

Impacto de la generación distribuida en la red de distribución en Sudamérica: Análisis tecno-operativo

Impact of Distributed Generation on Distribution Network in South America: A Techno-Operational Analysis

Diego Cando-Naula¹ <https://orcid.org/0009-0001-6540-6795>, Freddy Chuqui-Cajamarca¹ <https://orcid.org/0009-0007-6748-0378>, Danny Ochoa-Correa² <https://orcid.org/0000-0001-5633-1480>, Santiago Torres-Contreras² <https://orcid.org/0000-0002-8803-6811>

¹Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Cuenca, Ecuador
diego.cando@ucuenca.edu.ec, freddy.chuqui@ucuenca.edu.ec

²Universidad de Cuenca, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Cuenca, Ecuador
danny.ochoac@ucuenca.edu.ec, santiago.torres@ucuenca.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Enviado: 2025/05/26

Aceptado: 2026/04/09

Publicado: 2026/06/15

Resumen

El incremento sustancial de la generación distribuida (GD) en las redes de distribución (RD) de Sudamérica, en la última década, marca un cambio paradigmático que la industria y la academia deben abordar. Diversos estudios se han centrado en evaluar su integración desde una perspectiva técnico-operativa. En este contexto, este artículo presenta una revisión de la literatura sobre la integración de la GD y sus impactos en las RD, centrada en estudios que representan explícitamente la red de distribución a través de su modelado eléctrico dentro del análisis. Esta investigación se realiza en el contexto sudamericano mediante un análisis exhaustivo de artículos científicos publicados entre 2013-2024, con la metodología Prisma aplicada. La investigación demostró que la tecnología fotovoltaica constituye la principal fuente de generación analizada. Asimismo, se evidencia una marcada preferencia por el uso de OpenDSS como herramienta de análisis, y se destaca a Brasil como el país con el mayor volumen de investigación en este campo. Además de proporcionar un análisis detallado de estudios clave, parámetros relevantes, casos de RD destacados y herramientas computacionales habituales, este estudio también examina el impacto de la GD en los distintos niveles de las RD. En este sentido, se abordan áreas de

Sumario: Introducción, Materiales y Métodos, Resultados, Discusión de resultados, Conclusiones.

Como citar: Cando-Naula, D., Chuqui-Cajamarca, F., Ochoa-Correa, D. & Torres-Contreras, S. (2026). Impacto de la generación distribuida en la red de distribución en Sudamérica: Análisis tecno-operativo. *Revista Tecnológica - Espol*, 387(1), 25-46. <https://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/1324>

investigación que han recibido poca atención hasta el momento, lo que subraya la necesidad de una mayor exploración en estos ámbitos para comprender plenamente los efectos de la GD.

Palabras clave: Generación descentralizada, Redes reales y sintéticas, Modelado de redes de distribución, Impactos técnicos y operativos, Análisis bibliométrico, Metodología Prisma.

Abstract

Over the past decade, the substantial expansion of distributed generation (DG) in South American's Distribution Networks (DN) has represented a paradigmatic shift that both industry and academia must address. Numerous studies have focused on assessing this integration from a technical–operational perspective. In this context, this article presents a literature review on DG integration and its impacts on DNs, focusing on studies that explicitly represent the DN through electrical modeling within the analytical framework. This research has been conducted within a South American context by an exhaustive analysis of scientific articles published between 2013 and 2024, applying the Prisma methodology. The investigation demonstrated that photovoltaic technology constitutes the primary generation source examined, also revealing a marked preference for OpenDSS as the analytical tool and identifying Brazil as the country with the highest research volume in this field. In addition to providing a detailed analysis of key studies, relevant parameters, commonly studied DN cases, and frequently used computational tools, this study also examines the impact of DG across different DN levels. In this regard, it discusses research areas that have received little attention thus far, highlighting the need for further exploration in these areas to fully understand the effects of DG.

Keywords: Distributed Energy Resources, Real and synthetic Networks, Distribution network modeling, Technical and operational Impacts, Bibliometric analysis, Prisma methodology.

Introducción

En Sudamérica, la transición hacia un modelo de generación eléctrica distribuida (GD), en contraste con el tradicionalmente centralizado, se ha acelerado debido a la necesidad de diversificar la matriz energética de un país o región (Chabla-Auqui et al., 2023) principalmente a través de fuentes renovables. Un ejemplo es Galápagos, cuyo objetivo es alcanzar una generación 100 % renovable para el año 2050 (Barreto-cuesta et al., 2024). La incorporación de GD no solo promueve una transición hacia una generación sostenible, sino que fortalece la resiliencia de la infraestructura energética ante las demandas y tendencias topológicas cambiantes (Villa-Ávila et al., 2023), aunque bajo una planificación inadecuada, puede ocasionar problemas técnicos en las redes de distribución (RD) (Aucapiña et al., 2017; de Almeida et al., 2024; de Souza Almeida Neto et al., 2023; Torres et al., 2019).

El estudio enfocado en la integración de la GD en las RD es esencial tanto para la academia como para la industria, debido a que su integración mejora el desempeño técnico del sistema, reduce pérdidas y mejora el perfil de voltaje cuando existe un adecuado acoplamiento entre generación y demanda local, como lo demuestran (Henrique et al., 2023; López et al., 2025; Zambrano-Asanza et al., 2019); sin embargo, estos beneficios deben evaluarse junto con los requerimientos de reforzamiento de red, ya que mayores niveles de penetración pueden exigir adecuaciones o ampliaciones de la infraestructura de distribución, como señalan (Abud et al., 2022; de Souza Almeida Neto et al., 2023); por tanto, investigaciones profundas son necesarias para abordar desafíos que presenta la integración GD-RD tanto a nivel económico (Cebrian et al., 2024; Meneses & Mantovani, 2013; Souza Machado et al., 2016), regulatorio (de Souza Almeida Neto et al., 2023; Stecanella et al., 2020, 2022) y tecno-operativo.

En la región, la investigación sobre GD ha abordado diversas tecnologías bajo criterios de planificación y operación de las RD. La generación fotovoltaica (GFV) ha concentrado la mayor parte de los estudios, con beneficios en el aprovechamiento local de la energía y en la limitación de excedentes inyectados a la red, como se observa en los casos de Cuenca-Ecuador y Corrientes-Argentina (Vera et al., 2014; Zambrano-Asanza et al., 2019). De forma complementaria, la literatura también incorpora generación eólica (GE), generación hidroeléctrica a pequeña escala (GHP) y sistemas de almacenamiento de energía (SAE), que incluyen vehículos eléctricos (VE) bajo esquemas vehículo-a-red (V2G), como mecanismo de flexibilidad y soporte operativo (Henrique et al., 2023; Maia et al., 2024; Mattos et al., 2024; Saldanha et al., 2024; Silva et al., 2024). Asimismo, la integración GD-RD también se ha estudiado bajo el enfoque de redes inteligentes (RI), tal como se aborda en el estudio realizado por (de A. Olivieri et al., 2014).

Desde una perspectiva geográfica, la predominancia de las tecnologías de GD no es homogénea, ya que depende de factores económicos, políticos, técnicos, regulatorios y de la disponibilidad de recursos, que varían entre regiones e incluso dentro de un mismo país (de Souza Almeida Neto et al., 2023; Souza Machado et al., 2016; Zambrano-Asanza et al., 2019). En Brasil, por ejemplo, la discusión sobre la GFV ha evolucionado hacia marcos regulatorios que no solo incentiven su expansión, sino que también internalicen impactos tecno-económicos sobre la red, particularmente en demanda pico y costos de refuerzo asociados a transformadores y conductores (de Souza Almeida Neto et al., 2023; Stecanella et al., 2022).

El incremento GD-RD ha impulsado investigaciones centradas en una variedad de aspectos clave que incluyen análisis de flujo de potencia, confiabilidad, estabilidad, cortocircuitos, coordinación de protecciones, planificación de la expansión, calidad de energía y capacidad de alojamiento (Caballero-Peña et al., 2022; Cebrian et al., 2024; López et al., 2025; R. S. Pinto et al., 2019). La integración RD-GD presenta tanto ventajas como limitaciones técnicas y económicas; por ejemplo, puede reducir pérdidas, mejorar la estabilidad de voltaje y frecuencia, gestionar la demanda pico, disminuir emisiones de carbono, entre otros, según lo mencionado (Knak Neto et al., 2019; Zambrano-Asanza et al., 2019); sin embargo, si su penetración excede la capacidad de absorción de la red, puede provocar flujo inverso, sobrevoltajes y requerimientos adicionales de refuerzo y adaptación de la RD (Abud et al., 2022; Aucapiña et al., 2017; de Almeida et al., 2024; de Souza Almeida Neto et al., 2023; Henrique et al., 2023; Torres et al., 2019).

El modelamiento de las RD es necesario para cuantificar los impactos de la integración GD-RD, ya que la estimación de pérdidas, voltajes, flujos, sobrecargas y desempeño de protección depende de la fidelidad con que se represente la topología de red. En este contexto, la literatura distingue principalmente entre RD de prueba y RD reales; como ejemplo de las primeras, (Azeredo et al., 2023) emplean los alimentadores IEEE de 13, 34 y 123 nodos para evaluar la asignación óptima de generación fotovoltaica distribuida, bancos de capacitores y limitadores de corriente de falla, mientras que, como ejemplo de las segundas, (Abud et al., 2022) utiliza un alimentador real de 13,8 kV de Armação de Búzios para estimar la capacidad de alojamiento fotovoltaico y la probabilidad de sobretensión asociada a su difusión. No obstante, aunque existen RD de acceso libre, éstas suelen carecer del detalle requerido para simular sistemas completos (Palminier et al., 2021); por ello, se han desarrollado RD sintéticas a gran escala como alternativa para la investigación (Mateo et al., 2020; Trageser et al., 2022).

Con el fin de obtener resultados con adecuada precisión, algunos estudios emplean programas de libre acceso, como OpenDSS, mientras que otros recurren a software propietario, como DlgSILENT, PowerFactory, Interplan y Matlab; por otro lado, algunos estudios validan

sus propuestas mediante experimentos prácticos (Maia et al., 2024; Mattos et al., 2024; Mendes et al., 2023; G. X. A. Pinto et al., 2024; Sampaio et al., 2020); sin embargo, al igual que ocurre con los trabajos basados en lenguajes propietario, estos estudios son aún escasos, en parte por la limitada inversión de la academia y la industria en licencias especializadas y en laboratorios que integren simulación y validación experimental (Guarda et al., 2019).

A partir de esta discusión, este artículo presenta los resultados de una revisión exhaustiva sobre la integración GD-RD sudamericana y la evaluación de sus impactos, centrada en estudios en los que las RD es modelada explícitamente mediante su topología y sus restricciones operativas. El proceso de prospección literaria, guiado por la metodología PRISMA, abarca el periodo 2013-2024 y se basa en material bibliográfico alojado en bases de datos digitales de referencia. La obra contribuye al conocimiento de los impactos GD-RD, en consonancia con experiencias internacionales. El artículo se estructura así: la sección materiales y métodos detalla la metodología de revisión; la sección resultados expone hallazgos sobre tendencias, producción, casos de estudio, herramientas, fuentes de generación y niveles de RD evaluados; la discusión ofrece un análisis crítico de estos hallazgos; y, la sección conclusiones, expone las consideraciones finales del estudio.

Materiales y Métodos

Proceso de recopilación de literatura científica

La recopilación de la literatura relevante para este estudio se realizó mediante búsquedas en bases de datos bibliográficas indexadas, entre ellas Scopus, IEEE Xplore y ScienceDirect; las ecuaciones de búsqueda utilizadas en cada una se presentan en la Tabla 1. La búsqueda se efectuó el 16 de diciembre de 2025 y consideró el periodo comprendido entre 2013 y 2024.

Tabla 1

Ecuaciones de búsqueda empleadas en cada base de datos

Base de datos	Términos de búsqueda	Rango
Scopus	TITLE-ABS-KEY (Distributed Generation Grid Impact) AND PUBYEAR > 2012 AND PUBYEAR < 2025	2013-2024
IEEE Xplore	All (Distributed Generation Grid Impact)	2013-2024
Science Direct	TITLE-ABS-KEY (Distributed Generation Grid Impact)	2013-2024

Proceso de filtrado y selección de estudios

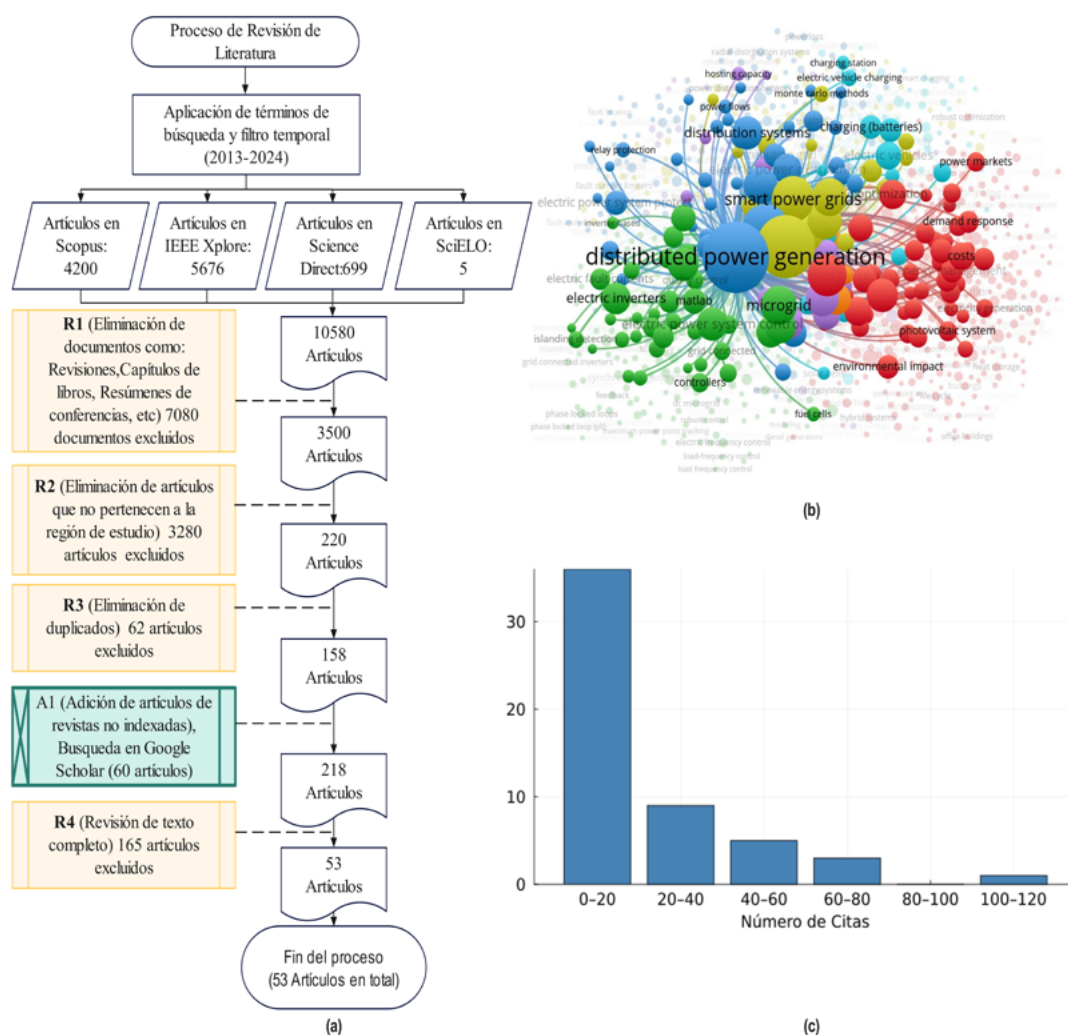
El proceso de selección y filtrado de artículos, basado en la metodología PRISMA (Page et al., 2021), incorpora guías orientadas a mejorar la calidad de la revisión literaria. La Figura 1a) presenta el esquema aplicado, que incluyen filtros y artículos obtenidos en cada etapa mientras que la Figura 1b) presenta un grafo de co-ocurrencia de palabras clave y la Figura 1c) muestra la distribución del número de citaciones de los 53 artículos seleccionados en esta revisión, con el fin de evidenciar el proceso de selección de artículos, además de resaltar la relevancia de los estudios reportados.

Al introducir las cadenas de búsqueda en las bases de datos, se identificaron 10580 artículos, cuyos metadatos (título, autores, palabras clave, resumen, año, DOI, fuente y revista) fueron almacenados en Excel. A partir de este conjunto inicial se ejecutó un proceso de selección por etapas, estructurado mediante los filtros R1–R4 que se enumeran a continuación:

1. En la etapa R1 se descartaron 7080 documentos debido a que correspondían a tipos de publicación no contemplados en el alcance de esta revisión, como revisiones, capítulos de libros, resúmenes de conferencias y otras fuentes secundarias.
2. En la etapa R2 se excluyeron 3280 artículos, cuyos casos de estudio o contextos de análisis no correspondían a la región de interés definida para esta revisión, es decir, Sudamérica.
3. En R3, una subrutina en Python comparó títulos y eliminó 62 duplicados, dejando 158 artículos para evaluación final. Para incorporar literatura adicional, en A1 se realizó una segunda búsqueda en Google Scholar con la misma cadena y horizonte temporal; dado el elevado número de resultados, se seleccionaron los artículos más relevantes de las tres primeras páginas, obteniéndose 60 publicaciones.
4. En la etapa R4, se realizó la revisión completa del texto de todos los documentos recopilados, con el fin de confirmar su pertinencia respecto al tema de estudio. Esta fase excluyó 165 artículos que, aunque relacionados con políticas energéticas, regulaciones, gestión de la demanda, vehículos eléctricos o redes inteligentes, no incluían a las RD como modelo en el análisis, sino que la abordaban de forma conceptual o indirecta.

Figura 1

Selección y análisis de literatura sobre generación distribuida en redes de distribución: (a) flujo PRISMA; (b) co-ocurrencia de palabras clave; (c) distribución de citas de artículos seleccionados.



Al finalizar el proceso de selección, se obtuvieron 53 publicaciones que cumplen con la estrategia de búsqueda y los criterios de inclusión definidos, sin identificarse trabajos adicionales dentro del alcance de la revisión.

Proceso de síntesis y extracción de información

Tras la selección de 53 publicaciones, se revisaron los temas abordados en cada una para elaborar un reporte que identificara los temas recurrentes. La revisión permitió agruparlos en cuatro puntos: a) tipos de energías empleados en la GD y características de las RD, b) herramientas utilizadas, c) estudios y parámetros tecno-operativos evaluados, y d) análisis por nivel de la RD donde se evalúa el impacto de la GD. Estos puntos se complementan con estadísticas sobre la evolución de las tendencias, el volumen de producción literaria en Sudamérica y el número de publicaciones por país.

Resultados

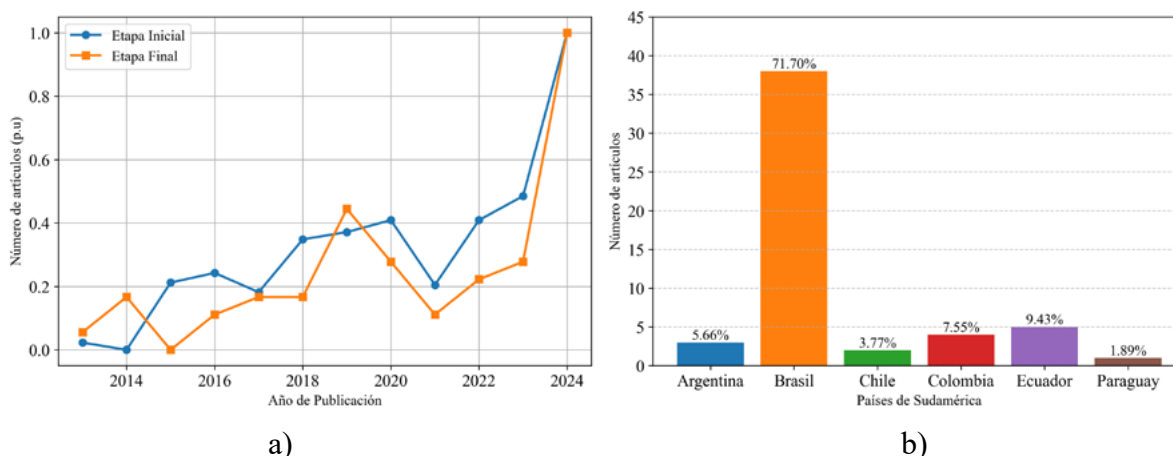
Proceso de síntesis y extracción de información

La Figura 2a) presenta valores normalizados del número de publicaciones, desde 10580 artículos iniciales hasta 53 finales. Esta normalización facilita la comparación temporal y evidencia una tendencia creciente de publicaciones durante los últimos 11 años, una reducción en 2021, posiblemente asociada a los efectos de la pandemia, y una recuperación posterior desde 2022, lo que sugiere un renovado interés en la temática.

Respecto a la distribución por países de la producción literaria, de los 53 artículos seleccionados, en la Figura 2b), se observa que solo 6 de los 12 países sudamericanos —Brasil, Ecuador, Colombia, Argentina, Chile y Paraguay— han contribuido en este campo. Brasil destaca con 38 publicaciones, seguido por Ecuador (5) y Colombia (4); Argentina y Chile registran 3 y 2 publicaciones, respectivamente, mientras que Paraguay presenta 1 publicación. El liderazgo de Brasil se vincula con sus políticas en generación distribuida y la disponibilidad de recursos energéticos distribuidos en su territorio (Chabla-Auqui et al., 2023).

Figura 2

Análisis bibliométrico: a) tendencia anual de publicaciones, b) distribución geográfica del volumen de publicaciones por país



Tipos de fuentes de energía y modelado de la red de distribución

A nivel mundial, se han evaluado diversas fuentes de GD y su impacto en distintas configuraciones de las RD. Su priorización depende de condiciones regionales como la disponibilidad de recursos naturales, la infraestructura de la red, las políticas energéticas y

disposiciones específicas, dinámica que también se observa en Sudamérica. A continuación, se presentan las fuentes más evaluadas en la región, junto con las características y el modelado de las RD.

Análisis de fuentes de energía dominantes

La Figura 3 muestra la distribución de tecnologías preferidas en Sudamérica. La generación fotovoltaica (GFV) es la más abordada, con 42 publicaciones (79.25%). Le siguen los sistemas de almacenamiento de energía (SAE), con 13 publicaciones (24.53%). Tanto la generación eólica (GE) como la hidroeléctrica de pequeña escala (GHP) se analizan en 5 estudios cada una (9.43%). Cabe señalar que, aunque algunas investigaciones incluyen múltiples tecnologías, en esta clasificación cada una se contabiliza por separado para reflejar mejor su frecuencia de análisis.

- **Generación fotovoltaica (GFV)**

La literatura ofrece múltiples razones para el enfoque preferencial de la GFV. En (Leite et al., 2021) destacan la alta irradiación solar en la región, que favorece su implementación. En Pinto et al. (2024) señalan su viabilidad técnica incluso en zonas con condiciones menos favorables. En suma, la GFV se posiciona como la opción prioritaria en la GD por su facilidad de instalación, madurez tecnológica y bajos costos unitarios, según detallan (Abud et al., 2022; Leite et al., 2021). En países como Brasil, donde su penetración es alta, estudios recientes han incorporado variables de mercado y regulación al análisis técnico de su integración con las RD (de Almeida et al., 2024; de Souza Almeida Neto et al., 2023; Stecanella et al., 2020, 2022).

Con base en las ventajas derivadas de la integración de la GFV en las RD, se han desarrollado líneas de investigación que evidencian beneficios técnicos señalados en estudios previos. Entre ellos destacan la reducción de pérdidas en las líneas de distribución y la mejora del perfil de voltaje en los nodos (de A. Olivieri et al., 2014; Leite et al., 2021; López et al., 2025; Mota Martins et al., 2024; Saldanha et al., 2024; Souza Machado et al., 2016), la disminución de costos operativos y de mantenimiento bajo un dimensionamiento adecuado (Knak Neto et al., 2019; Leite et al., 2021), y la menor dependencia de fuentes contaminantes (Zambrano-Asanza et al., 2019). También se reconoce su papel estratégico en redes inteligentes por su flexibilidad y capacidad de coordinación (Parada Contzen, 2024), así como su creciente planificación bajo criterios de adaptabilidad frente a eventos imprevistos, como desconexiones o fluctuaciones (Ramos et al., 2024).

- **Sistemas de almacenamiento de energía (SAE)**

El estudio de los SAE suele complementar la integración de otras fuentes de generación. En Sudamérica, según la Tabla 1, se observa que su análisis aparece estrechamente vinculado a la GFV, en respuesta a los desafíos generados por su creciente penetración en redes de distribución. Entre estos desafíos se identifican fluctuaciones de voltaje, desequilibrios de carga y mayores pérdidas de energía, atribuibles a la naturaleza intermitente de la generación fotovoltaica (Henrique et al., 2023; Knak Neto et al., 2019; Reiz & Leite, 2022). Los SAE permiten mitigar estos efectos mediante el almacenamiento de excedentes en periodos de alta producción solar y su utilización posterior durante baja generación o alta demanda (G. X. A. Pinto et al., 2024). Cabe destacar que los SAE incluyen soluciones móviles como los vehículos eléctricos con tecnología V2G, que permiten inyectar energía a la red para apoyar la estabilidad y cubrir picos de demanda (Mattos et al., 2024). También se investigan nuevas opciones como las baterías de hidrógeno (Parada Contzen, 2024).

- **Generación eólica (GE)**

En el contexto sudamericano, la GE se estudia principalmente en relación con la estabilidad del sistema, con énfasis en el impacto de desconexiones en cascada y la coordinación de protecciones (Mourinho & Assis, 2023; R. S. Pinto et al., 2019; Reiz & Leite, 2022). También se examina su integración con la GFV, destacando mejoras en el perfil de generación y una menor variabilidad en el suministro, lo que incrementa la autonomía energética, especialmente en aplicaciones como estaciones de carga rápida (M. S. da Cruz et al., 2024). Sin embargo, su análisis como fuente única es limitado debido a restricciones económicas, tecnológicas y geográficas. Según la revisión realizada, solo (R. S. Pinto et al., 2019) abordan este enfoque de forma aislada.

- **Generación hidroeléctrica a pequeña escala (GHP)**

La evaluación de la GHP se enfoca en aspectos de coordinación de protecciones y estabilidad del sistema, debido a su impacto en la estabilidad transitoria y en la limitación de corrientes de falla al integrarse a la RD (Filho et al., 2018; Meneses & Mantovani, 2013). La GHP suele complementar otras formas de GD, en particular fuentes intermitentes como la solar y la eólica, y contribuye a la dinámica del sistema mediante controles de frecuencia y voltaje.

La Tabla 2 resume las fuentes de generación y sus combinaciones. Algunos estudios como los de (de Barros Iscuissati et al., 2024; Guardiola et al., 2019; R. D. la Cruz et al., 2024; Maia et al., 2024; Sampaio et al., 2020) constituyen casos particulares, ya que no especifican una tecnología concreta para la GD. En su lugar, modelan la GD en función de su capacidad de inyección o integran grupos electrógenos como fuente principal o de respaldo (M. S. da Cruz et al., 2024; Silva et al., 2024).

Figura 3

Principales fuentes de generación estudiadas en Sudamérica

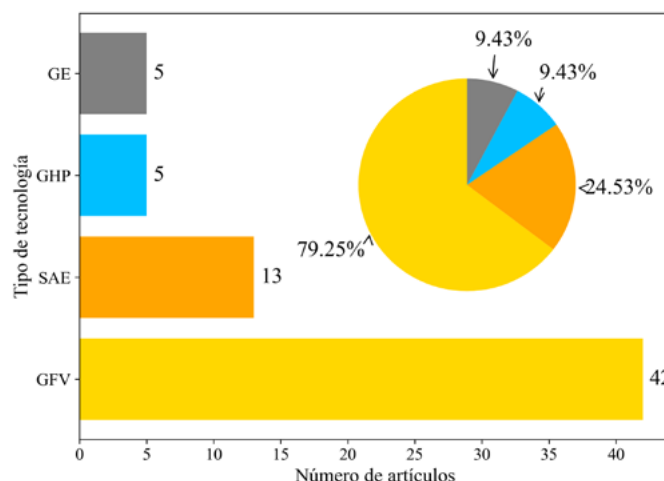


Tabla 2

Artículos que combinan diferentes tipos de GD

COMBINACIÓN	ARTÍCULOS
La GD se analiza de forma general, sin asociarse a una fuente específica, o se enfoca en el estudio puntual de un grupo electrógeno.	(de Barros Iscuissati et al., 2024; Guardiola et al., 2019; Guillén-López et al., 2024; R. D. la Cruz et al., 2024; Maia et al., 2024)
GHP	(Filho et al., 2018; Guarda et al., 2019; Meneses & Mantovani, 2013)

COMBINACIÓN	ARTÍCULOS
GHP+GE	(Madruga et al., 2018)
GHP+GFV+SAE+GE	(Reiz & Leite, 2022)
GFV	(Abud et al., 2022; Aucapiña et al., 2017; Azeredo et al., 2023; Buzo et al., 2021; Cáceres et al., 2017; Cebrian et al., 2024; Cunha Clark Leite et al., 2018; de A. Olivieri et al., 2014; de Almeida et al., 2024; de Oliveira et al., 2019; de Souza Almeida Neto et al., 2023; Giacosa et al., 2016; Gurski et al., 2019; Guzmán-Henao et al., 2024; Holguin et al., 2020; Meneses & Mantovani, 2013; Montoya et al., 2021; Mota Martins et al., 2024; Ramos et al., 2024; Remon et al., 2017; Serrano Guerrero et al., 2022; Silva et al., 2024; Souza Machado et al., 2016; Stecanella et al., 2020, 2022; Torres et al., 2019; Vera et al., 2014; Vieira et al., 2020)
GFV+SAE	(Henrique et al., 2023; Knak Neto et al., 2019; Leite et al., 2021; López et al., 2025; Maia et al., 2024; Parada Contzen, 2024; G. X. A. Pinto et al., 2024; Saldanha et al., 2024; Santos et al., 2024; Zambrano-Asanza et al., 2019)
GFV+SAE +GE	(M. S. da Cruz et al., 2024)
GFV+GE	(Mourinho & Assis, 2023)
GE	(R. S. Pinto et al., 2019)
SAE-V2G	(Mattos et al., 2024)

Modelado de la red de distribución

Respecto al modelado de las RD, su construcción puede realizarse mediante una representación matemática o computacional de la red y sus componentes, incluidas las distintas fuentes de generación. Es fundamental definir una RD, que, según (Mateo et al., 2020) inicia en una subestación primaria (SP), donde transformadores de potencia reducen el voltaje desde transmisión o subtransmisión a niveles de medio voltaje (MV). Desde allí, los alimentadores de MV conectan las SP con subestaciones secundarias (SS), donde los transformadores de distribución (TD) reducen MV a bajo voltaje (BV) y se enlazan con las cargas; algunas, como las industriales, se conectan directamente en MV.

Las RD pueden clasificarse como reales o de prueba según su origen. En este contexto, la Tabla 3 y la Tabla 4 resumen los parámetros de los casos de estudio analizados y muestran que el 27.27% corresponde a redes de prueba, mientras que el 72.72% corresponde a redes reales.

Tabla 3
Casos de estudio analizados – parte I

ID	TIPO	ALIMEN- TADORES	TOPOLOGÍA OPERATIVA	BARRAS	MV [KV]	BV [V]	CARGA [MW]	CARGA [MVAR]	ARTÍCULOS
IEEE 13 Barras	Prueba	1	Radial	13	4.16	480	-	-	(Azeredo et al., 2023; Gurski et al., 2019; Holguin et al., 2020; R. D. la Cruz et al., 2024; Mendes et al., 2023)
IEEE 34 Barras	Prueba	1	Radial	34	24.9- 4.16	-	-	-	(Azeredo et al., 2023; de Barros Iscuissati et al., 2024; Mendes et al., 2023; Santos et al., 2024)
IEEE 33 Barras	Prueba	1	Radial	33	12.66	-	3.715	2.3	(Guzmán-Henao et al., 2024; Knak Neto et al., 2019; Mota Martins et al., 2024; Ramos et al., 2024)

ID	TIPO	ALIMEN- TADORES	TOPOLOGÍA OPERATIVA	BARRAS	MV [KV]	BV [V]	CARGA [MW]	CARGA [MVAR]	ARTÍCULOS
IEEE 123 Barras	Prueba	1	Radial	123	4.16	-	-	-	(Azeredo et al., 2023; Maia et al., 2024; Silva et al., 2024)
IEEE 135 Barras	Prueba	1	Radial	135	13.8	-	-	-	(Meneses & Mantovani, 2013; Reiz & Leite, 2022)
IEEE 37 Barras	Prueba	1	Radial	37	4.8	230			(Guarda et al., 2019)
IEEE-RBTS 2 Barras	Prueba	1	Radial	2	13.8	220			(R. S. Pinto et al., 2019)
IEEE 90 Barras Modificado	Prueba	1	Radial	90	13.8	220			(R. S. Pinto et al., 2019)
IEEE 27 Barras	Prueba	1	Radial	27	23		4.131	2.56	(Guzmán-Henao et al., 2024)
UFJF	Real	3	Radial	22	22	220	1.4	-	(Henrique et al., 2023)
D5	Real		Radial	11000	44- 13.2	-	-	-	(Montoya et al., 2021)
Bandeirante Power Distribution Company	Real	1	Radial	8	13.8	-	-	-	(Filho et al., 2018)
UTE	Real	-	Radial	21	31.5	-	-	-	(Giacosa et al., 2016)
UNNE	Real	-	Radial	1	-	220	-	-	(Cáceres et al., 2017)
0321- CentroSur- Pichacay	Real	1	Radial	2153	22	480	-	-	(Guillén-López et al., 2024)
0103- CentroSur	Real	1	Radial	-	6.3	-	-	-	(Zambrano-Asanza et al., 2019)
0325- CentroSur	Real	-	Radial	-	-	220	-	-	(Aucapiña et al., 2017)

Tabla 4
Casos de estudio analizados – parte II

ID	TIPO	ALIMEN- TADORES	TOPOLOGÍA OPERATIVA	BARRAS	MV [KV]	BV [V]	CARGA [MW]	CARGA [MVAR]	ARTÍCULOS
07MA040T15 (Ciudad del Sol)	Real	-	Radial	-	13.8	-	-	-	(Serrano Guerrero et al., 2022)
RD Armação de Búzios	Real	1	Radial	1352	13.8	220/127	-	-	(Souza Machado et al., 2016)
Iberdrola Distribución Eléctrica	Real	-	Radial	-	-	-	-	-	(López et al., 2025)
UFERSA	Real	-	Radial	-	13.8	380/220	-	-	(Vieira et al., 2020)
UNIFEI	Real	-	Radial	1	13.8	220	-	-	(de Oliveira et al., 2019)
Parintins	Real	-	Radial	-	-	-	-	-	(de A. Olivieri et al., 2014)
Medio Oriente Brasil	Real	499	-	-	34.5- 13.8	440- 380- 220	-	-	(Stecanella et al., 2020)
Armação de Búzios	Real	-	Radial	-	13.8	220/127	-	-	(Abud et al., 2022)

ID	TIPO	ALIMEN- TADORES	TOPOLOGÍA OPERATIVA	BARRAS	MV [KV]	BV [V]	CARGA [MW]	CARGA [MVAR]	ARTÍCULOS
Corrientes	Real	-	Radial	7	13.2	380/220	-	-	(Vera et al., 2014)
COB	Real	74	Radial	-	34.5- 13.8	440- 380	-	-	(Stecanella et al., 2022)
San José- Costa Rica	Real	1	Radial	125	34.5	208	-	-	(Mattos et al., 2024)
D1	Real	2	Radial	-	13.8	380	-	-	(de Almeida et al., 2024)
D2	Real	1	Radial	20	13.8	380/220	-	-	(Torres et al., 2019)
D3	Real	7	Radial	-	13.8	-	-	-	(Sampaio et al., 2020)
D4	Real	1	Radial	45	-	-	-	-	(Madruga et al., 2018)
D5	Real	-	Radial	670	13.8	220- 240- 440	7.2	4	(Cebrian et al., 2024)

* Las identificaciones 'D1', 'D2', etc., se utilizan en lugar de los nombres propios de las redes debido a la carencia de información en los artículos consultados.

Este hecho evidencia los esfuerzos de la comunidad investigadora por modelar RD reales que reflejen con mayor fidelidad las condiciones operativas del entorno, sin embargo, algunos estudios que afirman emplear casos reales, en realidad utilizan modelos construidos con datos reales sobre redes de prueba, como ocurre en (Guzmán-Henao et al., 2024), cuyo trabajo, pese a ser simulado, presenta un alto rigor y resultados cercanos al comportamiento real.

La selección del caso de estudio depende de parámetros como la disponibilidad de datos. Una limitante común es el acceso restringido a información real, ya que las RD pertenecen a empresas públicas y están sujetas a acuerdos de confidencialidad, además, no existen modelos de libre acceso a gran escala que cumplan con los requerimientos operativos reales (Mateo et al., 2020). Para afrontar esta limitación se han desarrollado RD sintéticas, diseñadas para reproducir el comportamiento de redes reales (Mateo et al., 2020; Palmintier et al., 2021; Trageser et al., 2022).

Parámetros clave en la concepción de la RD incluyen: la topología (radial: 100% de los casos analizados, mallada: 0%); el número de alimentadores y nodos, que definen la complejidad del sistema y el tiempo de cómputo; y el uso de simplificaciones en algunos estudios, como propone (Mendes et al., 2023), siempre que no comprometan la validez de los resultados. También incluyen variables como el nivel de voltaje (MV o BV), el tipo de demanda, y las características de transformadores, líneas y elementos de compensación entre otros.

En los casos de prueba, los datos completos están disponibles en la literatura, a diferencia de los casos reales que requieren solicitud directa a las empresas. Entre los sistemas de prueba más utilizados destacan los modelos IEEE: 13 barras (5 estudios), 34 y 33 barras (4 cada uno), 123 barras (3), 135 barras (2), y 37, RBTS de 2 barras, 90 y 27 barras (1 estudio cada uno).

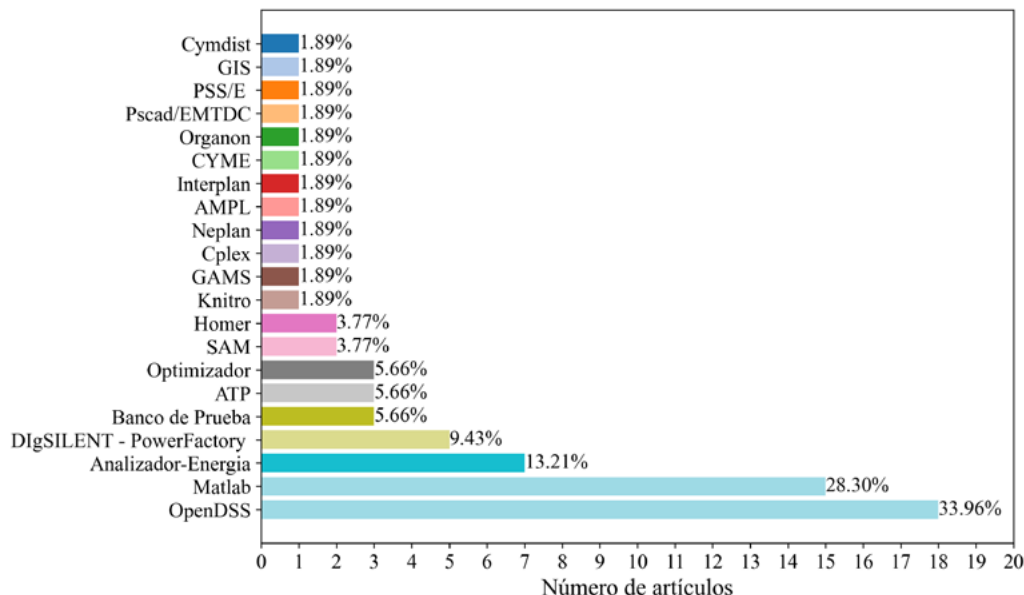
Herramientas y programas de simulación

La revisión muestra que los investigadores emplean principalmente instrumentos de medición y programas de simulación computacional para sus análisis. Estos últimos permiten evaluar sistemas en entornos controlados y se clasifican en comerciales o de código abierto, mientras que los instrumentos de medición permiten validar modelos con datos reales. La Figura

4 muestra que OpenDSS es el programa más utilizado (33.96%), seguido por Matlab (28.30%) y herramientas analizadoras de energía (13.21%). DIgSILENT PowerFactory (9.43%) y bancos de prueba (5.66%) presentan menor uso, debido a su carácter especializado y, en el caso del primero, a su acceso restringido por licencias comerciales.

Figura 4

Herramientas de simulación utilizadas para evaluar el impacto de la GD en las RD



Herramientas como Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources (Homer), System Advisor Model (SAM) y Alternative Transients Program (ATP), con menos del 6% de uso, se emplean como soporte para cálculos de costos, dimensionamientos y simulaciones transitorias. La categoría optimizador (5.66%) refiere al uso de modelos matemáticos sin asociarse a un software específico. Otras plataformas registran una presencia menor en los estudios revisados, con una participación conjunta del 1.89%. Entre las orientadas al análisis eléctrico se encuentran PSCAD/EMTDC, PSS/E, CYME, Neplan y CYMDIST, utilizadas para simulaciones detalladas de sistemas de potencia. Por su parte, CPLEX, GAMS, AMPL y Knitro se emplean en la formulación y resolución de modelos matemáticos de optimización. Adicionalmente, GIS se incorpora como herramienta complementaria para el análisis espacial y representación geográfica.

Un 22.64% de estudios emplea múltiples programas de forma integrada, destacando combinaciones como SAM-OpenDSS, GIS-OpenDSS y Matlab-DIgSILENT PowerFactory. Además, un 9.43% utiliza más de dos herramientas simultáneamente, como el caso de (Holguin et al., 2020), que combina Neplan, ATP y OpenDSS. Este enfoque integrado evidencia un avance hacia entornos automatizados y versátiles, capaces de abordar objetivos múltiples y procesar distintos tipos de datos. La Tabla 5 resume los estudios que adoptan este tipo de estrategias.

Tabla 5

Estudios que integran más de una herramienta de simulación o modelado

PROGRAMA 1	PROGRAMA 2	PROGRAMA 3	ARTÍCULOS
OpenDSS	GIS	SAM	(Zambrano-Asanza et al., 2019)
OpenDSS	-	SAM	(de Souza Almeida Neto et al., 2023)
OpenDSS	ATP	Neplan	(Holguin et al., 2020)

PROGRAMA 1	PROGRAMA 2	PROGRAMA 3	ARTÍCULOS
DigSILENT PowerFactory	Matlab	-	(Guarda et al., 2019)
CYME	DigSILENT - PowerFactory	-	(Guillén-López et al., 2024)
DigSILENT PowerFactory	GAMS	Matlab	(R. D. la Cruz et al., 2024)
Homer	Matlab	-	(Santos et al., 2024)
OpenDSS	Matlab	-	(Saldanha et al., 2024)
Pscad/EMTDC	OpenDSS	Matlab	(Mattos et al., 2024)
Banco de Prueba	Matlab	-	(de Almeida et al., 2024)
AMPL	Cplex	Knitro	(Silva et al., 2024)
ATP	Matlab	-	(de Barros Iscuissati et al., 2024)

Estudios y parámetros tecno-operativos

La selección de la herramienta adecuada depende de los requerimientos específicos de cada estudio y de su accesibilidad. En esta sección se analizan los estudios más relevantes realizados por distintos autores, junto con los principales parámetros considerados en cada caso.

Análisis de estudios en la revisión de literatura

En el ámbito de la GD-RD, la Figura 5 ofrece una visión general de los principales ejes temáticos abordados en la literatura técnica. Se destaca el predominio de los estudios sobre flujos de potencia, presentes en el 71.70% de las investigaciones. Le siguen los estudios sobre sistemas de protecciones (20.75%), que responden a la necesidad de adaptar estos esquemas ante los nuevos desafíos operativos que introduce la GD; por otro lado, la planificación, que incluye la ubicación y dimensionamiento, alcanza un 26.42%, mientras que los análisis sobre capacidad de alojamiento y calidad de energía representan cada uno un 13.21%. Asimismo, los estudios de carácter dinámico, como los de estabilidad (9.43%), complementan estas líneas de análisis.

Temas como regulaciones y confiabilidad (5.66%), mercados eléctricos (3.77%) y métodos de simplificación (1.89%) tienen menor representación, pero resultan esenciales para una visión integral. Aunque menos tratados, estos aspectos normativos, económicos y metodológicos complementan los análisis técnicos y fortalecen la planificación y operación de redes con alta participación de GD.

Figura 5

Estudios técnicos predominantes en la literatura a nivel de Sudamérica

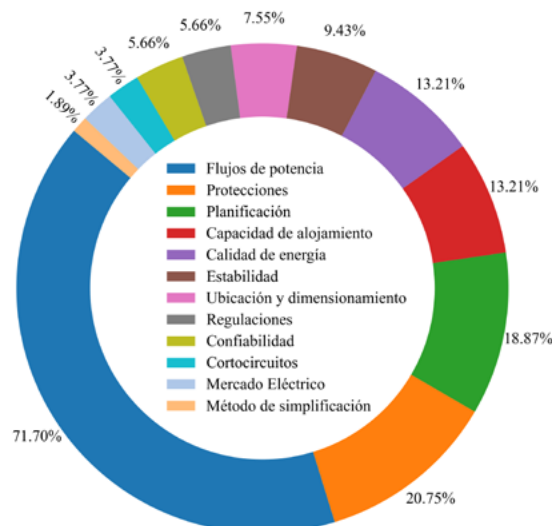


Tabla 6*Clasificación de los artículos analizados según los tipos de estudios realizados*

ESTUDIO	ARTÍCULOS
Flujos de potencia	(Abud et al., 2022; Aucapiña et al., 2017; Azeredo et al., 2023; Cáceres et al., 2017; Cebrian et al., 2024; M. S. da Cruz et al., 2024; de A. Olivieri et al., 2014; de Barros Iscuissati et al., 2024; de Souza Almeida Neto et al., 2023; Guillén-López et al., 2024; Gurski et al., 2019; Guzmán-Henao et al., 2024; Henrique et al., 2023; Knak Neto et al., 2019; Leite et al., 2021; López et al., 2025; Maia et al., 2024; Mattos et al., 2024; Mendes et al., 2023; Montoya et al., 2021; Mota Martins et al., 2024; Parada Contzen, 2024; G. X. A. Pinto et al., 2024; R. S. Pinto et al., 2019; Saldanha et al., 2024; Serrano Guerrero et al., 2022; Silva et al., 2024; Stecanella et al., 2020, 2022; Torres et al., 2019; Vera et al., 2014; Zambrano-Asanza et al., 2019)
Protecciones	(Azeredo et al., 2023; Buzo et al., 2021; de Almeida et al., 2024; de Barros Iscuissati et al., 2024; Filho et al., 2018; Guarda et al., 2019; Guillén-López et al., 2024; Holguin et al., 2020; Ramos et al., 2024; Reiz & Leite, 2022; Sampaio et al., 2020)
Planificación	(M. S. da Cruz et al., 2024; de Barros Iscuissati et al., 2024; Guzmán-Henao et al., 2024; R. D. la Cruz et al., 2024; López et al., 2025; Maia et al., 2024; Montoya et al., 2021; G. X. A. Pinto et al., 2024; R. S. Pinto et al., 2019; Santos et al., 2024)
Capacidad de alojamiento	(de Oliveira et al., 2019; R. D. la Cruz et al., 2024; López et al., 2025; Maia et al., 2024; Mattos et al., 2024; Santos et al., 2024; Silva et al., 2024)
Calidad de energía	(Cáceres et al., 2017; Cunha Clark Leite et al., 2018; Filho et al., 2018; Giacosa et al., 2016; Mattos et al., 2024; Ramos et al., 2024; Vieira et al., 2020)
Estabilidad	(de Barros Iscuissati et al., 2024; Madruga et al., 2018; Mourinho & Assis, 2023; Ramos et al., 2024; Remon et al., 2017)
Ubicación y dimensionamiento	(Henrique et al., 2023; R. D. la Cruz et al., 2024; Saldanha et al., 2024; Santos et al., 2024)
Regulaciones	(de Souza Almeida Neto et al., 2023; Stecanella et al., 2020, 2022)
Confiabilidad	(Meneses & Mantovani, 2013; Montoya et al., 2021; R. S. Pinto et al., 2019),
Cortocircuitos	(de Almeida et al., 2024; Guardiola et al., 2019)
Mercado Eléctrico	(Cebrian et al., 2024; Souza Machado et al., 2016)
Método de simplificación	(Mendes et al., 2023)

Cabe destacar que los artículos no se limitan a una única temática. Un 58.49% aborda más de dos enfoques simultáneamente, y un 16.98% desarrolla hasta tres tipos de estudio en un mismo trabajo. Esta combinación es, en muchos casos, necesaria; por ejemplo, estudios sobre regulación, ubicación y dimensionamiento o planificación requieren del análisis de flujos de potencia como base metodológica. Asimismo, hay trabajos que integran líneas comúnmente tratadas por separado: por ejemplo, (Azeredo et al., 2023; Filho et al., 2018) analizan protecciones junto con calidad de energía, mientras que (Montoya et al., 2021; R. S. Pinto et al., 2019) combinan planificación de la RD con estudios de confiabilidad.

Existe una clara relación entre las investigaciones y la elección de herramientas de simulación. La Tabla 7 resume los estudios más relevantes, los programas utilizados y sus capacidades, sirviendo como guía para futuras investigaciones.

Tabla 7*Estudios y recursos implementados para evaluar el impacto de la GD en las redes de distribución*

RECURSOS	ESTUDIOS	ARTÍCULOS
SAM y GIS	Evaluación técnica, modelado fotovoltaico, ubicación geográfica.	(de Souza Almeida Neto et al., 2023; Zambrano-Asanza et al., 2019)
DIgSILENT	Flujos de potencia y estabilidad.	(Guarda et al., 2019; Knak Neto et al., 2019; R. D. la Cruz et al., 2024; Madruga et al., 2018; Remon et al., 2017)

RECURSOS	ESTUDIOS	ARTÍCULOS
Analizador de Calidad de Energía	THD de voltaje y corriente.	(Cáceres et al., 2017; Cunha Clark Leite et al., 2018; de Oliveira et al., 2019; Giacosa et al., 2016; G. X. A. Pinto et al., 2024; Vieira et al., 2020)
Matlab Script y Simulink	Flujos de potencia, optimización y control.	(Guarda et al., 2019; Gurski et al., 2019; Guzmán-Henao et al., 2024; R. D. la Cruz et al., 2024; Mendes et al., 2023; Meneses & Mantovani, 2013; R. S. Pinto et al., 2019; Vera et al., 2014)
OpenDSS	Flujos de potencia, cortocircuitos, protecciones, calidad.	(Abud et al., 2022; Aucapiña et al., 2017; Azeredo et al., 2023; Cebrian et al., 2024; de Souza Almeida Neto et al., 2023; Henrique et al., 2023; Holguin et al., 2020; Leite et al., 2021; Montoya et al., 2021; Mota Martins et al., 2024; Saldanha et al., 2024; Souza Machado et al., 2016; Stecanella et al., 2020, 2022; Torres et al., 2019; Zambrano-Asanza et al., 2019)
Homer	Dimensionamiento económico de la GD y simulación horaria anual	(M. S. da Cruz et al., 2024; Santos et al., 2024)
Banco de Prueba	Cortocircuitos y protecciones.	(de Almeida et al., 2024; Maia et al., 2024; Sampaio et al., 2020)
Optimizador	Flujos de potencia, planificación y confiabilidad.	(Knak Neto et al., 2019; Meneses & Mantovani, 2013)
Neplan y ATP	Flujos de potencia, cortocircuitos, calidad, estabilidad.	(de Barros Iscuissati et al., 2024; Filho et al., 2018; Holguin et al., 2020)
CYME y Cymdist	Flujos de potencia y protecciones.	(Guillén-López et al., 2024; Serrano Guerrero et al., 2022)
Otros (Interplan, Organon, PSS/E, Pscad/EMTDC, AMPL, CPLEX, GAMS, etc)	Flujos de potencia, capacidad, optimización y calidad.	(de A. Olivieri et al., 2014; R. D. la Cruz et al., 2024; López et al., 2025; Mattos et al., 2024; Mourinho & Assis, 2023; Silva et al., 2024)

Análisis de parámetros evaluados por estudio

En referencia con los parámetros técnicos abordados, la revisión de literatura revela que su elección depende del objetivo y alcance de cada estudio. La Figura 6 muestra su frecuencia de aparición, asociada al tipo de análisis realizado. Cabe señalar que un mismo parámetro puede intervenir en distintos estudios, por lo que los porcentajes reflejan su recurrencia total.

Los estudios de flujos de potencia y relacionados concentran la mayor atención, evidenciando su relevancia técnica. El nivel de voltaje es el parámetro más frecuente (70.37%), seguido por pérdidas eléctricas (51.85%) y perfil de demanda (33.33%). Su alta presencia responde a su vínculo directo con la estabilidad operacional y eficiencia operativa de redes, especialmente radiales. Investigaciones como las de (Guillén-López et al., 2024; R. D. la Cruz et al., 2024) muestran que la GD puede mejorar perfiles de voltaje y reducir pérdidas, mientras que otros trabajos, como los de (Mota Martins et al., 2024; Santos et al., 2024), advierten que una configuración inadecuada puede provocar efectos contrarios.

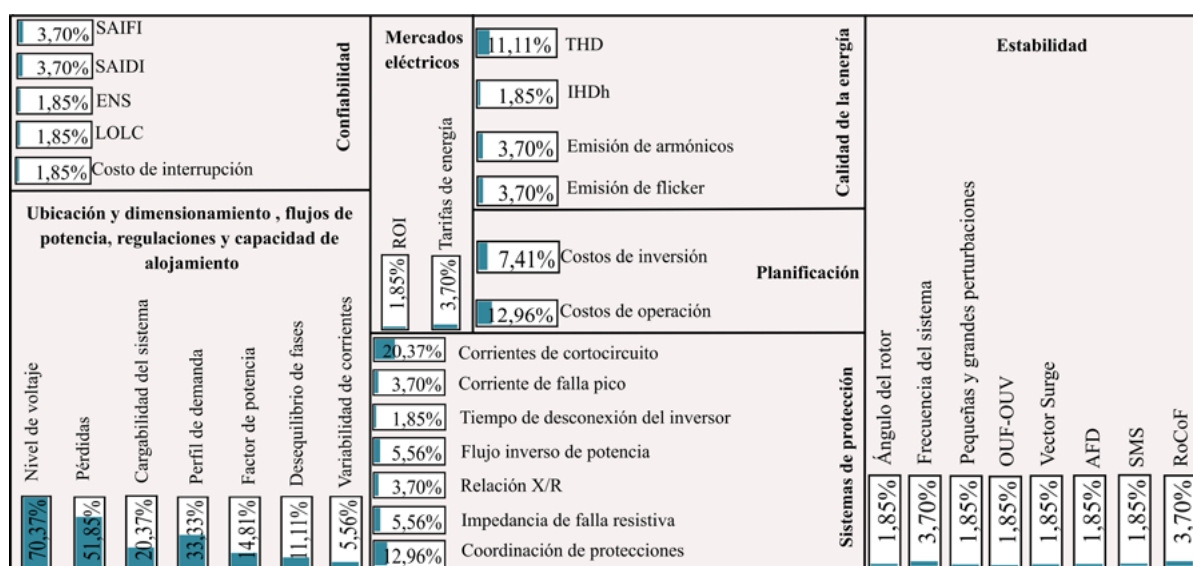
En estudios de confiabilidad, parámetros como SAIFI (índice de frecuencia media de interrupciones por usuario) y SAIDI (índice de duración media de interrupciones por usuario) aparecen en solo un 3.70% de los casos, y ENS (energía no suministrada), LOLC (probabilidad de pérdida de carga) o costos de interrupción en apenas 1.85%. Esta baja frecuencia refleja la preferencia por análisis operativos inmediatos, dada la complejidad y los requerimientos de datos de los enfoques probabilísticos. No obstante, con el crecimiento de la GD, se prevé un mayor protagonismo de estos indicadores para garantizar continuidad de servicio.

En cuanto a los aspectos económicos y de mercado, parámetros como el retorno de inversión (ROI) y las tarifas de energía aparecen en solo un 1.85% y 3.70% de los estudios. Según (Cebrian et al., 2024; Souza Machado et al., 2016), la incorporación de GD modifica

los flujos de potencia, lo que obliga a las distribuidoras a ajustar sus estructuras tarifarias. Por ello, es clave que futuras investigaciones incorporen estas métricas para desarrollar modelos sostenibles y esquemas de remuneración adecuados.

Respecto a calidad de energía, se abordan parámetros como la distorsión armónica total (THD) (11.11%), la distorsión armónica de corriente (IHDh) (1.85%), así como emisiones armónicas y flicker (3.70%). Dichos parámetros aparecen en estudios que analizan el efecto de convertidores electrónicos, típicos en sistemas GFV. En relación con lo descrito, (Giacosa et al., 2016; Mourinho & Assis, 2023) muestran que, sin un control adecuado, estos dispositivos degradan la forma de onda, comprometiendo la compatibilidad electromagnética y la calidad del suministro. Aunque aún poco tratados, estos temas representan un campo emergente clave en contextos de alta penetración renovable.

Figura 6
Parámetros técnicos evaluados en la literatura



Uno de los enfoques con presencia intermedia corresponde a los estudios de planificación, donde se evalúan principalmente los costos de inversión (7.41%) y operación (12.96%), reflejando el interés por la viabilidad económica de proyectos con GD, especialmente en etapas tempranas. Su estimación es clave para políticas públicas y proyectos piloto escalables. En este trabajo, se clasifican en planificación y en ubicación y dimensionamiento; aunque se hallan estrechamente vinculados, la separación obedece a investigaciones que profundizan en aspectos técnicos concretos de la GD.

En los estudios de protección, área crítica del análisis GD-RD, las redes fueron diseñadas para flujos unidireccionales y operación centralizada, por lo que la GD introduce desafíos. Destacan las corrientes de cortocircuito (20.37%) y la coordinación de protecciones (12.96%), ya que niveles de falla elevados pueden descoordinar o insensibilizar dispositivos. También se analizan la impedancia de falla resistiva (5.56%) y el tiempo de desconexión del inversor (1.85%), así como el flujo inverso de potencia (5.56%) y la variación de la relación X/R (3.70%), que obligan a revisar los criterios técnicos por su impacto en la lógica de actuación.

Con el avance de la GD basada en inversores, resulta indispensable incorporar métodos anti-isla. Destacan RoCoF (Rate of Change of Frequency), que detecta islas por cambios rápidos de frecuencia; el análisis armónico, que identifica distorsiones; OUF/OUV, que actúan ante

desviaciones de voltaje o frecuencia; Vector Surge, que detecta variaciones en el ángulo de fase; y métodos activos como AFD (Active Frequency Drift) y SMS (Slip Mode Shift), que introducen perturbaciones para forzar la desconexión. La escasa presencia de estos mecanismos en la literatura evidencia la necesidad de actualizar los criterios de estabilidad e integrarlos como variables críticas en sistemas de protección ante la creciente penetración de GD.

Impacto por nivel de la red de distribución

Uno de los análisis relevantes en la determinación de los impactos de la combinación GD-RD es el nivel en que este se estudia. En este artículo nos referimos como nivel a los elementos que componen los subsistemas de MV y BV. En este contexto, la Tabla 8, muestra un resumen de los estudios que abarcan cada nivel de la RD y sus combinaciones. El lector podrá notar que la SP y los TD son aquellos elementos que delimitan físicamente los distintos niveles considerados en el análisis.

Tabla 8
Listado de artículos que combinan los diferentes niveles de las RD

COMBINACIÓN	ARTÍCULOS
BV	(Abud et al., 2022; Buzo et al., 2021; M. S. da Cruz et al., 2024; de A. Olivieri et al., 2014; Knak Neto et al., 2019; Leite et al., 2021; Mendes et al., 2023; Parada Contzen, 2024; G. X. A. Pinto et al., 2024; Stecanella et al., 2022; Zambrano-Asanza et al., 2019)
BV+TD	(Aucapiña et al., 2017; Cáceres et al., 2017; Cunha Clark Leite et al., 2018; de Oliveira et al., 2019; de Souza Almeida Neto et al., 2023; Guzmán-Henao et al., 2024; Souza Machado et al., 2016; Torres et al., 2019; Vera et al., 2014; Vieira et al., 2020)
MV	(Cebrian et al., 2024; de Barros Iscuissati et al., 2024; Filho et al., 2018; Giacosa et al., 2016; Guarda et al., 2019; Guardiola et al., 2019; Gurski et al., 2019; Henrique et al., 2023; Holguín et al., 2020; Madruga et al., 2018; Maia et al., 2024; Meneses & Mantovani, 2013; R. S. Pinto et al., 2019; Ramos et al., 2024; Reiz & Leite, 2022; Saldanha et al., 2024; Sampaio et al., 2020; Serrano Guerrero et al., 2022; Stecanella et al., 2020)
MV+BV	(Azereido et al., 2023; de Almeida et al., 2024; Stecanella et al., 2020)
MV+TD	(Guillén-López et al., 2024; Montoya et al., 2021; Santos et al., 2024)
MV+SP	(López et al., 2025; Mota Martins et al., 2024)
SP	(Mourinho & Assis, 2023; Remon et al., 2017)

En cuanto al modelamiento de las RD por nivel, la revisión indica que, salvo que se modele todo el sistema, el análisis en MV considera la SP como nodo fuente y las cargas como SS, mientras que en BV la SS actúa como nodo fuente y la demanda corresponde a los consumidores finales.

Discusión de resultados

La pertinencia del presente estudio se sustenta en una revisión sistemática delimitada al contexto sudamericano y en la selección de trabajos que modelan explícitamente la red de distribución (RD), y aunque el conjunto de estudios analizados es acotado, se trata de un tema que responde a los filtros y criterios de selección aplicados, permitiendo aportar una síntesis regional y temática específica sobre la integración de la GD en las RD. La revisión evidencia un incremento sostenido de publicaciones sobre GD-RD en Sudamérica, interrumpido solo en 2021, presumiblemente por la pandemia y reactivado después. Brasil domina más del 70% de la producción, mientras el resto de los países presenta actividad limitada. En cuanto a tecnologías, la fotovoltaica concentra el 79.25% de los estudios gracias a la abundancia de recursos y a su madurez técnica en la región; por otro lado, la tecnología eólica, pese a su desarrollo industrial, recibe menor atención debido a restricciones de recurso, precios y geografía.

Las redes reales sustentan el 72.72% de las investigaciones, lo que refleja una estrecha colaboración academia-industria; cuando estos datos no están disponibles, se recurre a modelos sintéticos. Entre las herramientas de análisis destaca OpenDSS, seguido por software propietario como Matlab, DIgSILENT PowerFactory y PSS/E, así como por equipos de medición de campo que añaden realismo. Persiste, no obstante, una carencia de estudios con componente geoespacial, vital para ubicar la GD según las condiciones locales.

En el plano temático, la literatura prioriza flujos de potencia y protecciones, mientras aborda con menor frecuencia estabilidad, confiabilidad, planificación y mercados eléctricos, áreas críticas ante la creciente penetración de GD. Los resultados subrayan la importancia de un dimensionamiento adecuado: la GD moderada mejora perfiles de voltaje y reduce pérdidas; en exceso, genera sobretensiones, mala calidad de energía y riesgo de inestabilidad, lo que exige esquemas de protección capaces de gestionar flujos inversos y evitar sobrecargas.

En síntesis, la GD ya forma parte de la estrategia del sector eléctrico sudamericano; su éxito dependerá de la posibilidad de dimensionarla con rigor técnico, integrar análisis económicos, regulatorios y geoespaciales, y desarrollar redes resilientes que aseguren calidad y continuidad de servicio bajo cualquier nivel de penetración.

Conclusiones

La integración GD-RD crece notablemente en Sudamérica, impulsada por la convergencia de intereses públicos, privados y académicos, como refleja el incremento de estudios con datos de redes reales. Dentro de este panorama, la GFV domina (79.25%) debido a la abundancia de recursos solares y a su madurez tecnológica. No obstante, persisten fuertes disparidades nacionales; en particular, Brasil concentra el 71.70% de los casos analizados. Además, la literatura presta escasa atención a la confiabilidad, la estabilidad y la integración geoespacial, lo que evidencia la necesidad de investigaciones que combinen criterios técnicos, económicos, regulatorios y espaciales. De este modo, el reto consistirá en conformar redes resilientes y confiables que garanticen la continuidad del suministro ante perturbaciones y admitan cualquier nivel de penetración de GD.

Reconocimientos y Declaraciones

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento al Laboratorio de Micro-Red de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca por el valioso apoyo proporcionado durante el desarrollo de este estudio. Asimismo, los autores declaran que la contribución y participación en los roles de autoría para esta publicación se realizó de manera equitativa.

Los autores declaran que, en la elaboración del presente artículo, se ha utilizado una herramienta de IA, específicamente ChatGPT (GPT-5.4 Thinking), únicamente como apoyo para la revisión de redacción, estilo y corrección gramatical del manuscrito. Su uso no involucró la generación de ideas, resultados, análisis, interpretaciones ni conclusiones científicas. Los criterios académicos, el enfoque metodológico, la selección y discusión de la literatura, así como el contenido intelectual del artículo, son originales y de exclusiva responsabilidad de los autores.

Referencias

- Abud, T. P., Cataldo, E., Maciel, R. S., & Borba, B. S. M. C. (2022). A modified Bass model to calculate PVDG hosting capacity in LV networks. *Electric Power Systems Research*, 209, 107966. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107966>
- Aucapiña, P., Torres, S., Vitorino, R., Vide, P., & Zambrano, S. (2017). Impact of distributed generation and energy storage systems on electrical power distribution systems. *Maskana*, 8, 273–280.
- Azeredo, L. F. S., Yahyaoui, I., Fiorotti, R., Fardin, J. F., Garcia-Pereira, H., & Rocha, H. R. O. (2023). Study of reducing losses, short-circuit currents and harmonics by allocation of distributed generation, capacitor banks and fault current limiters in distribution grids. *Applied Energy*, 350, 121760. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121760>
- Barreto-cuesta, A., Herrera-perez, V., & Djokic, S. Z. (2024). Transition to a 100 % renewable power supply in galapagos islands : Long-term and short-term analysis for optimal operation and sizing of grid upgrades. *Renewable Energy*, 234(March), 121207. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121207>
- Buzo, R. F., Barradas, H. M., & Leão, F. B. (2021). Fault Current of PV Inverters Under Grid-Connected Operation: A Review. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 32(4), 1053 – 1062. <https://doi.org/10.1007/s40313-021-00729-6>
- Caballero-Peña, J., Cadena-Zarate, C., Parrado-Duque, A., & Osma-Pinto, G. (2022). Distributed energy resources on distribution networks: A systematic review of modelling, simulation, metrics, and impacts. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 138, 107900. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107900>
- Cáceres, M., Busso, A., Vera, L., & Firman, A. (2017). First grid--tied photovoltaic system in Northern Argentina: characterization and analysis. *DYNA Energ{\'i}a y Sostenibilidad*, 6(1), 13.
- Cebrian, J. C., Giacomini, J., Rossi, A. L. D., Trindade, F. C. L., & Paredes, H. K. M. (2024). Methodology to Estimate the Financial Impacts of the Integration of PV Generators in Distribution Systems on Voltage Sags and Energy Losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 39(2), 1233–1246. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2024.3358999>
- Chabla-Auqui, L., Ochoa-Correa, D., Villa-Ávila, E., & Astudillo-Salinas, P. (2023). Distributed Generation Applied to Residential Self-Supply in South America in the Decade 2013–2023: A Literature Review. *Energies*, 16(17). <https://doi.org/10.3390/en16176207>
- Cunha Clark Leite, M., Alisson Martins Vieira, F., Bravo Silva, V., Zamboti Fortes, M., & Henrique Nogueira Dias, D. (2018). Harmonic Analysis of a Photovoltaic Systems Connected to Low Voltage Grid. *IEEE Latin America Transactions*, 16(1), 112 – 117. <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8291462>
- da Cruz, M. S., Darui, C. B. F., Abaide, A. da R., Knak Neto, N., da Silva, L. N. F., & dos Santos, L. L. C. (2024). Planning and Analysis of Microgrids for Fast Charging Stations Considering Net Zero Energy Building Indexes. *Energies*, 17(24). <https://doi.org/10.3390/en17246488>
- de A. Olivieri, M. M., Rocha, M. S., de Castro, M. R. V., de Souza, S. M., Klaus, W., Medeiros, J. C., Visconti, I. F., Galdino, M. A. E., de P. Borges, E. L., da Silva, I. W. F., Lima, A. A. N., de Carvalho, C. M., Soares, Y. M. S., & Vieira, J. J. (2014). Distributed Generation in the Smart Grid – Case Study of Parintins. *Energy Procedia*, 57, 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.024>
- de Almeida, L. R., da Costa Lima, R. N., & Macedo Junior, J. R. (2024). Analysis of fault current contributions from small-scale single-phase photovoltaic inverters and their impacts on the protection of electric power distribution systems. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 18(7), 1343 – 1359. <https://doi.org/10.1049/gtd2.13127>
- de Barros Iscuissati, R., Motter, D., & M. Vieira, J. C. (2024). Probabilistic method for risk analysis of unintentional islanding of distributed generators. *Electric Power Systems Research*, 234, 110594. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110594>
- de Oliveira, T. E. C., Bollen, M., Ribeiro, P. F., de Carvalho, P. M. S., Zambroni, A. C., & Bonatto, B. D. (2019). The concept of dynamic hosting capacity for distributed energy resources: Analytics and practical considerations. *Energies*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/en12132576>

- de Souza Almeida Neto, J. C., Torres, P. F., Manito, A. R. A., Pinho, J. T., & Zilles, R. (2023). A comparison study of grid impact of photovoltaic installations in Brazil according to Normative Resolution 482 and Federal law 14.300. *Energy Policy*, 181, 113699. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113699>
- Filho, A. J. T. S., Camargo, A. O., & Domingues, E. G. (2018). Influence of fault impedance on voltage quality in radial distribution systems with distributed synchronous generator: A sensitivity analysis. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(16), 152 – 157. <https://doi.org/10.24084/repqj16.246>
- Giacosa, D., Bentancur, D., Lussich, I., Abal, G., Valevici, L., & Pardo, A. (2016). Power quality analysis for a PV plant in Uruguay. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(14), 708 – 713. <https://doi.org/10.24084/repqj14.436>
- Guarda, F. G. K., Cardoso, G., Bezerra, U. H., & Vieira, J. P. A. (2019). Minimising direct-coupled distributed synchronous generators impact on electric power systems protection. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 13(18), 4190 – 4196. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6757>
- Guardiola, J. M., Gómez-Luna, E., Marlés-Sáenz, E., & de la Cruz, J. (2019). The why of adaptive protections in modern electrical networks; [El porqué de las protecciones adaptativas en las redes eléctricas modernas]. *Ingeniería e Investigación*, 39(2), 58 – 68. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v39n2.74786>
- Guillén-López, D., Serrano-Guerrero, X., Barragán-Escandón, A., & Clairand, J.-M. (2024). Transient and Steady-State Evaluation of Distributed Generation in Medium-Voltage Distribution Networks. *Energies*, 17(22). <https://doi.org/10.3390/en17225783>
- Gurski, E., Moraes, F. A., Fritzen, P. C., & de Souza Benedito, R. A. (2019). A computational framework for daily power flow analysis considering photovoltaic distributed generation. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 62(specialissue). <https://doi.org/10.1590/1678-4324-SMART-2019190008>
- Guzmán-Henao, J. A., Cortés-Cacedo, B., Restrepo-Cuestas, B. J., Bolaños, R. I., & Grisales-Noreña, L. F. (2024). Optimal integration of photovoltaic generators into urban and rural power distribution systems. *Solar Energy*, 270, 112400. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112400>
- Henrique, L. F., Silva, W. N., Silva, C. C. A., Dias, B. H., Oliveira, L. W., & de Almeida, M. C. (2023). Optimal siting and sizing of distributed energy resources in a Smart Campus. *Electric Power Systems Research*, 217, 109095. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109095>
- Holguin, J. P., Rodriguez, D. C., & Ramos, G. (2020). Reverse Power Flow (RPF) Detection and Impact on Protection Coordination of Distribution Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(3), 2393–2401. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2969640>
- Knak Neto, N., Abaide, A., Miranda, V., Vilaça, P., Carvalho, L., Sumaili, J., & Bernardon, D. (2019). Load modeling of active low voltage consumers and comparative analysis of their impact on distribution system expansion planning. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12038>
- la Cruz, R. D., Tipán, L. F., & Cuji, C. C. (2024). Brief Analysis of the Location and Determination of Maximum Capacity of Distributed Generation in Electrical Systems Considering Demand Scenarios in Ecuador. *Energies*, 17(10). <https://doi.org/10.3390/en17102308>
- Leite, R., Souza, J., Asada, E., & Oleskovicz, M. (2021). The behaviour of a low voltage distribution network with crescent presence of photovoltaic generation and energy storage elements. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 19, 423–428. <https://doi.org/10.24084/repqj19.309>
- López, L., López, I., Gomez-Cornejo, J., Aranzabal, I., & Eguia, P. (2025). Analysis of impact for PV-BES strategies in low-voltage distribution system. *Electrical Engineering*, 107(2), 2147 – 2162. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02620-4>
- Madruça, E. P., Bernardon, D. P., Vieira, R. P., & Pfitscher, L. L. (2018). Analysis of transient stability in distribution systems with distributed generation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99, 555–565. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.01.039>

- Maia, G. L., Santos, C. C. L., Nunes, P. R. M., Castro, J. F. C., Marques, D. C., Medeiros, L. H. A. De, Limongi, L. R., Brito, M. E. C., Dantas, N. K. L., Filho, A. V. M. L., Fernandes, A. L., Chai, J., & Zhang, C. (2024). EV Smart-Charging Strategy for Power Management in Distribution Grid with High Penetration of Distributed Generation. *Energies*, 17(21). <https://doi.org/10.3390/en17215394>
- Mateo, C., Postigo, F., de Cuadra, F., Roman, T. G. S., Elgindy, T., Dueñas, P., Hodge, B.-M., Krishnan, V., & Palmintier, B. (2020). Building Large-Scale U.S. Synthetic Electric Distribution System Models. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(6), 5301–5313. <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3001495>
- Mattos, M. M., Archetti, J. A. G., Bitencourt, L. de A., Wallberg, A., Castellucci, V., Dias, B. H., & de Oliveira, J. G. (2024). Analysis of voltage control using V2G technology to support low voltage distribution networks. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 18(6), 1133 – 1157. <https://doi.org/10.1049/gtd2.13066>
- Mendes, M. A., Paiva, M. H. M., & Batista, O. E. (2023). Signal processing on graphs for estimating load current variability in feeders with high integration of distributed generation. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 34, 101032. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101032>
- Meneses, C. A. P., & Mantovani, J. R. S. (2013). Improving the grid operation and reliability cost of distribution systems with dispersed generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 2485 – 2496. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2235863>
- Montoya, C. A. G., López-Lezama, J. M., & Román, T. G. S. (2021). Estimación del costo de distribución de la energía eléctrica en Colombia considerando generación distribuida fotovoltaica. *Información Tecnológica*, 32(1), 79–88. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000100079>
- Mota Martins, R., Machado Alves, Z., Marchesan, G., & Cardoso Junior, G. (2024). Reactive compensation in distribution systems and volt/var control analysis: Mutual performance of inverters and curve slope effects. *Electric Power Systems Research*, 236, 110848. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110848>
- Mourinho, F. A., & Assis, T. M. L. (2023). Impact of Cascade Disconnection of Distributed Energy Resources on Bulk Power System Stability: Modeling and Mitigation Requirements. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 11(2), 412 – 420. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2022.000365>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Palmintier, B., Elgindy, T., Mateo, C., Postigo, F., Gómez, T., de Cuadra, F., & Martinez, P. D. (2021). Experiences developing large-scale synthetic U.S.-style distribution test systems. *Electric Power Systems Research*, 190, 106665. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106665>
- Parada Contzen, M. (2024). Medium voltage level power control using distributed photo-voltaic generation and hydrogen storage. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109858>
- Pinto, G. X. A., Naspolini, H. F., & Rüther, R. (2024). The role and benefits of storage systems in distributed solar PV generation on public buildings in Brazil. *Energy for Sustainable Development*, 81, 101495. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101495>
- Pinto, R. S., Unsuhay-Vila, C., & Fernandes, T. S. P. (2019). Multi-objective and multi-period distribution expansion planning considering reliability, distributed generation and self-healing. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 13(2), 219 – 228. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.5037>
- Ramos, C. R., Zorzela, G. C., Marchesan, G., Freitas-Gutierrez, L. F., & Cardoso, G. (2024). Impacts of output voltage control on PV generation islanding detection function. *Electric Power Systems Research*, 235, 110897. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110897>
- Reiz, C., & Leite, J. B. (2022). Optimal Coordination of Protection Devices in Distribution Networks With Distributed Energy Resources and Microgrids. *IEEE Access*, 10, 99584 – 99594. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3203713>

- Remon, D., Cañizares, C. A., & Rodriguez, P. (2017). Impact of 100-MW-scale PV plants with synchronous power controllers on power system stability in northern Chile. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(11), 2958–2964. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0203>
- Saldanha, J. J. A., Nied, A., Trentini, R., & Kutzner, R. (2024). AI-based optimal allocation of BESS, EV charging station and DG in distribution network for losses reduction and peak load shaving. *Electric Power Systems Research*, 234, 110554. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110554>
- Sampaio, F. C., Leão, R. P. S., Sampaio, R. F., Melo, L. S., & Barroso, G. C. (2020). A multi-agent-based integrated self-healing and adaptive protection system for power distribution systems with distributed generation. *Electric Power Systems Research*, 188, 106525. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106525>
- Santos, L. H. S., Silva, J. A. A., López, J. C., Rider, M. J., & da Silva, L. C. P. (2024). Joint Optimal Sizing and Operation of Unbalanced Three-Phase AC Microgrids Using HOMER Pro and Mixed-Integer Linear Programming. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 35(2), 346 – 360. <https://doi.org/10.1007/s40313-023-01059-5>
- Serrano Guerrero, X., Marín-Toro, B., Ochoa, C., & Barragán-Escandón, A. (2022). Impact of the incorporation of photovoltaics distributed generation in electric distribution grids in Ecuador. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 20, 387–392. <https://doi.org/10.24084/repqj20.319>
- Silva, J. A. A., Camilo López, J., Bañol Arias, N., Zenichi Terada, L., & Rider, M. J. (2024). Tri-Level Adaptive Robust Optimization for the Optimal Charging Coordination of EVs Considering Grid Impact. *IEEE Access*, 12, 169755–169767. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3498600>
- Souza Machado, I., Soares Moreira Cesar Borba, B., & Silva Maciel, R. (2016). Modeling Distributed PV Market and its Impacts on Distribution System: A Brazilian Case Study. *IEEE Latin America Transactions*, 14(11), 4520 – 4526. <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7795823>
- Stecanella, P. A. J., Camargos, R. S. C., Vieira, D., Domingues, E. G., & de L. Ferreira Filho, A. (2022). A methodology for determining the incentive policy for photovoltaic distributed generation that leverages its technical benefits in the distribution system. *Renewable Energy*, 199, 474–485. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.002>
- Stecanella, P. A. J., Vieira, D., Vasconcelos, M. V. L., & Ferreira Filho, A. D. L. (2020). Statistical Analysis of Photovoltaic Distributed Generation Penetration Impacts on a Utility Containing Hundreds of Feeders. *IEEE Access*, 8, 175009–175019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3024115>
- Torres, I. C., Negreiros, G. F., & Tiba, C. (2019). Theoretical and experimental study to determine voltage violation, reverse electric current and losses in prosumers connected to low-voltage power grid. *Energies*, 12(23). <https://doi.org/10.3390/en12234568>
- Trageser, M., Pape, M., Frings, K., Erlinghagen, P., Kurth, M., VertgeWall, C. M., Monti, A., & Busse, T. (2022). Automated routing of feeders in electrical distribution grids. *Electric Power Systems Research*, 211, 108217. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108217>
- Vera, L. H., Cáceres, M., & Busso, A. (2014). Grid Connected Photovoltaic Systems to the Urban Environment of Argentinian Northeast. *Energy Procedia*, 57, 3171–3180. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.06.066>
- Vieira, R., Guerra, M. I., & Bandeira, S. (2020). Analysis of the Power Quality of a Grid-Connected Photovoltaic System. *IEEE Latin America Transactions*, 18(4), 714 – 721. <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9082214>
- Villa-Ávila, E., Arévalo, P., Aguado, R., Ochoa-Correa, D., Iñiguez-Morán, V., Jurado, F., & Tostado-Véliz, M. (2023). Enhancing Energy Power Quality in Low-Voltage Networks Integrating Renewable Energy Generation: A Case Study in a Microgrid Laboratory. *Energies*, 16. <https://doi.org/10.3390/en16145386>
- Zambrano-Asanza, S., Zalamea-León, E. F., Barragán-Escandón, E. A., & Parra-González, A. (2019). Urban photovoltaic potential estimation based on architectural conditions, production-demand matching, storage and the incorporation of new eco-efficient loads. *Renewable Energy*, 142, 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.105>