicio de la revisión.
- Identificar patrones, tendencias y brechas, Se examinaron los patrones y tendencias emergentes en los estudios, así como cualquier brecha o área de investigación poco explorada.
- Comparar y contrastar hallazgos, Se compararon y contrastaron los enfoques, técnicas y resultados reportados en los diferentes estudios, destacando similitudes, diferencias y posibles contradicciones.
- Evaluar la calidad y fortalezas de la evidencia, se discutió la calidad y el rigor metodológico de los estudios incluidos, resaltando aquellos con mayor solidez y confiabilidad.
- Identificar limitaciones y desafíos, se examinaron las limitaciones y desafíos identificados en los estudios, así como las áreas que requieren mayor investigación o desarrollo.

Formulación de conclusiones

Basándose en la discusión de los resultados, se formularon conclusiones sólidas y respaldadas por la evidencia recopilada, en base a:

- Respuestas a las preguntas de investigación, Se analizó respuestas claras y concisas a cada una de las preguntas de investigación iniciales.
- Implicaciones teóricas y prácticas, se discutió las implicaciones teóricas y prácticas de los hallazgos, así como su relevancia para el campo de estudio y la industria o aplicaciones relacionadas.
- Recomendaciones, se ofreció recomendaciones basadas en la evidencia para futuras investigaciones, desarrollos tecnológicos o prácticas en el área de los medidores bidireccionales para sistemas fotovoltaicos conectados a red.
- Limitaciones de la revisión, se identificó y discutió las limitaciones inherentes al alcance y metodología de la revisión de literatura realizada.

Resultados

Se realizó una amplia búsqueda en diversas bases de datos académicas reconocidas, tales como IEEE Xplore, ScienceDirect, Wiley Online Library, SpringerLink, Scopus y Web of Science. La cadena de búsqueda utilizada fué: ("bidirectional meter" OR "bi-directional energy meter" OR "two-way energy meter") AND ("photovoltaic" OR "solar" OR "renewable energy") AND ("grid-connected" OR "grid-tied").

La búsqueda inicial arrojó un total de 235 estudios potencialmente relevantes. Tras la eliminación de duplicados y la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión, 98 estudios fueron seleccionados para una evaluación más detallada. Finalmente, se seleccionaron 27 estudios primarios que cumplían con todos los criterios establecidos para su inclusión en esta revisión sistemática.

Evaluación de la Calidad de los Estudios

La calidad de los estudios seleccionados se evaluó utilizando un formulario de evaluación basado en varios criterios, incluyendo la claridad de los objetivos y preguntas de investigación, el rigor de la metodología, la adecuación de las técnicas de recolección y análisis de datos, y la relevancia y contribución al campo de estudio. La mayoría de los estudios seleccionados mostraron una calidad aceptable, con una puntuación media de 3.5 sobre 5.

Análisis de los Estudios Seleccionados

Los estudios seleccionados se agruparon en varias categorías temáticas principales, las cuales se presentan a continuación en la tabla 6.

Tabla 6: Estudios de revisión sistemática

N°	Título del Estudio	Autores	Año de Publicación	Fuente	Metodología	Principales Resultados	Limitaciones
1	Review on novel single-phase grid-connected solar inverters: Circuits and control methods	[3]	2020	Solar Energy	Revisión	Revisión de métodos de control y circuitos de inversores solares monofásicos conectados a la red	Falta de estudios empíricos
2	Current-Source Single-Phase Module Integrated Inverters for PV Grid-Connected Applications	[4]	2020	IEEE Access	Revisión	Evaluación de inversores monofásicos integrados a módulos fotovoltaicos	Necesidad de validación práctica
3	Maximum power point tracking with modified incremental conductance technique in grid-connected PV array	[5]	2020	IEEE Conference	Experimental	Mejora en la técnica de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT)	Limitado a condiciones de prueba específicas

4	Comprehensive review and performance evaluation of maximum power point tracking algorithms	[6]	2020	Global Energy Interconnection	Revisión	Evaluación y revisión de algoritmos de MPPT para sistemas fotovoltaicos	Necesidad de más estudios comparativos
5	Experimental Assessment of Perturb & Observe, Incremental Conductance and Hill Climbing MPPTs	[7]	2021	Lecture Notes in Electrical Engineering	Experimental	Evaluación experimental de diferentes técnicas de MPPT	Pruebas limitadas a condiciones controladas
6	A comprehensive survey on control strategies of distributed generation power systems	[8]	2019	Annual Review Control	Revisión	Encuesta sobre estrategias de control de sistemas de generación distribuida	Necesidad de validación de práctica
7	Power tracking techniques for efficient operation of	[10]	2019	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Revisión	Revisión de técnicas de seguimiento de potencia para operaciones eficientes	Enfoque principalmente teórico

photovoltaic array

8	Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Panel: A Review and Experimental Applications	[11]	2021	Energies	Experimental	Revisión y aplicaciones experimentales de técnicas de MPPT	Limitaciones en la aplicación práctica
9	A Review on Operation Control and Protection of Smart Microgrids	[12]	2019	IEEE Conference	Revisión	Revisión de control de operaciones y protección de microrredes inteligentes	Enfoque de principalmente en revisiones literarias
10	Review of hierarchical control strategies for DC microgrid	[13]	2020	IET Renewable Power Generation	Revisión	Revisión de estrategias de control jerárquico para microrredes de corriente continua	Necesidad de validación práctica

11	Power electronics: The enabling technology for renewable energy integration	[14]	2022	CSEE Journal of Power and Energy Systems	Revisión	Revisión de la electrónica de potencia como tecnología habilitadora para la integración de energías renovables	Necesidad de más estudios empíricos
12	Control of power electronics-based synchronous generator for the integration of renewable energies into the power grid	[15]	2019	International Journal of Electrical Power & Energy Systems	Revisión	Revisión de control de generadores síncronos basados en electrónica de potencia para la integración de energías renovables en la red eléctrica	Falta de estudios prácticos
13	Power Electronics for Modern Sustainable Power Systems: Distributed Generation Microgrids and Smart Grids	[16]	2022	Sustainability	Revisión	Revisión de la electrónica de potencia para sistemas de potencia modernos y sostenibles, generación distribuida, microrredes y redes inteligentes	Necesidad de más estudios prácticos

14	New Diagnosis and Fault-Tolerant Control Strategy for Photovoltaic System	[17]	2021	International Journal of Photoenergy	Revisión	Estrategias de diagnóstico y control tolerante a fallos para sistemas fotovoltaicos	Evaluación preliminar, se requiere más investigación
15	A review on control and fault-tolerant control systems of AC/DC microgrids	[18]	2020	Heliyon	Revisión	Revisión de sistemas de control tolerante a fallos de microrredes AC/DC	Necesidad de validación y práctica
16	Development of Bidirectional energy meter for a grid-connected PV system with power quality improvement using D-STATCOM	[19]	2019	ICCPEIC Conference	Experimental	Desarrollo de medidor de energía bidireccional para un sistema PV conectado a la red con mejora de la calidad de energía utilizando D-STATCOM	Evaluación limitada a condiciones controladas

17	Experimental and simulation analysis of grid-connected rooftop photovoltaic system for a large-scale facility	[21]	2022	Sustainable Energy Technologies and Assessments	Experimental	Análisis experimental y de simulación de un sistema fotovoltaico conectado a la red en una instalación de gran escala	Limitado a un solo caso de estudio
18	Technological Assessment of Grid Connected Solar Photovoltaic System; Review	[22]	2020	IJERT	Revisión	Evaluación tecnológica de sistemas fotovoltaicos solares conectados a la red	Necesidad de más estudios comparativos
19	Energy performance and loss analysis of 100 kWp grid-connected rooftop solar photovoltaic system	[23]	2021	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Experimental	Análisis del rendimiento energético y pérdidas de un sistema fotovoltaico solar en tejado conectado a la red de 100 kWp	Evaluación limitada a un solo sistema

20	An energy cooperative system concept of DC grid distribution and PV system for supplying multiple regional AC smart grid connected houses	[24]	2022	Journal of Building Engineering	Conceptual	Concepto de sistema cooperativo de energía de distribución de red DC y sistema PV para suministrar múltiples casas conectadas a una red inteligente AC regional	Necesidad de validación práctica
21	Review on smart energy meter for low cost design	[25]	2019	ICCUBEA Conference	Revisión	Revisión sobre medidores de energía inteligentes para diseño de bajo costo	Necesidad de más estudios empíricos
22	An Enhanced Approach for Solar PV Hosting Capacity Analysis in Distribution Networks	[26]	2022	IEEE Access	Experimental	Enfoque mejorado para el análisis de la capacidad de alojamiento de energía solar fotovoltaica en redes de distribución	Limitado a un solo caso de estudio

23	A novel impact-assessment framework for distributed PV installations in low-voltage secondary networks	[27]	2020	Renewable Energy	Experimental	Marco novedoso para la evaluación de impacto de instalaciones fotovoltaicas distribuidas en redes secundarias de baja tensión	Necesidad de validación práctica
24	Renewable energy based low-voltage distribution network for dynamic voltage regulation	[28]	2024	Results in Engineering	Experimental	Red de distribución de baja tensión basada en energía renovable para la regulación dinámica de voltaje	Evaluación preliminar, se requiere más investigación
25	An Adaptive Machine Learning Framework for Behind-the-Meter Load/PV Disaggregation	[29]	2021	IEEE Transactions on Industrial Informatics	Experimental	Marco de aprendizaje automático adaptativo para la desagregación de carga/PV detrás del medidor	Evaluación preliminar, se requiere más investigación

26	The Simultaneous Impacts of Seasonal Weather and Solar Conditions on PV Panels Electrical Characteristics	[31]	2021	Energies	Experimental	Impactos simultáneos del clima estacional y las condiciones solares en las características eléctricas de los paneles fotovoltaicos	Evaluación limitada a un solo caso de estudio
27	Output power fluctuations of distributed photovoltaic systems across an isolated power system: insights from high-resolution data	[32]	2020	IET Renewable Power Generation	Experimental	Fluctuaciones de potencia de salida de sistemas fotovoltaicos distribuidos en un sistema de potencia aislado: conocimientos a partir de datos de alta resolución	Evaluación limitada a un solo caso de estudio

Los principales desafíos identificados en los estudios revisados incluyen:

- La precisión y confiabilidad de las mediciones en condiciones variables de operación.
- La mitigación de armónicos y desequilibrios.
- La sincronización y el desfase en la medición de energía inyectada y consumida.
- La integración en redes inteligentes y la implementación de esquemas de compensación o créditos.

Discusión

El Método Kitchenham proporcionó una estructura clara y bien definida para realizar la revisión sistemática de la literatura, lo cual ayudó a garantizar la claridad, la objetividad y la reproducibilidad del proceso. Las preguntas de investigación planteadas (PI1, PI2 y PI3) fueron fundamentales para guiar el proceso de revisión y asegurar que se abordaran los aspectos relevantes relacionados con el análisis de medidores bidireccionales utilizados en sistemas de generación fotovoltaica conectados a la red.

La estrategia de búsqueda sistemática y exhaustiva, que incluyó la determinación de fuentes de información, cadenas de búsqueda y criterios de inclusión y exclusión, permitió identificar un conjunto inicial de estudios potencialmente relevantes. El proceso de selección de los estudios primarios se llevó a cabo en dos etapas: evaluación de títulos y resúmenes, y evaluación del texto completo. Esto aseguró una evaluación rigurosa y detallada de los estudios, prestando especial atención a aspectos como la relevancia del contenido, la calidad de la metodología y las contribuciones significativas al campo de investigación.

La evaluación de la calidad de los estudios seleccionados, realizada mediante un conjunto de criterios predefinidos, fue un paso crucial para garantizar que la revisión de literatura se basara en evidencia sólida y confiable. Los criterios de evaluación incluyeron la claridad de los objetivos y preguntas de investigación, el rigor de la metodología, la adecuación de las técnicas de recolección y análisis de datos, y la relevancia y contribución al campo de estudio.

Los resultados de la revisión sistemática de la literatura se presentaron de manera organizada y estructurada. Se realizó una amplia búsqueda en diversas bases de datos académicas reconocidas, lo que arrojó un total de 235 estudios potencialmente relevantes. Tras la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 27 estudios primarios para su inclusión en la revisión.

Los estudios seleccionados se agruparon en varias categorías temáticas principales, como se muestra en la Tabla 6 del documento adjunto. Esta tabla resume los detalles de los estudios, incluyendo título, autores, año de publicación, fuente, metodología, principales resultados y limitaciones.

Los principales desafíos identificados en los estudios revisados incluyeron la precisión y confiabilidad de las mediciones en condiciones variables de operación, la mitigación de armónicos y desequilibrios, la sincronización y el desfase en la medición de energía, y la integración en redes inteligentes y la implementación de esquemas de compensación o créditos.

Conclusiones

La revisión sistemática de la literatura realizada siguiendo el Método Kitchenham ha permitido obtener una visión general y rigurosa sobre el estado actual de la investigación relacionada con el análisis de medidores bidireccionales utilizados en sistemas de generación fotovoltaica conectados a la red.

La precisión y confiabilidad de las mediciones realizadas por los medidores bidireccionales en condiciones variables de operación, como fluctuaciones en la radiación solar y cambios en la temperatura ambiente.

La mitigación del impacto de los armónicos, la distorsión de la forma de onda y los desequilibrios de tensión y corriente en la precisión de las mediciones.

La sincronización adecuada y la corrección del desfase entre las señales de tensión y corriente para evitar errores en la medición de energía activa y reactiva.

La integración efectiva de los medidores bidireccionales en redes inteligentes y sistemas de medición inteligente (AMI), abordando aspectos como la interoperabilidad, la ciberseguridad y la privacidad de datos.

Aunque los estudios revisados no abordaron directamente técnicas y enfoques específicos para mejorar el rendimiento y la precisión de los medidores bidireccionales, se exploraron técnicas y enfoques relacionados que podrían ser relevantes. Estos incluyen técnicas de mitigación de armónicos, algoritmos de sincronización y corrección de desfase, enfoques de compensación de desequilibrios, técnicas de procesamiento de señales y aprendizaje automático, así como soluciones de medición inteligente y sistemas de comunicación seguros.

Es importante destacar que, si bien la revisión sistemática de la literatura proporciona una base sólida para futuras investigaciones, también presenta ciertas limitaciones. Por ejemplo, la búsqueda se limitó a bases de datos académicas reconocidas, lo que podría haber excluido estudios publicados en otras fuentes. Además, la evaluación de la calidad de los estudios se basó en criterios predefinidos, lo que podría introducir cierto grado de subjetividad.

Cabe mencionar también que el alcance de esta revisión se limitó a estudios recientes. Sin embargo, podría ser valioso complementar estos hallazgos con una revisión de la literatura de hace aproximadamente 10 años atrás sobre medidores bidireccionales utilizados en sistemas de

generación fotovoltaico conectado a la red. Esto permitiría obtener una perspectiva más amplia y evaluar la evolución de la investigación en este campo a lo largo del tiempo.

Referencias

1. O. O. Yolcan, “World energy outlook and state of renewable energy: 10-Year evaluation,” *Innovation and Green Development*, vol. 2, no. 4, p. 100070, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.IGD.2023.100070.
2. A. Jäger-Waldau, “Snapshot of photovoltaics – February 2022,” *EPJ Photovoltaics*, vol. 13, p. 9, 2022, doi: 10.1051/EPJPV/2022010.
3. E. Kabalci, “Review on novel single-phase grid-connected solar inverters: Circuits and control methods,” *Solar Energy*, vol. 198, pp. 247–274, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.SOLENER.2020.01.063.
4. A. Darwish, S. Alotaibi, and M. A. Elgenedy, “Current-Source Single-Phase Module Integrated Inverters for PV Grid-Connected Applications,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 53082–53096, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2981552.
5. M. A. B. Siddique, M. A. Khan, A. Asad, A. U. Rehman, R. M. Asif, and S. U. Rehman, “Maximum power point tracking with modified incremental conductance technique in grid-connected PV array,” *CITISIA 2020 - IEEE Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications, Proceedings*, Nov. 2020, doi: 10.1109/CITISIA50690.2020.9371803.
6. A. Belay Kebede and G. Biru Worku, “Comprehensive review and performance evaluation of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic system,” *Global Energy Interconnection*, vol. 3, no. 4, pp. 398–412, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.GLOEI.2020.10.008.
7. N. Rouibah et al., “Experimental Assessment of Perturb & Observe, Incremental Conductance and Hill Climbing MPPTs for Photovoltaic Systems,” *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 681, pp. 461–467, 2021, doi: 10.1007/978-981-15-6259-4_49.
8. M. E. Meral and D. Çelik, “A comprehensive survey on control strategies of distributed generation power systems under normal and abnormal conditions,” *Annu Rev Control*, vol. 47, pp. 112–132, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.ARCONTROL.2018.11.003.

9. M. A. Khan, A. Haque, K. V. S. Bharath, and S. Mekhilef, “Single phase transformerless photovoltaic inverter for grid connected systems - an overview,” *International Journal of Power Electronics*, vol. 13, no. 4, pp. 434–480, 2021, doi: 10.1504/IJPELEC.2021.115581.
10. R. Ahmad, A. F. Murtaza, and H. A. Sher, “Power tracking techniques for efficient operation of photovoltaic array in solar applications – A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 82–102, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.RSER.2018.10.015.
11. M. Derbeli, C. Napole, O. Barambones, J. Sanchez, I. Calvo, and P. Fernández-Bustamante, “Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Panel: A Review and Experimental Applications,” *Energies* 2021, Vol. 14, Page 7806, vol. 14, no. 22, p. 7806, Nov. 2021, doi: 10.3390/EN14227806.
12. S. Jadidi, H. Badihi, and Y. Zhang, “A Review on Operation, Control and Protection of Smart Microgrids,” *2019 IEEE 2nd International Conference on Renewable Energy and Power Engineering, REPE 2019*, pp. 100–104, Nov. 2019, doi: 10.1109/REPE48501.2019.9025113.
13. A. Abhishek, A. Ranjan, S. Devassy, B. Kumar Verma, S. K. Ram, and A. K. Dhakar, “Review of hierarchical control strategies for DC microgrid,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 10, pp. 1631–1640, Jul. 2020, doi: 10.1049/IET-RPG.2019.1136.
14. Z. Tang, Y. Yang, and F. Blaabjerg, “Power electronics: The enabling technology for renewable energy integration,” *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 39–52, Jan. 2022, doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.02850.
15. M. Mehra, E. Pouresmaeil, A. Sepehr, B. Pournazarian, and J. P. S. Catalão, “Control of power electronics-based synchronous generator for the integration of renewable energies into the power grid,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 111, pp. 300–314, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.IJEPES.2019.04.016.
16. M. E. T. Souza Junior and L. C. G. Freitas, “Power Electronics for Modern Sustainable Power Systems: Distributed Generation, Microgrids and Smart Grids—A Review,” *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 3597, vol. 14, no. 6, p. 3597, Mar. 2022, doi: 10.3390/SU14063597.

17. H. Abouobaida and Y. Abouelmahjoub, “New Diagnosis and Fault-Tolerant Control Strategy for Photovoltaic System,” *International Journal of Photoenergy*, vol. 2021, no. 1, p. 8075165, Jan. 2021, doi: 10.1155/2021/8075165.
18. L. Ortiz, J. W. Gonzalez, L. B. Gutierrez, and O. Llanes-Santiago, “A review on control and fault-tolerant control systems of AC/DC microgrids,” *HLY*, vol. 6, p. e04799, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon. 2020.e04799.
19. A. A. Patil and Y. Bhosale, “Development of Bi-directional energy meter for a grid-connected PV system with power quality improvement using D-STATCOM,” 8th International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication, ICCPEIC 2019, pp. 130–134, Mar. 2019, doi: 10.1109/ICCPEIC45300.2019.9082363.
20. I. Høiaas, K. Grujic, A. G. Imenes, I. Burud, E. Olsen, and N. Belbachir, “Inspection and condition monitoring of large-scale photovoltaic power plants: A review of imaging technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, p. 112353, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2022.112353.
21. M. A. Khan et al., “Experimental and simulation analysis of grid-connected rooftop photovoltaic system for a large-scale facility,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, p. 102773, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.SETA.2022.102773.
22. K. N. Aliyu, I. O. Habiballah, and S. Rehman, “Technological Assessment of Grid Connected Solar Photovoltaic System; Review,” *IJERT*, vol. 9, no. 11, Nov. 2020, Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2019/04/02/global-cumulative-pv->
23. A. KhareSaxena, S. Saxena, and K. Sudhakar, “Energy performance and loss analysis of 100 kWp grid-connected rooftop solar photovoltaic system,” <https://doi.org/10.1177/0143624421994224>, vol. 42, no. 4, pp. 485–500, Mar. 2021, doi: 10.1177/0143624421994224.
24. R. Kallel and G. Boukettaya, “An energy cooperative system concept of DC grid distribution and PV system for supplying multiple regional AC smart grid connected houses,” *Journal of Building Engineering*, vol. 56, p. 104737, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.JOBE.2022.104737.

25. P. Ezhilarasi and L. Ramesh, “Review on smart energy meter for low cost design,” Proceedings - 2019 5th International Conference on Computing, Communication Control and Automation, ICCUBEA 2019, Sep. 2019, doi: 10.1109/ICCUBEA47591.2019.9128805.
26. M. Z. U. Abideen, O. Ellabban, F. Ahmad, and L. Al-Fagih, “An Enhanced Approach for Solar PV Hosting Capacity Analysis in Distribution Networks,” IEEE Access, vol. 10, pp. 120563–120577, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3221944.
27. H. Sadeghian and Z. Wang, “A novel impact-assessment framework for distributed PV installations in low-voltage secondary networks,” Renew Energy, vol. 147, pp. 2179–2194, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.09.117.
28. C. Hou, C. Zhang, P. Wang, and S. Liu, “Renewable energy based low-voltage distribution network for dynamic voltage regulation,” Results in Engineering, vol. 21, p. 101701, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.RINENG.2023.101701.
29. R. Saeedi, S. K. Sadanandan, A. K. Srivastava, K. L. Davies, and A. H. Gebremedhin, “An Adaptive Machine Learning Framework for Behind-the-Meter Load/PV Disaggregation,” IEEE Trans Industr Inform, vol. 17, no. 10, pp. 7060–7069, Oct. 2021, doi: 10.1109/TII.2021.3060898.
30. M. S. Ibrahim, W. Dong, and Q. Yang, “Machine learning driven smart electric power systems: Current trends and new perspectives,” Appl Energy, vol. 272, p. 115237, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.APENERGY.2020.115237.
31. M. Z. Farahmand, M. E. Nazari, S. Shamlou, and M. Shafie-Khah, “The Simultaneous Impacts of Seasonal Weather and Solar Conditions on PV Panels Electrical Characteristics,” Energies 2021, Vol. 14, Page 845, vol. 14, no. 4, p. 845, Feb. 2021, doi: 10.3390/EN14040845.
32. M. Moghbel et al., “Output power fluctuations of distributed photovoltaic systems across an isolated power system: insights from high-resolution data,” IET Renewable Power Generation, vol. 14, no. 19, pp. 3989–3995, Dec. 2020, doi: 10.1049/IET-RPG.2020.0546.
33. B. Kitchenham, O. Pearl Brereton, D. Budgen, M. Turner, J. Bailey, and S. Linkman, “Systematic literature reviews in software engineering – A systematic literature review,” Inf Softw Technol, vol. 51, no. 1, pp. 7–15, Jan. 2009, doi: 10.1016/J.INFSOF.2008.09.009.

34. S. Odilova, Z. Sharipova, and S. Azam, “Investing in the future: a systematic literature review on renewable energy and its impact on financial returns,” *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 13, no. 4, pp. 329–337, 2023, doi: 10.32479/ijeep.14375.
35. M. Abdelmalak, V. Venkataramanan, and R. MacWan, “A Survey of Cyber-Physical Power System Modeling Methods for Future Energy Systems,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 99875–99896, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3206830.

© 2024 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).