Tecnologías en electricidad

Revisiones bibliográficas y aplicaciones sostenibles



Juan Valentín Cedeño Mendoza
Compilador

Tecnologías en electricidad

Revisiones bibliográficas y aplicaciones sostenibles



Juan Valentín Cedeño Mendoza
Compilador

Dirección Editorial: PhD. Jorge Luis León-González
Diseño de portada y edición: DI. Yunisley Bruno-Díaz

ISBN: 978-1-968794-65-1

DOI: https://doi.org/10.64092/YDZM7862

© Instituto Superior Tecnológico Iberoamericano, 2026. All rights reserved.

La evaluación científica y metodológica de la obra se realizó a partir del método de Revisión por Pares Abierta (Open Peer Review).

Este libro es una publicación de acceso abierto licenciada bajo la Licencia Internacional Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0), que permite compartir, copiar, redistribuir, adaptar, transformar y reproducir el material en cualquier medio o formato con fines no comerciales, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor, se proporcione un enlace a la licencia y se indiquen los cambios realizados. Si el material se remezcla, transforma o se crea a partir de él, la obra resultante deberá distribuirse bajo la misma licencia que el original. No podrán aplicarse términos legales adicionales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras personas el ejercicio de los derechos concedidos por la licencia.



SOPHIA EDITIONS
8404 N Rome Ave, Tampa,
Florida, USA
Email: contact@sophiaeditions.com
Phone: +1 (813) 699-2557
https://sophiaeditions.com/

DEDICATORIA

A quienes nos enseñaron que todo conocimiento comienza con una pregunta, crece con la perseverancia y alcanza su verdadero sentido cuando sirve a los demás.

A nuestros maestros, por despertar la inquietud de comprender y mostrarnos que enseñar es también dejar una huella que permanece; a nuestras familias, por acompañar con paciencia, afecto y confianza cada desafío asumido; y a nuestros estudiantes, porque en su curiosidad encontramos nuevas razones para investigar, enseñar y continuar aprendiendo.

A las nuevas generaciones de ingenieros, investigadores y profesionales, llamadas no solo a comprender las tecnologías de su tiempo, sino también a imaginar aquellas que todavía no existen. Que el rigor acompañe siempre sus decisiones, que la curiosidad los impulse más allá de lo conocido y que ningún avance les haga olvidar que la ciencia y la tecnología alcanzan su mayor significado cuando contribuyen al bienestar humano y al cuidado del mundo que compartimos.

A quienes investigan donde todavía existen incertidumbres, a quienes enseñan sin saber hasta dónde llegará aquello que sembraron y a quienes tienen el valor de transformar el conocimiento en soluciones capaces de mejorar realidades.

Dedicamos esta obra a todos los que creen que aprender abre caminos, que enseñar permite trascender y que crear significa atreverse a convertir lo posible en realidad.

Que lo aprendido hoy inspire las decisiones del presente y permita construir un mañana que las próximas generaciones puedan transformar aún más.

Los autores

COMITÉ EDITORIAL

PhD. Juan Gabriel Rivera-Ortiz, Ana G. Méndez University, Estados Unidos

PhD. Armanda Matos, Universidade de Coimbra, Portugal

PhD. Domingo Antonio Lilón-Larrauri, Universidad de Pécs, Hungría

PhD. Frida Díaz-Barriga Arceo, Universidad Nacional Autónoma de México, México

PhD. Lok Raj Sharma, Makawanpur Multiple Campus, Nepal

PhD. Pamela Marcone-Dapelo, Universidad de Playa Ancha, Chile

PhD. Sébastien Quenot, Università di Corsica, Francia

PhD. Rafael Ravina-Ripoll, Universidad de Cádiz, España

PhD. Karen Pesantes-Aldana, Universidad Privada Antenor Orrego, Perú

PhD. Pablo Páramo-Bernal, Universidad Pedagógica Nacional, Colombia

PhD. Eduardo Somarribas-Chávez, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica

PhD. Lázaro Pino-Rivero, Lone Star College, Estados Unidos

PhD. Anurag Hazarika, Global Interfaith University, Estados Unidos

PhD. Setyamartana Parman, Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan, Indonesia

PhD. Vicenç Font-Moll, Universidad de Barcelona, España

PhD. Ricardo Rivero-Ortega, Universidad de Salamanca, España

PhD. María Elena Estrada-Martínez, Colegio Palms Day School, Estados Unidos

PhD. Annette Lourdes Padilla-Gómez, Instituto de Educación de Aguascalientes, México

PhD. José Fernando Escobedo-Gálvez, Universidad Señor de Sipán, Perú

PhD. Ahmed G. Hegazy, National Research Centre, Egipto

PhD. Lilibeth Portillo-Rumbo, Universidad Autónoma de Tlaxcala, México

PhD. Ana María Téllez-López, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

PhD. Alexandra Verónica Parra-Cárdenas, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador

PhD. Faisal A. Alnaser, Imperial College London, Reino Unido

PhD. Berlan Rodríguez-Pérez, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú

PhD. José Alberto Rivera-Costales, Universidad de Santiago de Compostela, España

PhD. Claudia Wasserman, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

PhD. Enrique Rafael Farfán-Heredia, Universidad Autónoma del Carmen, México

PhD. Lali Viviana Cedeño-Sánchez, Universidad de Guayaquil, Ecuador

PhD. Odette Martínez-Pérez, Universidad Bolivariana del Ecuador, Ecuador

PhD. Moacir Gadotti, Universidad de São Paulo, Brasil

PhD. Cesar Augusto Bernal-Torres, Universidad de La Sabana, Colombia

PhD. Lázaro Jesús Ojeda-Quintana, URBE University, Estados Unidos

PhD. Ángel Deroncele-Acosta, Universidad San Ignacio de Loyola, Perú

PhD. Rafael Gutiérrez-Núñez, Universidad de Ciencias Médicas de Granma, Cuba

PhD. Alfredo Noré Saluanja-Muacachila, Universidade do Namibe, Angola

PhD. Ronald Antonio Prieto-Pulido, Universidad Simón Bolívar, Colombia

PhD. Nurian Yamileth Luna-Laínez de Quintanilla, Universidad Gerardo Barrios, El Salvador

PhD. Lina María Cano-Vásquez, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia

PhD. Jarosław Korpysa, University of Szczecin, Polonia

PhD. Silvia Finocchio, Universidad Nacional de La Plata, Argentina

PhD. Pablo Pérez-Navarro, Universidad de Coimbra, Portugal

PhD. Oscar José Alejo-Machado, Instituto Superior Tecnológico de Investigación Científica e Innovación, Ecuador

PhD. Juan Díaz-Godino, Universidad de Granada, España

PhD. Thiago Duarte-Pimentel, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil

PhD. Guadalupe Velázquez-Vázquez, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

PhD. Lillian Rocio Pintado-Sosa, Universidad Ana G. Méndez, Puerto Rico

PhD. Alexandru Manole, ARTIFEX University of Bucharest, Rumanía

PhD. Alina Borysova, Kharkiv State Academy of Culture, Ucrania

PhD. Irina Sokolova, Don State Technical University, Rusia

PhD. Nadezhda Fedko, Rostov State Transport University, Rusia

PhD. Samikshya Madhukullya, Global Interfaith University, Estados Unidos

PhD. Roberto Maurice Robert, 21st Century Open University, Wyoming, Estados Unidos.

CONTENIDO

Prólogo i

Introducción vi

Capítulo 1. Evaluación y priorización del potencial de desarrollo tecnológico en sistemas eléctricos mediante un enfoque multicriterio

1.1. Investigación universitaria y desarrollo tecnológico en sistemas eléctricos 1

1.2. Diseño metodológico y construcción del Índice de Potencial de Desarrollo Tecnológico 4

1.3. Caracterización de las propuestas tecnológicas en sistemas eléctricos 10

Capítulo 2. Fundamentos y evolución tecnológica de los sistemas eléctricos: revisión de principios, componentes y aplicaciones

2.1. Evolución tecnológica y transformación de los sistemas eléctricos 24

2.2. Transformación tecnológica, digitalización y nuevas capacidades de los sistemas eléctricos 28

2.3. Propuesta de sistema modular inteligente para la supervisión y gestión de sistemas eléctricos 37

Capítulo 3. Instalaciones eléctricas de baja tensión: criterios técnicos, seguridad y eficiencia energética

3.1. Fundamentos técnicos y transformación de las instalaciones eléctricas de baja tensión 48

3.2. Seguridad, eficiencia energética y modernización tecnológica de las instalaciones de baja tensión 55

3.3. Propuesta de sistema inteligente para el diagnóstico y gestión de instalaciones eléctricas de baja tensión 65

Capítulo 4. Máquinas eléctricas y sistemas de control: fundamentos, aplicaciones y tendencias tecnológicas

4.1. Evolución de las máquinas eléctricas y los sistemas de control 77

4.2. Estrategias de control, eficiencia y tendencias tecnológicas en máquinas eléctricas 84

4.3. Propuesta de sistema inteligente para supervisión, control y diagnóstico de máquinas eléctricas y accionamientos 95

Capítulo 5. Generación eléctrica mediante energías renovables: tecnologías, integración y almacenamiento

5.1. Tecnologías de generación renovable y transformación de los sistemas eléctricos 106

5.2. Integración eléctrica, almacenamiento y gestión de sistemas renovables 113

5.3. Propuesta de plataforma integrada para generación renovable y almacenamiento energético 125

Capítulo 6. Sistemas eléctricos de distribución: redes, protección y calidad del suministro

6.1. Transformación tecnológica de los sistemas eléctricos de distribución 138

6.2. Protección, calidad del suministro y digitalización de las redes de distribución 143

6.3. Propuesta de sistema integrado para supervisión, protección y calidad del suministro 155

Capítulo 7. Calidad de la energía eléctrica: perturbaciones, diagnóstico y tecnologías de mitigación

7.1. Perturbaciones y diagnóstico de la calidad de la energía eléctrica 171

7.2. Diagnóstico de perturbaciones y tecnologías de mitigación 178

7.3. Propuesta de sistema inteligente para diagnóstico y apoyo a la mitigación 188

Capítulo 8. Digitalización de los sistemas eléctricos: automatización, sensores e internet de las cosas

8.1. Digitalización y automatización de los sistemas eléctricos 202

8.2. Sensores, internet de las cosas y tecnologías digitales para la supervisión eléctrica 205

8.3. Propuesta de sistema modular inteligente para supervisión y gestión digital 215

Capítulo 9. Sistemas de protección y seguridad eléctrica: tecnologías, coordinación y prevención de riesgos

9.1. Evolución tecnológica de los sistemas de protección y seguridad eléctrica 232

9.2. Tecnologías de protección, coordinación adaptativa y gestión de fallas 240

9.3. Propuesta de sistema modular inteligente para coordinación adaptativa y gestión de protección 250

Capítulo 10. Eficiencia energética y gestión inteligente del consumo eléctrico: tecnologías y aplicaciones sostenibles

10.1. Eficiencia energética y transformación inteligente de la gestión del consumo eléctrico 272

10.2. Tecnologías inteligentes para la medición, optimización y gestión del consumo eléctrico 278

10.3. Propuesta de sistema modular inteligente para eficiencia energética y gestión optimizada del consumo eléctrico 288

PRÓLOGO

La transformación de los sistemas eléctricos constituye un proceso tecnológico progresivo que modifica la generación, conversión, distribución, protección, control y utilización energética. Incorpora energías renovables, electrónica de potencia, automatización, sensores inteligentes, almacenamiento, comunicaciones digitales, supervisión e inteligencia artificial. Su estudio requiere superar la descripción aislada de tecnologías y componentes, debido a las relaciones que transforman el diseño, la operación y la gestión energética. En este contexto, los capítulos que conforman esta obra presentan resultados de investigaciones realizadas en el Instituto Superior Tecnológico Iberoamericano (ISTI) de Manta, Ecuador, orientadas al estudio de diferentes dimensiones de la transformación contemporánea de los sistemas eléctricos. Estas investigaciones se desarrollaron mediante revisiones bibliográficas de carácter descriptivo, analítico y comparativo, sustentadas en publicaciones científicas recientes. El análisis integra evidencias procedentes de diferentes áreas para identificar tendencias, convergencias, problemas persistentes y soluciones tecnológicas.

La investigación bibliográfica adquiere particular relevancia en un campo caracterizado por una elevada velocidad de innovación. Nuevos dispositivos, arquitecturas, algoritmos, sistemas de control y tecnologías energéticas aparecen continuamente en la literatura especializada. Una interpretación adecuada requiere evidencia reciente y comparaciones entre innovaciones consolidadas y propuestas emergentes. El análisis documental ofrece, en este sentido, una estrategia para reconocer la dirección que adopta la transformación

tecnológica y proporcionar una base científica para nuevas investigaciones y desarrollos.

La secuencia de los capítulos permite observar esta evolución como un proceso continuo. Los fundamentos eléctricos proporcionan la base física; las instalaciones expresan su aplicación; las máquinas permiten la conversión y utilización de energía; las fuentes renovables modifican la generación; y las redes inteligentes integran progresivamente capacidades físicas y digitales. Esta relación articula investigativamente la obra y permite establecer conexiones entre los resultados obtenidos en los diferentes estudios que la conforman. Las investigaciones también permiten reconocer que la innovación eléctrica no supone la desaparición inmediata de las tecnologías convencionales. Los principios físicos y eléctricos permanecen como fundamentos de las nuevas soluciones, mientras los dispositivos electrónicos, los sistemas digitales y las herramientas computacionales amplían sus posibilidades de aplicación. Esta coexistencia requiere diferenciar continuidad, modificación e incorporación de capacidades.

Otro componente investigativo corresponde a la identificación de relaciones entre tecnologías. Los sensores inteligentes generan información para los sistemas digitales; estos favorecen la supervisión y automatización; la electrónica de potencia facilita la integración de determinadas fuentes renovables; el almacenamiento contribuye a gestionar variaciones de generación y demanda; y las redes inteligentes articulan progresivamente estas capacidades. El análisis conjunto evita interpretar cada innovación fuera de su contexto sistémico y permite comprender las interdependencias que caracterizan la evolución de los sistemas eléctricos.

La literatura reciente evidencia, además, una ampliación de los problemas asociados con la confiabilidad eléctrica. La estabilidad tradicional continúa siendo necesaria, pero

adquieren importancia la resiliencia, la ciberseguridad, la adaptación, la gestión de recursos distribuidos y la continuidad operativa ante perturbaciones complejas. La protección también evoluciona debido a la generación distribuida, la electrónica de potencia y los sistemas digitales. Estas transformaciones muestran que los problemas contemporáneos incorporan dimensiones físicas y digitales que requieren ser examinadas de manera articulada.

La digitalización introduce una nueva dimensión en la investigación de los sistemas eléctricos. Los datos procedentes de sensores y dispositivos conectados permiten construir representaciones más detalladas de las condiciones operativas. Las réplicas digitales dinámicas, los sistemas de supervisión y las plataformas inteligentes amplían las posibilidades de diagnóstico, simulación, mantenimiento y optimización. La información adquiere así valor como recurso para la gestión tecnológica y para el desarrollo de decisiones fundamentadas. La inteligencia artificial representa una extensión reciente de esta transformación. Sus aplicaciones comprenden predicción, clasificación, diagnóstico, optimización y apoyo a la toma de decisiones. Sin embargo, su utilización requiere considerar las características físicas del fenómeno, la calidad de los datos, la seguridad de los sistemas y la interpretación de los resultados. La investigación debe analizar estas herramientas dentro del contexto eléctrico y de sus fundamentos técnicos.

La selección de literatura mediante criterios estructurados fortalece la trazabilidad de las investigaciones presentadas. La utilización de bases de datos científicas, criterios de inclusión y exclusión, matrices documentales y procedimientos de selección permite establecer correspondencia entre las publicaciones examinadas y los resultados sintetizados. El enfoque Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) contribuye a transparentar las etapas de identificación, selección, elegibilidad e

inclusión de la evidencia documental, sin alterar el carácter bibliográfico, descriptivo, analítico y comparativo de los estudios desarrollados.

La estrategia de análisis adoptada no pretende sustituir estudios experimentales, simulaciones, ensayos de laboratorio o investigaciones de campo. Su aporte se encuentra en integrar resultados científicos publicados y establecer una lectura comparativa del desarrollo tecnológico. Esta función resulta relevante ante información fragmentada entre áreas, revistas y comunidades científicas. La síntesis permite reconocer conocimientos consolidados, tendencias emergentes, convergencias tecnológicas y problemas que permanecen abiertos, proporcionando además fundamentos para la formulación de posteriores propuestas de investigación y desarrollo tecnológico.

La obra tampoco pretende establecer una única trayectoria tecnológica ni determinar una solución universal para los sistemas eléctricos. Su finalidad investigativa consiste en identificar patrones de transformación mediante el análisis de evidencia científica reciente. Esta perspectiva permite reconocer tendencias comunes, diferencias tecnológicas, relaciones funcionales y desafíos pendientes. El resultado constituye una interpretación documental del estado contemporáneo del campo eléctrico construida a partir de los resultados de las investigaciones que integran la obra.

La perspectiva adoptada permite valorar la transformación tecnológica sin perder de vista sus fundamentos, aplicaciones, operación y limitaciones. De este modo, cada capítulo constituye el resultado de una investigación desarrollada en el Instituto Superior Tecnológico Iberoamericano (ISTI) de Manta, Ecuador, y aporta evidencia específica sobre una dimensión del campo estudiado. Su articulación en esta obra permite integrar esos resultados dentro de una interpretación conjunta de la transformación contemporánea de los sistemas eléctricos y, al mismo tiempo, establecer

bases para futuras investigaciones, procesos de innovación y desarrollos tecnológicos.

Dra. Eva M. Mieles Cedeño

Rectora

Instituto Superior Tecnológico Iberoamericano

Manta, Ecuador, octubre de 2026

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica se encuentra en el centro de algunas de las transformaciones tecnológicas más importantes de nuestro tiempo. Su presencia resulta tan cotidiana que con frecuencia pasa inadvertida la extraordinaria complejidad de los sistemas que hacen posible disponer de ella de manera continua, segura y con parámetros adecuados para cada aplicación. Detrás de una instalación doméstica, un proceso industrial automatizado, un centro hospitalario, una infraestructura de telecomunicaciones o una ciudad conectada existe una extensa cadena de generación, transformación, transporte, distribución, protección, medición y control. Cada una de estas etapas responde a principios físicos consolidados, pero también se encuentra sometida a cambios tecnológicos que están modificando profundamente la ingeniería eléctrica contemporánea.

Durante décadas, el estudio de los sistemas eléctricos pudo organizarse alrededor de estructuras relativamente previsibles: grandes centros de generación, redes concebidas para transportar la electricidad en una dirección predominante y usuarios situados esencialmente al final del proceso energético. Ese escenario se encuentra en transformación. La incorporación de fuentes renovables, recursos energéticos distribuidos, sistemas de almacenamiento, vehículos eléctricos, convertidores electrónicos, dispositivos conectados y consumidores con capacidad de participar activamente en la gestión de su demanda está modificando la arquitectura y el comportamiento de las redes. La electricidad continúa obedeciendo los mismos principios físicos fundamentales, pero los sistemas encargados de administrarla son cada vez más dinámicos, distribuidos y dependientes de información.

Esta realidad plantea una exigencia particular para la formación académica y profesional: comprender las innovaciones sin perder de vista los principios que permiten explicarlas. Ninguna plataforma digital sustituye el conocimiento de las magnitudes eléctricas, los circuitos,

la potencia, las características de las instalaciones o el comportamiento de las redes. Del mismo modo, el dominio exclusivo de los fundamentos tradicionales resulta insuficiente para interpretar infraestructuras en las que sensores, comunicaciones, algoritmos, automatización y procesamiento de datos participan directamente en la supervisión y operación. La ingeniería eléctrica contemporánea se desarrolla precisamente en la intersección entre estos dos espacios.

Desde esta perspectiva se concibe la presente obra. Su estructura establece un recorrido que relaciona conocimiento fundamental, análisis tecnológico y aplicación. El propósito no consiste solamente en reunir contenidos sobre electricidad, sino en construir una comprensión articulada de los sistemas eléctricos y de las transformaciones que actualmente experimentan. Los diferentes capítulos permiten avanzar desde los principios necesarios para interpretar fenómenos y componentes eléctricos hasta escenarios en los que la infraestructura física interactúa con tecnologías digitales, estrategias avanzadas de protección, métodos de diagnóstico y herramientas para optimizar el aprovechamiento de la energía.

Este recorrido responde a una idea esencial: un sistema eléctrico debe comprenderse como un conjunto interdependiente. La generación carece de sentido técnico si se estudia desconectada de la transmisión y la distribución; la operación no puede separarse de la protección; la continuidad del servicio se relaciona con la calidad de la energía; la incorporación de recursos distribuidos modifica las condiciones de supervisión y coordinación; y la eficiencia del sistema depende tanto de sus componentes físicos como de la capacidad para conocer y gestionar su comportamiento. Esta visión permite superar aproximaciones fragmentadas y reconocer las relaciones existentes entre fenómenos que, aunque puedan estudiarse individualmente, convergen

durante el funcionamiento real de una infraestructura eléctrica.

A medida que el análisis avanza hacia las redes de distribución contemporáneas, esta interdependencia adquiere mayor relevancia. Las redes actuales reciben nuevas fuentes de generación, dispositivos electrónicos, sistemas de almacenamiento y cargas con comportamientos cada vez más variables. El flujo eléctrico puede modificar su dirección, las condiciones de operación pueden cambiar rápidamente y la cantidad de información disponible aumenta de manera considerable. En consecuencia, conocer el estado de la red, interpretar sus variaciones y responder adecuadamente ante ellas se convierte en una necesidad técnica fundamental. La evolución hacia infraestructuras conectadas implica, por tanto, no solo incorporar nuevos equipos, sino reconsiderar la manera en que se observa y administra el sistema.

La protección eléctrica constituye una expresión particularmente clara de este cambio. Los esquemas tradicionales fueron concebidos bajo determinadas condiciones de topología, niveles de corriente y direcciones de flujo. La expansión de la generación distribuida y de las microredes introduce escenarios diferentes, en los cuales esas condiciones pueden variar según el modo de operación y la configuración del sistema. Los estudios examinados en la obra muestran precisamente la necesidad de avanzar hacia mecanismos capaces de responder ante cambios de topología y flujos bidireccionales, así como hacia estrategias que aprovechen mediciones, comunicaciones y procesamiento digital para fortalecer la detección y coordinación de las protecciones.

La seguridad del suministro, sin embargo, no termina en la interrupción adecuada de una falla. La electricidad entregada debe conservar características compatibles con los requerimientos de los equipos y procesos conectados. Esta cuestión adquiere especial importancia en entornos

donde proliferan dispositivos electrónicos, convertidores, sistemas automatizados y cargas sensibles. Armónicos, interarmónicos, fluctuaciones, transitorios y otras alteraciones pueden repercutir en el desempeño de instalaciones y equipos. Por esta razón, la calidad de la energía ocupa un lugar relevante dentro de la obra y se estudia no únicamente desde la identificación de perturbaciones, sino también desde las posibilidades contemporáneas para diagnosticarlas y apoyar su mitigación mediante procesamiento de señales, reconocimiento de patrones y métodos basados en inteligencia artificial.

Precisamente en este punto emerge una de las transformaciones que atraviesa transversalmente el libro: la conversión de los datos eléctricos en conocimiento operativo. Medir tensión, corriente, potencia o consumo constituye una práctica inherente a la ingeniería eléctrica; la diferencia contemporánea reside en la escala, frecuencia y diversidad con que esa información puede obtenerse, transmitirse y procesarse. La instrumentación conectada permite generar flujos continuos de datos que pueden utilizarse para reconocer estados de funcionamiento, detectar comportamientos anómalos, analizar tendencias y sustentar decisiones técnicas. La medición deja así de constituir únicamente un procedimiento de comprobación y pasa a formar parte de arquitecturas permanentes de supervisión.

En este escenario, la digitalización modifica la relación entre la infraestructura física y la información que describe su funcionamiento. Sensores, dispositivos electrónicos inteligentes, plataformas de comunicación y herramientas computacionales permiten construir representaciones cada vez más detalladas del estado de instalaciones y redes. La literatura analizada en la obra muestra cómo la medición sincronizada, el aprendizaje de topologías, la gestión de activos y los métodos computacionales amplían las posibilidades para conocer el comportamiento de las

redes de distribución y anticipar determinadas necesidades operativas. Esta evolución favorece una infraestructura eléctrica con mayores capacidades de observación y análisis.

El internet de las cosas amplía todavía más estas posibilidades al facilitar la interconexión de equipos, sensores y plataformas capaces de intercambiar información. Su incorporación al ámbito eléctrico crea oportunidades para supervisar variables distribuidas y relacionar datos procedentes de diferentes puntos de una instalación. Al combinarse con automatización y procesamiento computacional, esta conectividad permite establecer arquitecturas en las que determinadas acciones pueden ejecutarse a partir de condiciones previamente definidas o de resultados obtenidos mediante procedimientos analíticos. La frontera entre observar y actuar se vuelve, de esta manera, progresivamente más estrecha.

La inteligencia artificial y el aprendizaje automático representan otra dimensión de este proceso. Su relevancia dentro de los sistemas eléctricos no radica en sustituir los principios de la ingeniería, sino en ampliar las posibilidades para trabajar con conjuntos de datos cuya complejidad dificulta su tratamiento mediante procedimientos convencionales. La identificación de patrones, la clasificación de perturbaciones, el análisis de condiciones operativas y determinadas aplicaciones de mantenimiento y gestión de activos muestran cómo las herramientas computacionales pueden complementar el conocimiento técnico. En este sentido, el valor de los algoritmos depende de su integración coherente con variables, modelos y criterios propios del dominio eléctrico.

La obra presta igualmente atención a la eficiencia energética, entendida desde una perspectiva que supera la simple reducción cuantitativa del consumo. Gestionar adecuadamente la electricidad requiere conocer perfiles de demanda, reconocer comportamientos, identificar

oportunidades de optimización y coordinar las decisiones de utilización con las condiciones del sistema. La medición inteligente, el análisis de datos, la automatización y los mecanismos de respuesta de la demanda proporcionan nuevas posibilidades para intervenir sobre estos procesos. La literatura reciente muestra, además, una tendencia hacia la coordinación entre generación, almacenamiento y consumo, particularmente en viviendas, edificios, microredes y entornos urbanos.

Esta perspectiva permite comprender que la sostenibilidad de los sistemas eléctricos no depende de una única tecnología. La incorporación de generación renovable constituye un componente fundamental, pero su aprovechamiento debe acompañarse de redes preparadas para integrarla, mecanismos adecuados de protección, estrategias para preservar la calidad del suministro, sistemas de almacenamiento cuando resulten necesarios y capacidades para gestionar la demanda. La sostenibilidad aparece así vinculada con una transformación más amplia de la infraestructura eléctrica, en la que convergen decisiones energéticas, tecnológicas y operativas.

Una característica relevante del libro es la incorporación de literatura científica reciente para analizar estas transformaciones. Los capítulos dedicados a las tecnologías contemporáneas no se limitan a describir dispositivos disponibles, sino que examinan tendencias, aplicaciones, problemas y posibilidades identificadas en investigaciones especializadas. Esta aproximación permite situar los contenidos dentro del estado reciente del conocimiento y mostrar al lector que la ingeniería eléctrica constituye un campo en permanente desarrollo. La protección de microredes, la ciberseguridad, la calidad de la energía en presencia de generación distribuida, la reconfiguración de redes, la estimación de estado y la gestión inteligente del consumo son ejemplos de ámbitos en los que continúan surgiendo nuevos métodos y desafíos.

El tratamiento de estos avances conduce, además, hacia un componente propositivo. A partir de los resultados obtenidos mediante el análisis documental, la obra incorpora desarrollos conceptuales que articulan diferentes capacidades tecnológicas dentro de sistemas modulares. Estas propuestas establecen relaciones entre adquisición de información, comunicación, procesamiento, diagnóstico, protección, automatización y gestión energética según el problema abordado en cada caso. Su finalidad no es presentar como experimentalmente validadas soluciones que se encuentran en una etapa conceptual, sino transformar el conocimiento analizado en arquitecturas susceptibles de posteriores procesos de diseño, implementación, prueba y perfeccionamiento.

Este enfoque fortalece el vínculo entre formación e investigación. El estudiante no encuentra únicamente contenidos que debe aprender, sino problemas que puede investigar; el docente dispone de elementos para relacionar los principios de la disciplina con tecnologías emergentes; el investigador puede reconocer áreas de convergencia y posibilidades de desarrollo; y el profesional encuentra una síntesis que conecta fenómenos conocidos con herramientas que están modificando las prácticas del sector. La obra adquiere así una función que trasciende la consulta técnica y se proyecta hacia la generación de preguntas, soluciones y futuras líneas de trabajo.

También resulta importante comprender que una infraestructura más conectada introduce responsabilidades adicionales. Cuanto mayor es la dependencia de comunicaciones, plataformas digitales y procesamiento automatizado, mayor relevancia adquieren la confiabilidad de los datos, la interoperabilidad y la seguridad de los componentes digitales. La evolución de las redes eléctricas incorpora, por ello, dimensiones que anteriormente podían considerarse externas al dominio eléctrico tradicional. La literatura examinada muestra que la ciberseguridad se integra

progresivamente con la protección de los sistemas eléctricos ciberfísicos, lo que obliga a considerar conjuntamente la integridad de la infraestructura energética y de los sistemas digitales que participan en su funcionamiento.

En conjunto, los contenidos reunidos permiten observar una transición de gran alcance. El sistema eléctrico deja de concebirse únicamente como una infraestructura física que conduce energía entre diferentes puntos. Sin abandonar esa función esencial, incorpora progresivamente capacidades para generar información sobre sí mismo, intercambiarla, procesarla y utilizarla para mejorar determinadas decisiones de operación. La red eléctrica adquiere así una dimensión informacional que se superpone a su estructura energética y modifica la forma de diseñarla, supervisarla, protegerla y gestionarla.

Esa transformación tampoco elimina los conocimientos precedentes. Por el contrario, aumenta su importancia. Interpretar correctamente los resultados de un algoritmo requiere comprender las variables eléctricas que procesa; automatizar una instalación exige conocer el comportamiento de sus componentes; diseñar una estrategia de protección demanda entender las fallas y las condiciones de operación; analizar la calidad del suministro requiere dominar los fenómenos eléctricos involucrados; y optimizar el consumo carece de sentido si no se comprende la relación entre energía, potencia, carga y funcionamiento del sistema. Innovación y fundamento no representan, por tanto, caminos opuestos, sino niveles complementarios de una misma formación.

Este principio define el sentido de la obra. El lector encontrará una aproximación en la que la electricidad se estudia como fenómeno físico, recurso tecnológico e infraestructura estratégica, pero también como un campo que dialoga crecientemente con la electrónica, la automatización, las telecomunicaciones, la ciencia de datos y la inteligencia

artificial. Tal convergencia refleja la realidad de una disciplina cuyos límites se amplían a medida que aumenta la complejidad de los sistemas que debe diseñar y administrar.

La formación en sistemas eléctricos enfrenta, en consecuencia, un desafío decisivo: preparar para tecnologías que continúan evolucionando sin convertir esa evolución en una sucesión de novedades desconectadas. La respuesta propuesta en estas páginas consiste en construir desde los principios, interpretar desde la evidencia y proyectar desde la integración tecnológica. Así, cada avance puede comprenderse no como un elemento aislado, sino como parte de una transformación más amplia de la infraestructura energética.

El futuro eléctrico no estará definido únicamente por la cantidad de energía que sea posible generar. También dependerá de la capacidad para transportarla con confiabilidad, preservar sus condiciones de suministro, proteger infraestructuras cada vez más complejas, incorporar fuentes distribuidas, interpretar enormes volúmenes de información y utilizar la electricidad con criterios de eficiencia y sostenibilidad. En ese escenario, conocer los fundamentos seguirá siendo indispensable, pero saber relacionarlos con las nuevas capacidades tecnológicas marcará la diferencia entre comprender un sistema existente y estar preparado para contribuir a su evolución.

Esta obra se sitúa precisamente en ese punto de encuentro. No propone abandonar la ingeniería eléctrica que conocemos, sino comprender cómo está evolucionando. Desde los principios que explican el comportamiento de la electricidad hasta las arquitecturas capaces de supervisar, diagnosticar, coordinar y optimizar su utilización, sus páginas trazan un recorrido hacia una infraestructura energética cada vez más conectada y adaptable. El propósito final es que el lector no contemple esta transformación como un proceso distante, sino que disponga de los conocimientos necesarios para

interpretarla, investigarla y participar responsablemente en la construcción de los sistemas eléctricos que sostendrán las próximas décadas.



01.

Evaluación y priorización del potencial de desarrollo tecnológico en sistemas eléctricos mediante un enfoque multicriterio

Erik Bolívar Ibáñez Mieles

1.1. Investigación universitaria y desarrollo tecnológico en sistemas eléctricos

Las políticas contemporáneas de investigación orientan crecientemente la innovación hacia problemas complejos y transformaciones socioeconómicas prioritarias (Henrekson et al., 2024; Liefner et al., 2025). Esta orientación exige coordinación institucional, direccionamiento estratégico y criterios verificables para asignar recursos científicos.

La política universitaria de investigación enfrenta, así, el desafío de articular la

producción científica, el desarrollo tecnológico y la transferencia efectiva (Cohen et al., 2025; Sallan & Lordan, 2025). La evaluación institucional requiere superar los indicadores exclusivamente bibliométricos e incorporar resultados aplicados, capacidades tecnológicas e impactos transferibles (Bamford et al., 2024).

La investigación orientada a misiones requiere seleccionar problemas, coordinar actores y establecer trayectorias verificables hacia soluciones aplicables (Pujotomo et al., 2023). Esta perspectiva demanda mecanismos cuantitativos capaces de comparar alternativas tecnológicas según criterios explícitos de pertinencia, madurez y transferencia (Chen et al., 2025; Cohen et al., 2025).

En este contexto, los sistemas eléctricos constituyen un campo estratégico debido a su acelerada digitalización, descentralización y electrificación (Kabeyi & Olanrewaju, 2023). La incorporación de generación distribuida, almacenamiento y sistemas digitales incrementa las necesidades de supervisión, coordinación, diagnóstico y gestión.

La transformación tecnológica también modifica las instalaciones eléctricas, los accionamientos y los recursos energéticos mediante capacidades avanzadas de medición, control y diagnóstico. Estas tendencias generan oportunidades diferenciadas para la investigación aplicada, pero requieren una priorización institucional antes de comprometer recursos destinados al desarrollo tecnológico (Mafu, 2023; Zhang & Tang, 2024).

El problema de investigación radica en la ausencia de un procedimiento cuantitativo para priorizar propuestas tecnológicas aplicadas a sistemas eléctricos desde una política institucional de investigación (Bamford et al., 2024; Cohen et al., 2025). Esta ausencia dificulta comparar sistemáticamente las alternativas según su

relevancia tecnológica, integración funcional, madurez proyectada y posibilidades de transferencia (Chen et al., 2025; Pujotomo et al., 2023).

La fragmentación entre investigación aplicada, desarrollo tecnológico y transferencia puede reducir la capacidad institucional para convertir el conocimiento en soluciones tecnológicamente aprovechables (Littleton et al., 2023; Mafu, 2023). Asimismo, la limitada articulación entre la universidad, los usuarios y los sectores productivos condiciona la identificación de necesidades y oportunidades de innovación (Shi & Wang, 2023; Zhao & Li-Ying, 2024).

Por ello, el objeto de investigación corresponde a la priorización cuantitativa de propuestas tecnológicas aplicadas a sistemas eléctricos (Zhang & Tang, 2024). El análisis comprende cuatro propuestas orientadas, respectivamente, a la supervisión de sistemas eléctricos, las instalaciones de baja tensión, las máquinas eléctricas y la transición energética (Kabeyi & Olanrewaju, 2023).

La investigación se delimita temporalmente al análisis de bibliografía reciente y, espacialmente, al ámbito institucional universitario de la investigación aplicada (Bamford et al., 2024; Liefner et al., 2025). Su unidad analítica corresponde a cuatro propuestas tecnológicas estructuradas para su posterior desarrollo, validación y transferencia institucional (Chen et al., 2025; Pujotomo et al., 2023).

En consecuencia, el objetivo fue determinar cuantitativamente la prioridad relativa de cuatro propuestas tecnológicas para sistemas eléctricos mediante criterios institucionales de investigación aplicada. La evaluación consideró dimensiones comparables destinadas a sustentar decisiones de priorización, desarrollo tecnológico, madurez y transferencia (Bamford et al., 2024; Sallan & Lordan, 2025).

El enfoque cuantitativo permite transformar atributos tecnológicos cualitativos en puntuaciones comparables mediante una matriz multicriterio previamente definida (Cohen et al., 2025; Zhang & Tang, 2024). Esta estrategia favorece la adopción de decisiones reproducibles, transparentes y trazables para orientar una cartera institucional de desarrollo tecnológico (Henrekson et al., 2024; Liefner et al., 2025).

1.2. Diseño metodológico y construcción del Índice de Potencial de Desarrollo Tecnológico

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de nivel descriptivo, con un método teórico-comparativo, un diseño no experimental y de corte transversal. El análisis se orientó a las propuestas de desarrollo tecnológico formuladas por equipos de estudiantes como resultado de un proceso de investigación formativa asociado con la elaboración de capítulos temáticos sustentados en la revisión bibliográfica. Cada equipo abordó una problemática específica relacionada con los sistemas eléctricos, examinó información científica y tecnológica pertinente y, a partir de dicha revisión, formuló una propuesta de solución con proyección hacia un eventual desarrollo tecnológico.

En consecuencia, las propuestas tecnológicas constituyeron las unidades de análisis y no se consideró a los estudiantes como especialistas o expertos en tecnología. El diseño permitió caracterizar y comparar cuantitativamente las propuestas mediante criterios comunes relacionados con su pertinencia, integración tecnológica, innovación, factibilidad, madurez, transferibilidad, impacto institucional y proyección hacia niveles superiores de desarrollo tecnológico.

El estudio se realizó en el Instituto Superior Tecnológico Iberoamericano (ISTI), en la ciudad de

Manta, Ecuador, durante el periodo correspondiente al desarrollo y evaluación de los capítulos académicos, comprendido entre marzo y septiembre de 2026. El contexto de análisis correspondió a un proceso de investigación formativa desarrollado en el ámbito de la educación superior tecnológica, en el cual los estudiantes elaboraron productos académicos de carácter bibliográfico y, como resultado de dicho ejercicio, formularon propuestas de desarrollo tecnológico relacionadas con la supervisión, el diagnóstico, el control, la gestión y la integración de sistemas eléctricos. La delimitación temporal y espacial se estableció de acuerdo con el periodo y el escenario institucional en los que fueron generados los productos analizados.

La población estuvo conformada por los estudiantes participantes en el proceso de investigación formativa orientado a la elaboración de capítulos temáticos mediante revisión bibliográfica y a la formulación de propuestas de desarrollo tecnológico en el campo de los sistemas eléctricos. La muestra analítica estuvo constituida por cuatro propuestas tecnológicas elaboradas por equipos de estudiantes, seleccionadas mediante un procedimiento no probabilístico e intencional, debido a que el objeto de comparación correspondió a productos académicos generados dentro de un proceso formativo previamente delimitado. Se incluyeron las propuestas que derivaron de un capítulo temático sustentado en literatura científica y tecnológica, abordaron una problemática identificable de los sistemas eléctricos y presentaron una solución tecnológica susceptible de ser examinada mediante criterios comunes. Se excluyeron los productos que no incorporaron una propuesta tecnológica, presentaron información insuficiente para la aplicación de los criterios de evaluación o no permitieron establecer una relación consistente entre la problemática identificada, la

solución formulada y su potencial de desarrollo. Por tanto, la unidad de análisis estuvo constituida por cada propuesta tecnológica y no por cada estudiante integrante del equipo.

La variable principal fue el potencial de desarrollo tecnológico de las propuestas estudiantiles, definido operacionalmente como el grado en que una solución formulada durante el proceso de investigación formativa presentó características técnicas, innovadoras, funcionales y de aplicabilidad que permitieran sustentar una eventual continuidad hacia etapas posteriores de desarrollo tecnológico. La variable se operacionalizó mediante ocho dimensiones: relevancia tecnológica, integración tecnológica, innovación y diferenciación, factibilidad de desarrollo, madurez tecnológica, transferibilidad, impacto institucional y proyección hacia niveles superiores de madurez tecnológica.

La relevancia tecnológica correspondió a la relación entre la propuesta y las necesidades identificables de los sistemas eléctricos; la integración tecnológica consideró la articulación de componentes eléctricos, electrónicos, digitales y de gestión; la innovación y diferenciación examinó la incorporación de características funcionales diferenciadas respecto de las soluciones convencionales; la factibilidad de desarrollo consideró las condiciones potenciales de disponibilidad de conocimientos, recursos, infraestructura y componentes requeridos para su desarrollo; la madurez tecnológica examinó el grado de definición alcanzado por la solución y su posibilidad de avanzar hacia etapas posteriores de desarrollo y validación; la transferibilidad consideró la posibilidad de materializar los resultados mediante prototipos, software, procedimientos, servicios, documentación técnica u otros mecanismos de transferencia; el impacto institucional correspondió a la contribución potencial de la propuesta a las

actividades de investigación, formación, vinculación y posicionamiento tecnológico; y la proyección hacia niveles superiores de madurez consideró la posibilidad de continuidad, escalamiento, perfeccionamiento y desarrollo posterior de la solución propuesta.

La información se obtuvo mediante la técnica de análisis documental estructurado, aplicada a los capítulos temáticos y a las respectivas propuestas tecnológicas desarrolladas por los equipos de estudiantes. El instrumento de recolección correspondió a una matriz de evaluación multicriterio diseñada para el estudio y estructurada de acuerdo con las ocho dimensiones de la variable y los indicadores observables derivados de su definición operacional. Cada indicador fue valorado mediante una escala ordinal de cinco categorías, en la que 1 correspondió a una condición muy baja; 2, a una condición baja; 3, a una condición media; 4, a una condición alta; y 5, a una condición muy alta. La matriz permitió registrar una puntuación independiente para cada indicador y propuesta, manteniendo una orientación común en la que los valores superiores representaron condiciones más favorables para el potencial de desarrollo tecnológico.

El procedimiento de análisis comprendió la identificación y caracterización de los cuatro capítulos y sus respectivas propuestas tecnológicas, la definición operacional de la variable, la estructuración de la matriz multicriterio, la asignación de puntuaciones a cada indicador, la organización de los datos por propuesta y dimensión, y el cálculo del índice global de potencial de desarrollo tecnológico. La valoración se efectuó a partir de la evidencia documental contenida en cada producto académico, considerando exclusivamente las características que podían identificarse de manera explícita en los capítulos y las propuestas. No se

utilizaron opiniones de especialistas externos para sustituir la evidencia documental ni se interpretaron las puntuaciones como mediciones del desempeño profesional de los estudiantes. De esta manera, el procedimiento permitió establecer una comparación homogénea entre las cuatro propuestas a partir de un conjunto común de dimensiones e indicadores.

El potencial de desarrollo tecnológico se estimó mediante un Índice de Potencial de Desarrollo Tecnológico (IPDT), construido a partir de las ocho dimensiones definidas para la evaluación. Para cada propuesta se calculó el promedio de los indicadores correspondientes a cada dimensión, utilizando una escala de 1 a 5. Debido a que todos los indicadores utilizaron la misma escala y tuvieron la misma orientación, no fue necesario realizar una normalización adicional. Las ocho dimensiones recibieron el mismo peso (0,125), por lo que el IPDT se obtuvo mediante el promedio de las ocho puntuaciones dimensionales. El índice presentó valores entre 1 y 5, donde los valores mayores indicaron un mayor potencial relativo de desarrollo tecnológico. Para su interpretación, los resultados se clasificaron en cinco niveles: muy bajo (1,00–1,79), bajo (1,80–2,59), medio (2,60–3,39), alto (3,40–4,19) y muy alto (4,20–5,00). La jerarquización de las propuestas se estableció de acuerdo con el valor del IPDT, ordenado de mayor a menor. Este índice permitió comparar el potencial relativo de las propuestas estudiantiles, sin considerarlo una medida de viabilidad comercial, superioridad tecnológica o competencia profesional.

El procesamiento estadístico se efectuó mediante estadística descriptiva, debido a que la unidad de análisis estuvo constituida por cuatro propuestas tecnológicas y el objetivo fue comparar sus características documentales mediante un índice multicriterio. Para cada propuesta se calcularon las

puntuaciones correspondientes a los indicadores, las dimensiones y el IPDT, así como medidas descriptivas de posición y dispersión cuando su interpretación resultó pertinente (Ec. 1.1).

$$\text{IPDT} = \frac{Di1 + Di2 + Di3 + Di4 + Di5 + Di6 + Di7 + Di8}{8} \quad \text{(Ec. 1.1)}$$

IPDT = índice de Potencial de Desarrollo Tecnológico de la propuesta

D = puntuación obtenida por la propuesta en cada una de las ocho dimensiones

8 = número de dimensiones evaluadas

Para evaluar a D, se considera (Ec 1.2):

$$D = \frac{\sum_{k=1}^{m_i} x_{ik}}{m_i} \quad \text{(Ec. 1.2)}$$

Donde x_{ik} es la puntuación del indicador k y mi es el número de indicadores de la dimensión $_i$.

No se aplicaron pruebas de normalidad ni procedimientos inferenciales destinados a establecer diferencias poblacionales entre las propuestas, debido al reducido número de unidades de análisis y a la naturaleza documental del estudio. La utilización de una prueba de Shapiro-Wilk con n = 4 no proporcionaría una base metodológica suficiente para justificar inferencias sobre la distribución de la variable y, por tanto, se evitó incorporar dicha prueba únicamente por razones formales. El procesamiento de los datos y los cálculos del IPDT se realizaron mediante una hoja de cálculo, mientras que el análisis estadístico se efectuó con IBM SPSS Statistics, versión 24. La jerarquización final se obtuvo directamente a partir de los valores del índice, conservando el mismo procedimiento de cálculo y los mismos pesos para las cuatro propuestas.

En relación con los aspectos éticos, el estudio se centró en el análisis de productos académicos generados durante un proceso de investigación formativa y no en la obtención de información clínica, biológica, financiera o de otra naturaleza sensible. La identificación individual de los estudiantes no fue necesaria para el cálculo del índice, por lo que los resultados se presentaron de manera anonimizada mediante códigos asignados a las propuestas o los equipos. Cuando la información utilizada permitió identificar directamente a los participantes, se aplicaron los procedimientos institucionales correspondientes de confidencialidad y autorización para el uso académico de los productos. La necesidad de consentimiento informado estuvo determinada por la utilización de datos personales o percepciones individuales de los estudiantes más allá del análisis de sus productos académicos, de conformidad con la normativa institucional aplicable. Asimismo, la aprobación por una instancia ética o institucional debía consignarse únicamente cuando hubiera sido efectivamente solicitada u obtenida, indicando la instancia responsable y el código o constancia correspondiente. En todos los casos, la información se consideró exclusivamente con fines académicos y de investigación, evitando atribuir a los estudiantes competencias profesionales o niveles de especialización que no hubieran sido objeto de medición.

1.3. Caracterización de las propuestas tecnológicas en sistemas eléctricos

Las cuatro propuestas tecnológicas se originaron en capítulos temáticos elaborados mediante revisión bibliográfica por equipos de estudiantes y estuvieron orientadas a diferentes necesidades

relacionadas con la supervisión, el diagnóstico, el control y la gestión de sistemas eléctricos (Tabla 1.1). La primera propuesta planteó un sistema modular inteligente para la supervisión y gestión de sistemas eléctricos, con integración de tecnologías digitales para el seguimiento de variables y el apoyo a la toma de decisiones. La segunda se orientó al diagnóstico y la gestión de instalaciones eléctricas de baja tensión, incorporando funciones destinadas a identificar condiciones de operación y facilitar acciones de supervisión. La tercera propuso un sistema inteligente para la supervisión, el control y el diagnóstico de máquinas eléctricas y sus accionamientos, con énfasis en la integración de información operativa para el seguimiento de su funcionamiento. La cuarta correspondió a una plataforma integrada para la gestión de la generación renovable, la integración eléctrica y el almacenamiento energético, orientada a la articulación de diferentes tecnologías dentro de un sistema de gestión energética. En conjunto, las propuestas mostraron una orientación hacia la incorporación de tecnologías digitales en sistemas eléctricos convencionales y hacia la integración de funciones de supervisión, diagnóstico, control y gestión.

Las propuestas presentaron diferencias principalmente en cuanto al objeto tecnológico de aplicación. P1 se orientó a los sistemas eléctricos de manera general; P2, a las instalaciones de baja tensión; P3, a las máquinas eléctricas y los accionamientos; y P4, a la integración de generación renovable y almacenamiento. Esta diferenciación permitió establecer cuatro unidades comparables para la evaluación posterior del potencial de desarrollo tecnológico mediante las dimensiones y los indicadores definidos en el estudio.

Tabla 1.1. Caracterización general de las propuestas tecnológicas.

Propuesta	Problema o necesidad abordada	Solución tecnológica planteada	Componentes o funciones principales
P1	Necesidad de mejorar la supervisión y gestión de sistemas eléctricos	Sistema modular inteligente de supervisión y gestión	Supervisión, gestión, integración digital y seguimiento de variables
P2	Necesidad de mejorar el diagnóstico y gestión de instalaciones eléctricas de baja tensión	Sistema inteligente para diagnóstico y gestión	Diagnóstico, supervisión y gestión de instalaciones
P3	Necesidad de mejorar la supervisión, control y diagnóstico de máquinas eléctricas y accionamientos	Sistema inteligente para máquinas eléctricas	Supervisión, control, diagnóstico y seguimiento operativo
P4	Necesidad de integrar generación renovable, sistemas eléctricos y almacenamiento	Plataforma integrada de gestión energética	Generación renovable, integración eléctrica, gestión y almacenamiento

La evaluación de las cuatro propuestas mostró diferencias entre las dimensiones consideradas para estimar su potencial de desarrollo tecnológico. Las puntuaciones se mantuvieron entre 3 y 5 puntos, lo que indicó una valoración predominantemente media y alta de las características analizadas. P1 presentó un comportamiento equilibrado, con puntuaciones más elevadas en relevancia tecnológica e integración tecnológica. P2 destacó principalmente por su factibilidad de desarrollo y su aplicabilidad en instalaciones eléctricas de baja tensión. P3 obtuvo valores elevados en integración

tecnológica, innovación y diferenciación, asociados con la incorporación de funciones de supervisión, control y diagnóstico de máquinas eléctricas. P4 alcanzó las puntuaciones más elevadas en integración tecnológica, transferibilidad y proyección tecnológica, debido a la articulación de la generación renovable, la integración eléctrica y el almacenamiento energético (Figura 1.1).

Los resultados preliminares mostraron que P4 obtuvo la puntuación promedio más elevada, seguida de P3, P1 y P2. Sin embargo, las diferencias entre las propuestas fueron relativamente reducidas, con valores promedio comprendidos entre 4,16 y 4,41. P4 presentó mayores fortalezas en integración, innovación, impacto y proyección tecnológica, aunque registró una puntuación inferior en factibilidad y madurez tecnológica. P3 mostró un perfil favorable en integración, innovación y proyección, mientras que P2 alcanzó su mejor desempeño en factibilidad y transferibilidad. P1 presentó un comportamiento más homogéneo entre las dimensiones evaluadas, sin alcanzar los valores máximos observados en las restantes propuestas para dimensiones específicas.

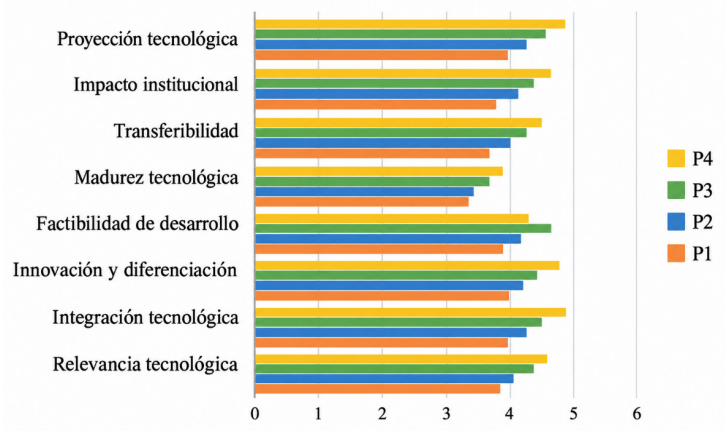


Figura 1.1. Evaluación del potencial de desarrollo tecnológico de las propuestas

El cálculo del Índice de Potencial de Desarrollo Tecnológico (IPDT) permitió sintetizar las puntuaciones obtenidas en las ocho dimensiones y establecer una jerarquización comparativa de las propuestas (Tabla 1.2). Los valores obtenidos oscilaron entre 4,16 y 4,41 puntos, correspondientes a niveles alto y muy alto de potencial de desarrollo tecnológico. La propuesta P4 alcanzó el mayor IPDT (4,41), seguida de P3 (4,30), P1 (4,19) y P2 (4,16).

La diferencia entre las propuestas con mayor y menor puntuación fue de 0,25 puntos. P4 presentó el mayor potencial relativo, mientras que P3 ocupó la segunda posición, con una diferencia de 0,11 puntos respecto de P4. P1 y P2 mostraron valores próximos, con una diferencia de apenas 0,03 puntos entre ambas. En conjunto, las cuatro propuestas se ubicaron en los niveles alto y muy alto, lo que evidenció condiciones favorables para su continuidad hacia procesos posteriores de desarrollo tecnológico. La jerarquización obtenida representó una comparación relativa entre las propuestas estudiantiles y no una determinación de superioridad tecnológica absoluta.

Tabla 1.2. Índice de Potencial de Desarrollo Tecnológico y jerarquización.

Posición	Propuesta	IPDT	Nivel de potencial
1	P4	4,41	Muy alto
2	P3	4,30	Muy alto
3	P1	4,19	Alto
4	P2	4,16	Alto

Los resultados mostraron que las cuatro propuestas estudiantiles presentaron un potencial de desarrollo tecnológico predominantemente alto, aunque con perfiles diferenciados entre las dimensiones evaluadas. Este comportamiento indicó que el proceso de investigación formativa no se limitó

a la elaboración de productos bibliográficos, sino que permitió transformar los problemas tecnológicos identificados en propuestas con diferentes posibilidades de continuidad. Desde una perspectiva interna, este resultado fue coherente con el objetivo de comparar el potencial tecnológico de las propuestas mediante criterios comunes, debido a que la utilización de ocho dimensiones permitió reconocer fortalezas específicas sin reducir la valoración a una única característica. Esta aproximación coincidió con Bamford et al. (2024), quienes mostraron que el impacto y la transferencia del conocimiento universitario podían evaluarse mediante marcos multidimensionales, particularmente cuando se consideraban simultáneamente las capacidades, la transferencia, la innovación y el desarrollo tecnológico.

La posición alcanzada por P4 se explicó principalmente por su capacidad para integrar la generación renovable, la integración eléctrica y el almacenamiento energético dentro de una misma propuesta. Esta característica le proporcionó una mayor articulación entre tecnologías y una proyección más amplia de desarrollo. El resultado fue consistente con Kabeyi y Olanrewaju (2023), quienes identificaron la integración de tecnologías inteligentes como un componente relevante para la evolución de los sistemas eléctricos hacia esquemas energéticos más flexibles y sostenibles. Sin embargo, la menor valoración relativa de P4 en factibilidad y madurez mostró que una propuesta tecnológicamente integrada no necesariamente presentaba las mismas condiciones para su implementación inmediata. Esta diferencia resultó importante porque evitó interpretar la innovación como un equivalente automático de viabilidad. En este sentido, Cohen et al. (2025) señalaron que los impactos de las colaboraciones de investigación presentaban una naturaleza multidimensional y

podían diferir entre resultados directos, indirectos, tangibles e intangibles.

El comportamiento de P3 también resultó relevante porque combinó valores elevados en integración tecnológica, innovación y proyección. La propuesta vinculó la supervisión, el control y el diagnóstico de máquinas eléctricas y accionamientos, por lo que su potencial estuvo asociado con una solución tecnológica más delimitada que la de P4, pero con una relación directa entre el problema, la función tecnológica y su aplicación. Este comportamiento sugirió que la delimitación del objeto tecnológico pudo favorecer la coherencia interna de una propuesta, aun cuando su campo de aplicación fuera más específico. Zhang y Tang (2024), a partir de información procedente de 673 universidades chinas, mostraron que tanto la investigación básica como la aplicada constituyeron antecedentes importantes del desempeño de la transferencia tecnológica, aunque su interacción no siempre produjo efectos sinérgicos. Desde esta perspectiva, el resultado de P3 sugirió que la combinación entre fundamentación académica y orientación aplicada debía mantenerse equilibrada, en lugar de asumir que una mayor amplitud tecnológica produciría necesariamente un mayor potencial de transferencia.

P1 presentó un comportamiento más homogéneo entre las dimensiones, mientras que P2 mostró una fortaleza particular en factibilidad y transferibilidad. Esta diferencia fue metodológicamente relevante porque demostró que el IPDT no dependió exclusivamente de la innovación tecnológica. Una propuesta podía obtener una valoración favorable mediante una combinación equilibrada de atributos, mientras que otra podía destacar por condiciones específicas relacionadas con sus posibilidades de implementación o transferencia. Esta interpretación

coincidió con Mafu (2023), quien encontró que la transferencia tecnológica dependía de mecanismos institucionales, capacidades y condiciones organizacionales, además de la existencia de conocimientos o soluciones técnicamente novedosas. El autor también identificó limitaciones relacionadas con la propiedad intelectual y las políticas institucionales, lo que reforzó la necesidad de valorar la transferibilidad como una dimensión diferenciada y no como una consecuencia automática de la innovación.

La proximidad entre los valores globales de las cuatro propuestas constituyó otro hallazgo relevante. La diferencia de 0,25 puntos entre P4 y P2 indicó que la jerarquización fue comparativa y que ninguna propuesta mostró una ventaja suficientemente amplia como para interpretarla como una superioridad tecnológica absoluta. Esta proximidad también fue coherente con la naturaleza del estudio, debido a que las propuestas procedieron de un proceso de investigación formativa y no de desarrollos tecnológicos sometidos a validación experimental o comercial. En consecuencia, el IPDT permitió ordenar el potencial relativo, pero no demostrar el desempeño técnico, la factibilidad económica o la transferencia efectiva. Esta precaución coincidió con Bamford et al. (2024), quienes señalaron que la evaluación del impacto de la transferencia requería considerar mecanismos de facilitación antes, durante y después de los proyectos, además de diferentes fuentes de evidencia.

Desde una perspectiva institucional, el resultado más importante no fue únicamente la posición de P4, sino también la posibilidad de utilizar una evaluación multicriterio para transformar productos de investigación formativa en información útil para la toma de decisiones. Chen et al. (2025) plantearon que las oficinas de transferencia tecnológica

desempeñaban funciones cada vez más activas en la traducción del conocimiento universitario hacia resultados de valor económico y social, superando una función limitada a la intermediación administrativa. En el presente estudio, el IPDT pudo cumplir una función preliminar semejante dentro del proceso formativo, al permitir identificar qué propuestas requerían un mayor acompañamiento para avanzar hacia la elaboración de prototipos, la validación, la protección intelectual o la transferencia. No obstante, esta función no debía confundirse con una evaluación formal de transferencia tecnológica, porque las propuestas todavía correspondían a productos académicos en una etapa inicial de desarrollo.

El resultado también tuvo implicaciones para la relación entre la formación universitaria y la transferencia tecnológica. Sallan y Lordan (2025) demostraron que el aprendizaje experiencial y los recursos especializados de las oficinas de transferencia podían relacionarse con mejores resultados de transferencia universitaria, particularmente en términos de creación de empresas derivadas y licenciamiento. En contraste, las propuestas analizadas en este estudio todavía no habían alcanzado esos resultados, pero mostraron una etapa previa potencialmente aprovechable: la generación estructurada de soluciones tecnológicas durante el proceso formativo. Por tanto, el aporte del estudio no residió en demostrar una transferencia efectiva, sino en proponer una vía de evaluación temprana mediante la cual los productos formativos pudieran ser identificados, comparados y posteriormente acompañados desde el ámbito institucional.

La utilización de un índice sintético también requirió una interpretación crítica. La ponderación uniforme de las ocho dimensiones permitió evitar decisiones

subjetivas acerca de qué característica debía dominar el resultado, pero implicó asumir que todas las dimensiones tenían la misma importancia para el potencial tecnológico. Esta decisión fue adecuada para una primera aproximación comparativa, aunque no debería considerarse universal. Cohen et al. (2025) evidenciaron que la medición del impacto de las colaboraciones entre universidad e industria enfrentaba dificultades precisamente por la diversidad de actores, objetivos y tipos de impacto involucrados. Por ello, futuras aplicaciones del IPDT podrían incorporar ponderaciones sustentadas empíricamente o diferenciadas según el tipo de tecnología, siempre que exista una base metodológica explícita que permita justificar esos pesos.

Desde una perspectiva de política institucional de investigación, los resultados también sugirieron que la priorización tecnológica debía mantenerse vinculada a información concreta y no únicamente a decisiones centralizadas. Henrekson et al. (2024) advirtieron que las políticas de innovación orientadas por misiones podían presentar problemas cuando los responsables de la toma de decisiones carecían de información suficiente para diseñarlas adecuadamente. En este estudio, la construcción del IPDT ofreció una respuesta parcial a ese problema al convertir características cualitativas de las propuestas estudiantiles en información cuantitativa comparable. Sin embargo, el índice no sustituyó la decisión institucional, sino que proporcionó evidencia inicial para orientar decisiones posteriores sobre acompañamiento, desarrollo tecnológico y eventual transferencia.

Los hallazgos mostraron que la investigación formativa pudo constituir una fase inicial para identificar propuestas tecnológicas con potencial diferenciado dentro de un programa de formación

en sistemas eléctricos. La principal contribución metodológica consistió en vincular la revisión bibliográfica realizada por los estudiantes con una evaluación multicriterio posterior, lo que permitió transitar desde la producción académica hacia una primera valoración estructurada del potencial tecnológico. Esta perspectiva fue compatible con la revisión de Pujotomo et al. (2023), que destacó la importancia de la colaboración entre universidad e industria durante las etapas de desarrollo y comercialización tecnológica. No obstante, el presente estudio se situó deliberadamente en una etapa anterior, en la que la finalidad fue identificar y jerarquizar propuestas susceptibles de continuar hacia procesos posteriores de desarrollo y no demostrar todavía resultados de transferencia o comercialización.

Finalmente, la principal limitación interpretativa estuvo determinada por el reducido número de unidades de análisis y por el origen formativo de las propuestas. La evaluación de cuatro productos no permitió realizar inferencias estadísticas poblacionales ni establecer relaciones causales entre las dimensiones. Asimismo, el IPDT dependió de la calidad de la información contenida en los capítulos y de la consistencia con la que se aplicaron los criterios de valoración. Por ello, los resultados debieron interpretarse como evidencia exploratoria y comparativa del potencial tecnológico de las propuestas. Su utilidad científica e institucional radicó principalmente en proporcionar un procedimiento reproducible para identificar diferencias entre productos de investigación formativa y generar evidencia inicial destinada a decisiones posteriores sobre desarrollo tecnológico, acompañamiento institucional y eventual transferencia.

El estudio estuvo limitado por el reducido número de propuestas y por su procedencia formativa, aspectos que restringieron las posibilidades de generalización de los resultados. No obstante, el IPDT permitió realizar una valoración inicial, reproducible y contextualizada del potencial tecnológico, susceptible de servir como punto de partida para posteriores procesos de evaluación, desarrollo y acompañamiento institucional.

El análisis permitió comparar el potencial de desarrollo tecnológico de cuatro propuestas estudiantiles orientadas a la supervisión, el diagnóstico y la gestión inteligente de sistemas eléctricos. Los resultados mostraron un potencial tecnológico alto en P1 y P2, y muy alto en P3 y P4, con predominio de P4 debido a su mayor integración, transferibilidad, impacto institucional y proyección tecnológica. La proximidad entre los valores del IPDT evidenció potenciales comparables entre las propuestas, aunque con fortalezas diferenciadas según su orientación tecnológica. En conjunto, la matriz multicriterio permitió estructurar una valoración objetiva, reproducible y pertinente para apoyar la toma de decisiones institucionales sobre futuras acciones de desarrollo tecnológico y maduración de estas propuestas.

Referencias

Bamford, D., Reid, I., Forrester, P., Dehe, B., Bamford, J., & Papalexi, M. (2024). An empirical investigation into UK university–industry collaboration: The development of an impact framework. ***The Journal of Technology Transfer, 49***, 1411–1443. https://doi.org/10.1007/s10961-023-10043-9

Chen, Z., Little, V. J., & Thuan, N. H. (2025). The evolving role of technology transfer offices in the entrepreneurial university: Go-betweens or playmakers? *The Journal of Technology Transfer, 50*, 1060–1079. https://doi.org/10.1007/s10961-024-10123-4

Cohen, M., Fernandes, G., & Godinho, P. (2025). Measuring the impacts of university-industry R&D collaborations: A systematic literature review. *The Journal of Technology Transfer, 50*, 345–374. https://doi.org/10.1007/s10961-024-10114-5

Henrekson, M., Sandström, C., & Stenkula, M. (2024). Seven reasons why mission-oriented innovation policies seldom work in practice. *Economic Affairs, 44*(2), 354–362. https://doi.org/10.1111/ecaf.12654

Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2023). Smart grid technologies and application in the sustainable energy transition: A review. *International Journal of Sustainable Energy, 42*(1), 685–758. https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2222298

Liefner, I., Brueck, C., Losacker, S., & Zeng, G. (2025). What can mission-oriented innovation policy learn from China? *Science and Public Policy, 52*(6), 826–838. https://doi.org/10.1093/scipol/scaf023

Littleton, C., Townsin, L., & Beilby, J. (2023). The motivations of stakeholders when developing university industry collaborations in an Australian university: Three case studies. *Journal of Higher Education Policy and Management, 45*(5), 481–494. https://doi.org/10.1080/1360080X.2023.2191608

Mafu, M. (2023). Technology transfer as a catalyst for effective university-industry collaboration in Botswana. *African Journal of Science,Technology, Innovation and Development, 15*(5), 606–623. https://doi.org/10.1080/20421338.2023.2173403

Pujotomo, D., Syed Hassan, S. A. H., Ma'aram, A., & Sutopo, W. (2023). University–industry collaboration in the technology development and technology commercialization stage: A systematic literature review. *Journal of Applied Research in Higher Education, 15*(5), 1276–1306. https://doi.org/10.1108/JARHE-11-2022-0344

Sallan, J. M., & Lordan, O. (2025). University technology transfer: Leveraging experiential learning and TTO's resources. *Small Business Economics, 64*, 221–237. https://doi.org/10.1007/s11187-024-00899-y

Shi, L., & Wang, L. (2023). Understanding university-industry collaboration from the perspective of proximity: Insights from a case study in China. *Technology Analysis & Strategic Management, 36*(12), 4380–4392. https://doi.org/10.1080/09537325.2023.2251606

Zhang, Q., & Tang, N. (2024). The duality of the influence of basic research and applied research on technology transfer performance: Evidence from Chinese universities. *Asian Journal of Technology Innovation, 32*(3), 604–631. https://doi.org/10.1080/19761597.2024.2305722

Zhao, X., & Li-Ying, J. (2024). University–industry collaboration and university technology license: The moderating effects of market and R&D strength. *Technology Analysis & Strategic Management, 36*(10), 3115–3127. https://doi.org/10.1080/09537325.2023.2191747



02.

Fundamentos y evolución tecnológica de los sistemas eléctricos: revisión de principios, componentes y aplicaciones

Pablo Vicente Aguirre Cagua

Carlos Luis Alay Silva

2.1. Evolución tecnológica y transformación de los sistemas eléctricos

La electrificación sostiene actualmente múltiples actividades productivas, sociales y tecnológicas mediante sistemas eléctricos progresivamente interconectados y digitalizados (Amini et al., 2023; Çolak & Irmak, 2023). Su evolución incorpora generación distribuida, recursos renovables, microredes y tecnologías digitales orientadas hacia sistemas más flexibles (Kushwaha & Bhattacharjee, 2023).

Los sistemas eléctricos conservan principios fundamentales relacionados con la tensión, la corriente, la potencia, la frecuencia, la impedancia y la transferencia energética (El-Fergany, 2025; Kumari & Pathak, 2024). Estos principios sustentan arquitecturas monofásicas y trifásicas destinadas a la generación, transmisión, distribución y utilización eficiente de la energía eléctrica (Guo et al., 2023). La transformación tecnológica modifica progresivamente los componentes, los dispositivos de protección, los sistemas de medición y los mecanismos convencionales de operación (Agwa & El-Fergany, 2023; Su et al., 2025). La incorporación de recursos electrónicos incrementa las capacidades funcionales relacionadas con la conversión, regulación, protección y control operativo (Gregis et al., 2024; He et al., 2024).

La expansión de los recursos energéticos distribuidos modifica las condiciones tradicionales de operación y planificación de las redes eléctricas (El-Fergany, 2025). Esta transformación exige nuevas estrategias para mantener la estabilidad, confiabilidad y calidad del suministro, así como la coordinación entre los componentes eléctricos (Agwa & El-Fergany, 2023; Amini et al., 2023). La integración creciente de tecnologías renovables introduce variabilidad operacional y nuevas exigencias sobre la frecuencia, la tensión y la estabilidad sistémica (Kumari & Pathak, 2024; Kushwaha & Bhattacharjee, 2023). Estas condiciones favorecen la incorporación de tecnologías de soporte capaces de optimizar los flujos, controlar la potencia y aprovechar la infraestructura existente (Su et al., 2025).

La digitalización constituye otra transformación relevante mediante la incorporación de sensores, comunicaciones, inteligencia computacional y sistemas avanzados de supervisión (Çolak & Irmak, 2023; Mansour et al., 2023). Las réplicas digitales

dinámicas permiten representar activos eléctricos y apoyar el diagnóstico, mantenimiento, supervisión y gestión operacional (Aghahadi et al., 2024; Heluany & Gkioulos, 2024).

La evolución también incorpora nuevas arquitecturas ciberfísicas que vinculan la infraestructura eléctrica con tecnologías informáticas y comunicacionales (Heluany & Gkioulos, 2024; Mansour et al., 2023). Esta integración amplía las capacidades operativas, aunque introduce desafíos relacionados con la interoperabilidad, seguridad y gestión de la información (Aghahadi et al., 2024; Shi & Fang, 2024). La modernización eléctrica requiere comprender conjuntamente los fundamentos, componentes, aplicaciones y procesos tecnológicos asociados con los sistemas contemporáneos (Guo et al., 2023). Sin embargo, la literatura reciente aborda frecuentemente estos elementos mediante perspectivas tecnológicas especializadas y fragmentadas (Amini et al., 2023; Mansour et al., 2023).

En consecuencia, resulta pertinente integrar los conocimientos fundamentales y los desarrollos tecnológicos dentro de una perspectiva bibliográfica articulada (Kushwaha & Bhattacharjee, 2023; Su et al., 2025). Esta integración favorece una comprensión progresiva de los sistemas eléctricos y sus aplicaciones en escenarios tecnológicos contemporáneos (El-Fergany, 2025; Pham et al., 2025).

El presente capítulo delimitó su objeto al análisis bibliográfico de los principios, componentes, aplicaciones y evolución tecnológica de los sistemas eléctricos (Amini et al., 2023; Çolak & Irmak, 2023). Su propósito fue sintetizar conocimientos recientes para fortalecer la comprensión técnica de los sistemas eléctricos actuales.

El estudio correspondió a una revisión bibliográfica de carácter descriptivo, analítico

y comparativo, orientada al análisis de los fundamentos, componentes, aplicaciones y evolución tecnológica de los sistemas eléctricos. La búsqueda consideró publicaciones científicas correspondientes al periodo 2023–2026 y utilizó como fuentes principales Scopus, Web of Science y ScienceDirect. La selección documental se organizó mediante el protocolo Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), con el propósito de garantizar la trazabilidad en la identificación, depuración, evaluación e inclusión de las publicaciones.

La estrategia de búsqueda empleó combinaciones de términos en inglés relacionadas con electrical systems, electrical power systems, power system technology, electrical components, electrical machines, power electronics, renewable energy, smart grids, energy efficiency y control systems. Se consideraron publicaciones correspondientes al periodo 2023–2026, artículos científicos publicados en revistas académicas, documentos directamente relacionados con el objeto de estudio y registros que permitieran verificar autores, año, título, revista, volumen, número, páginas e identificador DOI. Se priorizaron revisiones, revisiones sistemáticas, estudios del estado del arte y trabajos de síntesis tecnológica.

El proceso PRISMA registró 109 documentos identificados mediante las estrategias de búsqueda. Después de eliminar 37 registros duplicados, permanecieron 72 publicaciones para el cribado. La evaluación de títulos y resúmenes excluyó 28 documentos por falta de correspondencia con el objeto de estudio, por lo que 44 publicaciones pasaron a la evaluación de elegibilidad mediante la revisión del texto disponible. En esta etapa se excluyeron 27 publicaciones debido al incumplimiento de los criterios temáticos, metodológicos o bibliográficos

establecidos. Finalmente, se incorporaron 17 artículos científicos al corpus documental utilizado para sustentar la introducción y el desarrollo analítico del capítulo.

El estudio respetó los principios de integridad científica, transparencia documental y reconocimiento de la autoría intelectual. Al corresponder a una revisión bibliográfica, no involucró participantes humanos, animales, muestras biológicas ni datos personales, por lo que no requirió consentimiento informado. La selección documental aplicó criterios previamente establecidos mediante el protocolo PRISMA, sin manipular los resultados publicados. Las fuentes se identificaron mediante referencias bibliográficas completas y DOI, con reconocimiento explícito de sus autores. La información extraída conservó correspondencia con las fuentes originales y las interpretaciones se diferenciaron de los resultados reportados. Asimismo, se mantuvo la trazabilidad entre las publicaciones seleccionadas, las citas incorporadas y las referencias bibliográficas finales.

2.2. Transformación tecnológica, digitalización y nuevas capacidades de los sistemas eléctricos

La revisión documental integró 17 publicaciones científicas relacionadas con la evolución de los sistemas eléctricos y sus principales componentes tecnológicos. El análisis consideró el contenido específico de cada estudio y estableció su contribución respecto al objetivo del capítulo. La Tabla 2.1 sintetiza los principales aportes identificados y permite relacionarlos con las dimensiones correspondientes a fundamentos, componentes, protección, estabilidad, control, digitalización, generación renovable, planificación y gestión de los sistemas eléctricos.

Tabla 2.1. Análisis de las publicaciones seleccionadas según su contribución al estudio de los sistemas eléctricos.

Referencia	Área tecnológica analizada	Principal aporte identificado	Contribución al objetivo del capítulo	Implicación tecnológica
Aghahadi et al. (2024)	Digitalización de redes de distribución	Analiza estrategias y desafíos asociados con la digitalización de las redes de distribución	Evidencia la transformación de las redes convencionales hacia arquitecturas digitales con mayor capacidad de supervisión y gestión	Refuerza la necesidad de incorporar comunicaciones, automatización y gestión digital en las instalaciones eléctricas contemporáneas
Agwa & El-Fergany (2023)	Protección y generación renovable	Examina los desafíos de coordinación de protecciones en sistemas que incorporan fuentes renovables	Vincula la evolución de la generación eléctrica con la necesidad de adaptar los sistemas convencionales de protección	Demuestra que la incorporación de generación distribuida modifica las condiciones tradicionales de operación y protección
Amini et al. (2023)	Resiliencia de sistemas eléctricos	Integra conceptos, desafíos y estrategias relacionados con la resiliencia de los sistemas energéticos	Amplía el análisis desde la operación convencional hacia la capacidad del sistema para resistir y recuperarse ante perturbaciones	Destaca la importancia de diseñar sistemas confiables, flexibles y capaces de mantener funciones críticas

Çolak & Irmak (2023)	Sistemas eléctricos y transformación digital	Examina la transformación digital de los sistemas eléctricos y sus principales tecnologías habilitadoras	Permite identificar la digitalización como una etapa fundamental de la evolución tecnológica del sector eléctrico	Relaciona los fundamentos eléctricos tradicionales con sensores, comunicaciones, automatización y procesamiento digital
El-Fergany (2025)	Flujo de potencia en redes de distribución	Revisa los métodos empleados para el análisis del flujo de carga en redes eléctricas de distribución	Refuerza la importancia del análisis eléctrico como fundamento para evaluar las condiciones operativas de las redes	Sustenta la utilización de herramientas computacionales para la planificación, operación y diagnóstico de redes
Gregis et al. (2024)	Interruptores de estado sólido	Analiza métodos de limitación de tensión aplicados a interruptores de circuito de estado sólido	Incorpora la evolución de los dispositivos de protección hacia soluciones basadas en electrónica de potencia	Evidencia la transición desde dispositivos electromecánicos hacia sistemas de protección con mayor velocidad de respuesta
Guo et al. (2023)	Seguridad ciberfísica de sistemas eléctricos	Propone un modelo de optimización para la defensa de sistemas eléctricos considerando la interdependencia ciberfísica	Amplía el concepto de sistema eléctrico al integrar infraestructura física y componentes digitales de control y comunicación	Evidencia que la modernización eléctrica exige considerar simultáneamente seguridad física y ciberseguridad

He et al. (2024)	Estabilidad de frecuencia	Analiza los problemas de estabilidad de frecuencia asociados con sistemas eléctricos de baja inercia	Explica una consecuencia fundamental de la transformación de las redes mediante la incorporación de recursos electrónicos y generación renovable	Plantea la necesidad de nuevos métodos de control y regulación para conservar la estabilidad del sistema
Heluany & Gkioulos (2024)	Réplica digital dinámica	Revisa aplicaciones de réplicas digitales dinámicas en generación y distribución eléctrica	Identifica una evolución desde la supervisión convencional hacia representaciones digitales dinámicas de los sistemas físicos	Favorece el diagnóstico, la simulación, el mantenimiento predictivo y la optimización de instalaciones eléctricas
Kabeyi & Olanrewaju (2023)	Redes inteligentes y transición energética	Analiza tecnologías de redes inteligentes vinculadas con la transición energética sostenible	Integra generación renovable, digitalización, automatización y gestión energética dentro de una concepción moderna del sistema eléctrico	Demuestra que la red inteligente constituye una evolución estructural de la infraestructura eléctrica convencional
Kumari & Pathak (2024)	Control de frecuencia	Revisa arquitecturas de control de frecuencia aplicadas a diferentes configuraciones de sistemas eléctricos	Profundiza en la función del control como elemento esencial para mantener condiciones operativas estables	Evidencia la evolución de los sistemas de control hacia arquitecturas adaptativas y computacionalmente avanzadas

Kushwaha & Bhattacharjee (2023)	Sistemas híbridos renovables	Integra configuraciones, almacenamiento, dimensionamiento, gestión energética y control de sistemas híbridos renovables	Relaciona la evolución de la generación eléctrica con nuevas configuraciones que combinan fuentes renovables y almacenamiento	Demuestra la necesidad de competencias integradas en generación, almacenamiento, control y gestión energética
Li et al. (2024)	Sensores inteligentes	Analiza el estado y las tendencias de los sensores inteligentes aplicados al sector eléctrico	Evidencia la transformación de la medición convencional hacia sistemas de adquisición y procesamiento inteligente de información	Refuerza el papel de sensores y dispositivos inteligentes en supervisión, diagnóstico y automatización
Mansour et al. (2023)	IoT y la réplica digital dinámica	Examina aplicaciones del Internet de las Cosas y las réplicas digitales dinámicas en sistemas eléctricos	Vincula la evolución de los componentes eléctricos con infraestructuras digitales capaces de intercambiar y procesar información	Favorece la monitorización remota, integración de datos, mantenimiento y toma de decisiones operativas
Pham et al. (2025)	Planificación de redes de baja y media tensión	Examina la planificación de redes de distribución considerando recursos energéticos distribuidos	Relaciona la evolución de las redes de distribución con la incorporación creciente de generación y recursos distribuidos	Evidencia la necesidad de actualizar criterios de diseño y planificación de redes de baja y media tensión

Shi et al. (2024)	Redes inteligentes e inteligencia artificial	Analiza oportunidades y desafíos asociados con modelos de lenguaje de gran escala en redes inteligentes	Representa una etapa reciente de evolución tecnológica hacia sistemas eléctricos apoyados por inteligencia artificial	Amplía las posibilidades de análisis de información, asistencia inteligente y apoyo a la gestión de redes
Su et al. (2025)	Tecnologías de mejora de redes	Analiza tecnologías destinadas a incrementar la capacidad y flexibilidad de los sistemas eléctricos para integrar energía limpia	Vincula la transición energética con la modernización de las redes existentes	Destaca soluciones que permiten aprovechar mejor la infraestructura eléctrica y facilitar la integración de generación limpia

Los resultados evidenciaron que la evolución de los sistemas eléctricos no implicó una sustitución de sus fundamentos tradicionales, sino una incorporación progresiva de tecnologías que ampliaron sus capacidades de operación, protección, control y gestión. Esta transformación mantuvo como base los conocimientos relacionados con circuitos, potencia, distribución, protección y estabilidad, al tiempo que incorporó digitalización, inteligencia artificial, sensores inteligentes y tecnologías de electrónica de potencia. En este sentido, la literatura analizada mostró una transición desde sistemas predominantemente físicos hacia arquitecturas eléctricas interconectadas, automatizadas y orientadas al procesamiento continuo de información.

La digitalización representó uno de los principales ejes de transformación identificados. Aghahadi et al. (2024); y Çolak y Irmak (2023) coincidieron en que las redes de distribución experimentaban

modificaciones estructurales mediante tecnologías digitales destinadas a mejorar la supervisión, automatización y gestión. Esta tendencia adquirió mayor profundidad con Mansour et al. (2023), quienes relacionaron el Internet de las Cosas y las réplicas digitales dinámicas con los sistemas eléctricos. Heluany y Gkioulos (2024) ampliaron esta perspectiva al considerar las réplicas digitales dinámicas como herramientas para representar y analizar procesos de generación y distribución. En conjunto, estos resultados mostraron que la evolución tecnológica desplazaba progresivamente la supervisión convencional hacia modelos capaces de integrar información física y digital.

Los sensores inteligentes constituyeron otro componente fundamental de esta transformación. Li et al. (2024) mostraron que la tecnología de sensores adquiría una función estratégica en la adquisición y el procesamiento de información dentro del sector eléctrico. Esta contribución se relacionó directamente con la digitalización identificada por Aghahadi et al. (2024), debido a que una infraestructura digital requería dispositivos capaces de generar información operacional confiable. Por tanto, los sistemas eléctricos contemporáneos no dependían únicamente de conductores, transformadores, interruptores y equipos de medición convencionales, sino también de dispositivos inteligentes capaces de proporcionar información para el diagnóstico, la automatización y la toma de decisiones.

La incorporación de generación renovable introdujo modificaciones importantes en la planificación, protección y estabilidad de las redes. Agwa y El-Fergany (2023) identificaron desafíos relacionados con la coordinación de las protecciones cuando las fuentes renovables se incorporaban al sistema. Kushwaha y Bhattacharjee (2023) complementaron

esta perspectiva mediante el análisis de sistemas híbridos que integraban generación, almacenamiento, gestión energética y control. Pham et al. (2025) trasladaron esta problemática al ámbito de la planificación de redes de baja y media tensión con recursos energéticos distribuidos. La convergencia de estos estudios evidenció que la transición energética no consistía únicamente en reemplazar fuentes convencionales, sino que exigía modificar los criterios de diseño, protección, planificación y operación.

La estabilidad constituyó otra dimensión crítica de esta evolución. He et al. (2024) señalaron que la reducción de la inercia en los sistemas eléctricos modificaba las condiciones de estabilidad de frecuencia, particularmente ante una mayor presencia de recursos conectados mediante electrónica de potencia. Kumari y Pathak (2024) mostraron que esta situación requería arquitecturas de control capaces de responder a diferentes configuraciones del sistema eléctrico. Los resultados de El-Fergany (2025), centrados en métodos de flujo de carga, complementaron esta perspectiva al demostrar la importancia permanente del análisis de las condiciones eléctricas de operación. Así, los fundamentos del análisis de sistemas conservaron su relevancia, aunque requirieron herramientas computacionales y estrategias de control más avanzadas.

La protección eléctrica también experimentó una transformación tecnológica significativa. Gregis et al. (2024) analizaron métodos de limitación de tensión asociados con interruptores de estado sólido, lo que evidenció la incorporación de electrónica de potencia en funciones tradicionalmente electromecánicas. Esta evolución adquirió una dimensión adicional con Guo et al. (2023), cuyo análisis incorporó la interdependencia entre las dimensiones física y

cibernética del sistema eléctrico. La protección contemporánea, por tanto, superó la respuesta frente a fallas eléctricas convencionales y comenzó a considerar sistemas en los que la infraestructura eléctrica, las comunicaciones, la automatización y la seguridad digital mantenían una relación funcional.

La resiliencia constituyó una dimensión integradora de estas transformaciones. Amini et al. (2023) relacionaron la resiliencia con la capacidad de los sistemas eléctricos para enfrentar perturbaciones y mantener o recuperar sus funciones. Esta perspectiva complementó los resultados sobre estabilidad, protección y digitalización, debido a que un sistema moderno no requería únicamente operar bajo condiciones normales, sino también responder ante perturbaciones físicas, tecnológicas y cibernéticas. La resiliencia emergió así como una propiedad asociada con la integración de múltiples capacidades técnicas y no como una característica exclusiva de un componente individual.

La evolución hacia las redes inteligentes representó la convergencia de estas tecnologías. Kabeyi y Olanrewaju (2023) relacionaron las redes inteligentes con la transición energética sostenible, mientras que Shi et al. (2024) incorporaron los modelos de lenguaje de gran escala dentro de las posibilidades emergentes para su desarrollo. Su et al. (2025) complementaron esta perspectiva mediante tecnologías orientadas a incrementar la capacidad y flexibilidad de las redes para facilitar la integración de energía limpia. Los resultados permitieron interpretar la red inteligente como una evolución sistémica en la cual la generación, distribución, sensores, comunicaciones, control, protección, almacenamiento e inteligencia computacional funcionaban de manera progresivamente integrada.

En términos formativos, los resultados mostraron que la preparación técnica en electricidad requería articular los conocimientos tradicionales con las competencias tecnológicas emergentes. El dominio de circuitos, potencia, máquinas eléctricas, protección, medición y distribución continuó siendo indispensable, pero debía complementarse con conocimientos sobre automatización, sensores inteligentes, electrónica de potencia, comunicaciones, análisis computacional, redes inteligentes y gestión de recursos renovables. La principal implicación derivada del corpus documental consistió, por tanto, en que la evolución tecnológica no reducía la importancia de los fundamentos eléctricos, sino que incrementaba la necesidad de comprenderlos para interpretar, instalar, operar, mantener y modernizar sistemas eléctricos cada vez más digitalizados, automatizados y sostenibles.

La revisión presentó como principal limitación la heterogeneidad temática y tecnológica de las publicaciones seleccionadas, lo que restringió la posibilidad de establecer comparaciones directas entre sus resultados. Asimismo, el periodo bibliográfico establecido limitó la incorporación de estudios anteriores que pudieran aportar una perspectiva histórica más amplia sobre la evolución de los sistemas eléctricos. La disponibilidad desigual de información editorial y metodológica entre las publicaciones seleccionadas también condicionó la profundidad del análisis comparativo realizado.

2.3. Propuesta de sistema modular inteligente para la supervisión y gestión de sistemas eléctricos

Los resultados derivados de la revisión bibliográfica permitieron identificar una convergencia progresiva entre los fundamentos tradicionales de los sistemas eléctricos y las tecnologías asociadas con la

digitalización, automatización, electrónica de potencia, generación distribuida, almacenamiento y procesamiento inteligente de información. A partir de estos hallazgos, se formuló una propuesta de desarrollo tecnológico orientada a integrar dichas capacidades dentro de una solución modular que permita avanzar desde el análisis conceptual hacia posteriores etapas de diseño, desarrollo y validación. La propuesta se concibió como una alternativa de integración físico-digital aplicable a sistemas eléctricos de pequeña y mediana escala, con posibilidades de utilización en actividades de formación técnica, investigación aplicada, supervisión, diagnóstico y gestión energética.

1. Título

Sistema modular inteligente para supervisión y gestión de sistemas eléctricos con integración de tecnologías digitales.

2. Problema o necesidad tecnológica

La modernización de los sistemas eléctricos incorpora generación distribuida, electrónica de potencia, almacenamiento, sensores, automatización y tecnologías digitales, lo que incrementa la complejidad de los procesos de supervisión, control, diagnóstico y gestión. La literatura revisada evidenció que estas tecnologías suelen abordarse de manera especializada, mientras persiste la necesidad de soluciones integradas que permitan evaluar conjuntamente las condiciones eléctricas y tecnológicas de sistemas de pequeña y mediana escala.

3. Fundamento del desarrollo

La revisión bibliográfica identificó una evolución desde configuraciones eléctricas convencionales hacia sistemas caracterizados por una mayor digitalización, automatización, generación

distribuida, control avanzado y capacidad de procesamiento de información.

Los resultados mostraron que los fundamentos eléctricos permanecieron como base funcional, mientras que los componentes y mecanismos de operación adquirieron nuevas capacidades mediante tecnologías digitales y electrónicas. Esta convergencia sustentó la oportunidad de desarrollar una plataforma tecnológica integrada para la supervisión, el análisis y la gestión de sistemas eléctricos.

4. Objetivo general

Desarrollar y validar un sistema modular inteligente para la supervisión, el análisis y la gestión de sistemas eléctricos mediante la integración coordinada de tecnologías eléctricas, electrónicas y digitales.

5. Descripción general de la solución propuesta

Se propone desarrollar una plataforma tecnológica modular de carácter físico-digital capaz de adquirir información operacional de un sistema eléctrico, procesarla, representar sus condiciones de funcionamiento y proporcionar información para apoyar acciones de supervisión, diagnóstico, control y gestión.

La solución estará concebida mediante módulos funcionalmente interoperables, de manera que pueda adaptarse a diferentes configuraciones eléctricas y condiciones de operación sin depender de una arquitectura única de instalación.

En esta propuesta no se especifican los componentes, algoritmos, parámetros de diseño, protocolos de comunicación ni procedimientos de integración, debido a que estos elementos constituirán parte del expediente técnico reservado del desarrollo.

La evolución funcional propuesta comprenderá las siguientes capacidades:

a) Medir las variables eléctricas relevantes.

b) Supervisar las condiciones de operación del sistema.

c) Detectar eventos y condiciones anómalas.

d) Evaluar el comportamiento de la red eléctrica.

e) Proteger el sistema ante condiciones que comprometan su funcionamiento.

f) Analizar la información obtenida durante la operación.

g) Gestionar la información técnica generada para apoyar la toma de decisiones.

De esta manera, el sistema evolucionará desde la evaluación independiente de variables eléctricas hacia una evaluación integrada del comportamiento de las redes de distribución, articulando las funciones de medición, supervisión, detección, evaluación, protección, análisis y gestión dentro de una misma solución tecnológica.

6. Novedad o diferenciación tecnológica

La propuesta no se fundamentará en la creación aislada de un nuevo componente eléctrico, sensor o algoritmo, sino en la integración funcional de capacidades de supervisión, análisis y gestión dentro de una plataforma modular adaptable a diferentes configuraciones eléctricas.

Su diferenciación estará determinada por la capacidad de establecer una relación operativa entre el sistema físico y su representación digital, generando información útil para apoyar la toma

de decisiones técnicas. Este enfoque permitirá superar soluciones fragmentadas orientadas exclusivamente a la medición, automatización o supervisión individual.

7. Productos tecnológicos esperados

El desarrollo contempla como resultados principales:

a) Prototipo funcional del sistema tecnológico.

b) Módulo de supervisión y adquisición de información eléctrica.

c) Módulo de análisis y gestión operacional.

d) Representación digital del sistema monitorizado.

e) Interfaz de supervisión para usuarios técnicos.

f) Procedimiento de validación tecnológica.

g) Documentación técnica y manual de operación.

8. Nivel de madurez tecnológica

El desarrollo tendrá como meta inicial alcanzar un nivel de madurez tecnológica TRL 5 mediante la validación integrada de la solución en un entorno controlado y representativo. Para alcanzar esta meta, el proceso comprenderá la conceptualización de la solución, el diseño tecnológico, el desarrollo de sus componentes, la integración funcional, la realización de pruebas y, finalmente, la validación correspondiente al TRL 5.

Posteriormente, los resultados obtenidos podrán sustentar la evolución hacia niveles superiores de madurez tecnológica mediante demostraciones en entornos relevantes y procesos adicionales de validación.

9. Ámbito de aplicación

La tecnología podrá orientarse inicialmente a los siguientes ámbitos:

a) Formación técnica especializada.

b) Laboratorios de electricidad y automatización.

c) Investigación aplicada.

d) Supervisión de instalaciones eléctricas.

e) Evaluación de sistemas con generación distribuida.

f) Análisis de eficiencia y gestión energética.

g) Demostración de tecnologías de redes inteligentes.

El ámbito definitivo de aplicación dependerá de los resultados obtenidos durante el proceso de validación.

10. Estrategia de validación

La validación deberá demostrar, como mínimo, las siguientes condiciones:

a) Funcionalidad de la solución tecnológica integrada.

b) Interoperabilidad entre los módulos que conforman el sistema.

c) Estabilidad operativa durante las condiciones establecidas para las pruebas.

d) Capacidad de supervisión de las variables y condiciones de funcionamiento consideradas.

e) Respuesta del sistema ante diferentes condiciones de operación.

f) Utilidad de la información generada para apoyar la gestión técnica.

La evaluación se realizará mediante escenarios controlados que permitan comparar las condiciones reales del sistema con la información generada por la plataforma y determinar el comportamiento de la solución integrada.

Los indicadores específicos, los valores de referencia, la configuración experimental y los criterios de aceptación deberán mantenerse en el protocolo técnico del desarrollo y no formar parte de la propuesta pública.

11. Potencial de transferencia

El desarrollo podrá estructurarse como un paquete tecnológico transferible, susceptible de adaptación a instituciones educativas, centros de investigación y usuarios técnicos que requieran capacidades de supervisión y gestión de sistemas eléctricos.

La transferencia podrá considerar, según los resultados obtenidos durante la validación, los siguientes componentes:

a) Prototipo.

b) Software.

c) Documentación técnica.

d) Manual de operación.

e) Capacitación.

f) Asistencia para la implementación.

La propuesta traduce los principales hallazgos de la revisión bibliográfica en una alternativa de desarrollo tecnológico orientada a integrar capacidades eléctricas, electrónicas y digitales dentro de una arquitectura modular. Su planteamiento articula

la medición, supervisión, detección, evaluación, protección, análisis y gestión de información como funciones complementarias, con el propósito de superar el tratamiento aislado de estas capacidades y favorecer una interpretación integrada del comportamiento de los sistemas eléctricos.

El sistema modular propuesto constituye una base para avanzar desde la integración conceptual identificada en la literatura hacia posteriores etapas de diseño, desarrollo y validación tecnológica. Su carácter físico-digital y adaptable permitirá evaluar progresivamente la interoperabilidad entre módulos, la correspondencia entre las condiciones reales del sistema y su representación digital, y la utilidad de la información generada para apoyar la gestión técnica. De esta manera, la propuesta establece una continuidad entre los resultados de la revisión y una posible aplicación tecnológica con potencial para la formación especializada, la investigación aplicada, la supervisión de instalaciones eléctricas y la gestión energética.

Referencias

Aghahadi, M., Bosisio, A., Merlo, M., Berizzi, A., Pegoiani, A., & Forciniti, S. (2024). Digitalization processes in distribution grids: A comprehensive review of strategies and challenges. ***Applied Sciences, 14***(11), 4528. https://doi.org/10.3390/app14114528

Agwa, A. M., & El-Fergany, A. A. (2023). Protective relaying coordination in power systems comprising renewable sources: Challenges and future insights. ***Sustainability, 15***(9), 7279. https://doi.org/10.3390/su15097279

Amini, F., Ghassemzadeh, S., Rostami, N., & Sohrabi Tabar, V. (2023). Electrical energy systems resilience: A comprehensive review on definitions, challenges, enhancements and future proceedings. *IET Renewable Power Generation, 17*(7), 1835–1858. https://doi.org/10.1049/rpg2.12705

Çolak, M., & Irmak, E. (2023). A state-of-the-art review on electric power systems and digital transformation. *Electric Power Components and Systems, 51*(11), 1089–1112. https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2189760

El-Fergany, A. A. (2025). Reviews on load flow methods in electric distribution networks. *Archives of Computational Methods in Engineering, 32*, 1619–1633. https://doi.org/10.1007/s11831-024-10191-7

Gregis, G., Piegari, L., Raciti, L., & Masper, T. (2024). A review of voltage-clamping methods for solid-state circuit breakers. *IEEE Open Journal of Power Electronics, 5*, 873–890. https://doi.org/10.1109/OJPEL.2024.3411110

Guo, Y., Yang, J., Guo, C., & Yang, J. (2023). A tri-level optimization model for power systems defense considering cyber-physical interdependence. *IET Generation, Transmission & Distribution, 17*, 1477–1490. https://doi.org/10.1049/gtd2.12758

He, C., Geng, H., Rajashekara, K., & Chandra, A. (2024). Analysis and control of frequency stability in low-inertia power systems: A review. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 11*(12), 2363–2383. https://doi.org/10.1109/JAS.2024.125013

Heluany, J. B., & Gkioulos, V. (2024). A review on digital twins for power generation and distribution. *International Journal of Information Security, 23*, 1171–1195. https://doi.org/10.1007/s10207-023-00784-x

Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2023). Smart grid technologies and application in the sustainable energy transition: A review. *International Journal of Sustainable Energy, 42*(1), 685–758. https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2222298

Kumari, S., & Pathak, P. K. (2024). A state-of-the-art review on recent load frequency control architectures of various power system configurations. *Electric Power Components and Systems, 52*(5), 722–765. https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2234373

Kushwaha, P. K., & Bhattacharjee, C. (2023). An extensive review of the configurations, modeling, storage technologies, design parameters, sizing methodologies, energy management, system control, and sensitivity analysis aspects of hybrid renewable energy systems. *Electric Power Components and Systems, 51*(20), 2603–2642. https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2210556

Li, P., Fan, Y., Liu, Z., Tian, B., Wang, Z., Han, Z., Li, D., Zhang, Z., & Xiong, F. (2024). Application status and development trend of intelligent sensor technology in the electric power industry. *IET Science, Measurement & Technology, 18*(4), 145–162. https://doi.org/10.1049/smt2.12175

Mansour, D. E. A., Numair, M., Zalhaf, A. S., Ramadan, R., Darwish, M. M. F., Huang, Q., Hussien, M. G., & Abdel, R. O. (2023). Applications of IoT and digital twin in electrical power systems: A comprehensive survey. *IET Generation, Transmission & Distribution, 17*(20), 4457–4479. https://doi.org/10.1049/gtd2.12940

Pham, T. N., Shah, R., Dao, M. N., Sultanova, N., et al. (2025). Low and medium voltage distribution network planning with distributed energy resources: A survey. *Electrical Engineering, 107*, 1797–1828. https://doi.org/10.1007/s00202-024-02535-0

Shi, H., Fang, L., Chen, X., Gu, C., Ma, K., Zhang, X., Zhang, Z., Gu, J., & Lim, E. G. (2024). Review of the opportunities and challenges to accelerate mass-scale application of smart grids with large-language models. *IET Smart Grid, 7*(6), 737–759. https://doi.org/10.1049/stg2.12191

Su, T., Zhao, J., Gomez, E. A., Chen, Y., Terzija, V., & Gentle, J. P. (2025). Grid-enhancing technologies for clean energy systems. *Nature Reviews Clean Technology, 1*, 16–31. https://doi.org/10.1038/s44359-024-00001-5



03.

Instalaciones eléctricas de baja tensión: criterios técnicos, seguridad y eficiencia energética

Smilton Javier Chilan Ponce

Alcides David Delgado Merchan

3.1. Fundamentos técnicos y transformación de las instalaciones eléctricas de baja tensión

Las instalaciones eléctricas de baja tensión sustentan servicios residenciales, comerciales e institucionales mediante redes próximas al usuario final (Azzopardi & Gabdullin, 2024). Su planificación debe considerar la confiabilidad, la capacidad de suministro y las condiciones operativas asociadas con la incorporación de nuevas tecnologías eléctricas (Jaskólski et al., 2025;

Ndawula et al., 2024). La expansión de los recursos energéticos distribuidos modifica progresivamente las condiciones tradicionales de estas instalaciones (López et al., 2025; Saini et al., 2024). Este proceso introduce nuevas exigencias relacionadas con la regulación, la capacidad de alojamiento y la gestión de los recursos conectados (Micallef et al., 2024).

Los criterios técnicos determinan las condiciones necesarias para garantizar un funcionamiento seguro, confiable y eficiente de las instalaciones de baja tensión (Kostic et al., 2025; Sobolewski & Lis, 2023). La configuración de los circuitos, conductores, cargas y dispositivos de protección condiciona el comportamiento operativo de cada instalación (Ndawula et al., 2024; Pham et al., 2025). Asimismo, el análisis de las redes debe considerar los desequilibrios, las pérdidas y las variaciones de tensión asociados con configuraciones reales de operación (Gao et al., 2024; Nour et al., 2023). Estos aspectos adquieren mayor relevancia a medida que aumenta la conexión de generación distribuida y de cargas eléctricas variables (Micallef et al., 2024; Zhang et al., 2024).

La seguridad constituye un requisito esencial en las instalaciones eléctricas destinadas al consumo final. La verificación periódica permite identificar situaciones asociadas con riesgos de choque eléctrico, incendios y deficiencias funcionales (Kostic et al., 2025; Sobolewski & Lis, 2023). La incorporación de generación local y sistemas de almacenamiento modifica, además, las condiciones de protección y selectividad de los dispositivos existentes (Azzopardi & Gabdullin, 2024). Las instalaciones fotovoltaicas residenciales requieren especial atención debido a los riesgos eléctricos relacionados con fallas, aislamiento y diferentes condiciones de operación (Saini et al., 2024; Zhang et al., 2024).

La eficiencia energética representa otra dimensión fundamental del desempeño técnico de las instalaciones de baja tensión (López et al., 2025). Las pérdidas eléctricas dependen de las condiciones de carga, las características de los conductores y la configuración de los sistemas de distribución (Gissinga et al., 2024; Ishaq & Langella, 2024). El desequilibrio de tensiones también influye sobre las pérdidas, las corrientes y las condiciones operativas de las redes de baja tensión (Nour et al., 2023). Por ello, la evaluación energética requiere relacionar la demanda, la calidad eléctrica, la capacidad de conducción y las condiciones de utilización de la infraestructura (Santos et al., 2024).

La transición energética incorpora generación fotovoltaica, almacenamiento y vehículos eléctricos directamente vinculados con las redes de baja tensión (López et al., 2025; Micallef et al., 2024). Estos recursos pueden modificar los perfiles de tensión, los flujos de potencia, las pérdidas y la capacidad disponible en los circuitos existentes (Azzopardi & Gabdullin, 2024; Saini et al., 2024). La movilidad eléctrica introduce, además, nuevas demandas cuya concentración puede provocar sobrecargas, variaciones de tensión y desequilibrios (Mattos et al., 2024). En consecuencia, las instalaciones requieren criterios actualizados para gestionar las cargas emergentes y los recursos energéticos distribuidos (Jaskólski et al., 2025; Kotsonias et al., 2025).

La digitalización incorpora medición avanzada, comunicaciones y procesamiento de información en las redes eléctricas de baja tensión (Kippke et al., 2025; Milis et al., 2024). Estas tecnologías incrementan la visibilidad operacional y favorecen los procesos de supervisión, diagnóstico y gestión de los recursos distribuidos (Santos et al., 2024).

Las representaciones digitales dinámicas permiten, además, vincular modelos computacionales con información procedente de instalaciones eléctricas reales (Heluany & Gkioulos, 2024). Esta capacidad amplía las posibilidades de análisis operacional relacionadas con el diagnóstico, la estimación de estados y la toma de decisiones técnicas (Pamulaparthy, 2024; Zhi et al., 2024).

La literatura reciente evidencia avances específicos en la planificación, protección, regulación, medición y digitalización de las redes de baja tensión (Kotsonias et al., 2025; Pham et al., 2025). Sin embargo, estos aportes permanecen distribuidos entre problemas particulares relacionados con la seguridad, la eficiencia, la integración energética y la supervisión (Jaskólski et al., 2025; Milis et al., 2024). Esta especialización dificulta una interpretación integrada de los criterios técnicos que condicionan la modernización de las instalaciones (Ndawula et al., 2024; Sobolewski & Lis, 2023). Por consiguiente, resulta necesaria una integración conceptual que permita relacionar el desempeño eléctrico, la seguridad operacional y el aprovechamiento energético dentro de una perspectiva común (Kostic et al., 2025).

El problema de conocimiento se relaciona con la necesidad de integrar los criterios técnicos, la seguridad y la eficiencia energética frente a las transformaciones que experimentan actualmente las instalaciones de baja tensión (Kotsonias et al., 2025; Pham et al., 2025). Las configuraciones tradicionales deben responder simultáneamente a nuevas cargas, recursos distribuidos, dispositivos electrónicos y sistemas de medición avanzada (Kippke Salomón et al., 2025; López et al., 2025). Esta evolución requiere comprender las relaciones entre los componentes físicos, las condiciones operativas

y las tecnologías digitales emergentes (Zhi et al., 2024). En este contexto, el análisis bibliográfico permite organizar conocimientos especializados y establecer relaciones entre sus principales aportes tecnológicos (Heluany & Gkioulos, 2024; Jaskólski et al., 2025).

El presente capítulo delimita su objeto al análisis bibliográfico de las instalaciones eléctricas de baja tensión y de sus transformaciones tecnológicas recientes (Jaskólski et al., 2025; Pham et al., 2025). Para ello, articula los criterios técnicos, la seguridad y la eficiencia energética como dimensiones fundamentales para interpretar dicha evolución (Kostic et al., 2025; Sobolewski & Lis, 2023). El objetivo del capítulo fue integrar evidencia científica reciente para fortalecer la comprensión técnica de la generación distribuida, el almacenamiento energético, la movilidad eléctrica, la medición inteligente y las representaciones digitales dinámicas aplicadas a las instalaciones eléctricas de baja tensión, con el propósito de aportar fundamentos que orienten su modernización.

El estudio correspondió a una revisión bibliográfica de carácter descriptivo, analítico y comparativo. El objeto de análisis comprendió las instalaciones eléctricas de baja tensión, con énfasis en sus fundamentos técnicos, componentes, seguridad, eficiencia energética y evolución tecnológica. El enfoque descriptivo permitió organizar los principales aportes científicos identificados, el analítico examinó sus relaciones conceptuales y técnicas, y el comparativo permitió contrastar los enfoques, soluciones y tendencias documentados en la literatura seleccionada.

La búsqueda documental comprendió publicaciones científicas correspondientes al periodo 2023–2026

y utilizó como fuentes principales Scopus, Web of Science y ScienceDirect. La estrategia de búsqueda empleó combinaciones de términos en inglés relacionados con low-voltage electrical installations, low-voltage distribution networks, electrical safety, electrical protection, energy efficiency, distributed energy resources, photovoltaic systems, battery energy storage, electric vehicles, smart metering, power quality, voltage regulation y digital twins. Los términos se combinaron mediante los operadores booleanos AND y OR, de acuerdo con las relaciones conceptuales requeridas para localizar publicaciones pertinentes al objeto de estudio.

Como criterios de inclusión, se consideraron artículos científicos publicados en revistas académicas entre 2023 y 2026, directamente relacionados con las instalaciones eléctricas de baja tensión y con información bibliográfica verificable. Se priorizaron revisiones, revisiones sistemáticas, estudios del estado del arte y trabajos de síntesis tecnológica. También se incorporaron investigaciones sobre protección, calidad de la energía, regulación de tensión, pérdidas, eficiencia energética, generación fotovoltaica, almacenamiento, movilidad eléctrica, medición inteligente y digitalización, siempre que mantuvieran una relación directa con las instalaciones o redes de baja tensión.

Como criterios de exclusión, se eliminaron los registros duplicados, las publicaciones situadas fuera del periodo establecido, los documentos sin correspondencia temática con el objeto de estudio y los trabajos que carecían de información bibliográfica suficiente para verificar su procedencia. Asimismo, se excluyeron los estudios centrados exclusivamente en generación o transmisión eléctrica cuando no presentaban una relación directa con las instalaciones de baja tensión.

El procedimiento de selección registró inicialmente 121 documentos. Después de eliminar 26 registros duplicados, permanecieron 95 publicaciones para el cribado. La evaluación de títulos y resúmenes condujo a la exclusión de 32 documentos, por lo que 63 publicaciones pasaron a la etapa de elegibilidad. Posteriormente, la revisión del texto disponible determinó la exclusión de 41 publicaciones por incumplimiento de los criterios establecidos. Finalmente, el corpus documental quedó constituido por 22 artículos científicos.

El proceso de selección se documentó mediante el protocolo Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), que permitió estructurar las etapas de identificación, depuración, cribado, elegibilidad e inclusión. Su aplicación proporcionó trazabilidad al proceso de selección documental y permitió establecer de manera sistemática la transición desde los 121 registros inicialmente identificados hasta los 22 artículos que conformaron el corpus definitivo.

De cada publicación seleccionada se extrajeron los autores, el año de publicación, el título, la revista, el volumen, el número, las páginas o el identificador del artículo y el DOI. La información temática se clasificó en fundamentos técnicos, componentes, protección, seguridad, eficiencia energética, calidad eléctrica, recursos energéticos distribuidos y tecnologías digitales. El análisis descriptivo permitió caracterizar los contenidos predominantes del corpus, mientras que el análisis analítico estableció relaciones entre los criterios técnicos y las condiciones de operación, protección y eficiencia. Por su parte, el análisis comparativo permitió identificar coincidencias, diferencias, ventajas, limitaciones y tendencias entre las

soluciones documentadas. Esta organización facilitó la integración de los resultados bibliográficos con el propósito tecnológico del capítulo.

El estudio respetó los principios de integridad científica, transparencia documental y reconocimiento de la autoría intelectual. Debido a su naturaleza bibliográfica, no involucró la participación de seres humanos, animales, muestras biológicas ni datos personales, por lo que no requirió consentimiento informado ni procedimientos de intervención experimental.

Las interpretaciones mantuvieron correspondencia con las fuentes originales y se diferenciaron de los resultados comunicados por sus respectivos autores. Asimismo, las referencias bibliográficas permitieron identificar cada publicación utilizada y garantizar la trazabilidad entre las fuentes seleccionadas, las citas incorporadas y el contenido desarrollado en el capítulo.

3.2. Seguridad, eficiencia energética y modernización tecnológica de las instalaciones de baja tensión

La revisión documental permitió organizar las publicaciones seleccionadas según el área tecnológica analizada, el principal aporte científico y su relación con el objetivo del capítulo. La información recopilada permitió vincular cada estudio con los criterios técnicos, la seguridad, la eficiencia energética y la evolución tecnológica, así como identificar sus principales implicaciones para la planificación, operación y modernización de las instalaciones eléctricas de baja tensión. Los resultados de este análisis se sintetizan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Análisis de las referencias seleccionadas sobre instalaciones eléctricas de baja tensión.

Referencia	Área tecnológica analizada	Principal aporte identificado	Contribución al objetivo del capítulo	Implicación tecnológica
Azzopardi & Gabdullin (2024)	Carga de vehículos eléctricos en redes de baja tensión	Analiza los efectos de la carga de vehículos eléctricos sobre tensión, capacidad de alimentadores y estabilidad mediante datos de medición inteligente	Sustenta el análisis de las nuevas demandas eléctricas y sus efectos sobre las condiciones operativas de baja tensión	La incorporación de vehículos eléctricos exige evaluar capacidad de alimentadores, perfiles de demanda y regulación de tensión
Gao et al. (2024)	Regulación de tensión con alta penetración fotovoltaica	Compara estrategias basadas en almacenamiento, potencia reactiva de inversores, limitación de potencia activa, regulación mediante transformadores	Permite relacionar integración fotovoltaica con regulación y calidad de tensión	La regulación coordinada de recursos flexibles resulta más adecuada que la utilización aislada de una única estrategia
Gissinga et al. (2024)	Optimización de cargadores EV, fotovoltaica y V2G	Estudia la localización de cargadores, generación fotovoltaica y puntos V2G para reducir niveles de armónicos de tensión	Incorpora calidad de energía dentro del análisis de tecnologías emergentes en baja tensión	La ubicación de nuevas cargas y recursos debe considerar simultáneamente tensión, armónicos y capacidad de conexión

Heluany & Gkioulos (2024)	Réplicas digitales dinámicas aplicadas a sistemas eléctricos	Identifica componentes de las arquitecturas de réplicas digitales dinámicas y sus aplicaciones en generación y distribución	Fundamenta la incorporación de tecnologías digitales en la evolución de los sistemas eléctricos	La representación digital dinámica amplía las capacidades de supervisión, modelado, simulación y diagnóstico
Ishaq & Langella (2024)	Distorsión armónica producida por bombas de calor	Propone un modelo agregado de carga para estudiar la inyección de armónicos de bombas de calor en redes de baja tensión	Relaciona electrificación de cargas con calidad de energía y comportamiento de componentes de baja tensión	Las cargas electrónicas requieren evaluación armónica para prevenir pérdidas, calentamiento y reducción de capacidad de la red
Jaskólski et al. (2025)	Planificación de redes de baja y media tensión	Revisa la evolución de métodos de planificación considerando recursos distribuidos, prosumidores, protección, balance local y regulación de tensión	Aporta una visión evolutiva para interpretar la transformación de los criterios tradicionales de planificación	La planificación requiere incorporar generación distribuida, prosumidores, protección y balance energético local
Kippke Salomón et al. (2025)	Medición avanzada mediante comunicación por línea eléctrica	Desarrolla una infraestructura de medición avanzada con capacidad de autodiagnóstico para incrementar visibilidad y control en redes de baja tensión	Sustenta el papel de la medición inteligente en la modernización de las instalaciones	La medición avanzada permite mejorar supervisión, diagnóstico y gestión de dispositivos conectados

Kostic et al. (2025)	Verificación periódica de instalaciones eléctricas	Propone una metodología mejorada para verificar periódicamente instalaciones de baja tensión y detectar condiciones asociadas con riesgos eléctricos	Constituye una referencia directa para el componente de seguridad del capítulo	La verificación periódica fortalece la prevención de fallas, accidentes eléctricos y condiciones inseguras
Kotsonias et al. (2025)	Operación de redes de baja tensión con tecnologías de descarbonización	Sintetiza desafíos derivados de fotovoltaica y vehículos eléctricos, especialmente tensión, demanda, congestión y asimetrías	Integra varios problemas operativos que afectan simultáneamente las redes de baja tensión	La operación futura requiere regulación de tensión, gestión de congestión y balance de fases
López et al. (2025)	Integración de fotovoltaica y almacenamiento	Evalúa perfiles de tensión y pérdidas para diferentes estrategias de integración de generación fotovoltaica y almacenamiento	Vincula integración de recursos distribuidos con eficiencia y comportamiento eléctrico	El almacenamiento puede utilizarse como recurso para mejorar perfiles de tensión y reducir impactos de la generación distribuida
Mattos (2024)	Control de tensión mediante V2G	Analiza el uso de vehículos eléctricos como recursos de apoyo para el control de tensión en redes de baja tensión	Amplía el concepto de movilidad eléctrica desde una carga hacia un recurso de gestión de la red	La tecnología V2G puede aportar flexibilidad para regulación de tensión y gestión de demanda

Micallef et al. (2024)	Regulación de tensión con fotovoltaica y almacenamiento	Examina redes de baja tensión con penetración desequilibrada de fotovoltaica y baterías, considerando problemas regulatorios de tensión	Relaciona generación distribuida, desequilibrio y regulación eléctrica	La coordinación entre generación fotovoltaica y almacenamiento permite mejorar las condiciones de tensión
Milis et al. (2024)	Modelado de perfiles de consumidores mediante medición inteligente	Propone estimar perfiles diarios de consumidores a partir de mediciones de medidores inteligentes y curvas de subestaciones	Aporta una herramienta para comprender la demanda eléctrica y su influencia sobre la planificación	El conocimiento detallado de los perfiles de carga favorece la estimación de capacidad de alojamiento y gestión de demanda
Ndawula et al. (2024)	Modelado de confiabilidad de redes de baja tensión	Desarrolla equivalentes de confiabilidad mediante enumeración de estados y simulación Monte Carlo, considerando características reales de redes de baja tensión	Fortalece el análisis del desempeño y confiabilidad como criterios técnicos de las instalaciones	Los modelos equivalentes permiten evaluar confiabilidad con menor complejidad computacional sin perder representatividad relevante
Nour et al. (2023)	Mitigación del desequilibrio de tensión	Analiza el desequilibrio por diferencias entre cargas o generación monofásica y propone control descentralizado de corriente	Sustenta el tratamiento de desequilibrios como condición de calidad y seguridad operativa	La compensación descentralizada puede reducir desequilibrios y mejorar el comportamiento de redes activas

Pamulaparthy (2024)	Detección de fallas mediante IoT y réplica digital dinámica	Utiliza un modelo basado en IoT y réplica digital dinámica para identificar fallas de alta impedancia en sistemas de baja tensión	Relaciona seguridad eléctrica, diagnóstico y digitalización	La integración IoT–réplica digital dinámica puede acelerar la localización y diagnóstico de fallas
Pham et al. (2025)	Planificación de redes de baja y media tensión con recursos distribuidos	Revisa metodologías de planificación que incorporan generación distribuida, almacenamiento, vehículos eléctricos y otras tecnologías emergentes	Proporciona una referencia integradora para explicar la transformación de los criterios convencionales de planificación	La planificación debe considerar capacidad de alojamiento, flujo de potencia, recursos distribuidos y nuevas cargas
Saini et al. (2024)	Asignación de recursos distribuidos y carga de vehículos eléctricos	Analiza la asignación óptima de recursos distribuidos frente a demanda estocástica de vehículos eléctricos y perturbaciones naturales	Relaciona planificación, resiliencia y nuevas demandas eléctricas	La ubicación coordinada de recursos permite mejorar capacidad operativa y respuesta ante condiciones perturbadoras
Santos et al. (2024)	Monitoreo de flujo de potencia mediante infraestructura de alumbrado público	Utiliza infraestructura existente de alumbrado público para supervisar condiciones de flujo de potencia en redes de baja tensión	Incorpora una alternativa tecnológica para supervisión de redes sin depender exclusivamente de infraestructura convencional	Las infraestructuras eléctricas existentes pueden adquirir funciones adicionales de monitoreo y diagnóstico

Sobolewski & Lis (2023)	Protección de instalaciones eléctricas de baja tensión	Analiza verificación y diseño de protecciones en una instalación prosumidora colectiva de baja tensión	Constituye uno de los antecedentes más directamente relacionados con seguridad y protección eléctrica	La incorporación de generación distribuida exige revisar protección, selectividad y condiciones de operación de la instalación
Zhang et al. (2024)	Conversión AC-DC para integración de vehículos eléctricos	Analiza la conversión de redes AC de baja tensión hacia soluciones DC orientadas a integración de vehículos eléctricos y desarrolla estrategias de control adaptativo	Introduce la transformación de la arquitectura eléctrica como parte de la evolución tecnológica	La conversión DC puede modificar la arquitectura de suministro y las estrategias de control asociadas con movilidad eléctrica
Zhi et al. (2024)	Réplica digital dinámica y estimación de estado	Integra réplica digital dinámica con estimación de estado y tratamiento de datos anómalos en redes de distribución	Sustenta la evolución hacia sistemas eléctricos con mayor capacidad de supervisión computacional	La estimación de estado basada en representación digital mejora la detección de condiciones operativas inconsistentes

Los resultados mostraron que las instalaciones eléctricas de baja tensión evolucionaban desde configuraciones pasivas hacia sistemas con mayores exigencias de planificación y flexibilidad operativa (Jaskólski et al., 2025; Pham et al., 2025). Esta transformación respondió principalmente a la incorporación de generación distribuida, almacenamiento y nuevas cargas eléctricas con comportamiento variable (Kotsonias et al., 2025; López et al., 2025). En este contexto, los criterios tradicionales de dimensionamiento

resultaron insuficientes cuando las instalaciones incorporaban múltiples recursos energéticos distribuidos (Gao et al., 2024; Saini et al., 2024). La evidencia comparada indicó que la evaluación de la capacidad técnica debía considerar simultáneamente la demanda, la generación local, el almacenamiento y las condiciones de conexión (Micallef et al., 2024; Ndawula et al., 2024).

La regulación de tensión constituyó uno de los principales problemas asociados con la penetración fotovoltaica y las nuevas configuraciones de carga (Gao et al., 2024; Micallef et al., 2024). Ambos estudios coincidieron en que la generación distribuida modificaba los perfiles de tensión y exigía estrategias específicas de regulación. Los resultados también mostraron que la movilidad eléctrica introducía condiciones adicionales de demanda capaces de intensificar las restricciones operativas existentes (Azzopardi & Gabdullin, 2024; Mattos, 2024). La comparación evidenció que el vehículo eléctrico podía adquirir una función dual mediante la tecnología vehículo a red (V2G), al actuar tanto como carga como recurso potencial para la regulación de la red.

La calidad de la energía representó otra condición crítica para la evolución de las instalaciones de baja tensión, especialmente ante la presencia de cargas electrónicas y recursos conectados mediante convertidores (Gissinga et al., 2024; Ishaq & Langella, 2024). Ambos aportes relacionaron las nuevas tecnologías con la aparición o modificación de componentes armónicas en las redes de baja tensión. El desequilibrio constituyó, además, una condición relevante cuando existían cargas o recursos monofásicos distribuidos de manera no uniforme (Micallef et al., 2024; Nour et al., 2023). Por tanto, los resultados indicaron que la modernización tecnológica requería evaluar

la tensión, los armónicos y el desequilibrio junto con los parámetros convencionales de capacidad eléctrica.

La seguridad mantuvo un carácter estructural pese a la incorporación de tecnologías avanzadas en las instalaciones de baja tensión (Kostic et al., 2025; Sobolewski & Lis, 2023). Los resultados comparados indicaron que la generación distribuida modificaba las condiciones bajo las cuales operaban los sistemas de protección, la selectividad y los procedimientos de verificación de las instalaciones (Kostic et al., 2025; Sobolewski & Lis, 2023). Esta situación adquirió especial importancia en las instalaciones prosumidoras, donde los flujos eléctricos podían presentar condiciones diferentes de las previstas para las redes convencionales. En consecuencia, la protección debía responder a configuraciones eléctricas que incorporaban generación local, almacenamiento y nuevas modalidades de conexión.

La eficiencia energética también dependió de la capacidad para conocer con precisión los perfiles de consumo y las condiciones reales de operación (Ramos Milis et al., 2024; Santos et al., 2024). La utilización de sistemas de medición inteligente y monitoreo incrementó la información disponible para evaluar la demanda, los flujos de potencia y el comportamiento de los usuarios. Esta disponibilidad de información permitió superar aproximaciones sustentadas únicamente en demandas estimadas o condiciones nominales. La eficiencia adquirió así una dimensión operacional relacionada con la medición, el diagnóstico, la gestión de cargas y el aprovechamiento de la infraestructura existente.

La digitalización introdujo una transformación adicional mediante herramientas capaces de representar, supervisar y diagnosticar sistemas eléctricos a partir del procesamiento de información

(Heluany & Gkioulos, 2024; Zhi et al., 2024). Los resultados mostraron que las réplicas digitales dinámicas ampliaban las posibilidades de análisis al vincular la información procedente del sistema físico con modelos digitales. Esta capacidad presentó especial utilidad para identificar condiciones anómalas y localizar fallas en redes de baja tensión (Kippke Salomón et al., 2025; Pamulaparthy, 2024). La comparación evidenció que la medición avanzada, las comunicaciones y la representación digital configuraban una transición desde la supervisión convencional hacia una gestión con mayores capacidades de diagnóstico.

En conjunto, los hallazgos indicaron que la evolución de las instalaciones eléctricas de baja tensión no dependía de una tecnología aislada, sino de la interacción entre nuevas cargas, recursos energéticos distribuidos, sistemas de protección, calidad eléctrica, medición y herramientas digitales. Esta interacción modificó los criterios empleados para planificar, verificar, operar y modernizar las instalaciones. Por ello, los resultados respaldaron una concepción integrada en la que la seguridad, el desempeño técnico y la eficiencia energética constituyeron dimensiones complementarias del desarrollo tecnológico.

La principal limitación del análisis correspondió a la heterogeneidad de las fuentes seleccionadas, debido a las diferencias existentes entre los contextos técnicos, las configuraciones de red y los criterios de evaluación considerados en cada estudio. Esta condición restringió la comparación directa entre algunos hallazgos, aunque no impidió identificar tendencias, coincidencias y diferencias relevantes relacionadas con la evolución de las instalaciones eléctricas de baja tensión.

El análisis bibliográfico permitió establecer criterios técnicos, condiciones de seguridad y

estrategias de eficiencia energética aplicables a las instalaciones eléctricas de baja tensión. Los hallazgos evidenciaron que la incorporación de generación fotovoltaica, almacenamiento energético, movilidad eléctrica y medición inteligente modificaba las condiciones de operación y exigía una mayor atención a la regulación de tensión, la calidad eléctrica, la protección y la gestión de la demanda. La comparación documental permitió identificar coincidencias respecto a la necesidad de integrar estos elementos durante la planificación y modernización de las instalaciones. Asimismo, la digitalización fortaleció las capacidades de monitoreo, diagnóstico y supervisión mediante tecnologías como las representaciones digitales dinámicas. En conjunto, estos resultados sustentaron una visión integral orientada hacia instalaciones de baja tensión más seguras, eficientes y técnicamente adaptables.

3.3. Propuesta de sistema inteligente para el diagnóstico y gestión de instalaciones eléctricas de baja tensión

Los resultados de la revisión bibliográfica evidenciaron que la modernización de las instalaciones eléctricas de baja tensión exige considerar de manera integrada aspectos relacionados con el desempeño eléctrico, la seguridad, la eficiencia energética, la calidad del suministro y la incorporación de nuevas tecnologías. La convergencia de generación distribuida, almacenamiento energético, movilidad eléctrica, medición avanzada y herramientas digitales incrementa la cantidad y diversidad de variables que deben considerarse durante la evaluación técnica de estas instalaciones. A partir de estos hallazgos, se formuló una propuesta de desarrollo tecnológico orientada a integrar diferentes capacidades de diagnóstico y gestión dentro de una solución que permita evaluar las

condiciones técnicas, energéticas y operacionales de las instalaciones de baja tensión y generar información útil para apoyar su modernización.

1. Título del desarrollo tecnológico

Sistema inteligente para diagnóstico y gestión de instalaciones eléctricas de baja tensión.

2. Problema o necesidad tecnológica

Las instalaciones eléctricas de baja tensión experimentan una incorporación creciente de generación fotovoltaica, sistemas de almacenamiento energético, vehículos eléctricos y cargas electrónicas, lo que modifica las condiciones tradicionales de demanda, tensión, pérdidas, armónicos, desequilibrios y protección.

La revisión bibliográfica evidenció que la evaluación de estas condiciones se encuentra distribuida entre procedimientos específicos relacionados con la seguridad, la calidad eléctrica, la eficiencia energética, la planificación y la supervisión. Esta fragmentación dificulta obtener una valoración integrada del estado técnico, energético y operacional de una instalación de baja tensión, particularmente cuando convergen recursos energéticos distribuidos y nuevas cargas eléctricas.

3. Fundamento del desarrollo

La evidencia analizada mostró que las instalaciones eléctricas de baja tensión evolucionaron desde configuraciones predominantemente pasivas hacia sistemas caracterizados por una mayor variabilidad, bidireccionalidad y dependencia de dispositivos electrónicos y tecnologías digitales. Esta convergencia fundamenta el desarrollo de una solución capaz de integrar información eléctrica, energética y operacional para apoyar el diagnóstico técnico y la gestión de las instalaciones de baja tensión.

El desarrollo propuesto parte, por tanto, de la necesidad de relacionar dentro de una misma plataforma diferentes variables y condiciones que habitualmente son evaluadas mediante procedimientos independientes. Esta integración permitiría obtener una representación más completa del comportamiento de la instalación y facilitar la identificación de condiciones que puedan requerir intervención, mantenimiento o modernización.

4. Objetivo general

Desarrollar y validar un sistema inteligente para el diagnóstico y la gestión del desempeño técnico, energético y operacional de instalaciones eléctricas de baja tensión.

5. Descripción general de la solución propuesta

Se propone desarrollar una plataforma tecnológica modular de diagnóstico y gestión destinada a integrar información procedente de instalaciones eléctricas de baja tensión y transformarla en indicadores técnicos que apoyen su evaluación.

La solución estará orientada al reconocimiento y evaluación de las siguientes condiciones:

a) Desempeño eléctrico.

b) Calidad del suministro.

c) Utilización de la capacidad instalada.

d) Eficiencia energética.

e) Condiciones de seguridad.

f) Incorporación de recursos energéticos distribuidos.

g) Comportamiento de nuevas cargas.

h) Condiciones operativas anómalas.

El sistema proporcionará información técnica que facilite la identificación, valoración y seguimiento de las condiciones que requieran intervención, mantenimiento, adecuación o mejora. De esta manera, la información obtenida no se limitará al registro de variables eléctricas, sino que servirá como base para apoyar procesos de diagnóstico y gestión técnica.

La configuración específica de los sensores, la arquitectura de adquisición, los modelos matemáticos, los algoritmos de análisis, los criterios de decisión y los mecanismos de actuación no formará parte de la divulgación pública de esta propuesta, debido a que estos elementos deberán integrarse en el expediente técnico reservado del desarrollo.

6. Novedad o diferenciación tecnológica

La diferenciación tecnológica de la propuesta no se fundamenta en la creación aislada de un instrumento de medición o de una aplicación informática, sino en la integración funcional de diferentes capacidades de evaluación dentro de una misma solución.

La propuesta busca integrar el diagnóstico eléctrico, la evaluación energética y la verificación operacional, incorporando capacidades digitales para transformar las mediciones y los registros de funcionamiento en información técnica útil para apoyar la toma de decisiones.

La característica diferenciadora estará determinada, por tanto, por la capacidad de realizar una evaluación integrada del estado de una instalación de baja tensión frente a condiciones eléctricas convencionales y emergentes, en lugar de analizar cada problema mediante procedimientos independientes.

La evolución funcional propuesta comprenderá las siguientes capacidades:

a) Medir las variables eléctricas y energéticas relevantes.

b) Registrar la información obtenida durante la operación.

c) Interpretar las condiciones técnicas identificadas.

d) Diagnosticar situaciones que puedan afectar el desempeño, la seguridad o la eficiencia de la instalación.

e) Generar información técnica que apoye la toma de decisiones.

De esta manera, el sistema evolucionará desde una función centrada principalmente en la medición y el registro hacia una evaluación integrada capaz de interpretar información, identificar condiciones relevantes y apoyar el diagnóstico y la gestión técnica de las instalaciones de baja tensión.

7. Productos tecnológicos esperados

El desarrollo podrá generar los siguientes productos tecnológicos:

a) Prototipo funcional del sistema de diagnóstico.

b) Módulo de adquisición y procesamiento de información eléctrica.

c) Módulo de evaluación del desempeño energético.

d) Módulo de diagnóstico de condiciones operativas.

e) Interfaz de supervisión y reporte técnico.

f) Procedimiento de evaluación de instalaciones de baja tensión.

g) Manual técnico de operación y aplicación.

8. Nivel de madurez tecnológica

El desarrollo tendrá como meta inicial alcanzar un nivel de madurez tecnológica TRL 5 mediante la validación integrada del sistema en condiciones controladas y representativas de instalaciones eléctricas de baja tensión. Para alcanzar esta meta, el proceso comprenderá la conceptualización de la solución, el diseño tecnológico, el desarrollo de sus componentes, la integración funcional, la ejecución de pruebas y la validación tecnológica correspondiente.

Posteriormente, los resultados obtenidos podrán sustentar la evolución hacia niveles superiores de madurez tecnológica mediante procesos de validación y demostración en instalaciones reales o en otros entornos relevantes.

9. Ámbito de aplicación

El desarrollo tendrá aplicación potencial en los siguientes ámbitos:

a) Instalaciones residenciales.

b) Instalaciones comerciales.

c) Instalaciones institucionales.

d) Pequeñas instalaciones productivas.

e) Instalaciones con generación fotovoltaica.

f) Instalaciones con sistemas de almacenamiento energético.

g) Instalaciones con infraestructura para vehículos eléctricos.

h) Laboratorios de electricidad.

i) Actividades de inspección y mantenimiento.

j) Formación tecnológica.

Una aplicación de especial relevancia estará relacionada con el diagnóstico de instalaciones existentes que requieran procesos de modernización. En estos casos, el sistema podrá contribuir a evaluar las condiciones técnicas y energéticas existentes antes de incorporar nuevas tecnologías, como sistemas fotovoltaicos, baterías de almacenamiento o infraestructura de carga para vehículos eléctricos.

Esta aplicación permitirá determinar, a partir de los resultados del diagnóstico, si las condiciones existentes de una instalación resultan compatibles con la modernización prevista o si requieren intervenciones técnicas previas. De esta manera, la propuesta podrá apoyar no solo la supervisión de instalaciones en funcionamiento, sino también los procesos de evaluación asociados con su actualización tecnológica.

10. Estrategia de validación

La estrategia de validación estará orientada a comprobar el funcionamiento integrado de la solución tecnológica. Como mínimo, deberá demostrar las siguientes capacidades:

a) Adquirir información eléctrica y energética de la instalación.

b) Procesar la información obtenida.

c) Identificar condiciones técnicas y operacionales relevantes.

d) Generar información para el diagnóstico de la instalación.

e) Proporcionar información útil para apoyar la gestión técnica.

Los escenarios de validación podrán representar diferentes condiciones de carga, generación distribuida, calidad eléctrica y operación, con el propósito de comprobar la respuesta del sistema ante situaciones representativas de las instalaciones eléctricas de baja tensión.

Los umbrales, parámetros, algoritmos, arquitectura de decisión y criterios específicos de clasificación deberán mantenerse en el expediente técnico reservado del desarrollo. Esta separación permitirá presentar públicamente el alcance y la funcionalidad general de la propuesta sin divulgar los elementos técnicos específicos que puedan constituir parte de su desarrollo tecnológico.

11. Potencial de transferencia

El desarrollo podrá estructurarse como un paquete tecnológico destinado a instituciones educativas, empresas instaladoras, entidades de mantenimiento, centros de investigación y usuarios técnicos que requieran herramientas para el diagnóstico, evaluación y modernización de instalaciones eléctricas de baja tensión.

La transferencia tecnológica podrá comprender los siguientes componentes:

a) Prototipo funcional.

b) Software.

c) Metodología de diagnóstico.

d) Documentación técnica.

e) Capacitación.

f) Asistencia para la implementación.

g) Servicio especializado.

h) Licenciamiento de componentes susceptibles de protección.

Esta estructura permitirá que la tecnología no quede limitada a su utilización experimental o en laboratorios, sino que pueda evolucionar hacia un servicio tecnológico orientado al diagnóstico, evaluación y modernización de instalaciones eléctricas de baja tensión. Asimismo, los resultados de las etapas de validación permitirán determinar las modalidades de transferencia más adecuadas y las posibilidades de adaptación de la solución a diferentes contextos de aplicación.

Referencias

Azzopardi, B., & Gabdullin, Y. (2024). Impacts of electric vehicles charging in low-voltage distribution networks: A case study in Malta. *Energies, 17*(2), 289. https://doi.org/10.3390/en17020289

Gao, X., Zhang, J., Sun, H., Liang, Y., Wei, L., Yan, C., & Xie, Y. (2024). A review of voltage control studies on low voltage distribution networks containing high penetration distributed photovoltaics. *Energies, 17*(13), 3058. https://doi.org/10.3390/en17133058

Gissinga, G., Yang, J., & Meenand, N. (2024). Location optimization of electric vehicle chargers, photovoltaic generation, and vehicle to grid point of connection for minimizing voltage harmonic levels in low voltage power distribution networks. *International Journal of Green Energy, 22*(7), 1224–1244. https://doi.org/10.1080/15435075.2024.2414231

Heluany, J. B., & Gkioulos, V. (2024). A review on digital twins for power generation and distribution. *International Journal of Information Security, 23*, 1171–1195. https://doi.org/10.1007/s10207-023-00784-x

Ishaq, M., & Langella, R. (2024). Aggregated load modelling approach to study impact of heat pumps harmonic distortion on the low voltage distribution network. *Journal of Electrical Systems and Automation, 57*(5), 1497–1502. https://doi.org/10.18280/jesa.570525

Jaskólski, M., Bućko, P., & Czapp, S. (2025). The evolution of low- and medium-voltage distribution system development planning procedures and methods: A review. *Energies, 18*(13), 3461. https://doi.org/10.3390/en18133461

Kippke Salomón, M. A., Carou Álvarez. J. M., Suárez Ramón. L., & Arboleya, P. (2025). Self-diagnostic advanced metering infrastructure based on power-line communication: A study case in Spanish low-voltage distribution networks. *Energies, 18*(7), 1746. https://doi.org/10.3390/en18071746

Kostic, N., Hadziefendic, N., & Kostic, M. (2025). An improved methodology for periodic verifications of low-voltage electrical installations. *Electrical Engineering, 107*, 6985–6996. https://doi.org/10.1007/s00202-024-02904-9

Kotsonias, A., Hadjidemetriou, L., Asprou, M., & Panayiotou, C. G. (2025). Operational challenges and solution approaches for low voltage distribution grids: A review. *Electric Power Systems Research, 239*, 111258. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111258

López, L., López, I., Gomez, C. J., Aranzabal, I., & Eguia, P. (2025). Analysis of impact for PV-BES strategies in low-voltage distribution system. *Electrical Engineering, 107*, 2147–2162. https://doi.org/10.1007/s00202-024-02620-4

Mattos, M. M. (2024). Analysis of voltage control using V2G technology to support low voltage distribution networks. *IET Generation, Transmission & Distribution, 18*(6), 1133–1157. https://doi.org/10.1049/gtd2.13066

Micallef, A., Spiteri, S. C., & Licari, J. (2024). Voltage regulation in low voltage distribution networks with unbalanced penetrations of photovoltaics and battery storage systems. *IET Smart Grid, 7*(3), 264–276. https://doi.org/10.1049/stg2.12155

Ndawula, M. B., Djokic, S. Z., Kisuule, M., Gu, C., & Hernando, G. I. (2024). A novel formulation of low voltage distribution network equivalents for reliability analysis. *Sustainable Energy, Grids and Networks, 39*, 101437. https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101437

Nour, A. M. M., Helal, A. A., El-Saadawi, M. M., & Hatata, A. Y. (2023). Voltage imbalance mitigation in an active distribution network using decentralized current control. *Protection and Control of Modern Power Systems, 8*, 20. https://doi.org/10.1186/s41601-023-00293-y

Pamulaparthy, B. (2024). Hi-Z fault location identification on low voltage distribution systems using IoT-based digital twin model computation. *Digital Twins and Applications, 1*(1), 93–102. https://doi.org/10.1049/dgt2.12009

Pham, T. N., Shah, R., Dao, M. N., Sultanova, N., & Islam, S. (2025). Low and medium voltage distribution network planning with distributed energy resources: A survey. *Electrical Engineering, 107*, 1797–1828. https://doi.org/10.1007/s00202-024-02535-0

Ramos Milis, G., Gay, C., Alvarez-Herault, M.-C., & Caire, R. (2024). Disaggregation model: A novel methodology to estimate customers' profiles in a low-voltage distribution grid equipped with smart meters. *Information, 15*(3), 142. https://doi.org/10.3390/info15030142

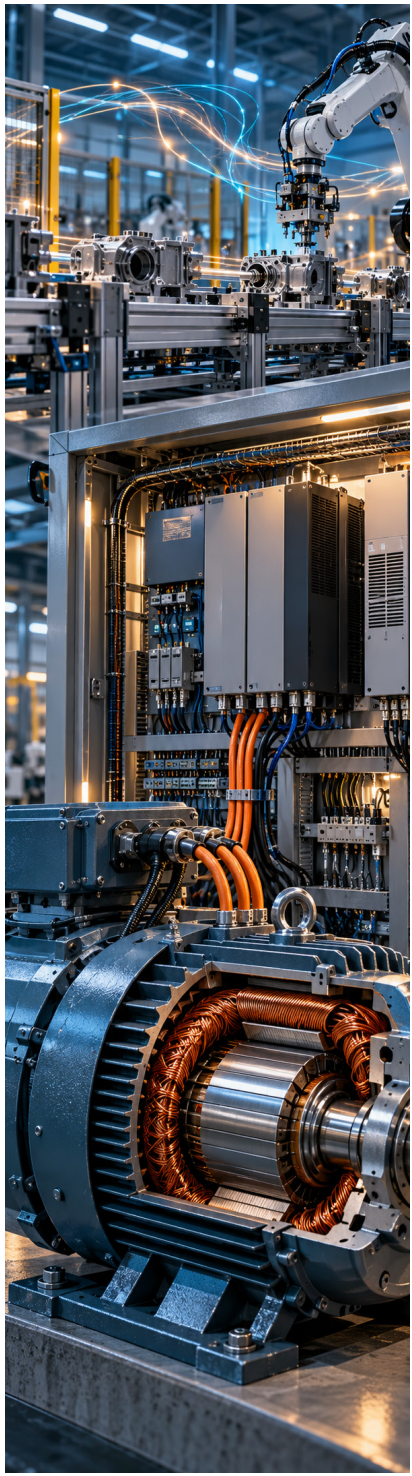
Saini, D. K., Yadav, M., & Pal, N. (2024). Optimal allocation of distributed energy resources to cater the stochastic E-vehicle loading and natural disruption in low voltage distribution grid. *Scientific Reports, 14*, 17057. https://doi.org/10.1038/s41598-024-67927-5

Santos, L., Torres, I., & Barboza, E. (2024). Monitoring the power flow of a low voltage distribution network using public lighting infrastructure. *Electric Power Systems Research, 234*, 110559. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110559

Sobolewski, R. A., & Lis, R. (2023). Protection verification and designing while establishing collective prosumer's low-voltage electrical installation: A case study. *Electric Power Systems Research, 218*, 109185. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109185

Zhang, B., Tang, W., Liang, J., Zhang, L., & Zhao, C. (2024). EV integration-oriented DC conversion of AC low-voltage distribution networks and the associated adaptive control strategy. *IEEE Transactions on Transportation Electrification, 10*(1), 213–223. https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3254372

Zhi, H., Mao, R., Hao, L., Chang, X., Guo, X., & Ji, L. (2024). Digital twin for modern distribution networks by improved state estimation with consideration of bad data identification. *Electronics, 13*(18), 3613. https://doi.org/10.3390/electronics13183613



04.

Máquinas eléctricas y sistemas de control: fundamentos, aplicaciones y tendencias tecnológicas

Omar Mauricio Garcia Castillo

Luis Efren Gómez Tigua

4.1. Evolución de las máquinas eléctricas y los sistemas de control

La electrificación contemporánea incrementó la importancia de las máquinas eléctricas en los sistemas industriales, el transporte y la automatización tecnológica (Lim et al., 2024). Su desempeño depende crecientemente de accionamientos capaces de coordinar la conversión energética, la regulación dinámica y la eficiencia operacional (Monadi et al., 2024; Shahid et al., 2024).

Esta integración transformó progresivamente la relación entre la máquina, el convertidor, el sistema de control y su aplicación, ampliando las exigencias funcionales asociadas con su operación (El Hajji et al., 2023; Li et al., 2024).

En este contexto, las máquinas eléctricas dejaron de analizarse exclusivamente como dispositivos electromecánicos para integrarse en sistemas de accionamiento con mayores capacidades de regulación, supervisión y procesamiento de información (Lim et al., 2024). Las demandas actuales de precisión, eficiencia y respuesta dinámica impulsaron el desarrollo de nuevas estrategias aplicables a diferentes tecnologías de máquinas y condiciones operativas (Monadi et al., 2024; Shahid et al., 2024). En consecuencia, su análisis requiere relacionar los principios electromagnéticos que determinan su funcionamiento con las arquitecturas de accionamiento y las estrategias contemporáneas de control (El Hajji et al., 2023; Li et al., 2024).

Las máquinas de inducción mantienen aplicaciones industriales relevantes, mientras que las máquinas síncronas de imanes permanentes adquirieron una presencia creciente en accionamientos que requieren elevada eficiencia y desempeño dinámico (Mahmood & Gaeid, 2024; Monadi et al., 2024). Esta coexistencia responde a diferencias relacionadas con la eficiencia, la densidad de potencia, la complejidad constructiva, la controlabilidad y los requerimientos específicos de cada aplicación (El Hajji et al., 2023; Mugyema et al., 2024). Paralelamente, las máquinas de reluctancia y otras configuraciones emergentes ampliaron las alternativas disponibles para aplicaciones especializadas (MacRae et al., 2024; Meesala et al., 2023). Los sistemas de control avanzaron desde estrategias convencionales hacia métodos

vectoriales, predictivos, robustos, adaptativos y sustentados en información obtenida durante la operación (Le & Hsieh, 2024; Li et al., 2024). Estas alternativas permitieron abordar problemas asociados con perturbaciones, variaciones paramétricas, rizado de par, restricciones computacionales y eficiencia energética (Meesala et al., 2023; Shahid et al., 2024). Por tanto, las tendencias recientes deben interpretarse considerando conjuntamente las características de cada máquina, la arquitectura de accionamiento y las capacidades proporcionadas por el sistema de control (MacRae et al., 2024; Mahmood & Gaeid, 2024).

La literatura reciente también evidenció la incorporación progresiva de inteligencia computacional, diagnóstico, sensado avanzado y automatización en los accionamientos eléctricos (Choi et al., 2025). Los métodos de aprendizaje automático se utilizaron para el control, la estimación de estados, la supervisión y el diagnóstico, lo que amplió las capacidades tradicionales de estos sistemas (Hsu et al., 2025). A su vez, las técnicas de control sin sensores buscaron reducir la dependencia de sensores físicos, así como los costos y las vulnerabilidades operativas asociados con su utilización (Akrami et al., 2024; Monadi et al., 2024). El control predictivo adquirió relevancia por su capacidad para gestionar restricciones, considerar múltiples objetivos y anticipar el comportamiento dinámico mediante modelos de operación (Li et al., 2024; Zhou et al., 2025). Otras investigaciones incorporaron métodos de optimización y estrategias adaptativas orientadas a mejorar la eficiencia, la regulación y el comportamiento de las máquinas bajo diferentes regímenes de funcionamiento (Hsu et al., 2025; MacRae et al., 2024).

Sin embargo, la diversidad de máquinas, estrategias de control, aplicaciones y criterios de desempeño mantiene fragmentada la interpretación conjunta de los avances registrados en este campo (Choi et al., 2025; Shahid et al., 2024). Los estudios suelen concentrarse en tecnologías o problemas específicos, lo que dificulta establecer relaciones entre las características electromecánicas de las máquinas, las arquitecturas de accionamiento, los métodos de control y las nuevas capacidades de supervisión y diagnóstico (Lim et al., 2024). Esta dispersión evidencia la necesidad de una perspectiva integradora que permita reconocer tanto la permanencia de los principios físicos que sustentan el funcionamiento de las máquinas como las transformaciones introducidas por las tecnologías contemporáneas de control.

En correspondencia con esta problemática, el presente capítulo tiene como objetivo analizar los principios de funcionamiento, las aplicaciones y la evolución tecnológica de las máquinas eléctricas y sus sistemas de control, mediante la integración de evidencia científica reciente sobre accionamientos, estrategias de regulación, estimación de variables, eficiencia, supervisión y diagnóstico, con el propósito de identificar las principales tendencias que caracterizan su incorporación en los sistemas eléctricos modernos.

El estudio correspondió a una revisión bibliográfica de carácter descriptivo, analítico y comparativo. El objeto de análisis comprendió las máquinas eléctricas y los sistemas de control vinculados con su funcionamiento y accionamiento. La revisión abordó los principios de operación, la clasificación, las características técnicas, las estrategias de control, las aplicaciones y la evolución tecnológica. El enfoque descriptivo permitió organizar los

principales conocimientos identificados, el analítico examinó las relaciones entre las características de las máquinas, los accionamientos y los sistemas de control, y el comparativo permitió contrastar las características, ventajas, limitaciones y aplicaciones de las tecnologías documentadas.

La búsqueda documental se delimitó al periodo 2023–2026 y comprendió las bases de datos Scopus, Web of Science y ScienceDirect. La estrategia de búsqueda empleó términos en inglés relacionados con el objeto de estudio, entre ellos electrical machines, electric motor drives, induction motors, synchronous motors, permanent magnet motors, switched reluctance motors, vector control, direct torque control, model predictive control, sensorless control, condition monitoring y fault diagnosis. Los términos se combinaron mediante los operadores booleanos AND y OR, de acuerdo con las relaciones establecidas entre los tipos de máquinas, las estrategias de control y las aplicaciones tecnológicas.

Como criterios de inclusión, se consideraron artículos científicos publicados entre 2023 y 2026 que presentaran información directamente relacionada con máquinas eléctricas, accionamientos, control, supervisión o diagnóstico. Se priorizaron revisiones, estudios del estado del arte y trabajos de síntesis tecnológica que permitieran caracterizar el desarrollo del campo. También se incorporaron investigaciones originales cuando aportaron información relevante sobre estrategias de control, eficiencia, respuesta dinámica, estimación de variables, diagnóstico de fallas o incorporación de tecnologías digitales aplicadas a máquinas eléctricas.

Como criterios de exclusión, se eliminaron las publicaciones duplicadas, los documentos situados fuera del periodo establecido y los trabajos sin

correspondencia directa con el objeto de análisis. Asimismo, se descartaron los estudios centrados exclusivamente en redes eléctricas, electrónica de potencia o algoritmos computacionales cuando no presentaban una aplicación específica en máquinas eléctricas o sus accionamientos. La selección consideró, además, la disponibilidad de información bibliográfica suficiente para verificar la procedencia de cada publicación.

El procedimiento de selección identificó inicialmente 91 documentos. Después de eliminar 6 registros duplicados, permanecieron 85 publicaciones para el cribado. La evaluación de títulos y resúmenes condujo a la exclusión de 31 documentos, por lo que 54 publicaciones pasaron a la etapa de elegibilidad. Posteriormente, la revisión del texto completo determinó la exclusión de 38 publicaciones por incumplimiento de los criterios establecidos. Finalmente, el corpus documental quedó constituido por 16 artículos científicos.

El proceso de selección se documentó mediante el protocolo Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), que permitió estructurar las etapas de identificación, depuración, cribado, elegibilidad e inclusión. Su aplicación proporcionó trazabilidad al proceso de selección documental y permitió establecer de manera sistemática la transición desde los 91 documentos inicialmente identificados hasta los 16 artículos que conformaron el corpus definitivo.

De cada publicación seleccionada se registraron los autores, el año de publicación, el título, la revista, el volumen, el número, las páginas o el identificador del artículo y el DOI. Para el análisis técnico se recopilaron datos relacionados con el tipo de máquina, el principio de funcionamiento, las características operativas, la modalidad

de accionamiento, la estrategia de control, las variables reguladas, los requerimientos de medición y el ámbito de aplicación. La información se organizó en categorías que permitieron establecer relaciones entre las características de las máquinas y las tecnologías empleadas para su control y accionamiento.

El análisis descriptivo permitió caracterizar los principales tipos de máquinas eléctricas y las estrategias utilizadas para regular variables como la velocidad, la corriente, el par y la posición. El análisis analítico examinó las relaciones entre las características de cada máquina, la arquitectura de accionamiento y el método de control empleado. Por su parte, el análisis comparativo consideró la respuesta dinámica, la precisión, la eficiencia energética, la complejidad de implementación, los requerimientos de sensado, la robustez y la aplicabilidad, con el propósito de identificar diferencias, coincidencias, ventajas y limitaciones entre las alternativas tecnológicas documentadas.

Las tendencias tecnológicas se examinaron considerando la incorporación progresiva del control predictivo, la estimación de variables, el control sin sensores mecánicos, el monitoreo de condición, el diagnóstico de fallas, la digitalización y el aprendizaje automático. Estas tecnologías se interpretaron en función de su contribución al desempeño, la supervisión y la capacidad de adaptación de los accionamientos eléctricos. El análisis mantuvo diferenciados los principios físicos que sustentan el funcionamiento de las máquinas de las tecnologías incorporadas posteriormente para mejorar su control, supervisión y operación.

El estudio respetó los principios de integridad científica, transparencia documental y reconocimiento de la autoría intelectual. Debido

a su naturaleza bibliográfica, no involucró la participación de seres humanos, animales, muestras biológicas ni datos personales, por lo que no requirió consentimiento informado ni procedimientos de intervención experimental. Las interpretaciones mantuvieron correspondencia con las publicaciones seleccionadas y se diferenciaron de los resultados originales comunicados por sus autores. Asimismo, la identificación de las fuentes y el registro del proceso de selección garantizaron la trazabilidad documental y metodológica de la síntesis desarrollada.

4.2. Estrategias de control, eficiencia y tendencias tecnológicas en máquinas eléctricas

La revisión documental permitió organizar las publicaciones seleccionadas según el tipo de máquina, el área tecnológica analizada, el principal aporte identificado y sus implicaciones para la evolución de los sistemas de control. Los estudios abarcaron motores de inducción, motores síncronos de imanes permanentes, motores de corriente continua sin escobillas, máquinas de reluctancia y máquinas lineales, así como diferentes tecnologías asociadas con su accionamiento. El análisis permitió identificar avances relacionados con las pérdidas eléctricas, la regulación de velocidad y par, la estimación de variables, el control sin sensores mecánicos, la eficiencia energética, la supervisión y el diagnóstico de fallas. Asimismo, se observaron estrategias basadas en control directo de par, modo deslizante, control predictivo y optimización computacional, aplicadas en ámbitos como la movilidad eléctrica, los servosistemas, el almacenamiento energético y los sistemas industriales. Los principales resultados de esta organización se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Síntesis de los aportes tecnológicos sobre máquinas eléctricas y sistemas de control.

Referencia	Área tecnológica analizada	Principal aporte identificado	Contribución al objetivo del capítulo	Implicación tecnológica
Akrami et al. (2024)	Control de motores BLDC sin sensores mecánicos	Revisó métodos para estimar posición y velocidad del rotor mediante variables eléctricas y algoritmos de estimación	Permitió comprender la evolución del control hacia accionamientos con menor dependencia de sensores mecánicos	Favorece accionamientos más compactos, económicos y con menores requerimientos de mantenimiento
Choi et al. (2025)	Diagnóstico de fallas en motores de inducción	Desarrolló y analizó un algoritmo para detectar y amplificar características asociadas con barras rotóricas defectuosas	Incorporó el diagnóstico de condición como componente de la evolución tecnológica del control y supervisión de máquinas	Permite avanzar desde el control operativo hacia sistemas capaces de identificar deterioros durante el funcionamiento
El Hajji et al. (2023)	Pérdidas eléctricas en devanados	Comparó modelos para estimar pérdidas de corriente alterna en devanados de máquinas eléctricas	Relacionó las características constructivas y electromagnéticas con el desempeño energético de las máquinas	Proporciona criterios para mejorar diseño, modelado térmico y eficiencia de máquinas eléctricas

Gao et al. (2025)	Accionamientos alimentados por inversores	Propuso un sistema de accionamiento con funciones para reducir tensión de modo común y velocidad de variación de sobretensiones en los devanados	Evidenció la importancia del inversor y su interacción con la máquina dentro del sistema de accionamiento	Orienta hacia arquitecturas de accionamiento con mayor protección eléctrica y confiabilidad del aislamiento
Hsu et al. (2025)	Control de corriente en servomotores	Desarrolló un método automático de ajuste del ancho de banda considerando los efectos del retardo temporal	Mostró cómo la optimización de parámetros de control puede mejorar la respuesta de los accionamientos servo	Favorece sistemas de control con ajuste automático y mejor desempeño dinámico frente a retardos
Le & Hsieh (2024)	Control por modo deslizante de motores síncronos de imanes permanentes	Propuso una estrategia de control de lazo único basada en modo deslizante para accionamientos MSIP	Amplió la comparación de estrategias de control aplicables a máquinas síncronas de imanes permanentes	Contribuye al desarrollo de controles robustos frente a perturbaciones y variaciones de operación
Li et al. (2024)	Control predictivo de motores de corriente alterna	Revisó estrategias de control predictivo aplicadas a accionamientos de motores de corriente alterna	Permitió reconocer el control predictivo como una etapa avanzada en la evolución de los accionamientos eléctricos	Favorece estrategias capaces de anticipar estados futuros y optimizar simultáneamente variables de operación

Lim et al. (2024)	Técnicas de accionamiento eléctrico e inteligencia de accionamientos	Analizó estrategias orientadas a incrementar prestaciones de potencia e incorporar capacidades inteligentes en los accionamientos	Permitió integrar la evolución del accionamiento con la incorporación progresiva de funciones inteligentes	Refuerza la transición hacia accionamientos capaces de optimizar su funcionamiento y responder a condiciones variables
MacRae et al. (2024)	Control de par en motores de reluctancia conmutada	Aplicó algoritmos genéticos para optimizar el control de par y mejorar la eficiencia en un intervalo de velocidades	Demostró la aplicación de métodos de optimización computacional a máquinas con características de control particulares	Favorece la adaptación de parámetros de operación para incrementar eficiencia y desempeño
Mahmood & Gaeid (2024)	Control de motores de inducción	Revisó y evaluó el control de motores de inducción mediante convertidores de mayor nivel	Aportó elementos para comprender la relación entre arquitectura de conversión y comportamiento del motor	Permite mejorar las prestaciones de motores de inducción mediante configuraciones avanzadas de conversión y control
Meesala et al. (2023)	Control directo de par en motores síncronos de imanes permanentes	Desarrolló una estrategia mejorada de control directo de par para un accionamiento MSIP de superficie	Permitió identificar la evolución de técnicas de control orientadas a mejorar respuesta y regulación del par	Contribuye a accionamientos con mayor capacidad de respuesta dinámica y regulación electromecánica

Monadi et al. (2024)	Control de velocidad de motores MSIP para vehículos eléctricos	Comparó técnicas de control de velocidad aplicadas a MSIP dentro de aplicaciones de movilidad eléctrica	Vinculó la evolución del control de máquinas con una aplicación tecnológica de alta demanda energética	Refuerza el papel de los MSIP y sus estrategias de control en sistemas de movilidad eléctrica eficiente
Mugyema et al. (2024)	Tecnologías de accionamiento para máquinas eléctricas lineales	Comparó desempeño y costos de diferentes tecnologías de accionamiento para almacenamiento gravitacional de energía	Amplió el análisis hacia máquinas eléctricas lineales y evidenció que la selección tecnológica depende de desempeño y costo	Favorece la evaluación multicriterio de máquinas y accionamientos según la aplicación específica
Shahid et al. (2024)	Control predictivo eficiente de accionamientos de corriente alterna	Analizó estrategias de control predictivo orientadas a mejorar la eficiencia energética de accionamientos de corriente alterna	Relacionó directamente la evolución del control con el uso eficiente de la energía	Impulsa controles capaces de considerar simultáneamente desempeño dinámico y consumo energético
Zhou et al. (2025)	Control predictivo sin modelo de accionamientos	Revisó estrategias predictivas que reducen la dependencia de modelos matemáticos detallados de la máquina	Mostró una tendencia hacia estrategias de control con menor dependencia de parámetros y modelos convencionales	Facilita controles más adaptables ante incertidumbres, variaciones paramétricas y condiciones operativas cambiantes

La evidencia mostró que la evolución tecnológica no se produjo únicamente en las máquinas eléctricas, sino también en la integración entre estas, los accionamientos, los sistemas de medición y el control. Esta tendencia coincidió con Lim et al. (2024), quienes caracterizaron la evolución de los accionamientos hacia mayores capacidades de potencia e inteligencia. De manera complementaria, El Hajji et al. (2023) mostraron que el desempeño de las máquinas dependía también de fenómenos electromagnéticos asociados con sus devanados. Por tanto, los resultados reflejaron una concepción tecnológica integrada, en la que las características físicas y electromagnéticas de la máquina se relacionaron directamente con las estrategias de accionamiento y regulación.

La revisión mostró que las estrategias de control evolucionaron desde la regulación convencional hacia métodos con mayores capacidades para responder dinámicamente ante perturbaciones, restricciones y variaciones paramétricas. Meesala et al. (2023) desarrollaron una estrategia mejorada de control directo de par para motores síncronos de imanes permanentes, orientada a reducir algunas de las limitaciones del control directo de par convencional. En otra línea, Le y Hsieh (2024) emplearon el control por modo deslizante para obtener una regulación robusta en accionamientos de motores síncronos de imanes permanentes. La comparación entre ambos estudios indicó que el desarrollo de los sistemas de control priorizó tanto la respuesta dinámica como la robustez operativa, aunque mediante principios de regulación diferentes.

El control predictivo representó una de las tendencias tecnológicas más definidas entre los estudios analizados. Li et al. (2024) organizaron las estrategias predictivas para accionamientos

de corriente alterna considerando aspectos como la reducción del rizado, la simplificación algorítmica, la selección de factores de ponderación y la robustez paramétrica. Shahid et al. (2024) coincidieron en señalar el creciente interés por el control predictivo de corriente y de par para mejorar la eficiencia energética, aunque identificaron la complejidad computacional como una limitación para su expansión industrial. En consecuencia, los resultados mostraron una transición hacia sistemas de control con mayor capacidad de anticipación y optimización, cuyo desarrollo permaneció condicionado por los requerimientos computacionales y las exigencias de implementación.

La incorporación de métodos con menor dependencia de modelos matemáticos constituyó otra tendencia identificada. Zhou et al. (2025) señalaron que la dependencia de modelos precisos podía limitar la aplicación práctica del control predictivo y, a partir de esta problemática, sistematizaron estrategias de control predictivo sin modelo. Akrami et al. (2024), desde otra perspectiva, revisaron métodos de control sin sensores mecánicos para motores de corriente continua sin escobillas, orientados a estimar la posición y la velocidad del rotor mediante variables eléctricas y algoritmos de estimación. Ambos enfoques redujeron determinadas dependencias presentes en los accionamientos convencionales, aunque actuaron sobre problemas diferentes: el primero sobre la necesidad de disponer de modelos matemáticos precisos y el segundo sobre la medición directa de variables mecánicas. Esta convergencia permitió reconocer la estimación y la reducción de dependencias instrumentales o matemáticas como tendencias relevantes en el desarrollo de los sistemas de control.

Los resultados también mostraron que la eficiencia dejó de estar relacionada únicamente con el diseño de la máquina para vincularse estrechamente con las características del accionamiento y la estrategia de control. El Hajji et al. (2023) identificaron pérdidas asociadas con los efectos de piel y proximidad, así como con las corrientes circulantes en los devanados, mientras que Shahid et al. (2024) situaron la eficiencia energética entre los principales objetivos del control predictivo. La relación entre ambos aportes permitió reconocer dos niveles complementarios de intervención tecnológica: uno asociado con el comportamiento electromagnético y constructivo de la máquina y otro relacionado con la forma en que esta es controlada durante su funcionamiento. De este modo, la eficiencia se configuró como un criterio transversal que vinculó el diseño electromagnético con las estrategias de operación y control.

En cuanto a las aplicaciones, los resultados evidenciaron relaciones diferenciadas entre determinados tipos de máquinas y los requerimientos de cada sector tecnológico. Monadi et al. (2024) identificaron los motores síncronos de imanes permanentes como una alternativa relevante para los vehículos eléctricos, vinculando su utilización con las exigencias de velocidad, eficiencia y respuesta dinámica. Mugyema et al. (2024), en cambio, compararon tecnologías de accionamiento para máquinas eléctricas lineales destinadas al almacenamiento gravitacional de energía. Estos resultados mostraron que la selección de una máquina y de su accionamiento no respondió a un criterio único, sino a las exigencias funcionales, energéticas y operativas de cada aplicación. Esta diversidad reforzó la necesidad de interpretar conjuntamente las características de la máquina, el sistema de control y el contexto tecnológico en el que se produce su utilización.

La incorporación de funciones de supervisión y diagnóstico amplió, además, las capacidades tradicionales de los sistemas de accionamiento. Choi et al. (2025) desarrollaron un procedimiento para el diagnóstico de barras rotóricas defectuosas en accionamientos de motores de inducción, mientras que otros estudios incluidos en la revisión abordaron funciones de estimación, monitoreo y ajuste automático. En paralelo, Hsu et al. (2025) analizaron el efecto de los retardos temporales sobre el control de corriente de servomotores mediante un procedimiento automático de ajuste del ancho de banda. Estas contribuciones evidenciaron una transición hacia arquitecturas capaces no solo de regular variables de funcionamiento, sino también de obtener información sobre el estado operativo del sistema, identificar determinadas condiciones y ajustar parámetros de control.

En conjunto, la evidencia revisada permitió identificar una trayectoria caracterizada por la integración progresiva de la conversión electromecánica, el accionamiento electrónico, el control avanzado, la estimación, la optimización y el diagnóstico. Esta trayectoria fue consistente con Lim et al. (2024), quienes relacionaron el desarrollo de los accionamientos con el incremento de sus prestaciones y la incorporación de capacidades inteligentes. Asimismo, coincidió con Zhou et al. (2025), quienes identificaron la reducción de la dependencia de modelos como una de las direcciones recientes del control predictivo. La integración de estos resultados permitió establecer relaciones entre transformaciones que, aunque fueron abordadas mediante diferentes tipos de máquinas, métodos de control y aplicaciones, convergieron en el desarrollo de accionamientos con mayores capacidades de regulación, adaptación y supervisión.

El análisis descriptivo, analítico y comparativo permitió diferenciar las características propias de cada máquina de las tecnologías incorporadas para mejorar su funcionamiento. La evidencia se examinó a partir de las relaciones entre el tipo de máquina, la estrategia de control, la aplicación y la tendencia tecnológica identificada. Los resultados mostraron que las innovaciones recientes no sustituyeron los principios electromagnéticos que sustentan el funcionamiento de las máquinas eléctricas, sino que incorporaron sobre ellos nuevas capacidades de regulación, estimación, supervisión, optimización y diagnóstico. En este sentido, las máquinas eléctricas y sus sistemas de control conformaron un campo tecnológico crecientemente integrado, cuyo desarrollo respondió a mayores exigencias de eficiencia, precisión, confiabilidad y adaptación a diferentes aplicaciones.

La principal limitación del análisis correspondió a la heterogeneidad temática y metodológica de las publicaciones seleccionadas, debido a las diferencias entre los tipos de máquinas, las estrategias de control, las condiciones de operación y los criterios de desempeño considerados en cada investigación. Esta heterogeneidad restringió la comparación directa entre algunos resultados. No obstante, permitió identificar tendencias convergentes relacionadas con la integración tecnológica, la estimación de variables, la optimización, la eficiencia energética, la supervisión y el diagnóstico en los sistemas de accionamiento eléctrico.

La revisión bibliográfica permitió analizar los principios de funcionamiento, las aplicaciones y las transformaciones recientes de las máquinas eléctricas y sus sistemas de control, evidenciando una transición desde el estudio individual de la

máquina hacia su integración con accionamientos, sistemas de estimación, optimización, supervisión y diagnóstico. Los resultados mostraron que los motores de inducción, los motores síncronos de imanes permanentes, los motores de corriente continua sin escobillas, las máquinas de reluctancia y las máquinas lineales conservaron ámbitos de aplicación diferenciados en función de sus características operativas y de los requerimientos funcionales y energéticos de cada contexto.

Las estrategias de control evolucionaron hacia métodos con mayores capacidades de regulación y adaptación ante variaciones en las condiciones de operación. En este proceso destacaron el control directo de par, el control por modo deslizante y el control predictivo, junto con técnicas orientadas a mejorar la respuesta dinámica, la robustez y la eficiencia. Asimismo, la estimación de variables y el control sin sensores mecánicos permitieron reducir determinadas dependencias instrumentales y de modelado, mientras que la incorporación de funciones de supervisión y diagnóstico amplió las capacidades de los accionamientos para conocer su estado operativo y favorecer una operación más confiable.

En conjunto, la evidencia analizada mostró que el desarrollo contemporáneo de las máquinas eléctricas no depende exclusivamente de modificaciones en su configuración electromagnética, sino de la integración entre la máquina, el accionamiento, la medición y el sistema de control. Esta convergencia favoreció el desarrollo de sistemas con mayores capacidades de eficiencia, adaptación, supervisión e integración digital, aplicables tanto en entornos industriales consolidados como en ámbitos emergentes relacionados con la movilidad eléctrica, el almacenamiento energético y la automatización.

4.3. Propuesta de sistema inteligente para supervisión, control y diagnóstico de máquinas eléctricas y accionamientos

A partir de las tendencias identificadas en la revisión, se plantea una propuesta de desarrollo tecnológico orientada a integrar las principales capacidades que caracterizan los sistemas contemporáneos de accionamiento eléctrico. La convergencia entre control avanzado, estimación de variables, optimización, supervisión y diagnóstico ofrece la posibilidad de concebir una arquitectura capaz de abordar de manera conjunta el desempeño de la máquina y su accionamiento. Sobre esta base, la propuesta que se presenta a continuación traslada los resultados del análisis bibliográfico hacia una solución susceptible de diseño, validación y posterior transferencia tecnológica, cuyos componentes principales se describen en los apartados siguientes.

1. Título del desarrollo tecnológico

Sistema inteligente para supervisión, control y diagnóstico de máquinas eléctricas y accionamientos

2. Problema o necesidad tecnológica

Las máquinas eléctricas utilizadas en aplicaciones industriales y de automatización incorporaron progresivamente accionamientos electrónicos, estrategias avanzadas de control, sistemas de estimación y herramientas digitales orientadas a mejorar su eficiencia, respuesta dinámica y confiabilidad. La revisión evidenció que estas funciones se desarrollaron mediante soluciones diferenciadas para la regulación de velocidad y par, la estimación de variables, la reducción de pérdidas, la optimización de parámetros, la supervisión y el diagnóstico de fallas. Sin embargo, el tratamiento separado de estas capacidades

dificulta disponer de una solución que permita evaluar conjuntamente el comportamiento de la máquina, el accionamiento, la estrategia de control y sus condiciones de operación.

A partir de esta necesidad, se propone desarrollar una solución tecnológica que integre control, estimación, optimización, supervisión y diagnóstico en una arquitectura común para máquinas eléctricas y sus accionamientos. Esta integración permitiría relacionar las variables electromecánicas con el comportamiento del sistema de control y las condiciones operativas, proporcionando una visión más completa del desempeño del conjunto.

3. Fundamento del desarrollo

La evidencia analizada mostró una transición desde sistemas de accionamiento centrados principalmente en la regulación de variables eléctricas y mecánicas hacia arquitecturas con capacidades de estimación de posición y velocidad, control predictivo, optimización computacional, supervisión y diagnóstico. Los estudios sobre motores de inducción, motores síncronos de imanes permanentes, motores de corriente continua sin escobillas y máquinas de reluctancia evidenciaron que las exigencias de eficiencia, respuesta dinámica y confiabilidad impulsaron una integración progresiva entre la máquina eléctrica, el accionamiento y las tecnologías de control.

Esta convergencia sustenta la propuesta de una plataforma tecnológica capaz de adquirir y procesar información sobre el funcionamiento del conjunto máquina-accionamiento y transformarla en indicadores útiles para la regulación, la evaluación del desempeño, la identificación de condiciones anómalas y el diagnóstico operativo. De esta manera, la propuesta traslada las tendencias identificadas en la revisión hacia una arquitectura

susceptible de desarrollo, integración y validación experimental.

4. Objetivo general

Desarrollar y validar un sistema inteligente para la supervisión, el control y el diagnóstico del desempeño operativo de máquinas eléctricas y sus accionamientos.

5. Descripción general de la solución propuesta

Se propone desarrollar una plataforma tecnológica modular destinada a integrar información procedente de máquinas eléctricas y sus accionamientos, procesarla mediante estrategias de control, estimación y análisis, y transformarla en información técnica para apoyar la regulación y la evaluación de su funcionamiento. La solución estará orientada a reconocer y evaluar las siguientes condiciones:

a) Desempeño electromecánico.

b) Regulación de velocidad y par.

c) Eficiencia energética.

d) Comportamiento dinámico.

e) Estimación de variables de funcionamiento.

f) Condiciones de operación del accionamiento.

g) Variaciones paramétricas.

h) Condiciones operativas anómalas.

i) Diagnóstico de fallas.

j) Necesidades de ajuste u optimización del control.

La arquitectura propuesta podrá adaptarse a diferentes tipos de máquinas de acuerdo con la

aplicación, particularmente motores de inducción, motores síncronos de imanes permanentes y motores de corriente continua sin escobillas, sin limitar su utilización a estas tecnologías. El sistema proporcionará información técnica destinada a facilitar la identificación, evaluación, regulación y seguimiento de condiciones que requieran ajuste, mantenimiento u optimización.

La configuración específica de los sensores, la arquitectura de adquisición, los modelos matemáticos, los algoritmos de control, los métodos de estimación, los criterios de decisión y los mecanismos de actuación no formará parte de la divulgación pública de la propuesta cuando estos elementos constituyan conocimiento tecnológico susceptible de protección.

6. Novedad o diferenciación tecnológica

La diferenciación tecnológica de la propuesta no se sustentará en la creación aislada de un controlador, un algoritmo de diagnóstico o una plataforma de supervisión. Su orientación consistirá en integrar, dentro de una misma arquitectura, las funciones de control de la máquina, estimación de variables, optimización del funcionamiento, supervisión y diagnóstico, relacionando las capacidades del accionamiento con las características electromecánicas de la máquina.

La característica diferenciadora será, por tanto, la evaluación conjunta del comportamiento de la máquina y su accionamiento frente a diferentes condiciones operativas, en lugar de abordar separadamente el control, la eficiencia, la supervisión y el diagnóstico. Desde esta perspectiva, la solución evolucionará desde una arquitectura convencional centrada principalmente en la medición y el control hacia un sistema capaz

de: a) adquirir variables operativas; b) estimar variables no medidas directamente; c) regular el funcionamiento; d) optimizar determinados parámetros de operación; e) supervisar el estado del conjunto; f) identificar condiciones anómalas y apoyar su diagnóstico; y g) proporcionar información para la toma de decisiones técnicas.

Esta integración constituye la principal orientación tecnológica derivada de los resultados de la revisión.

7. Productos tecnológicos esperados

El desarrollo podrá generar los siguientes productos tecnológicos:

a) Prototipo funcional del sistema inteligente de supervisión, control y diagnóstico.

b) Módulo de adquisición y procesamiento de variables de la máquina y el accionamiento.

c) Módulo de control y regulación de velocidad y par.

d) Módulo de estimación de variables operativas.

e) Módulo de evaluación de eficiencia y desempeño.

f) Módulo de supervisión y diagnóstico de condiciones anómalas.

g) Interfaz de supervisión y generación de reportes técnicos.

h) Procedimiento de evaluación y diagnóstico de máquinas eléctricas y accionamientos.

i) Manual técnico de operación, aplicación y mantenimiento.

8. Nivel de madurez tecnológica

La meta inicial será alcanzar un nivel de madurez tecnológica TRL 5 mediante la validación integrada del sistema en condiciones controladas y representativas de la operación de máquinas eléctricas y accionamientos. Para ello, el desarrollo comprenderá sucesivamente la conceptualización de la solución, el diseño de la arquitectura, el desarrollo de sus componentes, la integración de los módulos, la realización de pruebas funcionales y la validación tecnológica en un entorno representativo.

Una vez alcanzado este nivel, el sistema podrá evolucionar hacia su evaluación en condiciones operativas reales y, posteriormente, hacia niveles superiores de madurez tecnológica.

9. Ámbito de aplicación

El desarrollo tendrá aplicación potencial en los siguientes ámbitos:

a) Automatización industrial.

b) Sistemas de accionamiento eléctrico.

c) Plantas y procesos industriales.

d) Sistemas de bombeo y ventilación.

e) Servosistemas.

f) Movilidad eléctrica.

g) Sistemas de generación y conversión de energía.

h) Sistemas de almacenamiento energético.

i) Laboratorios de máquinas eléctricas.

j) Actividades de mantenimiento predictivo y diagnóstico.

k) Instituciones de formación tecnológica y universitaria.

Una aplicación de especial interés corresponderá al diagnóstico y la optimización de accionamientos eléctricos existentes sometidos a procesos de modernización. Antes de sustituir un sistema convencional por un accionamiento con capacidades avanzadas de control, la solución propuesta podría contribuir a determinar las condiciones de operación de la máquina, identificar necesidades de regulación, estimar variables relevantes y reconocer posibles condiciones anómalas.

Esta aplicación aportaría valor práctico al desarrollo al permitir que las decisiones de modernización tecnológica consideren el estado operativo de la máquina y las necesidades reales del sistema, en lugar de sustentarse únicamente en la sustitución del equipamiento existente.

10. Estrategia de validación

La estrategia de validación deberá comprobar el funcionamiento integrado de los diferentes componentes de la solución. Para ello, las pruebas deberán verificar la capacidad del sistema para: a) adquirir información procedente de la máquina y el accionamiento; b) procesar las variables registradas; c) estimar variables de funcionamiento; d) regular las variables definidas; e) identificar condiciones operativas relevantes o anómalas; f) generar información para el diagnóstico; y g) proporcionar resultados útiles para la gestión técnica del sistema.

Los escenarios de validación podrán representar diferentes condiciones de carga, velocidad y par, así como variaciones paramétricas, perturbaciones y estados operativos de las máquinas eléctricas.

La evaluación considerará, según corresponda, la capacidad de regulación, la estabilidad operativa, la respuesta dinámica, la eficiencia energética, la precisión de las variables estimadas y la capacidad para identificar condiciones anómalas.

Los parámetros específicos, los algoritmos, la arquitectura de decisión, los criterios de clasificación y las configuraciones de control deberán mantenerse en el expediente técnico reservado cuando constituyan elementos del conocimiento tecnológico susceptible de protección.

11. Potencial de transferencia

El desarrollo podrá estructurarse como un paquete tecnológico para la supervisión, el control y el diagnóstico de máquinas eléctricas y accionamientos, destinado a instituciones educativas, empresas industriales, fabricantes e integradores de accionamientos, empresas de mantenimiento y centros de investigación.

La transferencia tecnológica podrá comprender los siguientes componentes:

a) Prototipo funcional.

b) Software de supervisión y diagnóstico.

c) Módulos de control y estimación.

d) Metodología de evaluación.

e) Documentación técnica.

f) Capacitación especializada.

g) Asistencia para la implementación.

h) Servicio tecnológico de diagnóstico y optimización.

i) Licenciamiento de componentes susceptibles de protección.

De esta manera, la propuesta no quedará limitada al desarrollo de un sistema experimental, sino que podrá evolucionar hacia un servicio tecnológico especializado para la modernización, supervisión, optimización y diagnóstico de máquinas eléctricas y accionamientos. Su valor tecnológico radicará en articular las principales tendencias identificadas en la revisión, particularmente el control avanzado, la estimación de variables, la eficiencia energética, la optimización, la supervisión y el diagnóstico, dentro de una solución integrada con posibilidades de validación, protección y transferencia.

Referencias

Akrami, M., Jamshidpour, E., Nahid, M. B., Pierfederici, S., & Frick, V. (2024). Sensorless control methods for BLDC motor drives: A review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification, 11*(1), 135–152. https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3387371

Choi, J., Kim, S. H., Lee, W., & Lee, J. S. (2025). Rapid control prototyping and analysis of a fault diagnosis and amplifying algorithm for broken rotor bar induction motor drives. *IEEE Access, 13*, 19064–19074. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3532990

El Hajji, T., Hlioui, S., Louf, F., Gabsi, M., Belahcen, A., Mermaz, R. G., & Belhadi, M. (2023). AC losses in windings: Review and comparison of models with application in electric machines. *IEEE Access, 12*, 1552–1569. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3345014

Gao, B., Yuan, S., Cao, B., Liu, K., & Wu, G. (2025). Novel inverter-fed motor drive system with common-mode voltage suppression and end-surge slew rate suppression function. *High Voltage, 10*(6), 1474–1485. https://doi.org/10.1049/hve2.70098

Hsu, C. J., Zhuo, Y. C., Qiu, Z. H., & Lai, Y. S. (2025). An auto bandwidth boost tuning method of current control for servo motor drives considering time delay. *IEEE Access, 13*, 160103–160124. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3609303

Le, T. L., & Hsieh, M. F. (2024). A sliding mode-based single-loop control strategy for permanent magnet synchronous motor drives. *IET Power Electronics, 17*(1), 78–91. https://doi.org/10.1049/pel2.12616

Li, C., Meng, Q., & Shi, T. (2024). A review on model predictive control strategies for AC motor drives. *IET Electric Power Applications, 18*(11), 1584–1604. https://doi.org/10.1049/elp2.12510

Lim, G. C., Shim, J., & Ha, J. I. (2024). Review of electric drive techniques: Power enhancement and drive intelligence. *IEEJ Journal of Industry Applications, 13*(1), 1–7. https://doi.org/10.1541/ieejjia.23003141

MacRae, E., Abdel, A. A., Ahmed, K., Pollock, R., & Williams, B. W. (2024). Genetic algorithm-based approach for torque control and increased efficiency across an optimised speed range in switched reluctance drives. *IET Electric Power Applications, 18*(12), 1818–1832. https://doi.org/10.1049/elp2.12526

Mahmood, A., & Gaeid, K. (2024). Review and case study on control of induction motor using high-level converter. *Anbar Journal of Engineering Sciences, 15*(1), 41–53. https://doi.org/10.37649/aengs.2024.146517.1071

Meesala, R. E. K., Udumula, R. R., Nizami, T. K., & Hosseinpour, A. (2023). Development of enhanced direct torque control for surface-mounted permanent magnet synchronous motor drive operation. *IET Power Electronics, 16*(11), 1814–1827. https://doi.org/10.1049/pel2.12504

Monadi, M., Nabipour, M., Akbari, B. F., & Pouresmaeil, E. (2024). Speed control techniques for permanent magnet synchronous motors in electric vehicle applications toward sustainable energy mobility. *IEEE Access, 12*, 119615–119632. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3450199

Mugyema, M., Kamper, M., Wang, R. J., & Sebitosi, A. (2024). Performance and cost comparison of drive technologies for a linear electric machine gravity energy storage system. *IEEE Access, 12*, 46953–46966. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3383161

Shahid, M. B., Jin, W., Abbasi, M. A., Husain, A. R. B., Munir, H. M., Hassan, M., Flah, A., Souissi, A. S. E., & Alghamdi, T. A. H. (2024). Model predictive control for energy efficient AC motor drives: An overview. *IET Electric Power Applications, 18*(12), 1894–1920. https://doi.org/10.1049/elp2.12517

Zhou, C., Zhang, Y., & Yang, H. (2025). Model-free predictive control of motor drives: A review. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 9*(1), 76–90. https://doi.org/10.30941/CESTEMS.2025.00002



05.

Generación eléctrica mediante energías renovables: tecnologías, integración y almacenamiento

Cristhian Dalton Lino Tigua

Elvis Alberto Muñiz Indio

5.1. Tecnologías de generación renovable y transformación de los sistemas eléctricos

La transición energética está transformando la generación eléctrica mediante la incorporación de fuentes renovables, la innovación tecnológica y nuevas estrategias de planificación (Kyei et al., 2025; Yu et al., 2023). Este proceso diversifica las alternativas tecnológicas disponibles y exige configuraciones capaces de responder a criterios técnicos, económicos y ambientales (Gupta & Bhargava, 2024; Mohapatra & Dash, 2024).

La generación solar incorpora estrategias destinadas a maximizar la conversión energética bajo condiciones variables de irradiancia y temperatura (Ghribi et al., 2024; Liu et al., 2024). Por su parte, la generación eólica requiere sistemas de conversión y control capaces de mantener un desempeño eficiente ante las variaciones del recurso disponible (Gupta & Bhargava, 2024; Mohapatra & Dash, 2024). Esta diversificación amplía las posibilidades de generación, pero también introduce diferencias relacionadas con la disponibilidad, la controlabilidad y el comportamiento temporal de las fuentes (Liu et al., 2024; Yu et al., 2023). En consecuencia, la generación renovable constituye un campo tecnológico en el que convergen la conversión energética, la optimización, el control y la integración sistémica (Ghribi et al., 2024; Kyei et al., 2025).

La creciente incorporación de fuentes renovables modifica las condiciones operativas de las redes eléctricas e incrementa sus requerimientos de estabilidad (Kumar et al., 2025; Varhegyi & Nour, 2025). La variabilidad de la generación puede aumentar las exigencias relacionadas con la regulación de frecuencia y tensión, así como con la respuesta dinámica del sistema eléctrico. En este contexto, las tecnologías de mejora de redes permiten aprovechar la infraestructura existente y reducir determinadas restricciones asociadas con la congestión y la incorporación de nueva capacidad renovable (Bai et al., 2024; Su et al., 2025). Paralelamente, la gestión coordinada de los recursos distribuidos requiere modelos capaces de representar conjuntamente la generación, el almacenamiento, la demanda y las restricciones operativas (Jiang et al., 2024; Preeti & Karthikeyan, 2024).

Los sistemas híbridos permiten articular diferentes fuentes y dispositivos mediante estrategias de conversión, control y despacho energético (Gupta & Bhargava, 2024). Por ello, la integración renovable requiere superar una perspectiva centrada

exclusivamente en la generación individual de electricidad y considerar las interacciones entre los diferentes componentes del sistema (Bai et al., 2024; Varhegyi & Nour, 2025). En este escenario, el almacenamiento energético adquiere especial relevancia al compensar temporalmente los desequilibrios entre la generación renovable, la demanda y la capacidad de la red (Sutikno et al., 2025). Sus aplicaciones comprenden el desplazamiento temporal de energía, la regulación, el respaldo y la prestación de servicios asociados con la estabilidad del sistema eléctrico (Ashfaq et al., 2024).

La digitalización amplía estas capacidades mediante infraestructuras inteligentes orientadas a la coordinación de recursos, la respuesta de la demanda y la gestión energética (Khan et al., 2024; Zhang et al., 2024). Sin embargo, persisten diferencias tecnológicas relacionadas con la escalabilidad, la flexibilidad, el control, el almacenamiento y los requerimientos de integración eléctrica (Fernandez et al., 2024). Esta heterogeneidad dificulta establecer una interpretación conjunta de las relaciones entre las tecnologías de generación renovable, las redes eléctricas y las alternativas de almacenamiento energético (Zhang et al., 2024).

En este contexto, el problema central radica en determinar cómo pueden analizarse conjuntamente estas tecnologías a partir de sus funciones, complementariedades y restricciones sistémicas (Khan et al., 2024). El objeto de estudio comprende, por tanto, las tecnologías de generación renovable, sus mecanismos de integración al sistema eléctrico y las alternativas contemporáneas de almacenamiento energético. El análisis se delimita a la producción científica publicada entre 2023 y 2026, con énfasis en los desarrollos tecnológicos

recientes. Su pertinencia reside en la necesidad de organizar e integrar el conocimiento especializado para comparar tecnologías, aplicaciones, ventajas, limitaciones y requerimientos de integración.

En correspondencia con esta problemática, el presente capítulo tiene como objetivo analizar las tecnologías de generación eléctrica mediante fuentes renovables, sus mecanismos de integración al sistema eléctrico y las alternativas de almacenamiento energético, a partir de la comparación de sus características, aplicaciones, capacidades y limitaciones, con el propósito de identificar las principales tendencias que caracterizan la evolución hacia sistemas eléctricos renovables más flexibles, eficientes e integrados.

El estudio correspondió a una revisión bibliográfica de carácter descriptivo, analítico y comparativo. El objeto de análisis comprendió la generación eléctrica mediante energías renovables, con énfasis en las tecnologías de generación, su integración al sistema eléctrico y el almacenamiento energético. El enfoque descriptivo permitió organizar los principales aportes científicos sobre las tecnologías renovables y sus aplicaciones; el analítico examinó las relaciones entre generación, integración, control, flexibilidad y almacenamiento; y el comparativo permitió contrastar las características, aplicaciones, ventajas, limitaciones y requerimientos operativos de las soluciones identificadas.

La búsqueda documental se delimitó al periodo 2023–2026 y comprendió las bases de datos Scopus, Web of Science y ScienceDirect, seleccionadas por su cobertura de literatura científica relacionada con sistemas energéticos y tecnologías eléctricas. La estrategia de búsqueda empleó combinaciones de términos en inglés relacionados con el objeto de estudio: renewable energy generation, renewable electricity generation, solar photovoltaic systems,

wind energy systems, hydropower generation, biomass energy, hybrid renewable energy systems, renewable energy integration, smart grids, grid integration, energy storage systems, battery energy storage, pumped hydro storage, energy management, power system stability, frequency regulation y voltage regulation. Los términos se combinaron mediante los operadores booleanos AND y OR, de acuerdo con las relaciones conceptuales establecidas entre las tecnologías de generación, integración y almacenamiento.

Como criterios de inclusión, se consideraron artículos científicos publicados en revistas académicas entre 2023 y 2026, relacionados directamente con la generación eléctrica renovable, la integración de recursos renovables o el almacenamiento energético. Se priorizaron revisiones, estudios del estado del arte y trabajos de síntesis tecnológica que permitieran caracterizar los avances recientes. También se incorporaron investigaciones sobre generación fotovoltaica, energía eólica, generación hidráulica, biomasa, sistemas híbridos, redes inteligentes, estabilidad eléctrica, regulación de tensión y frecuencia, gestión energética y almacenamiento. La inclusión requirió información bibliográfica suficiente para verificar los autores, el año, el título, la revista, el volumen, el número, las páginas o el identificador editorial y el DOI.

Como criterios de exclusión, se eliminaron los registros duplicados, las publicaciones situadas fuera del periodo establecido, los documentos sin correspondencia temática y los trabajos con información bibliográfica insuficiente para verificar su procedencia. También se excluyeron los estudios centrados exclusivamente en aspectos económicos, ambientales o sociales cuando no presentaban una relación tecnológica directa con la generación eléctrica renovable,

su integración o almacenamiento. Asimismo, se descartaron los documentos cuya contribución no permitía establecer relaciones con las dimensiones tecnológicas definidas para el capítulo.

El procedimiento de selección identificó inicialmente 88 documentos. Después de eliminar 37 registros duplicados, permanecieron 51 publicaciones para el cribado. La evaluación de títulos y resúmenes condujo a la exclusión de 19 documentos, por lo que 32 publicaciones pasaron a la etapa de elegibilidad. Posteriormente, la revisión del texto disponible determinó la exclusión de 15 publicaciones por incumplimiento de los criterios establecidos. Finalmente, el corpus documental quedó constituido por 17 artículos científicos.

El proceso de selección se documentó mediante el protocolo Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), que permitió estructurar las etapas de identificación, depuración, cribado, elegibilidad e inclusión. Su aplicación proporcionó trazabilidad al proceso de selección documental y permitió establecer de manera sistemática la transición desde los 88 documentos inicialmente identificados hasta los 17 artículos que conformaron el corpus definitivo.

De cada publicación seleccionada se registraron los autores, el año de publicación, el título, la revista, el volumen, el número, las páginas o el identificador editorial y el DOI. La información temática se organizó en cinco dimensiones principales: tecnologías de generación renovable, integración eléctrica, estabilidad y control, almacenamiento energético y aplicaciones sistémicas. La primera comprendió las tecnologías solar, eólica, hidráulica, biomásica e híbrida; la segunda consideró la conexión a red, las redes inteligentes, la gestión energética y la flexibilidad; la tercera incluyó la regulación de tensión y frecuencia, la estabilidad y el control; la

cuarta abordó las baterías, el almacenamiento hidráulico y otras alternativas tecnológicas; y la quinta relacionó las soluciones identificadas con la eficiencia, la confiabilidad, la continuidad y la capacidad de adaptación del sistema eléctrico.

El análisis descriptivo permitió caracterizar las tecnologías renovables según sus principios de funcionamiento, aplicaciones, capacidades y condiciones operativas documentadas. El análisis analítico examinó las relaciones entre generación variable, integración eléctrica, estabilidad, flexibilidad y almacenamiento. Por su parte, el análisis comparativo permitió identificar coincidencias, diferencias, ventajas, limitaciones y tendencias tecnológicas entre las alternativas estudiadas. Esta organización permitió interpretar las tecnologías no como soluciones independientes, sino como componentes complementarios de sistemas eléctricos progresivamente integrados.

La síntesis de la información se organizó mediante una tabla de correspondencia bibliográfica en la que se relacionaron cada referencia, el área tecnológica analizada, el principal aporte identificado, su contribución al objetivo del capítulo y la correspondiente implicación tecnológica. Esta estructura facilitó la comparación transversal entre las publicaciones seleccionadas y permitió interpretar la convergencia o divergencia de sus aportes según la tecnología, la función eléctrica, los requerimientos de integración y la capacidad de almacenamiento.

El estudio respetó los principios de integridad científica, transparencia documental y reconocimiento de la autoría intelectual. Debido a su naturaleza bibliográfica, no involucró la participación de seres humanos, animales, muestras biológicas ni datos personales, por lo que no requirió consentimiento informado ni procedimientos de intervención experimental. Las

interpretaciones mantuvieron correspondencia con las publicaciones seleccionadas y se diferenciaron de los resultados originales comunicados por sus autores. Asimismo, la identificación de las fuentes y el registro del proceso de selección garantizaron la trazabilidad documental y metodológica de la síntesis desarrollada.

5.2. Integración eléctrica, almacenamiento y gestión de sistemas renovables

La síntesis comparativa permitió identificar tres dimensiones tecnológicas articuladas: generación renovable, integración eléctrica y almacenamiento energético (Tabla 5.1). En la primera dimensión predominaron los sistemas fotovoltaicos y eólicos, complementados por alternativas geotérmicas, biomásicas y configuraciones híbridas, con énfasis en la conversión, el control y el aprovechamiento energético. La integración eléctrica se caracterizó por el desarrollo de estrategias orientadas a la regulación de tensión y frecuencia, la gestión de la demanda, la incorporación de recursos flexibles y la aplicación de tecnologías de mejora de redes. En el ámbito del almacenamiento destacaron las baterías, los sistemas hidráulicos y las soluciones de larga duración, vinculados con la flexibilidad operativa y la prestación de servicios auxiliares.

De manera transversal, los estudios incorporaron estrategias de optimización, electrónica de potencia, digitalización, internet de las cosas y arquitecturas inteligentes para coordinar la generación, la red, el almacenamiento y la demanda. Las investigaciones evidenciaron una evolución desde el análisis de tecnologías individuales hacia configuraciones integradas, en las que la generación renovable, la estabilidad eléctrica, la flexibilidad y el almacenamiento se relacionaron como componentes interdependientes del sistema eléctrico.

Tabla 5.1. Síntesis comparativa de estudios sobre generación renovable, integración eléctrica y almacenamiento energético.

Referencia	Área tecnológica analizada	Principal aporte identificado	Contribución al objetivo del capítulo	Implicación tecnológica
Ashfaq et al. (2024)	Almacenamiento energético de larga duración e integración de renovables	Analiza cómo el crecimiento de la demanda modifica los requerimientos de almacenamiento en sistemas con alta penetración eólica y solar	Permite relacionar la variabilidad renovable y el crecimiento de la demanda con la necesidad de almacenamiento de larga duración	El incremento de demanda exige mayor almacenamiento para equilibrar generación, consumo y flexibilidad operativa del sistema
Bai et al. (2024)	Recursos flexibles de red, almacenamiento y servicios auxiliares	Desarrolla un modelo óptimo que integra interconexiones y respuesta flexible de demanda	Aporta criterios para comprender cómo los recursos flexibles complementan la generación renovable variable	La penetración renovable demanda recursos flexibles y servicios auxiliares para asegurar operación segura, estable y continua
Fernandez et al. (2024)	Sistemas energéticos, renovables, almacenamiento y redes	Integra los principales desafíos y habilitadores tecnológicos asociados con sistemas energéticos orientados hacia cero emisiones netas	Proporciona una visión transversal para relacionar generación renovable, almacenamiento, redes y eficiencia sistémica	La transición energética requiere coordinación tecnológica entre generación, almacenamiento, infraestructura eléctrica y gestión energética

Ghribi et al. (2024)	Generación fotovoltaica y seguimiento del punto de máxima potencia	Estima la tensión óptima según temperatura del panel para optimizar el seguimiento del punto máximo	Contribuye a caracterizar estrategias de optimización de la conversión fotovoltaica	El control de tensión según temperatura puede mejorar el aprovechamiento energético de los sistemas fotovoltaicos
Gupta & Bhargava (2024)	Microredes híbridas renovables	Optimiza una microred con generación fotovoltaica, eólica, biomasa, baterías y otros recursos mediante criterios técnicos, económicos, ambientales, sociales y de confiabilidad	Permite analizar la complementariedad entre diferentes fuentes renovables y almacenamiento dentro de una arquitectura híbrida	La configuración óptima depende simultáneamente del desempeño técnico, costo, impacto ambiental, confiabilidad y características de los recursos
Jiang et al. (2024)	Despacho de generación renovable distribuida y almacenamiento	Examina la operación coordinada de recursos renovables distribuidos y sistemas de almacenamiento mediante estrategias de optimización	Aporta elementos para analizar la gestión conjunta de generación y almacenamiento en sistemas distribuidos	La coordinación del despacho permite aprovechar recursos renovables y almacenamiento según las condiciones operativas del sistema

Khan et al. (2024)	Redes inteligentes, IoT y respuesta de demanda	Analiza arquitecturas de redes inteligentes, aplicaciones IoT y estrategias de respuesta de demanda, incluyendo barreras de implementación y seguridad	Amplía el análisis de integración incorporando gestión activa de la demanda y digitalización de la red	La integración renovable puede fortalecerse mediante redes inteligentes capaces de coordinar información, demanda y operación eléctrica
Kumar et al. (2025)	Regulación de tensión y frecuencia en redes con renovables	Revisa problemas y estrategias de regulación simultánea de tensión y frecuencia en redes con alta integración renovable y almacenamiento	Define los principales requerimientos de estabilidad asociados con la incorporación creciente de fuentes renovables	La integración renovable exige estrategias coordinadas de control de tensión y frecuencia para preservar seguridad y estabilidad
Kyei et al. (2025)	Innovación en energías renovables	Examina innovaciones renovables vinculadas con la transición energética y el cumplimiento de objetivos de desarrollo sostenible	Sitúa la evolución tecnológica de las energías renovables dentro de una perspectiva de transformación del sistema energético	La innovación tecnológica constituye un mecanismo para ampliar la adopción y diversificación de fuentes renovables
Liu et al. (2024)	Generación geotérmica e integración con otras renovables	Revisa tecnologías geotérmicas y su combinación con energía solar e hidráulica, incluyendo diferentes ciclos de conversión	Amplía la caracterización de tecnologías renovables más allá de solar y eólica y evidencia posibilidades de complementariedad tecnológica	La combinación geotérmica con otras fuentes diversifica la generación y favorece sistemas renovables de menor emisión

Mohapatra & Dash (2024)	Conversión y control de energía eólica	Desarrolla control para sistemas eólicos variables basados en generadores de inducción doblemente alimentados	Permite incorporar el control de conversión eólica como componente de la integración eficiente de generación variable	Las estrategias avanzadas de control pueden mejorar la respuesta y el desempeño operativo de sistemas eólicos conectados a red
Preeti & Karthikeyan (2024)	Integración fotovoltaica-batería y electrónica de potencia	Propone un convertidor bidireccional de múltiples puertos y control predictivo para gestionar flujos entre generación fotovoltaica, batería y carga	Relaciona generación solar, almacenamiento y conversión electrónica dentro de sistemas eléctricos aislados	La electrónica de potencia permite coordinar generación y almacenamiento mediante conversión bidireccional y control predictivo
Su et al. (2025)	Tecnologías de mejora de redes e integración renovable	Analiza tecnologías capaces de incrementar la capacidad de las redes y reducir congestión y vertimiento de generación renovable	Aporta soluciones de infraestructura para integrar mayor cantidad de generación renovable sin depender exclusivamente de nuevas ampliaciones convencionales	Las tecnologías de mejora de redes pueden aumentar capacidad de transmisión y reducir restricciones de integración con inversiones relativamente menores

Sutikno et al. (2025)	Tecnologías de baterías y sistemas de gestión	Compara generaciones y tipos de baterías según densidad energética, densidad de potencia, ciclo de vida, eficiencia y otros parámetros	Proporciona criterios técnicos para comparar tecnologías electroquímicas aplicables al almacenamiento energético	La selección de baterías debe considerar simultáneamente potencia, energía, eficiencia, vida útil, seguridad y condiciones de operación
Varhegyi & Nour (2025)	Respuesta rápida de frecuencia y almacenamiento	Revisa servicios de respuesta rápida de frecuencia y sus requerimientos técnicos, económicos y regulatorios en sistemas con alta penetración renovable	Vincula almacenamiento y control de frecuencia con la estabilidad de sistemas eléctricos dominados por fuentes variables	El almacenamiento de respuesta rápida puede proporcionar servicios auxiliares esenciales ante reducción de inercia convencional
Yu et al. (2023)	Modelización y optimización de sistemas renovables	Revisa modelos de optimización y métodos de solución aplicados a planificación, generación, transmisión, consumo y almacenamiento renovable	Proporciona fundamento metodológico para comparar estrategias de planificación y operación de sistemas renovables	La optimización permite integrar restricciones técnicas, económicas y ambientales en decisiones de configuración y operación

Zhang et al. (2024)	Digitalización, energía renovable y sistemas energéticos inteligentes	Revisa fundamentos y tecnologías del ***agricultural energy internet***, articulando fuentes, redes y cargas en sistemas energéticos rurales	Aporta una perspectiva de integración digital y coordinación entre generación, red y demanda.	La digitalización puede favorecer la coordinación de recursos renovables, infraestructura eléctrica y consumo mediante arquitecturas energéticas inteligentes

Los hallazgos evidenciaron que la generación renovable dejó de abordarse como un conjunto de tecnologías independientes y pasó a considerarse dentro de arquitecturas energéticas integradas. Esta tendencia coincidió con Kyei et al. (2025), quienes caracterizaron la innovación renovable como un componente de la transformación tecnológica del sistema energético, y con Fernandez et al. (2024), quienes identificaron la articulación entre fuentes renovables, almacenamiento y redes como una condición tecnológica para avanzar hacia sistemas energéticos de bajas emisiones.

En relación con la generación renovable, los resultados evidenciaron un predominio de las tecnologías fotovoltaicas y eólicas, aunque también se identificaron configuraciones geotérmicas e híbridas. Esta diversidad reflejó una transición desde el análisis de fuentes individuales hacia esquemas de complementariedad tecnológica. Ghribi et al. (2024) demostraron que el aprovechamiento fotovoltaico podía optimizarse mediante la estimación de la tensión de operación a partir de la temperatura del panel, mientras que Mohapatra y Dash (2024) desarrollaron una estrategia de

control para sistemas eólicos de velocidad variable basados en generadores doblemente alimentados. Ambos hallazgos coincidieron con la presente síntesis al indicar que la eficiencia de la generación dependió no solo de la fuente primaria, sino también de las estrategias de conversión y control.

Liu et al. (2024) ampliaron esta perspectiva al examinar la integración de la generación geotérmica con otras fuentes renovables, lo que evidenció una orientación tecnológica hacia la diversificación y complementariedad de los recursos. Gupta y Bhargava (2024) coincidieron con esta tendencia mediante el análisis de configuraciones híbridas que combinaron diferentes fuentes y almacenamiento bajo criterios técnicos y de confiabilidad.

Respecto a la integración eléctrica, los resultados indicaron que la incorporación creciente de generación renovable estuvo asociada con mayores requerimientos de regulación, flexibilidad y coordinación operativa. Kumar et al. (2025) identificaron la regulación simultánea de tensión y frecuencia como un problema relevante en redes con elevada participación renovable, mientras que Bai et al. (2024) destacaron la importancia de los recursos flexibles, el almacenamiento y la respuesta de la demanda para la programación de los sistemas eléctricos. La convergencia entre estos hallazgos indicó que la integración no se limitó a conectar nuevas fuentes a la red, sino que implicó transformar los mecanismos de operación y control.

Khan et al. (2024) complementaron esta interpretación al destacar la respuesta de la demanda y las tecnologías de internet de las cosas como mecanismos para mejorar la gestión de las redes inteligentes. Su aporte permitió identificar una diferencia relevante respecto de los estudios centrados exclusivamente en la generación, debido

a que la integración renovable requirió también capacidades digitales para coordinar la generación, la demanda y las condiciones de operación.

En cuanto al almacenamiento energético, los resultados evidenciaron una función principalmente asociada con la flexibilidad del sistema y el equilibrio entre generación y demanda. Ashfaq et al. (2024) mostraron que el crecimiento de la demanda modificó los requerimientos de almacenamiento de larga duración en sistemas con elevada penetración eólica y solar. Este resultado fue consistente con la presente síntesis, en la que el almacenamiento se identificó como un recurso complementario para gestionar la variabilidad de la generación renovable.

Desde una perspectiva diferente, Sutikno et al. (2025) concentraron su análisis en las características técnicas de las baterías y sus sistemas de gestión, y señalaron que la selección tecnológica dependió de variables como la densidad energética, la potencia, la eficiencia y la vida útil. El contraste entre ambos estudios permitió distinguir dos escalas de análisis: Ashfaq et al. (2024) abordaron la capacidad de almacenamiento desde una perspectiva sistémica, mientras que Sutikno et al. (2025) la examinaron a partir de las características tecnológicas de las baterías. Preeti y Karthikeyan (2024) establecieron una conexión adicional al integrar la generación fotovoltaica y las baterías mediante electrónica de potencia y control predictivo.

La flexibilidad operativa constituyó otro patrón transversal identificado en los resultados. Varhegyi y Nour (2025) analizaron la respuesta rápida de frecuencia como servicio auxiliar ante condiciones de baja inercia, mientras que Jiang et al. (2024) abordaron el despacho coordinado de generación renovable distribuida y almacenamiento mediante estrategias de optimización. Ambos enfoques coincidieron con la tendencia observada hacia

una operación coordinada entre la generación y los recursos de flexibilidad, aunque difirieron en su escala funcional. El primero se concentró en la respuesta dinámica requerida para preservar la estabilidad, mientras que el segundo consideró la programación coordinada de recursos distribuidos. Esta diferencia evidenció que la flexibilidad podía abordarse tanto desde la respuesta inmediata del sistema como desde la planificación y la operación optimizada de sus recursos.

La digitalización y la optimización aparecieron como mecanismos transversales para articular las tecnologías analizadas. Yu et al. (2023) identificaron la optimización como una herramienta aplicable a la planificación, la generación, la transmisión, el consumo y el almacenamiento dentro de los sistemas renovables, mientras que Zhang et al. (2024) incorporaron arquitecturas digitales para coordinar fuentes, redes y demanda. Los resultados del presente estudio fueron consistentes con ambas perspectivas, dado que las investigaciones seleccionadas evidenciaron una incorporación progresiva de modelos de optimización, tecnologías de internet de las cosas, control avanzado y arquitecturas inteligentes. Su et al. (2025) añadieron una dimensión relacionada con las tecnologías de mejora de redes, orientadas a incrementar la capacidad de integración y reducir las restricciones operativas. En conjunto, estas evidencias indicaron que la evolución tecnológica no dependió exclusivamente del desarrollo de nuevas fuentes de generación, sino también de la transformación de las redes y de sus capacidades de gestión.

Finalmente, la comparación global evidenció una convergencia tecnológica entre generación, integración y almacenamiento, aunque cada dimensión presentó funciones diferenciadas. La

generación se relacionó principalmente con la diversificación de las fuentes y la optimización de la conversión energética; la integración, con la estabilidad, el control y la flexibilidad del sistema; y el almacenamiento, con el equilibrio energético y la prestación de servicios auxiliares. Esta diferenciación confirmó que las tres dimensiones desempeñaron funciones específicas, pero complementarias, dentro de la configuración de sistemas eléctricos renovables progresivamente más integrados.

Esta diferenciación fue coherente con Fernandez et al. (2024), quienes identificaron la necesidad de integrar las tecnologías energéticas dentro de una arquitectura sistémica, y con Gupta y Bhargava (2024), quienes mostraron que las configuraciones híbridas requirieron evaluar simultáneamente el desempeño técnico, la confiabilidad y la disponibilidad de los recursos. Desde esta perspectiva, el principal aporte del estudio consistió en organizar comparativamente las tecnologías analizadas a partir de tres dimensiones articuladas: generación, integración y almacenamiento. Esta organización permitió reconocer que la transición hacia sistemas eléctricos renovables dependió de la interacción entre las fuentes de generación, las redes eléctricas, los sistemas de control, el almacenamiento y las herramientas de gestión inteligente.

Las principales limitaciones estuvieron relacionadas con la naturaleza bibliográfica del estudio, la heterogeneidad metodológica de las investigaciones seleccionadas y la diversidad de las tecnologías analizadas. Asimismo, la revisión se circunscribió a la evidencia científica disponible durante el periodo 2023–2026 y no incorporó validaciones experimentales propias. Estas condiciones delimitaron el alcance de los resultados y su generalización, aunque permitieron establecer

tendencias y relaciones comparativas entre las dimensiones tecnológicas examinadas.

A partir de los resultados analizados, la relación entre generación renovable, integración eléctrica y almacenamiento energético permitió identificar una tendencia común hacia configuraciones cada vez más coordinadas. Aunque cada dimensión respondió a funciones tecnológicas específicas, su análisis conjunto evidenció que el desempeño de los sistemas eléctricos renovables no dependió exclusivamente de la eficiencia de las fuentes de generación, sino también de la capacidad de la red para integrarlas, de los recursos disponibles para gestionar su variabilidad y de las estrategias empleadas para coordinar su operación.

Esta diferenciación fue coherente con Fernandez et al. (2024), quienes identificaron la necesidad de integrar las tecnologías energéticas dentro de una arquitectura sistémica, y con Gupta y Bhargava (2024), quienes mostraron que las configuraciones híbridas requirieron evaluar simultáneamente el desempeño técnico, la confiabilidad y la disponibilidad de los recursos. Desde esta perspectiva, el principal aporte del estudio consistió en organizar comparativamente las tecnologías analizadas a partir de tres dimensiones articuladas: generación, integración y almacenamiento. Esta organización permitió reconocer que la transición hacia sistemas eléctricos renovables dependió de la interacción entre las fuentes de generación, las redes eléctricas, los sistemas de control, el almacenamiento y las herramientas de gestión inteligente.

Las principales limitaciones estuvieron relacionadas con la naturaleza bibliográfica del estudio, la heterogeneidad metodológica de las investigaciones seleccionadas y la diversidad de las tecnologías analizadas. Asimismo, la revisión se circunscribió a la evidencia científica

disponible durante el periodo 2023–2026 y no incorporó validaciones experimentales propias. Estas condiciones delimitaron el alcance de los resultados y su generalización, aunque permitieron establecer tendencias y relaciones comparativas entre las dimensiones tecnológicas examinadas.

En conjunto, la evidencia analizada permitió establecer que la integración efectiva de fuentes renovables requiere una visión sistémica en la que generación, red, almacenamiento, control y gestión energética funcionen de manera coordinada. Esta convergencia constituye, además, una oportunidad para trasladar los hallazgos de la revisión hacia una solución tecnológica capaz de integrar información operativa, supervisar el comportamiento de los recursos y apoyar su coordinación y optimización. Sobre esta base se plantea, en el epígrafe siguiente, una propuesta orientada al desarrollo de una plataforma integrada para la gestión de la generación renovable, la integración eléctrica y el almacenamiento energético.

5.3. Propuesta de plataforma integrada para generación renovable y almacenamiento energético

Los resultados de la revisión evidenciaron que la incorporación creciente de fuentes renovables exige una coordinación cada vez mayor entre generación, condiciones de la red, almacenamiento y gestión energética. La convergencia identificada entre estas dimensiones proporciona una base para trasladar los hallazgos del análisis bibliográfico hacia una propuesta de desarrollo tecnológico orientada a integrar funciones que actualmente pueden operar de manera independiente. En este contexto, se plantea una plataforma modular capaz de supervisar, coordinar y optimizar recursos renovables y sistemas de almacenamiento a partir de las condiciones operativas del sistema eléctrico.

1. Título del desarrollo tecnológico

Plataforma integrada para la gestión de generación renovable, integración eléctrica y almacenamiento energético.

2. Problema o necesidad tecnológica

La generación eléctrica mediante fuentes renovables ha incorporado progresivamente tecnologías fotovoltaicas, eólicas, geotérmicas y configuraciones híbridas. La variabilidad inherente a algunas de estas fuentes introduce nuevos requerimientos para la operación de los sistemas eléctricos, particularmente en relación con la regulación, la estabilidad, la flexibilidad y el equilibrio entre generación y demanda.

La revisión evidenció que estos requerimientos son atendidos mediante diferentes estrategias de control, regulación de tensión y frecuencia, optimización, respuesta de la demanda y almacenamiento energético. Asimismo, la integración de generación renovable requiere coordinar las condiciones de generación con la demanda eléctrica, el comportamiento de la red y la disponibilidad de recursos flexibles. En este escenario, el almacenamiento desempeña una función complementaria al compensar variaciones de generación, contribuir al equilibrio energético y proporcionar servicios auxiliares.

Sin embargo, la gestión separada de estos componentes puede limitar la disponibilidad de una visión conjunta del comportamiento energético y eléctrico del sistema. Esta fragmentación plantea la necesidad de disponer de una solución tecnológica que articule generación renovable, integración eléctrica y almacenamiento dentro de una estructura común de gestión. En respuesta a esta necesidad, se propone desarrollar una plataforma integrada que permita supervisar, coordinar y optimizar los

recursos disponibles en función de las condiciones de operación del sistema eléctrico.

3. Fundamento del desarrollo

La evidencia analizada mostró una evolución desde sistemas de generación renovable centrados principalmente en la conversión energética hacia configuraciones integradas con redes eléctricas, almacenamiento, control avanzado y herramientas de optimización. Los sistemas fotovoltaicos y eólicos incorporaron estrategias destinadas a mejorar la conversión y el control, mientras que las configuraciones híbridas ampliaron las posibilidades de complementariedad entre diferentes fuentes.

Paralelamente, la integración eléctrica requirió mecanismos para regular la tensión y la frecuencia, gestionar la demanda y aprovechar recursos flexibles. Los sistemas de almacenamiento, particularmente las baterías y las alternativas de larga duración, adquirieron relevancia para compensar la variabilidad de la generación y proporcionar flexibilidad operativa.

La convergencia de estas capacidades sustenta el desarrollo de una plataforma capaz de relacionar información sobre generación renovable, condiciones de operación eléctrica y almacenamiento energético. Su propósito será transformar los datos operativos en información útil para la supervisión, la coordinación y la optimización de los recursos del sistema.

4. Objetivo general

Desarrollar y validar una plataforma integrada para supervisar, coordinar y optimizar la generación renovable y el almacenamiento energético en sistemas eléctricos.

5. Descripción general de la solución propuesta

Se propone desarrollar una plataforma tecnológica modular destinada a integrar y procesar información procedente de sistemas de generación renovable, dispositivos de almacenamiento energético y variables asociadas con la operación del sistema eléctrico.

La solución permitirá apoyar la evaluación y gestión de los siguientes componentes y condiciones:

a) Generación fotovoltaica.

b) Generación eólica.

c) Configuraciones híbridas renovables.

d) Variabilidad de la generación.

e) Disponibilidad energética.

f) Condiciones de integración a la red.

g) Tensión y frecuencia.

h) Equilibrio entre generación y demanda.

i) Estado operativo del almacenamiento.

j) Disponibilidad de recursos flexibles.

k) Eficiencia en la utilización de la energía.

l) Condiciones operativas anómalas.

m) Necesidades de regulación y optimización.

La plataforma podrá incorporar diferentes tecnologías de generación y almacenamiento sin quedar limitada a una configuración específica. Su arquitectura modular permitirá integrar información procedente de la generación, la red y los sistemas de almacenamiento con el propósito de proporcionar una visión conjunta de las condiciones operativas

y facilitar la gestión coordinada de los recursos energéticos.

La configuración específica de los sensores, los sistemas de adquisición, los algoritmos, los parámetros de control, los criterios de decisión y la arquitectura computacional podrá mantenerse reservada cuando constituya conocimiento tecnológico susceptible de protección.

6. Novedad o diferenciación tecnológica

La diferenciación tecnológica de la propuesta no radicará en el desarrollo aislado de un sistema fotovoltaico, un sistema eólico, una batería, un controlador o un software de supervisión. Su elemento distintivo será la integración de la generación renovable, las condiciones de operación eléctrica y el almacenamiento energético dentro de una misma arquitectura de gestión.

La plataforma buscará coordinar estos componentes considerando simultáneamente la generación disponible, las variables eléctricas del sistema, la demanda y la capacidad de almacenamiento. Desde el punto de vista funcional, la solución deberá: a) adquirir las variables relevantes del sistema. b) Supervisar el comportamiento de los recursos energéticos. c) Integrar la información procedente de generación, red y almacenamiento. d) Evaluar las condiciones operativas. e) Ejecutar o apoyar acciones de control cuando corresponda. f) Optimizar la utilización de los recursos disponibles. g) Proporcionar información para la gestión técnica del sistema.

De esta manera, la propuesta avanzará desde la supervisión independiente de componentes hacia una gestión coordinada de los recursos energéticos, con capacidad para relacionar las condiciones de generación, demanda, red y almacenamiento dentro de una estructura tecnológica común.

7. Productos tecnológicos esperados

El desarrollo de la propuesta permitirá obtener productos tecnológicos orientados tanto a la implementación funcional de la plataforma como a su posterior validación, documentación y transferencia. Los principales productos esperados serán:

a) Prototipo funcional de la plataforma integrada.

b) Módulo de adquisición y procesamiento de variables energéticas.

c) Módulo de supervisión de generación renovable.

d) Módulo de evaluación de las condiciones de integración eléctrica.

e) Módulo de gestión del almacenamiento energético.

f) Módulo de análisis del equilibrio entre generación y demanda.

g) Módulo de supervisión de tensión y frecuencia.

h) Módulo de optimización de la generación y el almacenamiento.

i) Interfaz de supervisión y visualización.

j) Sistema de generación de reportes técnicos.

k) Procedimiento para evaluar la integración de fuentes renovables y sistemas de almacenamiento.

l) Manual técnico de operación y mantenimiento.

La integración de estos productos permitirá conformar una solución modular cuya

implementación podrá adaptarse a diferentes configuraciones de generación renovable, almacenamiento y condiciones de operación eléctrica.

8. Nivel de madurez tecnológica

La meta inicial del desarrollo será alcanzar un nivel de madurez tecnológica TRL 5 mediante la integración y validación de la plataforma en condiciones controladas y representativas de operación. Para ello, el proceso comprenderá: a) La conceptualización de la solución. b) El diseño de la arquitectura tecnológica. c) El desarrollo de los módulos funcionales. d) La integración de los componentes. e) La ejecución de pruebas funcionales. f) La validación tecnológica en un entorno representativo.

El cumplimiento de estas etapas permitirá evaluar la integración funcional de la plataforma y determinar su capacidad para operar bajo diferentes condiciones de generación, demanda y disponibilidad de almacenamiento. Posteriormente, el desarrollo podrá avanzar hacia pruebas en entornos operativos reales y hacia niveles superiores de madurez tecnológica, de acuerdo con los resultados obtenidos durante la validación.

9. Ámbito de aplicación

La plataforma tendrá potencial de aplicación en diferentes escenarios relacionados con la generación renovable, el almacenamiento y la gestión de sistemas eléctricos. Entre los principales ámbitos se consideran:

a) Sistemas fotovoltaicos.

b) Sistemas eólicos.

c) Sistemas híbridos renovables.

d) Microredes.

e) Sistemas de generación distribuida.

f) Sistemas de almacenamiento energético.

g) Redes eléctricas inteligentes.

h) Instalaciones industriales.

i) Sistemas de gestión energética.

j) Laboratorios de sistemas eléctricos.

k) Centros de investigación.

l) Instituciones de formación tecnológica y universitaria.

Una aplicación especialmente relevante corresponderá a las microredes y los sistemas de generación distribuida que combinen fuentes renovables con almacenamiento energético. En estos escenarios, la plataforma podrá facilitar la evaluación conjunta de las condiciones de generación, demanda, almacenamiento y operación eléctrica antes de implementar modificaciones en la infraestructura o en las estrategias de gestión.

10. Estrategia de validación

La validación tecnológica estará orientada a comprobar el funcionamiento integrado de la plataforma y la interacción entre sus principales componentes. Para ello, el proceso deberá verificar su capacidad para: a) Adquirir información procedente de los recursos energéticos y del sistema eléctrico. b) Procesar las variables registradas. c) Supervisar la generación renovable. d) Evaluar las condiciones eléctricas de operación. e) Gestionar la información correspondiente al almacenamiento energético. f) Coordinar los recursos disponibles. g) Apoyar la optimización de la operación. h) Generar información técnica para la evaluación del sistema.

Los escenarios de validación podrán representar diferentes niveles de generación renovable, demanda eléctrica, disponibilidad de almacenamiento y variabilidad de las fuentes. La evaluación considerará, según las características de cada escenario:

a) Capacidad de supervisión.

b) Estabilidad operativa.

c) Respuesta ante variaciones de generación.

d) Regulación de tensión y frecuencia.

e) Gestión del almacenamiento.

f) Equilibrio entre generación y demanda.

g) Eficiencia en la utilización de la energía.

h) Capacidad de coordinación entre los recursos.

La validación permitirá determinar la funcionalidad de la solución en condiciones controladas y representativas de operación, así como identificar ajustes necesarios antes de avanzar hacia pruebas en entornos reales. Los resultados obtenidos constituirán la base para valorar la evolución de la plataforma hacia niveles superiores de madurez tecnológica, sin asumir previamente su desempeño en condiciones no evaluadas.

11. Potencial de transferencia

La estructura modular de la plataforma favorecerá diferentes modalidades de transferencia tecnológica según las características del entorno de aplicación y el grado de madurez alcanzado. La transferencia podrá comprender:

a) Prototipo funcional.

b) Software de supervisión y gestión.

c) Módulos de procesamiento y optimización.

d) Metodología de evaluación tecnológica.

e) Documentación técnica.

f) Capacitación especializada.

g) Asistencia técnica para la implementación.

h) Servicios tecnológicos de evaluación y optimización.

i) Licenciamiento de componentes tecnológicos susceptibles de protección.

El potencial de transferencia no se limitará al prototipo como producto físico o digital, sino que podrá comprender los procedimientos de evaluación, los módulos funcionales, el software, la documentación técnica y los servicios especializados derivados del desarrollo. Esta diversidad permitirá adaptar la transferencia a instituciones académicas, centros de investigación, instalaciones industriales, operadores de sistemas energéticos y otras organizaciones interesadas en la integración de generación renovable y almacenamiento.

La propuesta traslada los principales hallazgos de la revisión bibliográfica hacia una alternativa de desarrollo tecnológico susceptible de diseño, integración y validación progresiva. La plataforma planteada busca articular generación renovable, condiciones de operación eléctrica y almacenamiento energético dentro de una arquitectura común de supervisión, coordinación y optimización. Su desarrollo permitirá evaluar experimentalmente la viabilidad de esta integración y establecer una base tecnológica para posteriores aplicaciones en sistemas eléctricos con creciente participación de fuentes renovables.

Referencias

Ashfaq, S., El Myasse, I., Zhang, D., & Musleh, A. S. (2024). Impact of demand growth on the capacity of long-duration energy storage under deep decarbonization. ***Clean Energy, 8***(4), 237–247. https://doi.org/10.1093/ce/zkae045

Bai, B., Xiao, Y., Zhao, R., Ju, X., & Liu, S. (2024). Optimal scheduling of flexible grid-side resources and auxiliary service cost allocation model considering renewable-energy penetration. ***Clean Energy, 8***(4), 90–102. https://doi.org/10.1093/ce/zkae039

Fernandez, M. I., Go, Y. I., Wong, D. M. L., & Früh, W. G. (2024). Review of challenges and key enablers in energy systems towards net zero target: Renewables, storage, buildings, & grid technologies. ***Heliyon, 10***(23), e40691. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40691

Ghribi, M. E. B., Garcia, G. L., Ternifi, Z. E. T., Zheng, Z., Bachir, G., & Aillerie, M. (2024). Tracking the maximum power point of solar panels through direct estimation of optimum voltage with temperature. ***Clean Energy, 8***(4), 135–146. https://doi.org/10.1093/ce/zkae044

Gupta, M., & Bhargava, A. (2024). Optimal design of hybrid renewable-energy microgrid system: A techno–economic–environment–social–reliability perspective. ***Clean Energy, 8***(1), 66–83. https://doi.org/10.1093/ce/zkad069

Jiang, H., Zhao, Y., & Zhou, H. (2024). Optimal dispatch of distributed renewable energy and energy storage systems via optimal configuration of mobile edge computing. ***IET Renewable Power Generation, 18***(16), 3537–3550. https://doi.org/10.1049/rpg2.12905

Khan, M. A., Khan, T., Waseem, M., Saleh, A. M., Qamar, N., & Muqeet, H. A. (2024). Investigation and analysis of demand response approaches, bottlenecks, and future potential capabilities for IoT-enabled smart grid. *IET Renewable Power Generation, 18*(15), 3509–3535. https://doi.org/10.1049/rpg2.13011

Kumar, V., Sharma, V., Kumar, A. V. P., Arya, Y., & Chikkam, S. (2025). A state-of-the-art review on concurrent voltage and frequency regulation problems in renewable integrated power networks. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 47*(1), 16–49. https://doi.org/10.1080/15567036.2025.2462799

Kyei, S. K., Boateng, H. K., & Frimpong, A. J. (2025). Renewable energy innovations: Fulfilling SDG targets. *Clean Energy, 9*(2), 190–203. https://doi.org/10.1093/ce/zkae109

Liu, X., Cai, D., Ukwuoma, C. C., Huang, Q., & Bamisile, O. (2024). A survey of geothermal power generation combined with renewable energy for low carbon emissions. *Clean Energy, 8*(3), 138–146. https://doi.org/10.1093/ce/zkad090

Mohapatra, S. P., & Dash, P. K. (2024). A novel control strategy of a variable-speed doubly-fed-induction-generator-based wind energy conversion system. *Clean Energy, 8*(1), 153–170. https://doi.org/10.1093/ce/zkad074

Preeti, G. A., & Karthikeyan, A. (2024). Finite control set model predictive control of three-port converter for interfacing a PV–battery energy storage system to a three-phase stand-alone AC system. *Clean Energy, 8*(2), 73–84. https://doi.org/10.1093/ce/zkae006

Su, T., Zhao, J., Gomez, E. A., Chen, Y., Terzija, V., & Gentle, J. P. (2025). Grid-enhancing technologies for clean energy systems. ***Nature Reviews Clean Technology, 1***, 16–31. https://doi.org/10.1038/s44359-024-00001-5

Sutikno, T., Arsadiando, W., & Purnama, H. S. (2025). Battery types and recent developments for energy storage in electric vehicles: Technical criteria and battery management system. ***Clean Energy, 9***(6), 293–322. https://doi.org/10.1093/ce/zkaf048

Varhegyi, G., & Nour, M. (2025). Integrating fast frequency response ancillary services: A global review of technical, procurement, and market integration challenges. ***Clean Energy, 9***(2), 204–218. https://doi.org/10.1093/ce/zkae105

Yu, S., You, L., & Zhou, S. (2023). A review of optimization modeling and solution methods in renewable energy systems. ***Frontiers of Engineering Management, 10***, 640–671. https://doi.org/10.1007/s42524-023-0271-3

Zhang, X., Fu, X., Xue, Y., Chang, X., & Bai, X. (2024). A review on basic theory and technology of agricultural energy internet. ***IET Renewable Power Generation, 18***(7), 1318–1331. https://doi.org/10.1049/rpg2.12808



06.

Sistemas eléctricos de distribución: redes, protección y calidad del suministro

David Fernando Parrales Baque

Henry Yanderson Pico Cedeño

6.1. Transformación tecnológica de los sistemas eléctricos de distribución

Los sistemas eléctricos de distribución experimentaron una transformación asociada con la descentralización, la digitalización y la incorporación de recursos energéticos distribuidos. Esta transición incrementó la complejidad operativa y exigió nuevas estrategias para mantener la confiabilidad, la seguridad y la eficiencia (Barasa Kabeyi & Olanrewaju, 2023; Bu et al., 2023). La evolución hacia redes activas incorporó

sistemas de medición avanzada, automatización y generación distribuida, modificando progresivamente los esquemas tradicionales de operación (Deka et al., 2024; Yadav et al., 2023).

La planificación de las redes de distribución enfrentó nuevas condiciones derivadas de la incorporación de recursos distribuidos, sistemas de almacenamiento y movilidad eléctrica. Estas tecnologías modificaron los perfiles de carga, los flujos de potencia y las condiciones de operación de las redes convencionales (Pham et al., 2025; Shah et al., 2023). En este contexto, la reconfiguración de las redes adquirió relevancia como estrategia para reducir pérdidas, mejorar los perfiles de tensión y mantener condiciones operativas adecuadas (El-Fergany, 2024; Wang et al., 2023).

La protección eléctrica también experimentó modificaciones debido a la bidireccionalidad de los flujos de potencia y a la variabilidad asociada con las fuentes distribuidas. Los esquemas convencionales enfrentaron mayores requerimientos de coordinación, selectividad y sensibilidad ante configuraciones activas (Alasali et al., 2024; Baba et al., 2024). Paralelamente, la incorporación de inteligencia artificial y aprendizaje automático amplió las posibilidades de diagnóstico, mantenimiento y gestión de los activos eléctricos (Manias et al., 2024; Rajora et al., 2024).

La calidad del suministro constituyó otro componente crítico debido a las perturbaciones asociadas con cargas no lineales, generación distribuida y dispositivos basados en electrónica de potencia. La literatura identificó las variaciones de tensión, los armónicos y otros fenómenos eléctricos como condiciones relevantes para el funcionamiento confiable de las redes (Mousa et al., 2024). En correspondencia con esta problemática, los métodos de monitorización y análisis evolucionaron

hacia procedimientos capaces de identificar y caracterizar perturbaciones con mayor rapidez y precisión (Khetarpal et al., 2024; Oubrahim et al., 2023).

Sin embargo, la integración simultánea de redes activas, sistemas de protección y mecanismos para preservar la calidad del suministro generó nuevos requerimientos de coordinación tecnológica. Las soluciones orientadas individualmente hacia la planificación, la protección o la calidad del suministro no siempre consideraron las interacciones existentes entre estos componentes. Además, la creciente dependencia de las comunicaciones y los sistemas digitales incorporó nuevas condiciones de vulnerabilidad para la operación segura de las redes eléctricas (Manias et al., 2024; Mansour et al., 2023).

En consecuencia, persistió la necesidad de analizar de manera integrada las redes de distribución, la protección eléctrica y la calidad del suministro desde una perspectiva tecnológica actualizada. Esta articulación resulta relevante para comprender las condiciones que determinan la continuidad del servicio, la seguridad operativa y el desempeño eléctrico de los sistemas modernos (Alajrash et al., 2024; Dehaghani et al., 2026).

En correspondencia con esta problemática, el presente capítulo tiene como objetivo analizar la evolución tecnológica reciente de los sistemas eléctricos de distribución, con énfasis en las redes, los mecanismos de protección y la calidad del suministro, a partir de la comparación de sus características, aplicaciones, aportes y limitaciones, con el propósito de identificar las principales tendencias que orientan el desarrollo de sistemas de distribución más confiables, seguros, eficientes y adaptables.

El estudio correspondió a una revisión bibliográfica de carácter descriptivo, analítico y comparativo, orientada al examen de las redes de distribución, la protección eléctrica y la calidad del suministro. La revisión consideró avances tecnológicos relacionados con la digitalización, la generación distribuida, la automatización, la confiabilidad y la gestión operativa. El enfoque descriptivo permitió caracterizar las tecnologías y sus aplicaciones; el analítico examinó las relaciones entre infraestructura, protección, calidad del suministro y digitalización; y el comparativo permitió identificar coincidencias, diferencias, tendencias y requerimientos tecnológicos entre las soluciones analizadas.

La búsqueda bibliográfica se delimitó al periodo 2023–2026 y comprendió las bases de datos Scopus, Web of Science y ScienceDirect, seleccionadas por su cobertura de literatura científica relacionada con sistemas eléctricos, redes de distribución y tecnologías energéticas. La estrategia de búsqueda empleó combinaciones de términos en inglés relacionados con el objeto de estudio: electrical distribution systems, distribution networks, distribution system protection, power quality, distributed energy resources, smart distribution grids y distribution network reliability. Los términos se combinaron mediante operadores booleanos AND y OR, de acuerdo con las relaciones conceptuales establecidas entre redes de distribución, protección eléctrica y calidad del suministro.

Como criterios de inclusión, se consideraron artículos científicos publicados en revistas académicas indexadas entre 2023 y 2026, relacionados directamente con redes de distribución, sistemas de protección o calidad del suministro. Se priorizaron revisiones, estudios de síntesis tecnológica y trabajos con aplicaciones demostrables en

sistemas eléctricos. La inclusión requirió, además, información bibliográfica suficiente para verificar los autores, el año de publicación, el título, la revista, el volumen, el número, las páginas o el identificador de artículo y el DOI.

Como criterios de exclusión, se eliminaron los registros duplicados, las publicaciones situadas fuera del periodo establecido, los documentos sin correspondencia directa con el objetivo del capítulo y los trabajos cuya información bibliográfica o DOI no pudiera verificarse adecuadamente. Esta depuración permitió conformar un corpus documental pertinente para comparar tecnologías, aplicaciones y tendencias relacionadas con los sistemas eléctricos de distribución.

El proceso de selección documental se organizó mediante las etapas de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión, siguiendo la lógica de Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA 2020) (Page et al., 2021). Inicialmente se identificaron 86 registros. Después de eliminar 19 duplicados, permanecieron 67 publicaciones para el cribado. La evaluación de los títulos condujo a la exclusión de 24 documentos, por lo que permanecieron 43 registros. Posteriormente, la evaluación de los resúmenes determinó la exclusión de otros 24 documentos. Finalmente, 19 publicaciones cumplieron los criterios establecidos y conformaron el corpus documental utilizado para el análisis del capítulo.

La información seleccionada se organizó mediante una matriz documental en la que cada publicación se relacionó con el área tecnológica analizada, el principal aporte identificado, su contribución al objetivo del capítulo y la correspondiente

implicación tecnológica. El análisis descriptivo permitió caracterizar las tecnologías, aplicaciones y condiciones documentadas; el análisis relacional examinó las interacciones entre redes de distribución, protección eléctrica, calidad del suministro, recursos energéticos distribuidos y digitalización; y el análisis comparativo permitió identificar coincidencias, diferencias, ventajas, limitaciones y tendencias entre las soluciones estudiadas. La síntesis consideró particularmente la evolución de las redes, los mecanismos de protección, los problemas asociados con la calidad del suministro y las tecnologías empleadas para mejorar el desempeño operativo.

El estudio respetó los principios de integridad científica, transparencia documental y reconocimiento de la autoría intelectual. Debido a su naturaleza bibliográfica, no involucró la participación de seres humanos, animales, muestras biológicas ni datos personales, por lo que no requirió consentimiento informado ni procedimientos de intervención experimental. Las interpretaciones mantuvieron correspondencia con las publicaciones seleccionadas y se diferenciaron de los resultados originales comunicados por sus autores. Asimismo, la correspondencia entre las publicaciones seleccionadas, la matriz de extracción, las citas utilizadas y las referencias bibliográficas finales garantizó la trazabilidad documental del estudio. Cada referencia fue verificada antes de su incorporación al corpus documental.

6.2. Protección, calidad del suministro y digitalización de las redes de distribución

La síntesis comparativa permitió identificar tres tendencias principales en los estudios revisados

(Tabla 6.1). La primera correspondió a la protección eléctrica, caracterizada por el análisis de esquemas de coordinación y su adaptación ante la incorporación de generación distribuida, los cambios topológicos y los flujos bidireccionales. La segunda se relacionó con la calidad del suministro, ámbito en el que se identificaron investigaciones sobre perturbaciones eléctricas, armónicos, compensación de potencia reactiva, estabilidad y diagnóstico automatizado. La tercera comprendió la modernización y gestión de las redes de distribución, con estudios orientados a la reconfiguración, la estimación de estado, la planificación, la restauración del servicio, la supervisión, la gestión de la demanda y el mantenimiento de activos.

De manera transversal, el corpus evidenció la incorporación de tecnologías digitales aplicadas a la supervisión, el análisis y el control de los sistemas de distribución, entre ellas la inteligencia artificial, el aprendizaje automático, el internet de las cosas, la medición sincronizada y las representaciones digitales dinámicas. Asimismo, los estudios relacionados con recursos energéticos distribuidos abordaron su integración con la generación fotovoltaica, el almacenamiento energético, la movilidad eléctrica y la gestión activa de la demanda. En conjunto, los resultados mostraron una evolución de los sistemas eléctricos de distribución hacia configuraciones progresivamente más automatizadas, observables, flexibles y digitalizadas, en las que la protección, la operación de las redes y la calidad del suministro permanecieron como dimensiones tecnológicas interdependientes.

Tabla 6.1. Corpus documental sobre sistemas eléctricos de distribución.

Referencia	Área tecnológica analizada	Principal aporte identificado	Contribución al objetivo del capítulo	Implicación tecnológica
Alasali et al. (2024)	Protección de microredes y coordinación	Revisó esquemas de coordinación de protecciones para microredes AC, considerando nuevas condiciones de operación y requerimientos de selectividad	Aporta criterios para comprender la adaptación de la protección de redes de distribución con generación distribuida y operación flexible	Evolución desde protecciones convencionales hacia esquemas adaptativos y coordinados
Alajrash et al. (2024)	Calidad, estabilidad y compensación	Analizó dispositivos FACTS y su aplicación en calidad de energía, estabilidad y ubicación óptima ante una mayor penetración renovable	Relaciona la operación de redes modernas con tecnologías destinadas a controlar variables eléctricas y mejorar su desempeño	Mayor utilización de compensación flexible para gestionar tensión, flujo de potencia y estabilidad
Baba et al. (2024)	Protección de microredes	Sintetizó los principales desafíos de protección derivados de diferentes configuraciones, modos de operación y presencia de generación distribuida	Permite identificar las limitaciones de los esquemas tradicionales frente a redes con comportamiento bidireccional	Necesidad de estrategias de protección capaces de responder a cambios en topología y flujo de corriente

Bu et al. (2023)	Estabilidad y supervisión de redes activas	Revisó la utilización de tecnología D-PMU para estudiar estabilidad y dinámica de redes de distribución activas	Incorpora medición sincronizada como elemento para conocer el comportamiento dinámico de redes de distribución	Expansión de la supervisión de alta resolución temporal para diagnóstico y control de redes
Deka et al. (2024)	Topología de redes de distribución	Presentó fundamentos y métodos para el aprendizaje de topologías de redes de distribución mediante técnicas computacionales	Contribuye a la caracterización de la estructura de las redes y a su operación basada en información disponible	Incorporación de aprendizaje automático y análisis de datos para identificar configuraciones de red
Dehaghani et al. (2026)	Calidad de energía en redes con generación distribuida	Revisó tecnologías y estrategias destinadas a mejorar la calidad de energía en sistemas de distribución con generación distribuida	Vincula la expansión de recursos distribuidos con la necesidad de controlar perturbaciones y mantener condiciones adecuadas de suministro	Desarrollo de soluciones específicas para redes con alta penetración de generación distribuida
El-Fergany (2024)	Reconfiguración de redes	Revisó métodos computacionales para reconfigurar redes, mejorar tensión y reducir pérdidas	Aporta una perspectiva de operación y optimización de la configuración de las redes de distribución	Mayor aplicación de métodos de optimización para adaptar dinámicamente la estructura de las redes

Barasa Kabeyi & Olanrewaju (2023)	Redes inteligentes y transición energética	Analizó tecnologías de red eléctrica inteligente y sus aplicaciones en la transición hacia sistemas energéticos sostenibles	Integra digitalización, automatización y gestión energética dentro de la evolución de los sistemas eléctricos	Transformación de las redes convencionales hacia infraestructuras inteligentes y conectadas
Khetarpal et al. (2024)	Diagnóstico de calidad de energía	Desarrolló un enfoque basado en BI-LSTM y mecanismos de atención para segmentar y clasificar perturbaciones de calidad de energía	Aporta herramientas avanzadas para identificar automáticamente perturbaciones presentes en redes eléctricas	Incorporación de inteligencia artificial al diagnóstico automatizado de eventos de calidad de energía
Manias et al. (2024)	Ciberseguridad de redes inteligentes	Revisó componentes, amenazas y soluciones de seguridad para sistemas eléctricos ciberfísicos	Amplía el análisis de las redes de distribución hacia la seguridad de sus componentes digitales y comunicaciones	La protección de la red moderna requiere integrar seguridad eléctrica y ciberseguridad
Mansour et al. (2023)	IoT y representaciones digitales dinámicas	Realizó una revisión integral de aplicaciones de IoT y réplica digital en sistemas eléctricos	Introduce tecnologías digitales aplicables al monitoreo, modelación y gestión de sistemas eléctricos	Evolución hacia representaciones digitales conectadas con activos y procesos eléctricos reales

Mousa et al. (2024)	Gestión activa de demanda y recursos distribuidos	Revisó estrategias de gestión de la demanda orientadas a sistemas con elevada presencia de recursos energéticos distribuidos	Relaciona el comportamiento de la demanda con la flexibilidad necesaria para operar redes modernas.	Mayor interacción entre consumidores, recursos distribuidos, almacenamiento y sistemas de gestión energética
Oubrahim et al. (2023)	Perturbaciones y calidad de energía	Sistematizó técnicas de procesamiento de señales y reconocimiento de patrones para caracterizar perturbaciones eléctricas	Fortalece la identificación y diagnóstico de problemas que afectan la calidad del suministro	Uso creciente del procesamiento digital de señales y reconocimiento automatizado de eventos
Pham et al. (2025)	Planificación de redes de baja y media tensión	Revisó estrategias de planificación de redes de distribución considerando recursos energéticos distribuidos	Aporta criterios para adaptar la expansión de redes de baja y media tensión a nuevos patrones de generación y consumo	La planificación futura requiere considerar simultáneamente red convencional y recursos distribuidos
Rajora et al. (2024)	Gestión de activos eléctricos e inteligencia artificial	Revisó aplicaciones de modelos de aprendizaje automático para la gestión de activos de sistemas eléctricos y energéticos	Incorpora el mantenimiento y la gestión de activos como componentes de la confiabilidad de las redes de distribución	Transición hacia mantenimiento predictivo y toma de decisiones basada en datos

Shah et al. (2023)	Protección ante generación distribuida	Revisó los desafíos de protección producidos por la integración de fuentes distribuidas en las redes eléctricas	Permite reconocer cómo la generación distribuida modifica las condiciones tradicionales de protección	Necesidad de rediseñar criterios de detección, coordinación y selectividad ante flujos bidireccionales
Wang et **al. (2023)**	Resiliencia y restauración del suministro	Estudió estrategias de restauración secuencial utilizando punto de conexión electrónico y consideración de la recuperación de carga	Contribuye al análisis de continuidad y recuperación del servicio después de perturbaciones en redes de distribución	Incorporación de dispositivos electrónicos y estrategias dinámicas para acelerar la restauración de redes
Yadav et al. (2023)	Estimación de estado en redes de distribución	Revisó conceptos emergentes, oportunidades y desafíos de la estimación de estado en sistemas de distribución	Aporta fundamentos para mejorar la observación y conocimiento operativo de redes eléctricas modernas	Mayor integración de medición avanzada, datos distribuidos y métodos computacionales para estimar el estado de la red

En cuanto a la operación de las redes, los resultados identificaron la reconfiguración, la estimación de estado, la planificación y la restauración como líneas tecnológicas diferenciadas, pero relacionadas con la flexibilidad operativa. El-Fergany (2024) identificó diferentes métodos computacionales destinados a resolver problemas de reconfiguración en redes inteligentes, particularmente para modificar su

configuración operativa y mejorar su desempeño. Por su parte, Yadav et al. (2023) describieron la estimación de estado como un componente relevante para incrementar la observabilidad de los sistemas de distribución. La comparación entre ambos aportes permitió reconocer que la operación moderna incorporó simultáneamente herramientas destinadas a conocer el estado de la red y mecanismos capaces de modificar su configuración, estableciendo una relación funcional entre observabilidad y capacidad de control.

La restauración del suministro constituyó otra expresión de esta transformación operativa. Wang et al. (2023) estudiaron estrategias de restauración secuencial mediante puntos de conexión electrónica y consideraron, además, la recuperación temporal de la carga. En el corpus analizado, este enfoque se relacionó con la resiliencia y la recuperación del servicio, diferenciándose de aquellos orientados principalmente a la reducción de pérdidas o al control de tensión. Esta diferencia evidenció que la reconfiguración adquirió funciones más amplias: además de contribuir a la optimización de las condiciones normales de operación, se empleó para responder ante perturbaciones y favorecer la recuperación progresiva del suministro.

Los resultados mostraron que la evolución de los sistemas eléctricos de distribución se concentró en la articulación entre protección, operación, calidad del suministro y digitalización, en correspondencia con el objetivo del capítulo de analizar las tecnologías recientes y sus aplicaciones en las redes de distribución. Debido al carácter descriptivo, analítico y comparativo de la revisión bibliográfica, la interpretación se sustentó en la identificación y comparación de patrones tecnológicos dentro del corpus documental, y no en el establecimiento de relaciones estadísticas entre variables. En

este sentido, la presencia de investigaciones relacionadas con la protección y la calidad del suministro evidenció la relevancia adquirida por ambas dimensiones ante la incorporación de generación distribuida y recursos energéticos distribuidos (Alasali et al., 2024; Dehaghani et al., 2026).

En relación con la protección, se evidenció una transición hacia esquemas capaces de responder a modificaciones en la topología y en la dirección de los flujos eléctricos. Esta tendencia fue coherente con Alasali et al. (2024), quienes identificaron la necesidad de actualizar la coordinación de protecciones en microredes de corriente alterna debido a las nuevas condiciones operativas. De manera complementaria, Baba et al. (2024) señalaron que la generación distribuida y los diferentes modos de operación de las microredes incrementaron los desafíos asociados con la detección, la coordinación y la selectividad. La convergencia entre ambos estudios y los hallazgos de la presente revisión indicó que la protección dejó de depender exclusivamente de condiciones eléctricas relativamente estables y pasó a requerir mecanismos con mayor capacidad de adaptación ante configuraciones variables.

La presencia de generación distribuida también se relacionó con modificaciones en las condiciones tradicionales de protección. Shah et al. (2023) señalaron que la integración de fuentes distribuidas modificó los criterios convencionales de detección y coordinación, mientras que Alasali et al. (2024) describieron la evolución de los esquemas de protección hacia configuraciones más adaptativas en microredes. La coincidencia entre ambos estudios reforzó la necesidad de considerar los flujos bidireccionales y las variaciones topológicas como condiciones propias de las redes modernas.

Esta convergencia mostró, además, que la modernización de la protección no se limitó al reemplazo de dispositivos, sino que involucró modificaciones en los criterios de detección, operación y coordinación.

Respecto a la calidad del suministro, se observaron aportes relacionados con la identificación de perturbaciones, la compensación, los armónicos, las variaciones de tensión y la estabilidad. Esta tendencia coincidió con Dehaghani et al. (2026), quienes caracterizaron la mejora de la calidad de la energía como una necesidad asociada con la expansión de la generación distribuida. De manera complementaria, Oubrahim et al. (2023) identificaron el procesamiento de señales y el reconocimiento de patrones como herramientas relevantes para caracterizar perturbaciones eléctricas. La correspondencia entre estos estudios y el corpus analizado mostró que la calidad del suministro se abordó mediante una combinación de técnicas de análisis eléctrico y procesamiento computacional, particularmente en sistemas con una presencia creciente de electrónica de potencia.

La inteligencia artificial constituyó otra tendencia vinculada con el diagnóstico de perturbaciones relacionadas con la calidad de la energía. Khetarpal et al. (2024) utilizaron una arquitectura de memoria bidireccional a corto y largo plazo modificada mediante mecanismos de atención para segmentar y clasificar señales perturbadas, mientras que Oubrahim et al. (2023) sistematizaron diferentes técnicas de procesamiento de señales y reconocimiento de patrones aplicadas al diagnóstico de eventos eléctricos. La comparación entre ambos enfoques mostró una evolución desde procedimientos sustentados principalmente en características eléctricas hacia métodos capaces de procesar señales y reconocer automáticamente

diferentes tipos de perturbaciones. En consecuencia, la inteligencia artificial se presentó en el corpus como una tecnología aplicada al reconocimiento, la clasificación y el diagnóstico automatizado de eventos asociados con la calidad del suministro.

En cuanto a la operación de las redes, la reconfiguración, la estimación de estado, la planificación y la restauración se presentaron como líneas tecnológicas diferenciadas, pero relacionadas con la flexibilidad operativa. El-Fergany (2024) examinó diferentes métodos computacionales destinados a resolver problemas de reconfiguración en redes inteligentes, particularmente para modificar su configuración operativa y mejorar su desempeño. Por su parte, Yadav et al. (2023) describieron la estimación de estado como un componente relevante para incrementar la observabilidad de los sistemas de distribución. La comparación entre ambos aportes mostró que la operación moderna incorporó simultáneamente herramientas destinadas a conocer el estado de la red y mecanismos capaces de modificar su configuración, estableciendo una relación funcional entre observabilidad y capacidad de control.

La restauración del suministro constituyó otra expresión de esta transformación operativa. Wang et al., 2023 et al. (2023) estudiaron estrategias de restauración secuencial mediante puntos de conexión electrónica y consideraron, además, la recuperación temporal de la carga. En el corpus analizado, este enfoque se relacionó con la resiliencia y la recuperación del servicio, diferenciándose de aquellos orientados principalmente a la reducción de pérdidas o al control de tensión. Esta diferencia evidenció que la reconfiguración adquirió funciones más amplias: además de contribuir a la optimización de las condiciones normales de operación, se

empleó para responder ante perturbaciones y favorecer la recuperación progresiva del suministro.

El estudio permitió caracterizar la evolución tecnológica de los sistemas eléctricos de distribución a partir del análisis integrado de las redes, los esquemas de protección y la calidad del suministro. La revisión evidenció una transición hacia configuraciones más flexibles y automatizadas, asociadas con la incorporación de generación distribuida, la reconfiguración de las redes, la estimación de estado y la restauración del servicio. Estos avances mostraron que la modernización de la distribución eléctrica comprendió tanto modificaciones en su infraestructura como nuevas capacidades de supervisión, gestión y respuesta ante diferentes condiciones operativas.

En materia de protección, se identificó una creciente necesidad de esquemas adaptativos capaces de responder a cambios topológicos, flujos bidireccionales y presencia de recursos energéticos distribuidos. Respecto a la calidad del suministro, se reconoció la incorporación de técnicas avanzadas destinadas a detectar, clasificar y mitigar perturbaciones, variaciones de tensión y armónicos. Ambos componentes mostraron una relación cada vez más estrecha con las condiciones dinámicas de operación de las redes de distribución.

La digitalización, mediante inteligencia artificial, aprendizaje automático, internet de las cosas, medición sincronizada y representaciones digitales dinámicas, fortaleció las capacidades de supervisión, diagnóstico, análisis y control. En conjunto, los resultados evidenciaron que la evolución tecnológica de la distribución eléctrica se orientó hacia sistemas progresivamente más observables, flexibles, automatizados y resilientes, en los que la operación de las redes, la protección

y la calidad del suministro adquirieron un carácter crecientemente integrado.

6.3. Propuesta de sistema integrado para supervisión, protección y calidad del suministro

Los resultados de la revisión evidenciaron que la evolución de los sistemas eléctricos de distribución no depende únicamente de la modernización individual de sus componentes, sino de la capacidad para integrar supervisión, protección y calidad del suministro dentro de una misma estructura operativa. La incorporación de generación distribuida, los cambios topológicos, los flujos bidireccionales, la digitalización y las nuevas condiciones de carga incrementaron la necesidad de disponer de soluciones capaces de relacionar las variables eléctricas de la red con los eventos de protección y los indicadores asociados con la calidad del suministro.

A partir de estas necesidades se plantea una propuesta de desarrollo tecnológico orientada a integrar las principales dimensiones identificadas durante la revisión. La solución se concibe como un sistema modular capaz de adquirir y procesar información de las redes de distribución, supervisar sus condiciones operativas, evaluar el comportamiento de las protecciones y analizar indicadores relacionados con la calidad del suministro. La propuesta establece las bases conceptuales y funcionales para un desarrollo susceptible de validación progresiva en condiciones controladas y representativas de operación.

1. Título del desarrollo tecnológico

Sistema integrado para supervisión, protección y evaluación de la calidad del suministro en redes eléctricas de distribución.

2. Problema o necesidad tecnológica

Los sistemas eléctricos de distribución requieren mantener condiciones adecuadas de operación, protección y calidad del suministro frente a variaciones de carga, cambios en la configuración de las redes, incorporación de generación distribuida y ocurrencia de perturbaciones eléctricas. Estas condiciones incrementan la necesidad de disponer de mecanismos integrados que permitan conocer el estado de las redes y responder ante situaciones capaces de afectar su funcionamiento.

La revisión realizada mostró que la operación de las redes de distribución se aborda mediante estrategias de supervisión, estimación de estado, reconfiguración y restauración del servicio. De manera complementaria, la protección eléctrica requiere considerar las modificaciones en los flujos de potencia, la presencia de generación distribuida, los cambios topológicos y las condiciones de falla. La calidad del suministro, por su parte, demanda procedimientos destinados a identificar y evaluar perturbaciones, variaciones de tensión, armónicos y otros fenómenos eléctricos.

El tratamiento independiente de estas dimensiones dificulta disponer de una solución tecnológica capaz de relacionar el estado operativo de la red con las condiciones de protección y los indicadores de calidad del suministro. Por ello, se identificó la necesidad de desarrollar un sistema integrado que permita supervisar las redes de distribución, evaluar sus condiciones de protección y analizar la calidad del suministro eléctrico dentro de una misma arquitectura tecnológica.

3. Fundamento del desarrollo

La evidencia analizada mostró que los sistemas eléctricos de distribución evolucionaron desde configuraciones predominantemente pasivas hacia redes con mayores requerimientos de supervisión, flexibilidad y capacidad de respuesta.

La incorporación de generación distribuida y las modificaciones en las condiciones de operación transformaron los flujos eléctricos y generaron nuevos requerimientos para la protección y el control de las redes.

En este contexto, la protección requiere mecanismos capaces de responder a cambios en las condiciones operativas, mientras que la supervisión incorpora herramientas destinadas a estimar el estado de la red, analizar su topología, reconfigurar alimentadores y apoyar la restauración del suministro. Paralelamente, la calidad del suministro adquiere relevancia mediante la evaluación de perturbaciones eléctricas, variaciones de tensión, armónicos y otros fenómenos capaces de afectar el funcionamiento de los equipos y las cargas conectadas.

La convergencia entre estas dimensiones fundamenta el desarrollo de un sistema tecnológico que articule la supervisión de las redes, la evaluación de la protección y el análisis de la calidad del suministro. Esta integración permitirá transformar las variables eléctricas obtenidas de la red en información técnica útil para evaluar su comportamiento, identificar condiciones anómalas y apoyar su gestión operativa.

4. Objetivo general

Desarrollar y validar un sistema integrado para supervisar redes eléctricas de distribución, evaluar condiciones de protección y analizar la calidad del suministro en condiciones controladas y representativas de operación.

5. Descripción general de la solución propuesta

Se propone desarrollar un sistema tecnológico modular destinado a integrar y procesar información procedente de las redes eléctricas de distribución y de sus dispositivos de medición y protección.

Su estructura permitirá relacionar las condiciones operativas de la red con el comportamiento de las protecciones y los indicadores de calidad del suministro.

La solución procesará información relacionada con:

a) Configuración de las redes de distribución.

b) Estado operativo de los alimentadores.

c) Tensión eléctrica.

d) Corriente eléctrica.

e) Potencia activa y reactiva.

f) Flujos de potencia.

g) Condiciones de carga.

h) Cambios topológicos.

i) Generación distribuida.

j) Eventos eléctricos.

k) Condiciones de falla.

l) Actuación de dispositivos de protección.

m) Coordinación de protecciones.

n) Variaciones de tensión.

o) Perturbaciones eléctricas.

p) Distorsión armónica.

q) Indicadores de calidad del suministro.

r) Condiciones de continuidad del servicio.

s) Condiciones anómalas de operación.

t) Información técnica para la evaluación de la red.

A partir de estas variables y condiciones, la solución se estructurará en tres componentes tecnológicos principales.

Componente 1. Supervisión de redes de distribución. Permitirá integrar y procesar información relacionada con la configuración, el estado operativo, las condiciones de carga y el comportamiento eléctrico de las redes. Este componente proporcionará la información necesaria para caracterizar las condiciones de funcionamiento y reconocer modificaciones relevantes en la operación.

Componente 2. Evaluación de la protección eléctrica. Permitirá analizar condiciones asociadas con fallas, actuación de dispositivos de protección, coordinación y respuesta ante modificaciones en las condiciones de operación. Su funcionamiento relacionará los eventos eléctricos identificados con las condiciones existentes en la red durante su ocurrencia.

Componente 3. Evaluación de la calidad del suministro. Permitirá identificar y analizar perturbaciones eléctricas, variaciones de tensión, distorsión armónica y otros indicadores relacionados con la calidad del suministro. La información obtenida podrá relacionarse con las condiciones operativas y los eventos registrados por los demás componentes.

La integración funcional de estos componentes comprenderá la adquisición de las variables eléctricas, la supervisión del estado operativo, la evaluación de las condiciones de funcionamiento, la detección de eventos y fallas, el análisis de la actuación de las protecciones, la valoración de

los indicadores de calidad del suministro y la generación de información técnica para apoyar la gestión de la red.

La configuración específica de sensores, algoritmos, parámetros, criterios de decisión, protocolos de comunicación y arquitectura computacional podrá mantenerse reservada cuando constituya conocimiento tecnológico susceptible de protección.

6. Novedad o diferenciación tecnológica

La diferenciación tecnológica de la propuesta no se fundamentará en el desarrollo aislado de una red eléctrica, un sistema de protección o un instrumento destinado exclusivamente a medir la calidad de la energía. Su elemento distintivo consistirá en integrar, dentro de una misma solución tecnológica, la supervisión de la red, la evaluación de la protección y el análisis de la calidad del suministro.

Esta integración permitirá relacionar las condiciones operativas de la red con los eventos de protección y los indicadores de calidad del suministro. De esta manera, las variables eléctricas no serán evaluadas exclusivamente como registros independientes, sino como información asociada con el comportamiento general del sistema de distribución.

La evolución funcional propuesta comprenderá la adquisición y procesamiento de las variables eléctricas, la supervisión del estado de la red, la detección y evaluación de eventos, el análisis de las condiciones de protección y calidad del suministro y, finalmente, la generación de información técnica para apoyar la gestión operativa. De esta manera, el sistema avanzará desde una evaluación independiente de variables eléctricas hacia una evaluación integrada del comportamiento de las redes de distribución.

7. Productos tecnológicos esperados

El desarrollo podrá generar los siguientes productos tecnológicos:

a) Prototipo funcional del sistema integrado.

b) Módulo de supervisión de redes de distribución.

c) Módulo de procesamiento de variables eléctricas.

d) Módulo de evaluación del estado operativo de la red.

e) Módulo de análisis de condiciones de protección.

f) Módulo de evaluación de la coordinación de protecciones.

g) Módulo de detección de eventos y fallas.

h) Módulo de evaluación de la calidad del suministro.

i) Módulo de análisis de perturbaciones eléctricas.

j) Módulo de evaluación de tensión y armónicos.

k) Interfaz de supervisión y visualización.

l) Sistema de generación de alertas técnicas.

m) Sistema de generación de reportes.

n) Procedimiento para la evaluación integrada de redes, protección y calidad del suministro.

o) Manual técnico de operación y mantenimiento.

Estos productos podrán desarrollarse progresivamente de acuerdo con las etapas de diseño, integración y validación de la solución, de manera que los diferentes módulos puedan evaluarse individualmente antes de comprobar su funcionamiento articulado dentro del sistema integrado.

8. Nivel de madurez tecnológica

La meta inicial será alcanzar el nivel de madurez tecnológica 5 (TRL 5), mediante la integración y validación del sistema en condiciones controladas y representativas de la operación de redes eléctricas de distribución.

La trayectoria tecnológica prevista comprenderá la conceptualización y el diseño de la solución, seguidos por el desarrollo de sus componentes y su integración funcional. Posteriormente, se realizarán las pruebas necesarias para comprobar su funcionamiento y avanzar hacia la validación tecnológica del sistema en un entorno representativo.

La validación estará orientada a demostrar la funcionalidad del sistema sin asumir previamente su desempeño en redes comerciales bajo condiciones reales de operación. Una vez alcanzada esta etapa, el desarrollo podrá evolucionar hacia pruebas operativas y niveles superiores de madurez tecnológica.

9. Ámbito de aplicación

La solución tendrá aplicación potencial en:

a) Redes eléctricas de distribución.

b) Redes de baja tensión.

c) Redes de media tensión.

d) Alimentadores eléctricos.

e) Subestaciones de distribución.

f) Sistemas con generación distribuida.

g) Microredes.

h) Redes eléctricas inteligentes.

i) Instalaciones industriales.

j) Laboratorios de sistemas eléctricos.

k) Centros de investigación.

l) Instituciones de formación tecnológica.

m) Instituciones universitarias.

Una aplicación especialmente relevante corresponderá a las redes de distribución con generación distribuida, donde las modificaciones en las condiciones de operación pueden afectar simultáneamente el comportamiento de la red, los requerimientos de protección y la calidad del suministro. En estos escenarios, la integración de las tres dimensiones permitirá analizar sus interacciones dentro de una misma estructura tecnológica.

10. Estrategia de validación

La validación deberá comprobar el funcionamiento articulado del sistema, desde la adquisición de los datos de la red eléctrica hasta la generación de información técnica para su análisis. Este proceso comprenderá la supervisión de las condiciones de operación, la identificación de eventos, el análisis del comportamiento de las protecciones y la evaluación de la calidad del suministro eléctrico.

Los escenarios de validación podrán representar diferentes condiciones de carga, configuraciones de red, cambios topológicos, incorporación de

generación distribuida, fallas y perturbaciones eléctricas. Según las características de cada escenario, la evaluación considerará:

a) Capacidad de adquisición de variables eléctricas.

b) Capacidad de supervisión de la red.

c) Identificación del estado operativo.

d) Reconocimiento de cambios topológicos.

e) Detección de eventos eléctricos.

f) Evaluación de condiciones de falla.

g) Evaluación de la actuación de las protecciones.

h) Análisis de la coordinación de protecciones.

i) Identificación de perturbaciones.

j) Evaluación de la tensión.

k) Evaluación de la distorsión armónica.

l) Generación de alertas.

m) Generación de reportes técnicos.

n) Integración funcional de los tres componentes tecnológicos.

La validación permitirá determinar la funcionalidad de la solución en condiciones controladas y representativas de operación, así como identificar las modificaciones necesarias antes de avanzar hacia escenarios de mayor complejidad y niveles superiores de madurez tecnológica.

11. Potencial de transferencia

La transferencia tecnológica podrá comprender:

a) Prototipo funcional del sistema integrado.

b) Software de supervisión de redes.

c) Módulos de evaluación de protección.

d) Módulos de análisis de calidad del suministro.

e) Metodología de evaluación integrada.

f) Procedimientos técnicos de supervisión.

g) Documentación técnica especializada.

h) Manual de operación y mantenimiento.

i) Capacitación especializada.

j) Asistencia técnica para la implementación.

k) Servicio tecnológico de diagnóstico de redes.

l) Servicio de evaluación de la calidad del suministro.

m) Servicio de apoyo para el análisis de protección.

n) Licenciamiento de componentes tecnológicos susceptibles de protección.

La solución podrá transferirse a empresas eléctricas, instituciones tecnológicas, universidades, centros de investigación y otras organizaciones que requieran herramientas para la supervisión y evaluación de redes eléctricas de distribución. La modularidad propuesta permitirá adaptar sus componentes a diferentes configuraciones y necesidades de aplicación, sin requerir necesariamente la implementación simultánea de todas sus funcionalidades.

En conjunto, la propuesta transforma los principales hallazgos de la revisión bibliográfica en una alternativa de desarrollo tecnológico orientada a integrar dimensiones que frecuentemente se abordan de manera independiente. La articulación entre supervisión, protección y calidad del suministro permitirá relacionar el estado operativo de las redes con los eventos eléctricos y sus efectos sobre las condiciones del servicio, estableciendo una estructura funcional para la adquisición, procesamiento, evaluación y utilización de información técnica.

El desarrollo propuesto constituye una base para avanzar desde la integración conceptual identificada en la literatura hacia una solución susceptible de diseño, implementación y validación tecnológica. Su desarrollo progresivo permitirá evaluar la funcionalidad de los diferentes componentes, comprobar su integración en condiciones representativas y determinar las posibilidades de evolución hacia niveles superiores de madurez tecnológica. De esta manera, la propuesta establece una continuidad entre los resultados de la revisión y una posible aplicación tecnológica orientada a fortalecer la supervisión, la protección y la calidad del suministro en los sistemas eléctricos de distribución.

Referencias

Alajrash, B. H., Salem, M., Swadi, M., Senjyu, T., Kamarol, M., & Motahhir, S. (2024). A comprehensive review of FACTS devices in modern power systems: Addressing power quality, optimal placement, and stability with renewable energy penetration. ***Energy Reports, 11***, 5350–5371. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.05.011

Alasali, F., Mustafa, H., Saidi, A. S., El-Naily, N., Abeid, S., Holderbaum, W., Omran, E., & Saad, S. M. (2024). The recent development of protection coordination schemes based on inverse of AC microgrid: A review. *IET Generation, Transmission & Distribution, 18*(1), 1–23. https://doi.org/10.1049/gtd2.13074

Baba, M., Nor, N. B. M., Sheikh, M. A., Alharthi, Y. Z., Shutari, H., & Majeed, M. F. (2024). A review on microgrid protection challenges and approaches to address protection issues. *IEEE Access, 12*, 175278–175303. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3458047

Barasa Kabeyi, M. J., & Olanrewaju, O. A. (2023). Smart grid technologies and application in the sustainable energy transition: A review. *International Journal of Sustainable Energy, 42*(1), 685–758. https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2222298

Bu, S., Meegahapola, L. G., Wadduwage, D. P., & Foley, A. M. (2023). Stability and dynamics of active distribution networks with D-PMU technology: A review. *IEEE Transactions on Power Systems, 38*(3), 2791–2804. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3179488

Dehaghani, M. N., Korõtko, T., & Rosin, A. (2026). Power quality improvement in DG based distribution systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 225*, 116184. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116184

Deka, D., Kekatos, V., & Cavraro, G. (2024). Learning distribution grid topologies: A tutorial. *IEEE Transactions on Smart Grid, 15*(1), 999–1013. https://doi.org/10.1109/TSG.2023.3271902

El-Fergany, A. A. (2024). Reviews, challenges, and insights on computational methods for network reconfigurations in smart electricity distribution networks. *Archives of Computational Methods in Engineering, 31*, 1233–1253. https://doi.org/10.1007/s11831-023-10007-0

Khetarpal, P., Nagpal, N., Siano, P., & Al-Numay, M. (2024). Power quality disturbance signal segmentation and classification based on modified BI-LSTM with double attention mechanism. *IET Generation, Transmission & Distribution,18*(1), 50–62. https://doi.org/10.1049/gtd2.13065

Manias, D. M., Saber, A. M., Radaideh, M. I., Gaber, A. T., Maniatakos, M., Zeineldin, H., Svetinovic, D., & El-Saadany, E. F. (2024). Trends in smart grid cyber-physical security: Components, threats, and solutions. *IEEE Access, 12*, 161329–161356. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3477714

Mansour, D. E. A., Numair, M., Zalhaf, A. S., Ramadan, R., Darwish, M. M. F., Huang, Q., Hussien, M. G., & Abdel, R. O. (2023). Applications of IoT and digital twin in electrical power systems: A comprehensive survey. *IET Generation, Transmission & Distribution, 17*(20), 4457–4479. https://doi.org/10.1049/gtd2.12940

Mousa, H. H. H., Mahmoud, K., & Lehtonen, M. (2024). Recent developments of demand-side management towards flexible DER-rich power systems: A systematic review. *IET Generation, Transmission & Distribution, 18*(13), 2259–2300. https://doi.org/10.1049/gtd2.13204

Oubrahim, Z., Amirat, Y., Benbouzid, M., & Ouassaid, M. (2023). Power quality disturbances characterization using signal processing and pattern recognition techniques: A comprehensive review. *Energies, 16*(6), 2685. https://doi.org/10.3390/en16062685

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., . . . Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ, 372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

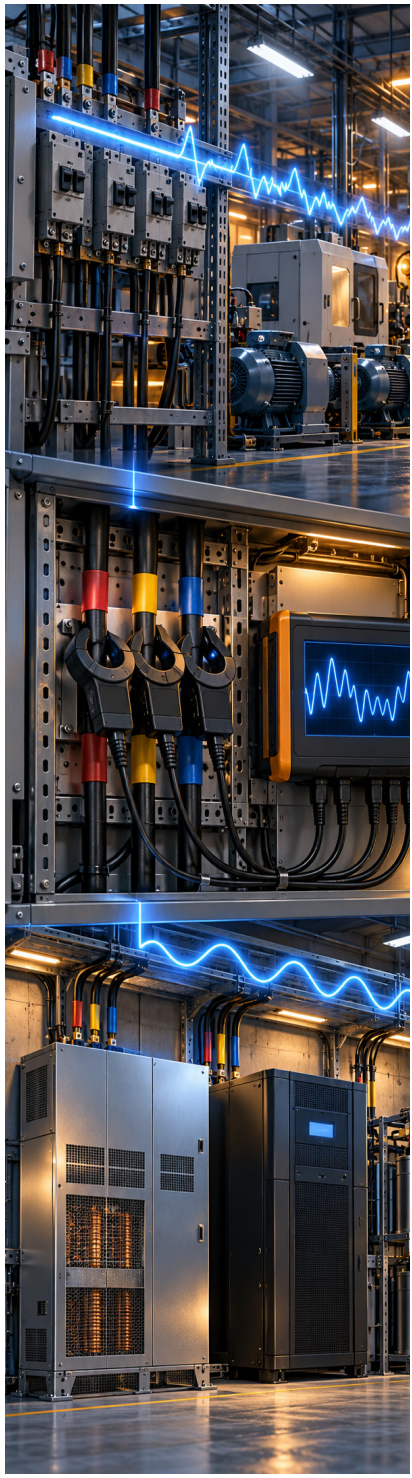
Pham, T. N., Shah, R., Dao, M. N., Sultanova, N., & Islam, S. (2025). Low and medium voltage distribution network planning with distributed energy resources: A survey. *Electrical Engineering, 107*, 1797–1828. https://doi.org/10.1007/s00202-024-02535-0

Rajora, G. L., Sanz, B. M. A., Bertling, T. L., & Urrea, C. J. E. (2024). A review of asset management using artificial intelligence-based machine learning models: Applications for the electric power and energy system. *IET Generation, Transmission & Distribution, 18*(12), 2155–2170. https://doi.org/10.1049/gtd2.13183

Shah, H., Chakravorty, J., & Chothani, N. (2023). Protection challenges on integration of distributed sources to power system network: A review. *Journal of Applied Research and Technology, 21*(2), 212–226. https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2023.21.2.1630

Wang, Y., Su, X., Song, M., Jiang, W., Shahidehpour, M., & Xu, Q. (2023). Sequential load restoration with soft open points and time-dependent cold load pickup for resilient distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid, 14*(5), 3427–3438. https://doi.org/10.1109/TSG.2023.3262199

Yadav, A. P., Nutaro, J., Park, B., Dong, J., Liu, B., Yoginath, S. B., Yin, H., Dong, J., Dong, Y., Liu, Y., Kuruganti, T., & Xue, Y. (2023). Review of emerging concepts in distribution system state estimation: Opportunities and challenges. *IEEE Access, 11*, 70503–70515. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3292793



07.

Calidad de la energía eléctrica: perturbaciones, diagnóstico y tecnologías de mitigación

Jefferson Alejandro Pinargote Rodríguez

Victor Ramon Rivadeneira Jame

7.1. Perturbaciones y diagnóstico de la calidad de la energía eléctrica

La calidad de la energía eléctrica adquirió mayor relevancia ante la creciente digitalización y electrificación de los sistemas contemporáneos (Oubrahim et al., 2023). La incorporación de generación distribuida y dispositivos basados en electrónica de potencia introdujo nuevas condiciones capaces de alterar las características del suministro eléctrico (Mousa

et al., 2024). Estas transformaciones incrementaron la necesidad de mantener parámetros eléctricos compatibles con la confiabilidad y el funcionamiento adecuado de las redes y las cargas conectadas (Mansour et al., 2023). Además, la expansión de cargas sensibles aumentó la importancia de identificar variaciones capaces de afectar procesos industriales, equipos electrónicos y sistemas automatizados. En este contexto, la calidad de la energía eléctrica se vinculó progresivamente con la continuidad operativa, el desempeño de los equipos, la eficiencia energética y la estabilidad funcional de las instalaciones eléctricas modernas.

La literatura reciente abordó las perturbaciones eléctricas mediante técnicas de procesamiento de señales y reconocimiento de patrones (Oubrahim et al., 2023). También se desarrollaron métodos destinados a caracterizar armónicos, interarmónicos, fluctuaciones, transitorios y otras alteraciones presentes en los sistemas eléctricos modernos (Taghvaie et al., 2023). Paralelamente, los enfoques basados en inteligencia artificial ampliaron las capacidades para la detección y clasificación automatizada de eventos relacionados con la calidad de la energía eléctrica (Samanta et al., 2025). Estos avances favorecieron el desarrollo de procedimientos diagnósticos capaces de diferenciar eventos según sus características temporales, frecuenciales y morfológicas. Asimismo, la automatización facilitó el procesamiento de señales eléctricas y la identificación de patrones asociados con perturbaciones específicas. Su aplicación fortaleció la evaluación técnica de los eventos y proporcionó información relevante para la selección de medidas destinadas a su mitigación.

En las redes de distribución, la integración de recursos energéticos distribuidos modificó las condiciones de operación y generó nuevos desafíos

para preservar la calidad de la energía eléctrica (Dehaghani et al., 2026). Particularmente, la generación renovable conectada a la red mediante convertidores se relacionó con la presencia de fluctuaciones de tensión, distorsiones armónicas y desequilibrios asociados con la potencia reactiva (Fidelis et al., 2025). Estas condiciones incrementaron los requerimientos de supervisión, control y compensación, especialmente en redes caracterizadas por una participación creciente de fuentes renovables y dispositivos electrónicos de potencia.

Frente a estas condiciones, los sistemas fotovoltaicos conectados a redes trifásicas incorporaron estrategias adaptativas destinadas a compensar la potencia reactiva y mejorar la calidad de la energía eléctrica (Prasad et al., 2024). Estas estrategias permitieron responder de manera más dinámica ante las variaciones de carga y los cambios en la generación renovable, contribuyendo a mantener las variables eléctricas dentro de condiciones operativas adecuadas. Asimismo, el empleo de dispositivos basados en electrónica de potencia facilitó el control de la tensión y la gestión de los flujos bidireccionales, especialmente en alimentadores con elevada penetración fotovoltaica. En este contexto, la supervisión continua de las variables eléctricas adquirió mayor relevancia para identificar perturbaciones y favorecer el ajuste oportuno de las condiciones de operación.

Aunque aumentaron las investigaciones relacionadas con el diagnóstico y la mitigación de perturbaciones, persistieron diferencias entre las técnicas, los escenarios de aplicación y los criterios empleados para su evaluación (Samanta et al., 2025). Algunas investigaciones enfatizaron la clasificación mediante aprendizaje automático, mientras que otras priorizaron técnicas

de procesamiento en los dominios temporal y frecuencial (Oubrahim et al., 2023). Asimismo, las estrategias de mitigación variaron según el tipo de perturbación, la arquitectura de la red y la tecnología de compensación utilizada (Alajrash et al., 2024). Esta diversidad evidenció que la evaluación de la calidad de la energía eléctrica requirió considerar conjuntamente las características de las perturbaciones, las condiciones operativas de las redes y las capacidades de las tecnologías disponibles para su diagnóstico y mitigación.

El análisis de la calidad de la energía eléctrica resultó relevante para la formación tecnológica porque articuló sus principios con herramientas contemporáneas de diagnóstico y compensación (Khetarpal et al., 2024). Su importancia también se relacionó con la incorporación de Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna (FACTS), filtros, compensadores y estrategias avanzadas de control (Alajrash et al., 2024). Estas tecnologías permitieron analizar la respuesta de las redes ante perturbaciones, variaciones de carga y cambios en las condiciones de operación. Además, favorecieron el desarrollo de capacidades para interpretar parámetros eléctricos, seleccionar alternativas de compensación y evaluar su desempeño en sistemas de distribución.

En correspondencia con esta problemática, el presente capítulo tuvo como objetivo analizar comparativamente los enfoques empleados para identificar perturbaciones, establecer procedimientos de diagnóstico y evaluar alternativas tecnológicas para su mitigación, con el propósito de reconocer soluciones orientadas a mantener condiciones adecuadas de calidad, confiabilidad y eficiencia en los sistemas eléctricos modernos (Chen et al., 2025).

El capítulo se desarrolló mediante una revisión bibliográfica de carácter descriptivo, analítico y comparativo, orientada al estudio de la calidad de la energía eléctrica, las principales perturbaciones, los procedimientos de diagnóstico y las tecnologías empleadas para su mitigación. El enfoque descriptivo permitió caracterizar los métodos y las tecnologías reportados en la literatura reciente; el analítico facilitó la identificación e interpretación de los principales aportes metodológicos y tecnológicos; y el comparativo permitió contrastar tecnologías, procedimientos de diagnóstico, aplicaciones y tendencias según las condiciones de operación de los sistemas eléctricos estudiados. Por su alcance y procedimiento, la revisión no se definió como sistemática.

La búsqueda bibliográfica se realizó en Scopus, Web of Science y ScienceDirect, seleccionadas por su cobertura de literatura científica especializada en ingeniería eléctrica, electrónica de potencia, calidad de la energía, procesamiento de señales, sistemas de distribución y tecnologías de compensación. Estas fuentes se consultaron para identificar publicaciones relacionadas con perturbaciones eléctricas, métodos de diagnóstico, generación distribuida, inteligencia artificial, dispositivos FACTS, filtros, compensadores y estrategias avanzadas de control. La información bibliográfica considerada comprendió los autores, el año de publicación, el título, la revista, el volumen, el número, las páginas y el DOI, con el propósito de garantizar la trazabilidad y verificabilidad de las referencias utilizadas.

El periodo de búsqueda y selección bibliográfica comprendió publicaciones correspondientes a 2023–2026, con énfasis en estudios relacionados con la evolución de los sistemas eléctricos, la integración de recursos energéticos distribuidos, el diagnóstico automatizado de perturbaciones y

las tecnologías contemporáneas de mitigación. Esta delimitación temporal permitió concentrar el análisis en desarrollos tecnológicos recientes y en las tendencias reportadas para mejorar la calidad, la confiabilidad y la estabilidad del suministro eléctrico.

La estrategia de búsqueda se estructuró mediante combinaciones de términos en inglés directamente relacionados con el objeto del capítulo. Se utilizaron las expresiones power quality AND power disturbances, power quality AND diagnosis, power quality disturbances AND signal processing, harmonic distortion AND mitigation, power quality AND artificial intelligence, distributed generation AND power quality, FACTS AND power quality y voltage fluctuations AND compensation. Asimismo, se emplearon los operadores booleanos AND y OR para combinar conceptos y ampliar o restringir la recuperación documental según su pertinencia. La estrategia evitó términos excesivamente generales que pudieran incorporar literatura desvinculada del diagnóstico y la mitigación de perturbaciones en sistemas eléctricos.

Como criterios de inclusión, se consideraron artículos científicos publicados entre 2023 y 2026 en revistas indexadas en las fuentes bibliográficas seleccionadas, siempre que presentaran una relación directa con la calidad de la energía eléctrica, las perturbaciones, su diagnóstico o las tecnologías destinadas a su mitigación. También se incluyeron publicaciones que aportaran desarrollos tecnológicos, procedimientos metodológicos, análisis comparativos o aplicaciones relacionadas con armónicos, interarmónicos, fluctuaciones de tensión, transitorios, desequilibrios, compensación de potencia reactiva, procesamiento de señales, inteligencia artificial, dispositivos FACTS, filtros y sistemas electrónicos de potencia. Además, se requirió información bibliográfica verificable

y un DOI identificable para las publicaciones incorporadas al corpus documental.

Como criterios de exclusión, se eliminaron los registros duplicados recuperados en más de una fuente de información, las publicaciones situadas fuera del periodo 2023–2026, los documentos sin relación directa con el objetivo del capítulo y los trabajos cuya información bibliográfica no pudiera verificarse adecuadamente. También se excluyeron las publicaciones sin DOI, debido a que este elemento constituyó un requisito para su incorporación, así como los artículos que, pese a abordar sistemas eléctricos, no aportaran información específica sobre perturbaciones, procedimientos de diagnóstico, tecnologías de compensación, mitigación o calidad del suministro. De esta manera, la depuración documental atendió a criterios de pertinencia temática, delimitación temporal y verificabilidad de las fuentes.

El proceso de selección documental se organizó mediante las etapas de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión, tomando como referencia la estructura general de Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA 2020) (Page et al., 2021), adaptada al carácter descriptivo, analítico y comparativo de la revisión. En la etapa de identificación se localizaron 156 registros mediante las estrategias de búsqueda aplicadas en Scopus, Web of Science y ScienceDirect. Después de la eliminación de duplicados y del cribado inicial según los criterios temáticos y temporales, permanecieron 91 registros. Posteriormente, la evaluación de la pertinencia del contenido y de la disponibilidad de información bibliográfica verificable permitió conservar 54 publicaciones para la etapa de elegibilidad. Finalmente, 11 artículos cumplieron integralmente los criterios establecidos y conformaron el corpus documental utilizado para el análisis del capítulo.

De cada publicación seleccionada se extrajeron los elementos correspondientes a la referencia bibliográfica, el área tecnológica, el problema abordado, el principal aporte, la tecnología estudiada, la aplicación, la contribución al objetivo del capítulo y la implicación tecnológica. La información se organizó para facilitar la identificación de patrones, coincidencias y diferencias entre los estudios seleccionados. El análisis descriptivo permitió reconocer las características y las líneas de investigación predominantes; el análisis relacional facilitó la interpretación de los aportes metodológicos y tecnológicos y de sus vínculos con el diagnóstico y la mitigación de las perturbaciones; y el análisis comparativo permitió contrastar los métodos de procesamiento de señales, las técnicas de inteligencia artificial, los sistemas de compensación, los filtros, los dispositivos FACTS y las estrategias de control según sus aplicaciones y finalidades. Finalmente, los hallazgos se integraron para establecer una interpretación conjunta de las tendencias identificadas y de las alternativas tecnológicas disponibles para mantener condiciones adecuadas de calidad, confiabilidad y eficiencia en los sistemas eléctricos modernos.

7.2. Diagnóstico de perturbaciones y tecnologías de mitigación

El corpus documental estuvo conformado por 11 artículos científicos publicados entre 2023 y 2026, seleccionados por su relación directa con la calidad de la energía eléctrica, las perturbaciones, los procedimientos de diagnóstico y las tecnologías de mitigación. A partir del análisis de estas publicaciones se identificaron cuatro áreas tecnológicas principales: caracterización y diagnóstico de perturbaciones; inteligencia artificial y procesamiento de señales; integración de recursos energéticos distribuidos y generación

fotovoltaica; y compensación y control mediante tecnologías basadas en electrónica de potencia.

Esta clasificación permitió organizar los estudios según el problema tecnológico abordado y su contribución al objetivo del capítulo. Los trabajos examinados evidenciaron una tendencia hacia la incorporación de métodos automatizados para identificar y caracterizar eventos relacionados con la calidad de la energía eléctrica, particularmente mediante procesamiento de señales, reconocimiento de patrones y aprendizaje automático. Paralelamente, se identificaron investigaciones orientadas a la integración de generación distribuida y recursos renovables, especialmente por sus implicaciones sobre la tensión, los armónicos, la potencia reactiva y las condiciones operativas de las redes.

Otra tendencia correspondió al desarrollo de dispositivos y estrategias de compensación destinados a mejorar las condiciones eléctricas de los sistemas, entre ellos FACTS, D-FACTS, algoritmos de control y soluciones aplicadas a sistemas fotovoltaicos. Asimismo, algunos estudios ampliaron el análisis hacia herramientas digitales destinadas a la supervisión y gestión de los sistemas eléctricos, lo que evidenció una progresiva articulación entre adquisición de información, diagnóstico, control y compensación.

En conjunto, el corpus mostró una transición desde procedimientos convencionales de diagnóstico hacia soluciones que integraron medición, procesamiento de información, inteligencia artificial, electrónica de potencia y control avanzado. Esta convergencia permitió abordar la calidad de la energía eléctrica desde una perspectiva tecnológica más integrada, en la que el diagnóstico de las perturbaciones se relacionó con la selección y aplicación de alternativas para su mitigación. La Tabla 7.1 sintetiza los principales aportes de los estudios analizados y su contribución al objetivo del capítulo.

Tabla 7.1. Resultados de la revisión bibliográfica sobre calidad de la energía eléctrica.

Referencia	Área tecnológica analizada	Principal aporte identificado	Contribución al objetivo del capítulo	Implicación tecnológica
Oubrahim et al. (2023)	Caracterización de perturbaciones y procesamiento de señales	Revisó técnicas de procesamiento de señales y reconocimiento de patrones para caracterizar perturbaciones de calidad eléctrica	Proporcionó fundamentos para identificar y diferenciar perturbaciones mediante características de las señales eléctricas	Fortaleció el diagnóstico basado en análisis temporal, frecuencial y reconocimiento de patrones
Taghvaie et al. (2023)	Armónicos y técnicas de estimación	Analizó problemas relacionados con armónicos y métodos tradicionales y basados en inteligencia artificial para su estimación	Permitió comprender la detección y estimación de distorsiones armónicas dentro del diagnóstico de calidad eléctrica	Favoreció la incorporación de métodos computacionales para evaluar componentes armónicas en redes eléctricas
Mansour et al. (2023)	IoT y representaciones digitales dinámicas en sistemas eléctricos	Examinó aplicaciones de Internet de las cosas y representaciones digitales dinámicas en sistemas eléctricos	Amplió el enfoque del diagnóstico hacia tecnologías digitales para supervisión, representación y gestión de sistemas eléctricos	Promovió arquitecturas de monitoreo digital capaces de integrar información operacional y modelos virtuales

Khetarpal et al. (2024)	Inteligencia artificial para diagnóstico de perturbaciones	Desarrolló segmentación y clasificación de perturbaciones mediante BI-LSTM con doble atención	Aportó un enfoque automatizado para segmentar y clasificar eventos de calidad eléctrica	Evidenció la aplicación del aprendizaje profundo para mejorar el reconocimiento automatizado de perturbaciones
Mousa et al. (2024)	Gestión de demanda y recursos energéticos distribuidos	Revisó desarrollos recientes de la gestión del lado de la demanda en sistemas con alta presencia de recursos energéticos distribuidos	Relacionó la flexibilidad de la demanda con las nuevas condiciones operativas derivadas de la integración de recursos distribuidos	Favoreció estrategias de gestión capaces de adaptar el consumo a las condiciones dinámicas del sistema
Alajrash et al. (2024)	FACTS, calidad eléctrica y estabilidad	Revisó dispositivos FACTS considerando calidad de potencia, ubicación óptima, estabilidad e integración de energías renovables	Permitió relacionar las tecnologías FACTS con la mitigación de problemas de calidad y el comportamiento estable de las redes	Sustentó el empleo de compensadores electrónicos para controlar variables eléctricas ante condiciones operativas cambiantes
Prasad et al. (2024)	Control de sistemas fotovoltaicos trifásicos	Propuso algoritmos de control basados en gradiente estocástico para mejorar la calidad eléctrica en sistemas fotovoltaicos conectados a redes trifásicas	Contribuyó al análisis de estrategias de control aplicadas a generación fotovoltaica conectada a sistemas de distribución	Mostró la utilidad del control adaptativo para mejorar el comportamiento eléctrico de sistemas renovables interconectados

Fidelis et al. (2025)	Generación renovable distribuida y mitigación	Revisó problemas de calidad eléctrica asociados con sistemas de generación renovable distribuida conectados a la red y sus técnicas de mitigación	Integró la problemática de las perturbaciones con las condiciones generadas por la incorporación de recursos renovables distribuidos	Orientó la selección de técnicas de mitigación según las características de la generación distribuida y de la red
Samanta et al. (2025)	Inteligencia artificial y aprendizaje automático	Revisó técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático para la clasificación de eventos de calidad eléctrica	Aportó una perspectiva sobre la automatización del reconocimiento y clasificación de eventos eléctricos	Reforzó la incorporación de modelos computacionales como herramientas de diagnóstico y apoyo a la supervisión
Chen et al. (2025)	D-FACTS y redes de distribución	Revisó la aplicación de dispositivos D-FACTS para optimizar la calidad eléctrica en redes de distribución	Vinculó la compensación electrónica con la optimización de parámetros de calidad en redes de distribución	Amplió la aplicación de tecnologías FACTS hacia soluciones distribuidas para el control de condiciones eléctricas
Dehaghani et al. (2026)	Calidad eléctrica en sistemas de distribución con generación distribuida	Analizó estrategias para mejorar la calidad eléctrica en sistemas de distribución con generación distribuida	Permitió integrar las perturbaciones asociadas con la generación distribuida y las alternativas disponibles para su mitigación	Destacó la necesidad de estrategias específicas de control y compensación ante nuevas condiciones de operación

La revisión permitió identificar una evolución en el estudio de la calidad de la energía eléctrica, desde la caracterización convencional de las perturbaciones hacia procedimientos que integraron procesamiento de señales, reconocimiento de patrones y técnicas de inteligencia artificial. Oubrahim et al. (2023) señalaron la utilidad del análisis de características temporales y frecuenciales para diferenciar eventos, mientras que Khetarpal et al. (2024) incorporaron arquitecturas de aprendizaje profundo para segmentar y clasificar señales. Esta tendencia fue consistente con Samanta et al. (2025), quienes identificaron una expansión de los métodos de aprendizaje automático aplicados a la clasificación de eventos. La convergencia entre estos estudios evidenció que el diagnóstico adquirió un carácter progresivamente automatizado; sin embargo, las diferencias entre las técnicas respondieron a la naturaleza de las perturbaciones, la estructura de las señales y los requerimientos computacionales. En consecuencia, una de las principales implicaciones tecnológicas correspondió al desarrollo de sistemas de diagnóstico capaces de transformar las señales eléctricas en información útil para la identificación oportuna de eventos.

En relación con las perturbaciones armónicas, Taghvaie et al. (2023) mostraron que su estimación incorporó tanto métodos tradicionales como herramientas basadas en inteligencia artificial, lo que evidenció la coexistencia de diferentes niveles de complejidad metodológica. Este enfoque resultó complementario al de Oubrahim et al. (2023), debido a que la caracterización mediante procesamiento de señales proporcionó elementos para identificar propiedades específicas de las perturbaciones. La principal diferencia radicó en que los métodos orientados al análisis de armónicos se concentraron en la estimación de componentes espectrales, mientras que los procedimientos

de clasificación se orientaron al reconocimiento de eventos completos. Esta distinción resultó relevante para el objetivo del capítulo porque mostró que el diagnóstico no dependió de una única técnica, sino de la correspondencia entre el tipo de perturbación y el procedimiento analítico empleado. Desde el punto de vista tecnológico, esta complementariedad favoreció el desarrollo de arquitecturas de diagnóstico capaces de integrar la extracción de características, la estimación y la clasificación.

La incorporación de recursos energéticos distribuidos introdujo otra dimensión en la problemática de la calidad de la energía eléctrica. Fidelis et al. (2025) relacionaron la generación renovable conectada a la red con diferentes problemas de calidad y examinaron técnicas para su mitigación, mientras que Dehaghani et al. (2026) analizaron alternativas de mejora específicamente aplicadas a sistemas de distribución con generación distribuida. Ambos estudios coincidieron en señalar que la incorporación de generación distribuida modificó las condiciones operativas de las redes y requirió soluciones adaptadas de control y compensación. Mousa et al. (2024), desde el análisis de la gestión de la demanda en sistemas con elevada presencia de recursos energéticos distribuidos, ampliaron esta perspectiva al considerar la flexibilidad como un componente de la operación. La principal diferencia se encontró en el ámbito de aplicación: mientras los estudios sobre calidad de la energía se concentraron en las perturbaciones y su mitigación, la gestión de la demanda abordó la adaptación de los recursos del sistema a condiciones operativas variables. Esta complementariedad evidenció que la preservación de la calidad del suministro requirió una gestión progresivamente más coordinada entre la generación, la demanda y los dispositivos de control.

En los sistemas fotovoltaicos conectados a redes trifásicas, Prasad et al. (2024) evidenciaron la aplicación de algoritmos de control basados en gradiente estocástico para mejorar la calidad de la energía eléctrica. Este enfoque coincidió con la problemática examinada por Fidelis et al. (2025), aunque ambos estudios abordaron la respuesta tecnológica desde perspectivas diferentes: el primero se concentró en el desarrollo y aplicación de algoritmos de control, mientras que el segundo examinó de manera más amplia los problemas de calidad y las alternativas de mitigación asociados con la generación renovable distribuida. La comparación entre ambos trabajos permitió reconocer una relación entre la identificación de los problemas derivados de la integración de fuentes renovables y el desarrollo de soluciones de control específicamente adaptadas a estos sistemas. En consecuencia, una de las principales implicaciones tecnológicas correspondió a la necesidad de incorporar estrategias de control capaces de responder dinámicamente a las variaciones de la generación, la carga y las condiciones de la red.

Respecto a las tecnologías de compensación, Alajrash et al. (2024) relacionaron los dispositivos FACTS con la calidad de la energía eléctrica, la estabilidad y la penetración de energías renovables, mientras que Chen et al. (2025) examinaron específicamente la aplicación de D-FACTS en redes de distribución. La comparación entre ambos estudios mostró una evolución desde soluciones de compensación orientadas al comportamiento general del sistema hacia configuraciones distribuidas con mayor capacidad de actuación en puntos específicos de las redes de distribución. Esta diferencia no implicó la sustitución de una tecnología por otra, sino su adaptación a distintas arquitecturas y requerimientos operativos. Desde el punto de vista tecnológico, esta evolución amplió

las posibilidades de controlar variables eléctricas y responder a perturbaciones de acuerdo con las características y necesidades particulares de cada red.

Finalmente, Mansour et al. (2023) incorporaron el internet de las cosas y las representaciones digitales dinámicas como herramientas para la supervisión y representación de los sistemas eléctricos, aportando una dimensión digital que complementó los métodos de diagnóstico y compensación examinados en los demás estudios. Esta perspectiva resultó coherente con la tendencia hacia sistemas eléctricos con mayor capacidad de observación, procesamiento y gestión de información. No obstante, su contribución se diferenció de los trabajos centrados directamente en las perturbaciones, debido a que abordó principalmente la infraestructura digital necesaria para supervisar y representar el comportamiento del sistema. En conjunto, la literatura analizada evidenció una convergencia entre diagnóstico automatizado, integración de recursos energéticos distribuidos, control avanzado, compensación electrónica y supervisión digital. Esta convergencia fortaleció la posibilidad de abordar la calidad de la energía eléctrica mediante soluciones integradas; sin embargo, las diferencias entre las arquitecturas de red, los tipos de perturbación, las tecnologías de compensación y los requerimientos de procesamiento limitaron la aplicación uniforme de una única estrategia tecnológica.

La revisión presentó limitaciones relacionadas con el periodo documental establecido, las fuentes bibliográficas consultadas y la disponibilidad de artículos con DOI verificable. Asimismo, la heterogeneidad de las tecnologías, los métodos de diagnóstico y los escenarios de

aplicación restringió la comparación directa entre determinadas soluciones. Los hallazgos se sustentaron exclusivamente en la información reportada en las publicaciones seleccionadas y no incluyeron procesos de diseño, simulación o validación experimental propios. Estas limitaciones deben considerarse al interpretar los resultados y al valorar su posible aplicación en contextos tecnológicos diferentes de los examinados en el corpus documental.

La revisión permitió establecer que el diagnóstico de la calidad de la energía eléctrica evolucionó hacia métodos que integraron procesamiento de señales, reconocimiento de patrones e inteligencia artificial. Esta transformación amplió las capacidades para identificar y caracterizar perturbaciones y fortaleció la formación tecnológica orientada al análisis automatizado de los sistemas eléctricos. Asimismo, los estudios analizados evidenciaron que la incorporación de generación distribuida y sistemas fotovoltaicos introdujo nuevas condiciones operativas relacionadas con variaciones de tensión, distorsiones armónicas y requerimientos de potencia reactiva. Estas condiciones demandaron estrategias adaptadas de control y compensación, capaces de responder a la variabilidad de la generación, la carga y las características de las redes.

La literatura examinada evidenció una complementariedad entre los dispositivos de compensación, los algoritmos de control y las herramientas digitales destinadas a la supervisión de las redes. Esta integración permitió abordar la calidad de la energía eléctrica desde la identificación y el diagnóstico de las perturbaciones hasta la selección de alternativas para su mitigación. En este contexto, los hallazgos mostraron que no existe una única solución tecnológica aplicable a todas

las condiciones, debido a que la selección de los métodos de diagnóstico, control y compensación depende del tipo de perturbación, la arquitectura de la red y las condiciones específicas de operación.

En conjunto, los resultados permitieron concluir que la calidad de la energía eléctrica adquirió un carácter multidimensional, en el que convergieron el diagnóstico automatizado, el control, la compensación, la generación distribuida y la supervisión digital. Esta perspectiva favoreció una comprensión tecnológica integrada de los sistemas eléctricos modernos y proporcionó una base para orientar el desarrollo y la selección de soluciones destinadas a mejorar la eficiencia, la confiabilidad y la capacidad de respuesta de las redes ante la creciente incorporación de recursos energéticos renovables.

7.3. Propuesta de sistema inteligente para diagnóstico y apoyo a la mitigación

Los resultados de la revisión permitieron identificar una convergencia entre las tecnologías destinadas al diagnóstico de perturbaciones y aquellas orientadas a su mitigación, particularmente mediante procesamiento de señales, inteligencia artificial, electrónica de potencia y estrategias avanzadas de control. A partir de estos hallazgos, se plantea una propuesta de desarrollo tecnológico dirigida a integrar la adquisición y el procesamiento de información eléctrica, la identificación y caracterización de perturbaciones y la evaluación de alternativas para su tratamiento. La propuesta se concibe como una solución modular susceptible de desarrollo y validación progresivos, orientada a fortalecer la evaluación de la calidad de la energía eléctrica en redes de distribución con presencia de generación distribuida y sistemas fotovoltaicos.

1. Título del desarrollo tecnológico

Sistema inteligente para diagnóstico y apoyo a la mitigación de perturbaciones en redes eléctricas de distribución

2. Problema o necesidad tecnológica

Los sistemas eléctricos de distribución enfrentan condiciones cada vez más variables debido a la incorporación de generación distribuida, sistemas fotovoltaicos, electrónica de potencia y cargas sensibles. Estas condiciones pueden favorecer la aparición de variaciones de tensión, distorsiones armónicas, transitorios, desequilibrios y otras perturbaciones capaces de afectar el funcionamiento de equipos e instalaciones.

La revisión mostró que el diagnóstico de estas condiciones se abordó mediante técnicas de procesamiento de señales, reconocimiento de patrones, inteligencia artificial y métodos de estimación. De manera complementaria, las estrategias de mitigación incorporaron filtros, compensadores, dispositivos FACTS, D-FACTS y algoritmos avanzados de control. Sin embargo, los estudios trataron frecuentemente el diagnóstico y la mitigación desde perspectivas tecnológicas diferenciadas.

Esta separación dificultó disponer de una estructura integrada que relacionara la adquisición de información eléctrica, la identificación de perturbaciones, su caracterización y el apoyo para seleccionar alternativas de mitigación. Por ello, se identificó la necesidad tecnológica de desarrollar un sistema que integre el diagnóstico y el apoyo a la mitigación de perturbaciones en redes eléctricas de distribución, especialmente bajo condiciones asociadas con generación distribuida y sistemas fotovoltaicos.

3. Fundamento del desarrollo

La evidencia analizada mostró una evolución desde métodos convencionales de caracterización de perturbaciones hacia procedimientos que incorporaron procesamiento digital de señales, reconocimiento de patrones y técnicas de inteligencia artificial. Los estudios revisados también indicaron que la integración de recursos energéticos distribuidos generó nuevas condiciones de operación relacionadas con la tensión, los armónicos, la potencia reactiva y el comportamiento dinámico de las redes.

Paralelamente, las investigaciones sobre FACTS y D-FACTS mostraron posibilidades de compensación y control de variables eléctricas, mientras que los estudios sobre sistemas fotovoltaicos incorporaron estrategias de control orientadas a mejorar la calidad de la energía eléctrica. Estas contribuciones permanecieron asociadas a diferentes componentes tecnológicos, entre ellos el diagnóstico, la clasificación, el control y la mitigación.

Esta convergencia fundamentó el desarrollo de una solución que relacione la información obtenida mediante medición con el diagnóstico de perturbaciones y la identificación de alternativas tecnológicas de mitigación. La propuesta no sustituiría los sistemas de protección eléctrica existentes, sino que proporcionaría información técnica complementaria para apoyar la evaluación y gestión de la calidad del suministro.

4. Objetivo general

Desarrollar y validar un sistema inteligente para el diagnóstico de perturbaciones y el apoyo a la selección de alternativas de mitigación de la calidad de la energía eléctrica en condiciones controladas y representativas de redes de distribución.

5. Descripción general de la solución propuesta

Se propone desarrollar un sistema tecnológico modular destinado a integrar información procedente de instrumentos de medición y sistemas de supervisión de redes eléctricas de distribución.

La solución permitirá procesar información relacionada con:

a) Tensión eléctrica.

b) Corriente eléctrica.

c) Frecuencia.

d) Potencia activa y reactiva.

e) Variaciones de tensión.

f) Distorsión armónica.

g) Perturbaciones transitorias.

h) Desequilibrios eléctricos.

i) Fluctuaciones.

j) Interarmónicos.

k) Eventos asociados con la calidad de la energía.

l) Condiciones de carga.

m) Generación distribuida.

n) Generación fotovoltaica conectada a la red.

o) Comportamiento de variables eléctricas.

p) Indicadores de calidad del suministro.

q) Información temporal y frecuencial de las señales.

r) Condiciones anómalas de operación.

s) Alternativas tecnológicas de compensación.

t) Información técnica para el apoyo a la mitigación.

La solución estará estructurada en cuatro componentes principales:

Componente 1. Adquisición y procesamiento de señales eléctricas.

Permitirá integrar información procedente de instrumentos de medición y acondicionar las señales para su posterior análisis, considerando variables y características relevantes para la evaluación de la calidad de la energía eléctrica.

Componente 2. Diagnóstico y caracterización de perturbaciones.

Permitirá identificar y caracterizar eventos asociados con la calidad de la energía mediante procedimientos de análisis de señales y reconocimiento de patrones. El sistema podrá diferenciar las perturbaciones de acuerdo con sus características eléctricas, temporales y frecuenciales.

Componente 3. Evaluación de alternativas de mitigación.

Permitirá relacionar las perturbaciones identificadas con alternativas tecnológicas disponibles, considerando soluciones como filtros, compensadores, dispositivos FACTS, D-FACTS y estrategias de control, según las características de la condición evaluada.

Componente 4. Visualización y generación de información técnica.

Permitirá presentar los eventos identificados, sus características y las alternativas de mitigación consideradas mediante interfaces de visualización y reportes técnicos destinados a apoyar la interpretación de los resultados.

La integración funcional propuesta comprenderá de manera secuencial la medición de las variables eléctricas, el procesamiento de las señales, la detección y caracterización de los eventos, el diagnóstico de las perturbaciones, la evaluación de las alternativas disponibles y la generación de información para apoyar su mitigación.

La configuración específica de sensores, algoritmos, parámetros, criterios de clasificación, reglas de decisión, protocolos de comunicación y arquitectura computacional podrá mantenerse reservada cuando constituya conocimiento tecnológico susceptible de protección.

6. Novedad o diferenciación tecnológica

La diferenciación tecnológica no se fundamentará en desarrollar aisladamente un instrumento de medición, un método de clasificación, un filtro o un dispositivo de compensación. La propuesta buscará integrar en una misma solución tecnológica la adquisición de señales, el diagnóstico de perturbaciones y el apoyo a la selección de alternativas de mitigación.

La característica diferenciadora estará relacionada con la posibilidad de establecer una correspondencia funcional entre la perturbación identificada y las alternativas tecnológicas disponibles para su tratamiento. De esta manera, el sistema evolucionará desde una evaluación independiente de variables eléctricas hacia una estructura integrada de diagnóstico y apoyo a la mitigación.

La evolución funcional propuesta comprenderá la medición y el procesamiento de las variables eléctricas, la detección y caracterización de los eventos, el diagnóstico de las perturbaciones, su evaluación y la generación de información destinada a apoyar la selección de alternativas de mitigación.

Esta diferenciación deberá comprobarse posteriormente mediante desarrollo experimental, comparación técnica y evaluación de antecedentes de propiedad intelectual, por lo que no se asumirá anticipadamente exclusividad o novedad jurídica.

7. Productos tecnológicos esperados

El desarrollo podrá generar:

a) Prototipo funcional del sistema integrado.

b) Módulo de adquisición y procesamiento de señales eléctricas.

c) Módulo de caracterización de perturbaciones.

d) Módulo de diagnóstico y clasificación de eventos.

e) Módulo de evaluación de la calidad de la energía.

f) Módulo de análisis de variaciones de tensión.

g) Módulo de análisis de distorsión armónica.

h) Módulo de evaluación de perturbaciones transitorias y fluctuaciones.

i) Módulo de evaluación de alternativas de mitigación.

j) Interfaz de supervisión y visualización.

k) Sistema de generación de alertas técnicas.

l) Sistema de generación de reportes.

m) Procedimiento para el diagnóstico integrado de la calidad de la energía eléctrica.

n) Procedimiento para la evaluación de alternativas de mitigación.

o) Manual técnico de operación y mantenimiento.

8. Nivel de madurez tecnológica

La meta inicial de desarrollo será alcanzar un nivel de madurez tecnológica 5 (TRL 5), siempre que el prototipo pueda ser integrado y validado en un entorno representativo de una red eléctrica de distribución. Este nivel no se considerará alcanzado por la sola evidencia bibliográfica disponible, debido a que el corpus analizado no proporcionó resultados experimentales de validación del sistema integrado propuesto.

La trayectoria tecnológica prevista comprenderá las etapas de conceptualización, diseño, desarrollo, integración, pruebas funcionales, validación en condiciones representativas y optimización.

La etapa de validación deberá demostrar la funcionalidad del sistema en escenarios controlados y posteriormente representativos, considerando diferentes condiciones de carga, perturbaciones y presencia de generación distribuida. Una vez obtenida evidencia experimental suficiente, podrá establecerse el nivel de madurez tecnológica efectivamente alcanzado.

9. Ámbito de aplicación

La solución tendrá aplicación potencial en:

a) Redes eléctricas de distribución.

b) Alimentadores de baja y media tensión.

c) Sistemas con generación distribuida.

d) Sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

e) Microredes.

f) Instalaciones industriales con cargas sensibles.

g) Laboratorios de sistemas eléctricos.

h) Centros de investigación.

i) Instituciones de formación tecnológica.

j) Instituciones universitarias.

Una aplicación particularmente pertinente corresponderá a redes de distribución con elevada incorporación de generación distribuida y sistemas fotovoltaicos, donde las variaciones de generación y carga puedan modificar las condiciones de calidad de la energía y requerir procedimientos específicos de diagnóstico y mitigación.

10. Estrategia de validación

La validación deberá demostrar que el sistema puede ejecutar de manera integrada la adquisición de información, el procesamiento de señales, la detección de eventos, la caracterización de perturbaciones, el diagnóstico de las condiciones de calidad, la evaluación de alternativas de mitigación y la generación de información técnica.

Los escenarios de validación podrán representar diferentes condiciones de carga, variaciones de tensión, presencia de generación distribuida, operación de sistemas fotovoltaicos y ocurrencia controlada de perturbaciones eléctricas.

La evaluación deberá considerar, según corresponda:

a) Capacidad de adquisición de variables eléctricas.

b) Procesamiento adecuado de las señales.

c) Identificación de eventos relacionados con la calidad de la energía eléctrica.

d) Caracterización temporal y frecuencial.

e) Identificación de variaciones de tensión.

f) Evaluación de distorsión armónica.

g) Reconocimiento de fluctuaciones y transitorios.

h) Identificación de desequilibrios.

i) Clasificación de perturbaciones.

j) Correspondencia entre los eventos identificados y las alternativas de mitigación.

k) Generación de alertas técnicas.

l) Generación de reportes.

m) Integración funcional de los componentes tecnológicos.

La validación permitirá determinar la funcionalidad de la solución en condiciones controladas y representativas, sin asumir previamente su desempeño en redes comerciales reales.

11. Potencial de transferencia

La transferencia tecnológica podrá comprender:

a) Prototipo funcional del sistema de diagnóstico.

b) Software de procesamiento y evaluación de señales.

c) Módulo de diagnóstico de perturbaciones.

d) Módulo de evaluación de la calidad de la energía.

e) Módulo de apoyo a la selección de alternativas de mitigación.

f) Metodología de diagnóstico de perturbaciones.

g) Procedimientos técnicos para la evaluación de la calidad de la energía eléctrica.

h) Documentación técnica especializada.

i) Manual de operación y mantenimiento.

j) Capacitación especializada.

k) Asistencia técnica para la implementación.

l) Servicio tecnológico de diagnóstico de la calidad de la energía eléctrica.

m) Servicio de evaluación de perturbaciones.

n) Servicio de apoyo para la selección de alternativas de mitigación.

o) Licenciamiento de componentes tecnológicos susceptibles de protección.

La solución podrá transferirse a empresas eléctricas, instituciones tecnológicas, universidades, centros de investigación e instalaciones industriales que requieran herramientas para el diagnóstico y la evaluación de la calidad de la energía eléctrica. Su implementación deberá realizarse progresivamente,

de acuerdo con el nivel de madurez tecnológica alcanzado y la evidencia obtenida durante las etapas de prueba y validación.

La propuesta transforma los principales hallazgos de la revisión bibliográfica en una alternativa de desarrollo tecnológico que articula la adquisición y el procesamiento de señales, el diagnóstico de perturbaciones y la evaluación de alternativas de mitigación. Su estructura modular permitirá avanzar progresivamente desde la conceptualización y el diseño hasta la integración y validación en condiciones representativas, sin asumir anticipadamente un desempeño que deberá demostrarse experimentalmente. De esta manera, el sistema propuesto establece una continuidad entre la evidencia analizada y su posible aplicación tecnológica, con potencial para fortalecer la supervisión y gestión de la calidad de la energía eléctrica y favorecer su posterior transferencia a diferentes contextos de distribución, investigación y formación tecnológica.

Referencias

Alajrash, B. H., Salem, M., Swadi, M., Senjyu, T., Kamarol, M., & Motahhir, S. (2024). A comprehensive review of FACTS devices in modern power systems: Addressing power quality, optimal placement, and stability with renewable energy penetration. *Energy Reports, 11*, 5350–5371. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.05.011

Chen, W., Fan, Y., Lin, J., Fang, X., Huang, X., Li, Z., Yuan, J., Xiao, F., Zhang, D., Jiang, J., & Ma, G. (2025). A review on the application of D-FACTS devices for power quality optimization in distribution networks. *Measurement and Control*, 1–14. https://doi.org/10.1177/00202940251403834

Dehaghani, M. N., Korõtko, T., & Rosin, A. (2026). Power quality improvement in DG based distribution systems: A review. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews, 225***, 116184. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116184

Fidelis, E. T., Khan, N. D., & Tsafack, P. (2025). Grid-connected distributed renewable energy generation systems: Power quality issues, and mitigation techniques – A review. ***Energy Reports, 13***, 3181–3203. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.02.050

Khetarpal, P., Nagpal, N., Siano, P., & Al-Numay, M. (2024). Power quality disturbance signal segmentation and classification based on modified BI-LSTM with double attention mechanism. ***IET Generation, Transmission & Distribution, 18***(1), 50–62. https://doi.org/10.1049/gtd2.13065

Mansour, D. E. A., Numair, M., Zalhaf, A. S., Ramadan, R., Darwish, M. M. F., Huang, Q., Hussien, M. G., & Abdel, R. O. (2023). Applications of IoT and digital twin in electrical power systems: A comprehensive survey. ***IET Generation, Transmission & Distribution, 17***(20), 4457–4479. https://doi.org/10.1049/gtd2.12940

Mousa, H. H. H., Mahmoud, K., & Lehtonen, M. (2024). Recent developments of demand-side management towards flexible DER-rich power systems: A systematic review. ***IET Generation, Transmission & Distribution, 18***(13), 2259–2300. https://doi.org/10.1049/gtd2.13204

Oubrahim, Z., Amirat, Y., Benbouzid, M., & Ouassaid, M. (2023). Power quality disturbances characterization using signal processing and pattern recognition techniques: A comprehensive review. ***Energies, 16***(6), 2685. https://doi.org/10.3390/en16062685

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., . . . Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. ***BMJ, 372***, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Prasad, D., Kumar, N., Sharma, R., Alotaibi, M. A., Malik, H., García, M. F. P., & Hossaini, M. A. (2024). Stochastic-gradient-based control algorithms for power quality enhancement in solar photovoltaic interfaced three-phase distribution system. ***IET Generation, Transmission & Distribution, 18***(22), 3567–3578. https://doi.org/10.1049/gtd2.13300

Samanta, I. S., Mohanty, S., Parida, S. M., Rout, P. K., et al. (2025). Artificial intelligence and machine learning techniques for power quality event classification: A focused review and future insights. ***Results in Engineering, 25***, 103873. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103873

Taghvaie, A., Warnakulasuriya, T., Kumar, D., Zare, F., Sharma, R., & Vilathgamuwa, D. M. (2023). A comprehensive review of harmonic issues and estimation techniques in power system networks based on traditional and artificial intelligence/machine learning. ***IEEE Access, 11***, 31417–31442. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3260768



08.

Digitalización de los sistemas eléctricos: automatización, sensores e internet de las cosas

Daniel Elias Mera Sonorza

Edgar Ivan Rivera Choez

8.1. Digitalización y automatización de los sistemas eléctricos

El propósito del capítulo consistió en analizar comparativamente los fundamentos, las aplicaciones, las capacidades y los desafíos asociados con la digitalización de los sistemas eléctricos contemporáneos (Alao et al., 2024). El análisis resultó pertinente para la formación tecnológica porque permitió relacionar la infraestructura eléctrica con los procesos de adquisición de datos, automatización y comunicación digital (Rehtanz et al., 2024).

Asimismo, favoreció la comprensión de la contribución de los sensores, el internet de las cosas y otras tecnologías digitales a la supervisión y operación de los sistemas eléctricos modernos (Abdelkader et al., 2024). En conjunto, este enfoque proporcionó una base para comprender la transición desde infraestructuras eléctricas convencionales hacia sistemas caracterizados por mayores niveles de observación, conectividad, automatización y capacidad de gestión inteligente.

El capítulo se desarrolló mediante una revisión bibliográfica de enfoque cualitativo y alcance descriptivo y analítico, orientada a examinar la digitalización de los sistemas eléctricos mediante la automatización, los sensores y el internet de las cosas. El análisis documental permitió organizar los conceptos, las aplicaciones, las arquitecturas tecnológicas, las capacidades operativas y los principales desafíos asociados con la incorporación de tecnologías digitales en las infraestructuras eléctricas contemporáneas.

La búsqueda bibliográfica se desarrolló durante 2026 en las bases de datos Scopus, Web of Science y ScienceDirect. Se consideraron publicaciones científicas correspondientes al período 2023–2026, con énfasis en artículos de revisión, estudios de síntesis, investigaciones aplicadas y trabajos tecnológicos directamente relacionados con sistemas eléctricos digitalizados. La estrategia de búsqueda incluyó términos como digitalización de sistemas eléctricos, automatización eléctrica, sensores inteligentes, Internet of Things, smart grids, digital twins, monitoring systems y power distribution digitalization.

La población documental estuvo constituida por publicaciones científicas relacionadas con la digitalización, la automatización, la adquisición de datos, los sensores, las comunicaciones y el internet de las cosas aplicados a sistemas eléctricos. Como resultado de la búsqueda se identificaron 108 documentos. Se incluyeron publicaciones

correspondientes al período 2023–2026 que presentaran pertinencia temática, información técnica identificable y datos bibliográficos completos. Se excluyeron 91 documentos por duplicidad, ausencia de relación directa con los sistemas eléctricos, orientación exclusivamente comercial o insuficiencia de información metodológica o tecnológica para establecer comparaciones. Después de este proceso de depuración, 17 publicaciones conformaron el corpus documental utilizado para el análisis.

La selección documental se realizó mediante la revisión del título, el resumen, las palabras clave y el contenido técnico de los documentos recuperados. Posteriormente, las 17 publicaciones seleccionadas se organizaron en cinco categorías de análisis: automatización de procesos eléctricos; tecnologías sensoriales; comunicación e internet de las cosas; procesamiento y gestión de datos; y aplicaciones digitales para la operación y el mantenimiento. Esta clasificación permitió establecer relaciones entre las tecnologías identificadas, sus funciones operativas y sus ámbitos de aplicación.

El análisis comparativo consideró las características tecnológicas, las funciones, los requerimientos de comunicación, la capacidad de adquisición de información, el nivel de automatización, las aplicaciones y las principales limitaciones. En relación con los sensores, se examinó su función en la medición de variables eléctricas y operativas; para el internet de las cosas, se consideraron la conectividad, el intercambio de información y la integración de dispositivos; mientras que, para la automatización, se analizaron la supervisión, el control, el diagnóstico y la respuesta operativa. La información se sistematizó mediante matrices documentales y posteriormente se integró en categorías temáticas.

Finalmente, se realizó una integración crítica de las evidencias identificadas con el propósito de reconocer aplicaciones consolidadas, tendencias

tecnológicas, limitaciones y oportunidades de desarrollo en los sistemas eléctricos digitalizados. Este procedimiento permitió establecer una base comparativa para interpretar la articulación entre sensado, comunicación, procesamiento de información, automatización y gestión digital en las publicaciones seleccionadas.

8.2. Sensores, internet de las cosas y tecnologías digitales para la supervisión eléctrica

Los 17 artículos seleccionados abordaron diversos componentes tecnológicos de la infraestructura eléctrica, lo que permitió clasificarlos en cinco áreas: digitalización de redes; automatización y supervisión; sensores y adquisición de datos; internet de las cosas y comunicaciones; y tecnologías digitales avanzadas. La clasificación se estableció de acuerdo con la función tecnológica de las soluciones analizadas y no únicamente con su denominación. Los sensores se relacionaron principalmente con la adquisición de información; el internet de las cosas y las tecnologías de comunicación, con la conectividad y el intercambio de datos; la automatización, con la supervisión y la actuación sobre los sistemas; y las plataformas digitales, con el procesamiento, la integración y la gestión de la información.

El corpus documental evidenció una creciente convergencia entre estas tecnologías mediante su integración en arquitecturas digitales. Esta evolución amplió las capacidades de observación, intercambio de información, diagnóstico, supervisión y mantenimiento de los sistemas eléctricos. Asimismo, se identificaron aplicaciones relacionadas con redes de distribución, gestión de activos, representaciones digitales dinámicas y sistemas energéticos inteligentes. En este contexto, la Tabla 8.1 sintetiza los principales aportes de las publicaciones seleccionadas, su contribución al objetivo del capítulo y sus implicaciones tecnológicas.

Tabla 8.1. Síntesis del corpus documental sobre digitalización de sistemas eléctricos.

Referencia	Área tecnológica analizada	Principal aporte identificado	Contribución al objetivo del capítulo	Implicación tecnológica
Ahsan et al. (2023)	Digitalización y gestión basada en datos	Analizó tecnologías y técnicas para sistemas eléctricos inteligentes basados en datos	Permitió relacionar digitalización con procesamiento y utilización de información eléctrica	Fortalecimiento de arquitecturas eléctricas orientadas a datos
Mansour et al. (2023)	IoT y representaciones digitales dinámicas	Integró aplicaciones de IoT y representaciones digitales en sistemas eléctricos	Permitió comprender la relación entre conectividad, representación digital y operación	Mayor integración entre activos físicos y plataformas digitales
Aghahadi et al. (2024)	Digitalización de redes de distribución	Analizó estrategias, tecnologías y desafíos asociados con la digitalización de redes	Aportó una visión estructurada sobre la transformación digital de la distribución eléctrica	Incremento de la observación, automatización y gestión digital
Qays et al. (2023)	IoT y comunicaciones	Revisó tecnologías, protocolos y aplicaciones de comunicación para sistemas eléctricos asistidos por IoT	Permitió identificar la comunicación como soporte fundamental de la digitalización	Interconexión de dispositivos mediante arquitecturas de comunicación

Kirmani et al. (2023)	IoT aplicado a redes inteligentes	Sistematizó tecnologías, arquitecturas, aplicaciones y desafíos del IoT en redes eléctricas	Permitió establecer funciones específicas del IoT dentro de sistemas eléctricos digitalizados	Integración de sensores, dispositivos y plataformas conectadas
Wang et al. (2024)	Red eléctrica digital e IoT	Analizó tecnologías para la colaboración entre redes eléctricas digitales e IoT	Explicó mecanismos de integración entre infraestructura eléctrica y ecosistemas digitales	Convergencia entre infraestructura eléctrica y tecnologías IoT
Rodríguez et al. (2024)	Digitalización de distribución	Propuso indicadores para caracterizar y medir la digitalización de sistemas de distribución	Permitió identificar dimensiones cuantificables de la transformación digital	Evaluación estructurada del nivel de digitalización de redes
Cheng et al. (2024)	Sensores y estimación de estado	Analizó el empleo conjunto de PMU, SCADA, AMI y otras fuentes de información	Aportó evidencia sobre la importancia de múltiples fuentes sensoriales para representar estados eléctricos	Mayor observación y precisión en la supervisión de redes
Rajagopalan et al. (2024)	IoT y computación en la nube	Relacionó IoT y computación en la nube con distribución energética sostenible y eficiente	Permitió vincular conectividad, procesamiento remoto y gestión de sistemas de distribución	Plataformas distribuidas para procesamiento y gestión energética

Sharma et al. (2023)	Tecnologías Smart Grid e IoT	Revisó tecnologías asociadas con redes inteligentes e Internet de las cosas	Permitió reconocer la convergencia tecnológica que sustenta la digitalización eléctrica	Integración de tecnologías digitales, comunicación y automatización
Mortensen et al. (2024)	Mantenimiento digital	Analizó sistemas de mantenimiento proactivo habilitados digitalmente para redes de distribución	Incorporó el mantenimiento como aplicación relevante de la digitalización	Transición hacia mantenimiento basado en información operacional
Heluany & Gkioulos (2024)	Representación digital	Revisó aplicaciones de representaciones digitales en generación y distribución eléctrica	Permitió identificar representaciones virtuales como herramientas para monitoreo y análisis	Simulación, diagnóstico y seguimiento de activos mediante modelos digitales
Mchirgui et al. (2024)	Representación digital y Smart Grid	Analizó aplicaciones y desafíos de representaciones digitales en redes inteligentes	Complementó la comprensión de la representación virtual dentro de arquitecturas digitales	Integración entre datos físicos, modelos virtuales y gestión inteligente
Kabir et al. (2024)	Representación digital e IoT	Estudió la relación entre representaciones digitales, IoT y sistemas energéticos	Permitió reconocer la convergencia entre sensado, conectividad y representación digital	Desarrollo de sistemas energéticos con mayor capacidad de modelación dinámica

Alao et al. (2024)	Representación digital en sistemas fotovoltaicos	Analizó aplicaciones, desafíos y oportunidades de representaciones digitales en sistemas fotovoltaicos	Amplió el análisis hacia aplicaciones digitales en generación renovable	Supervisión y representación digital de sistemas fotovoltaicos
Rehtanz et al. (2024)	Arquitecturas digitales e ICT	Propuso una arquitectura de tecnologías de información y comunicación para sistemas energéticos resilientes	Permitió relacionar digitalización con arquitectura de comunicación y resiliencia	Sistemas energéticos distribuidos con mayor coordinación tecnológica
Abdelkader et al. (2024)	Sistemas energéticos virtualizados	Analizó la evolución de sistemas energéticos virtuales y su integración tecnológica	Permitió ampliar la perspectiva hacia nuevas formas de coordinación digital	Mayor flexibilidad para integrar recursos energéticos distribuidos

La clasificación mostró que la digitalización no se concentró en una tecnología específica, sino en la integración progresiva de procesos de adquisición de datos, comunicación, procesamiento y actuación. Ahsan et al. (2023) relacionaron la evolución de los sistemas eléctricos con arquitecturas basadas en datos, mientras que Aghahadi et al. (2024) analizaron específicamente la transformación digital de las redes de distribución. Ambos enfoques coincidieron en considerar la información como un componente esencial

de la transformación tecnológica de los sistemas eléctricos. Esta convergencia permitió interpretar la digitalización como un proceso transversal que modificó diferentes funciones de la infraestructura eléctrica y favoreció una mayor integración entre sus componentes físicos y digitales.

Los sensores y los sistemas de adquisición constituyeron elementos fundamentales para incrementar la capacidad de observación de las redes. Cheng et al. (2024) mostraron la importancia de combinar unidades de medición fasorial, sistemas de supervisión, control y adquisición de datos, infraestructura de medición avanzada y otras fuentes de información para mejorar la representación del estado eléctrico. Rodríguez et al. (2024), desde una perspectiva complementaria, plantearon dimensiones destinadas a medir el grado de digitalización de las redes de distribución. Mientras el primer enfoque se concentró en la integración de diferentes fuentes de información para representar las condiciones del sistema, el segundo permitió evaluar dimensiones de su transformación digital. En conjunto, ambos estudios evidenciaron una relación entre la disponibilidad de información, la capacidad de observación y el nivel de digitalización alcanzado por las redes.

La incorporación del internet de las cosas amplió estas capacidades mediante la interconexión de dispositivos distribuidos. Kirmani et al. (2023) identificaron arquitecturas y aplicaciones del internet de las cosas aplicables a redes inteligentes, mientras que Qays et al. (2023) destacaron la importancia de las tecnologías y los protocolos de comunicación para facilitar el intercambio de información. Wang et al. (2024) complementaron esta perspectiva mediante el análisis de la colaboración entre redes eléctricas digitales e internet de las cosas. La comparación

entre estos trabajos mostró que la conectividad no constituyó únicamente un mecanismo para transmitir datos, sino un componente estructural para articular sensores, dispositivos, sistemas de procesamiento y plataformas de gestión dentro de las infraestructuras eléctricas digitalizadas.

La automatización adquirió una dimensión operativa cuando la información obtenida comenzó a utilizarse para supervisar y gestionar procesos eléctricos. Sharma et al. (2023) relacionaron las tecnologías de redes inteligentes y el internet de las cosas con arquitecturas de operación inteligente, mientras que Rajagopalan et al. (2024) incorporaron el internet de las cosas y la computación en la nube para apoyar la gestión de las redes de distribución. Mortensen et al. (2024) extendieron estas capacidades hacia el mantenimiento proactivo. Estos estudios abordaron aplicaciones diferentes, pero complementarias: supervisión y operación, procesamiento y gestión distribuida de información, y mantenimiento basado en información operacional. En consecuencia, la digitalización amplió progresivamente su alcance desde la adquisición de datos hacia su utilización para apoyar decisiones y actuaciones relacionadas con la operación y el mantenimiento de los sistemas eléctricos.

Las representaciones digitales dinámicas constituyeron una etapa tecnológica adicional al incorporar modelos virtuales relacionados con sistemas físicos. Mansour et al. (2023) vincularon el internet de las cosas y las representaciones digitales dinámicas con diferentes aplicaciones en sistemas eléctricos, mientras que Heluany y Gkioulos (2024) examinaron específicamente su aplicación en los procesos de generación y distribución. Mchirgui et al. (2024) profundizaron en sus aplicaciones y desafíos dentro de las redes inteligentes. En conjunto, estas contribuciones evidenciaron una

transición desde la adquisición y comunicación de datos hacia representaciones digitales capaces de apoyar la supervisión, el análisis y la gestión de los activos eléctricos. Sin embargo, también mostraron que su implementación dependió de la disponibilidad y confiabilidad de los datos, la infraestructura tecnológica y la capacidad para mantener una correspondencia adecuada entre los activos físicos y sus representaciones digitales.

La integración entre el internet de las cosas y las representaciones digitales dinámicas también fue examinada por Kabir et al. (2024), quienes situaron ambas tecnologías dentro de sistemas energéticos digitalizados. Alao et al. (2024) extendieron este enfoque hacia los sistemas fotovoltaicos y evidenciaron su aplicación en el ámbito de la generación renovable. La comparación de estos estudios mostró que las arquitecturas digitales no permanecieron restringidas a las redes eléctricas convencionales, sino que ampliaron su ámbito de aplicación hacia recursos energéticos y activos vinculados con la transición energética. Esta evolución incrementó las posibilidades de integrar información procedente de diferentes componentes del sistema dentro de estructuras digitales destinadas a su seguimiento y análisis.

Finalmente, Rehtanz et al. (2024) relacionaron las tecnologías digitales con nuevas arquitecturas de información y comunicación orientadas a sistemas energéticos resilientes, mientras que Abdelkader et al. (2024) ampliaron esta perspectiva hacia sistemas energéticos virtualizados y la coordinación de recursos. Ambos enfoques evidenciaron que la digitalización trascendió la incorporación aislada de sensores o dispositivos conectados y avanzó hacia arquitecturas destinadas a coordinar diferentes componentes tecnológicos y energéticos. Desde esta perspectiva, los sensores, las comunicaciones,

el internet de las cosas, la automatización y las representaciones digitales conformaron componentes progresivamente interrelacionados dentro de los sistemas eléctricos contemporáneos.

En consecuencia, el corpus analizado permitió reconocer una secuencia funcional en la que el sensado proporcionó información sobre las condiciones del sistema; las tecnologías de comunicación facilitaron su intercambio; el procesamiento permitió organizarla e interpretarla; la automatización posibilitó utilizarla en procesos operativos; las representaciones digitales ampliaron las capacidades de análisis y seguimiento; y las herramientas de gestión facilitaron su utilización para apoyar la operación y el mantenimiento. Esta secuencia evidenció que la digitalización de los sistemas eléctricos dependió de la articulación entre tecnologías físicas y digitales, más que de la incorporación aislada de dispositivos. Los principales desafíos se relacionaron con la interoperabilidad, las comunicaciones, la integración y confiabilidad de los datos, la ciberseguridad y las capacidades tecnológicas necesarias para gestionar infraestructuras eléctricas progresivamente digitalizadas.

Como limitación metodológica, el capítulo se circunscribió a publicaciones científicas correspondientes al período 2023–2026 y a tecnologías directamente relacionadas con la digitalización de los sistemas eléctricos, por lo que no incorporó desarrollos anteriores ni la totalidad de las aplicaciones emergentes. Asimismo, la diversidad de arquitecturas, tecnologías y ámbitos de aplicación examinados limitó la comparación directa entre determinadas soluciones. No obstante, la delimitación establecida permitió mantener la coherencia temática del corpus y reconocer tendencias comunes en la integración de sensores,

comunicaciones, automatización, procesamiento de información y representaciones digitales. En conjunto, estos resultados proporcionaron la base tecnológica para formular una propuesta orientada a integrar dichas capacidades dentro de una arquitectura modular destinada a la supervisión y gestión digital de sistemas eléctricos.

La digitalización de los sistemas eléctricos se caracterizó por la integración progresiva de sensores, tecnologías de comunicación, procesamiento de datos, automatización y representaciones digitales. Los resultados mostraron que estas tecnologías no actuaron de manera aislada, sino que conformaron una estructura funcional en la que la adquisición, transmisión y procesamiento de información ampliaron las capacidades de observación, supervisión, diagnóstico y gestión de las infraestructuras eléctricas. Esta articulación evidenció que la transformación digital dependió tanto de la disponibilidad de tecnologías específicas como de su capacidad para integrarse dentro de arquitecturas orientadas al intercambio y aprovechamiento de información.

Los sensores y los diferentes sistemas de adquisición de datos constituyeron fuentes complementarias para incrementar la disponibilidad de información y mejorar la representación de los estados eléctricos. Su integración proporcionó una base tecnológica para fortalecer la supervisión de las redes y disponer de información relevante para los procesos operativos. A su vez, el internet de las cosas amplió la conectividad entre dispositivos distribuidos y facilitó el intercambio de datos entre diferentes componentes de la infraestructura eléctrica, mientras que la automatización permitió utilizar esta información en actividades de supervisión, control, diagnóstico y mantenimiento.

Las representaciones digitales ampliaron estas capacidades al vincular la información procedente de los activos físicos con modelos digitales destinados a su seguimiento, análisis y evaluación. Su aplicación en redes eléctricas y sistemas fotovoltaicos evidenció la extensión de la digitalización hacia infraestructuras asociadas con la transición energética. En conjunto, los resultados permitieron establecer que la evolución tecnológica siguió una secuencia funcional basada en la adquisición de información, la comunicación, el procesamiento, la automatización, la representación y la gestión. Esta convergencia configuró sistemas eléctricos con mayores capacidades de observación, conectividad y coordinación, aunque su desarrollo continuó condicionado por desafíos relacionados con la interoperabilidad, la integración y confiabilidad de los datos, las comunicaciones y la ciberseguridad.

8.3. Propuesta de sistema modular inteligente para supervisión y gestión digital

Los resultados del análisis permitieron identificar una convergencia progresiva entre el sensado, las comunicaciones, el internet de las cosas, el procesamiento de información, la automatización y las representaciones digitales aplicadas a los sistemas eléctricos. A partir de estos hallazgos, se plantea una propuesta de desarrollo tecnológico orientada a integrar dichas capacidades dentro de una arquitectura modular que articule la adquisición, transmisión, procesamiento y utilización de información procedente de diferentes activos eléctricos. La propuesta busca establecer una continuidad entre las tendencias tecnológicas identificadas en la revisión y su posible aplicación en una solución destinada a fortalecer la supervisión y la gestión digital de sistemas eléctricos,

con posibilidades de adaptación a diferentes configuraciones y condiciones operativas.

1. Título del desarrollo tecnológico

Sistema modular inteligente para supervisión y gestión digital de sistemas eléctricos mediante sensores e internet de las cosas.

2. Problema o necesidad tecnológica

Los sistemas eléctricos contemporáneos requieren mayores capacidades de observación, conectividad, supervisión y gestión debido a la creciente incorporación de dispositivos digitales, generación distribuida, sistemas automatizados y recursos energéticos interconectados. La revisión realizada mostró que estas necesidades han sido atendidas mediante sensores, sistemas de adquisición de datos, plataformas de comunicación, internet de las cosas, automatización y herramientas de representación digital.

Los estudios revisados evidenciaron que los sensores, las unidades de medición fasorial (PMU), los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA), la infraestructura de medición avanzada (AMI) y los dispositivos electrónicos inteligentes (IED) permiten obtener información sobre diferentes condiciones de operación. A su vez, las tecnologías basadas en internet de las cosas facilitan la interconexión de dispositivos y el intercambio de información. De manera complementaria, las plataformas de procesamiento, la computación en la nube y las representaciones digitales dinámicas amplían las posibilidades de supervisión, diagnóstico, mantenimiento y seguimiento de los activos eléctricos.

Sin embargo, estas tecnologías son abordadas frecuentemente como componentes diferenciados, lo que evidencia una necesidad tecnológica

relacionada con la integración funcional de la adquisición de información, la comunicación, el procesamiento, la supervisión y la gestión digital dentro de una estructura modular. Por ello, se plantea una solución destinada a articular los principales componentes identificados en el corpus documental, sin sustituir los sistemas eléctricos de protección, control o supervisión existentes, sino complementarlos mediante una capa tecnológica orientada a incrementar la disponibilidad y utilización de información operacional.

3. Fundamento del desarrollo

La evidencia analizada mostró que la digitalización de los sistemas eléctricos siguió una evolución funcional desde la adquisición de información hasta su utilización en procesos de supervisión, automatización y gestión. Los sensores y los sistemas de adquisición constituyeron la base para obtener información procedente de los activos eléctricos, mientras que las unidades de medición fasorial, los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos, la infraestructura de medición avanzada y los dispositivos electrónicos inteligentes aportaron capacidades complementarias para incrementar la observación de las condiciones operativas.

Paralelamente, las tecnologías basadas en internet de las cosas y los sistemas de comunicación permitieron interconectar dispositivos distribuidos y facilitar el intercambio de información. La incorporación del procesamiento de datos, la computación en la nube y otras formas de procesamiento distribuido amplió las posibilidades de utilizar esta información en actividades de supervisión, diagnóstico, mantenimiento y apoyo a la gestión operativa.

Las representaciones digitales constituyeron una extensión de esta arquitectura al relacionar la

información procedente de los activos físicos con sus correspondientes representaciones virtuales. Su integración con el internet de las cosas amplió las posibilidades de seguimiento, análisis y gestión de sistemas eléctricos y de activos asociados con la generación renovable, al permitir que la información adquirida desde la infraestructura física pudiera incorporarse a entornos digitales destinados a su procesamiento e interpretación.

Sobre esta base, el desarrollo tecnológico se fundamenta en la integración funcional de tecnologías que el corpus documental identificó como complementarias. La solución propuesta buscará articular el sensado, la comunicación, el procesamiento de información, la supervisión y la representación digital mediante una arquitectura modular adaptable a diferentes configuraciones eléctricas. De esta manera, la propuesta no se orientará a sustituir las plataformas existentes, sino a establecer una estructura de integración capaz de aprovechar diferentes fuentes de información y tecnologías digitales para fortalecer la supervisión y la gestión de los sistemas eléctricos.

4. Objetivo general

Desarrollar y validar un sistema modular inteligente para la supervisión y gestión digital de sistemas eléctricos mediante la integración de sensores, comunicaciones, internet de las cosas y herramientas de representación digital, en condiciones controladas y representativas.

5. Descripción general de la solución propuesta

Se propone desarrollar un sistema tecnológico modular destinado a integrar información procedente de sensores, medidores, dispositivos inteligentes y sistemas de supervisión de infraestructuras eléctricas.

La solución podrá gestionar información relacionada con:

a) Tensión eléctrica.

b) Corriente eléctrica.

c) Frecuencia.

d) Potencia activa y reactiva.

e) Estado operativo de equipos.

f) Variables obtenidas mediante sensores.

g) Información procedente de unidades de medición fasorial.

h) Información procedente de sistemas de supervisión, control y adquisición de datos.

i) Información procedente de infraestructura de medición avanzada.

j) Información procedente de dispositivos electrónicos inteligentes.

k) Eventos operativos.

l) Condiciones de funcionamiento.

m) Información temporal de las variables.

n) Información procedente de dispositivos conectados mediante internet de las cosas.

o) Estados de activos eléctricos.

p) Información histórica de operación.

q) Información para diagnóstico.

r) Indicadores de funcionamiento.

s) Información para mantenimiento.

t) Representación digital de activos seleccionados.

La solución estará estructurada en cinco componentes principales:

Componente 1. Adquisición y sensado de variables eléctricas.

Permitirá integrar información proveniente de sensores, medidores y dispositivos inteligentes instalados en diferentes puntos de la infraestructura eléctrica. Su función será proporcionar información representativa del estado operativo de los activos y de las variables supervisadas.

Componente 2. Comunicación e internet de las cosas.

Permitirá establecer la conectividad entre sensores, medidores, dispositivos inteligentes y plataformas de procesamiento. Este componente facilitará el intercambio organizado de información procedente de diferentes puntos del sistema eléctrico.

Componente 3. Procesamiento y gestión de información.

Permitirá recibir, organizar, procesar y almacenar la información obtenida mediante los componentes de adquisición y comunicación. Su función estará orientada a transformar los datos recopilados en información útil para la supervisión, el diagnóstico y la gestión operativa.

Componente 4. Supervisión y gestión digital.

Permitirá visualizar las condiciones operativas, identificar cambios en las variables supervisadas y generar información técnica para apoyar las actividades de operación, diagnóstico y mantenimiento. La información será presentada mediante interfaces y reportes técnicos.

Componente 5. Representación digital de activos.

Permitirá vincular la información de determinados activos físicos con una representación digital para apoyar su seguimiento, análisis y evaluación operativa. Este componente podrá incorporar principios de representación virtual dinámica de un sistema físico cuando la infraestructura tecnológica y la disponibilidad de información permitan establecer dicha correspondencia.

La integración funcional del sistema se desarrollará mediante una secuencia en la que el sensado permitirá adquirir información de los activos eléctricos; las tecnologías de comunicación facilitarán su transmisión; el procesamiento permitirá organizar e interpretar los datos; la supervisión posibilitará conocer las condiciones operativas; la representación digital facilitará el seguimiento de los activos; y la gestión permitirá utilizar la información resultante para apoyar las actividades operativas y de mantenimiento.

La configuración específica de los sensores, la arquitectura de comunicación, los protocolos, los algoritmos, los parámetros de procesamiento, las reglas de integración y la estructura computacional podrá mantenerse reservada cuando constituya conocimiento tecnológico susceptible de protección.

6. Novedad o diferenciación tecnológica

La diferenciación tecnológica no se fundamentará en el desarrollo aislado de un sensor, un sistema de comunicación, una plataforma basada en internet de las cosas o una herramienta de representación digital. La propuesta buscará integrar funcionalmente estos componentes dentro de una arquitectura modular orientada específicamente a sistemas eléctricos.

La característica diferenciadora estará relacionada con la articulación entre la adquisición de

información, la conectividad, el procesamiento, la supervisión y la representación digital. Desde una perspectiva funcional, el sistema partirá del sensado de las variables eléctricas, continuará con la comunicación y el procesamiento de la información, incorporará capacidades de supervisión y representación digital y, finalmente, facilitará la utilización de la información generada para apoyar la gestión del sistema eléctrico.

Esta integración permitirá avanzar desde la utilización independiente de dispositivos y plataformas hacia una estructura tecnológica coordinada, en la que la información procedente de los activos eléctricos pueda circular entre diferentes niveles funcionales y ser utilizada de manera integrada.

La diferenciación deberá comprobarse posteriormente mediante el desarrollo experimental, las pruebas de integración, la comparación técnica y la evaluación de antecedentes de propiedad intelectual. Por tanto, la propuesta no asumirá anticipadamente exclusividad, novedad jurídica ni superioridad tecnológica.

7. Productos tecnológicos esperados

El desarrollo podrá generar los siguientes productos tecnológicos:

a) Prototipo funcional del sistema modular.

b) Módulo de adquisición de variables eléctricas.

c) Módulo de integración de sensores.

d) Módulo de comunicación mediante internet de las cosas.

e) Módulo de gestión de dispositivos conectados.

f) Módulo de procesamiento y almacenamiento de información.

g) Módulo de supervisión digital.

h) Módulo de visualización de variables eléctricas.

i) Módulo de seguimiento de activos.

j) Módulo de gestión de información operacional.

k) Módulo de representación digital de activos.

l) Sistema de generación de alertas técnicas.

m) Sistema de generación de reportes.

n) Procedimiento para la integración de sensores y dispositivos conectados mediante internet de las cosas.

o) Procedimiento para la supervisión digital de sistemas eléctricos.

p) Metodología de gestión de información eléctrica.

q) Manual técnico de operación y mantenimiento.

8. Nivel de madurez tecnológica

La meta inicial del desarrollo será alcanzar un nivel de madurez tecnológica 5 (TRL 5), siempre que el prototipo integrado pueda ser probado y validado en un entorno representativo de un sistema eléctrico. Este nivel no se considerará alcanzado únicamente a partir de la evidencia bibliográfica disponible, debido a que el corpus analizado permitió fundamentar la arquitectura tecnológica propuesta, pero no demostró experimentalmente el funcionamiento del sistema integrado.

La trayectoria tecnológica prevista comprenderá las etapas de conceptualización, diseño, desarrollo, integración, realización de pruebas funcionales, validación en condiciones representativas y optimización. Esta progresión permitirá avanzar de manera gradual desde la definición conceptual de la solución hasta la obtención de evidencias sobre su funcionamiento integrado.

La validación deberá comprobar progresivamente la adquisición de información, la comunicación entre dispositivos, el procesamiento de datos, la supervisión y la representación digital. Una vez obtenida evidencia experimental suficiente, podrá establecerse el nivel de madurez tecnológica efectivamente alcanzado.

9. Ámbito de aplicación

La solución tendrá aplicación potencial en:

a) Redes eléctricas de distribución.

b) Sistemas eléctricos de baja y media tensión.

c) Instalaciones eléctricas industriales.

d) Sistemas con generación distribuida.

e) Sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

f) Microredes.

g) Sistemas de gestión de activos eléctricos.

h) Laboratorios de sistemas eléctricos.

i) Centros de investigación.

j) Instituciones de formación tecnológica.

k) Instituciones universitarias.

Una aplicación particularmente pertinente corresponderá a los sistemas eléctricos de distribución que requieran incrementar la observación de variables, conectar dispositivos distribuidos y disponer de información integrada para actividades de supervisión, diagnóstico y mantenimiento. La arquitectura modular permitirá adaptar los componentes de la solución a las características de cada entorno de aplicación, de acuerdo con la infraestructura tecnológica disponible y las necesidades específicas de supervisión y gestión.

10. Estrategia de validación

La validación deberá demostrar que el sistema puede ejecutar de manera integrada las funciones de adquisición de información, comunicación entre dispositivos, procesamiento de datos, supervisión de las condiciones operativas, representación digital de los activos y generación de información técnica para apoyar la gestión.

Los escenarios de validación podrán desarrollarse inicialmente en condiciones controladas y, posteriormente, en un entorno representativo, considerando diferentes condiciones operativas y configuraciones de dispositivos.

La evaluación deberá considerar, según corresponda:

a) Capacidad de adquisición de variables eléctricas.

b) Integración funcional de sensores.

c) Comunicación entre dispositivos.

d) Conectividad mediante internet de las cosas.

e) Recepción y transmisión de información.

f) Procesamiento adecuado de datos.

g) Almacenamiento y organización de información.

h) Visualización de variables.

i) Identificación de condiciones operativas.

j) Generación de información para diagnóstico.

k) Generación de alertas técnicas.

l) Seguimiento de activos.

m) Representación digital.

n) Integración funcional de los componentes tecnológicos.

o) Estabilidad de la comunicación.

p) Consistencia de la información procesada.

q) Generación de reportes técnicos.

La validación permitirá determinar la funcionalidad de la solución en condiciones controladas y representativas, sin asumir previamente su desempeño en sistemas eléctricos comerciales reales. Los resultados obtenidos deberán proporcionar evidencia sobre el grado de integración alcanzado entre los diferentes componentes y permitir identificar los ajustes necesarios antes de avanzar hacia escenarios de implementación de mayor complejidad.

11. Potencial de transferencia

La transferencia tecnológica podrá comprender:

a) Prototipo funcional del sistema modular.

b) Plataforma de supervisión digital.

c) Módulo de adquisición de información.

d) Módulo de integración de sensores.

e) Módulo de comunicación mediante internet de las cosas.

f) Módulo de procesamiento y gestión de datos.

g) Módulo de seguimiento digital de activos.

h) Procedimientos para la integración de dispositivos.

i) Metodología de supervisión digital.

j) Documentación técnica especializada.

k) Manual de operación y mantenimiento.

l) Capacitación especializada.

m) Asistencia técnica para la implementación.

n) Servicio tecnológico de supervisión digital.

o) Servicio de integración de sensores y dispositivos conectados mediante internet de las cosas.

p) Servicio de gestión de información eléctrica.

q) Licenciamiento de componentes tecnológicos susceptibles de protección.

La solución podrá transferirse progresivamente a empresas eléctricas, instituciones tecnológicas, universidades, centros de investigación e instalaciones industriales que requieran incrementar sus capacidades de supervisión y gestión digital. Su implementación deberá adecuarse al nivel de madurez tecnológica efectivamente alcanzado y a la evidencia obtenida durante las

etapas de desarrollo, integración y validación. En este sentido, el potencial de transferencia dependerá de la comprobación experimental de la funcionalidad del sistema, de su capacidad de adaptación a diferentes infraestructuras eléctricas y de la identificación de aquellos componentes, procedimientos o conocimientos tecnológicos susceptibles de protección y transferencia.

En conjunto, la propuesta articula en una misma arquitectura funcional las principales tecnologías identificadas en el corpus documental y establece una trayectoria de desarrollo que comprende adquisición de información, conectividad, procesamiento, supervisión, representación digital y gestión. Su carácter modular permitirá desarrollar y validar progresivamente los diferentes componentes antes de su integración completa, reduciendo la dependencia de una configuración tecnológica única y favoreciendo su adaptación a distintos escenarios eléctricos. La materialización de la propuesta requerirá posteriormente desarrollo experimental y validación técnica para determinar su desempeño, nivel de madurez y posibilidades reales de transferencia.

Referencias

Abdelkader, S., Amissah, J., & Abdel-Rahim, O. (2024). Virtual power plants: An in-depth analysis of their advancements and importance as crucial players in modern power systems. *Energy, Sustainability and Society, 14*, 52. https://doi.org/10.1186/s13705-024-00483-y

Aghahadi, M., Bosisio, A., Merlo, M., Berizzi, A., Pegoiani, A., & Forciniti, S. (2024). Digitalization processes in distribution grids: A comprehensive review of strategies and challenges. *Applied Sciences, 14*(11), 4528. https://doi.org/10.3390/app14114528

Ahsan, F., Dana, N. H., Sarker, S. K., Li, L., Muyeen, S. M., Ali, M. F., Tasneem, Z., Hasan, M. M., Abhi, S. H., Islam, M. R., Ahamed, M. H., Islam, M. M., Das, S. K., Badal, M. F. R., & Das, P. (2023). Data-driven next-generation smart grid towards sustainable energy evolution: Techniques and technology review. *Protection and Control of Modern Power Systems, 8*, 43. https://doi.org/10.1186/s41601-023-00319-5

Alao, K. T., Gilani, S. I. U. H., Sopian, K., & Alao, T. O. (2024). A review on digital twin application in photovoltaic energy systems: Challenges and opportunities. *JMST Advances, 6*, 257–282. https://doi.org/10.1007/s42791-024-00083-z

Cheng, G., Lin, Y., Abur, A., Gómez, E. A., & Wu, W. (2024). A survey of power system state estimation using multiple data sources: PMUs, SCADA, AMI, and beyond. *IEEE Transactions on Smart Grid, 15*(1), 1129–1151. https://doi.org/10.1109/TSG.2023.3286401

Heluany, J. B., & Gkioulos, V. (2024). A review on digital twins for power generation and distribution. *International Journal of Information Security, 23*, 1171–1195. https://doi.org/10.1007/s10207-023-00784-x

Kabir, M. R., Halder, D., & Ray, S. (2024). Digital twins for IoT-driven energy systems: A survey. *IEEE Access, 12*, 177123–177143. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3506660

Kirmani, S., Mazid, A., Khan, I. A., & Abid, M. (2023). A survey on IoT-enabled smart grids: Technologies, architectures, applications, and challenges. *Sustainability, 15*(1), 717. https://doi.org/10.3390/su15010717

Mansour, D. E. A., Numair, M., Zalhaf, A. S., Ramadan, R., Darwish, M. M. F., Huang, Q., Hussien, M. G., & Abdel, R. O. (2023). Applications of IoT and digital twin in electrical power systems: A comprehensive survey. *IET Generation, Transmission & Distribution, 17*(20), 4457–4479. https://doi.org/10.1049/gtd2.12940

Mchirgui, N., Quadar, N., Kraiem, H., & Lakhssassi, A. (2024). The applications and challenges of digital twin technology in smart grids: A comprehensive review. *Applied Sciences, 14*(23), 10933. https://doi.org/10.3390/app142310933

Mortensen, L. K., Sundsgaard, K., Shaker, H. R., Hansen, J. Z., & Yang, G. (2024). Designing digitally enabled proactive maintenance systems in power distribution grids: A scoping literature review. *Energy Reports, 12*, 1–21. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.08.044

Qays, M. O., Ahmad, I., Abu-Siada, A., Hossain, M. L., & Yasmin, F. (2023). Key communication technologies, applications, protocols and future guides for IoT-assisted smart grid systems: A review. *Energy Reports, 9*, 2440–2452. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.085

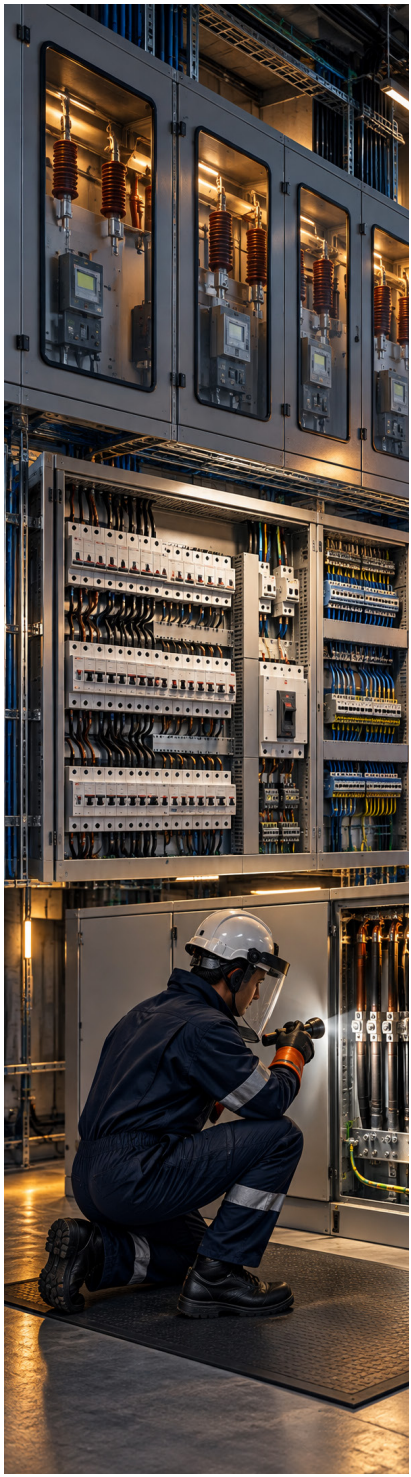
Rajagopalan, A., Swaminathan, D., Bajaj, M., Damaj, I., Rathore, R. S., Singh, A. R., Blažek, V., & Prokop, L. (2024). Empowering power distribution: Unleashing the synergy of IoT and cloud computing for sustainable and efficient energy systems. *Results in Engineering, 21*, 101949. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101949

Rehtanz, C., Ulbig, A., Palaniappan, R., Faulwasser, T., Saidi, S., Schmeink, A., & Wietfeld, C. (2024). Towards holonic power and energy systems – A novel ICT architecture as enabler for resilience. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 162*, 110283. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110283

Rodríguez Pérez, N., Matanza, J., López, G., Cossent, R., Chaves Avila, J. P., Mateo, C., Gómez San Román, T., & Sánchez Fornié, M. A. (2024). Measuring the digitalisation of electricity distribution systems in Europe: Towards the smart grid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 159*, 110009. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110009

Sharma, K., Malik, A., Batra, I., Sanwar Hosen, A. S. M., Latif Sarker, M. A., & Han, D. S. (2023). Technologies behind the smart grid and Internet of Things: A system survey. *Computers, Materials & Continua, 75*(3), 5049–5072. https://doi.org/10.32604/cmc.2023.035638

Wang, P., Zhang, D., Gan, L., & Zhang, Y. (2024). Key technologies and applications of collaboration between digital power grid and Internet of Things. *Digital Twins and Applications, 1*(1), 26–37. https://doi.org/10.1049/dgt2.12013



09.

Sistemas de protección y seguridad eléctrica: tecnologías, coordinación y prevención de riesgos

Joffre Gustavo Yoza Calderón

Luis Javier Zurita Brione

9.1. Evolución tecnológica de los sistemas de protección y seguridad eléctrica

La evolución de los sistemas eléctricos se ha caracterizado por la incorporación progresiva de tecnologías de digitalización, generación renovable y automatización en redes cada vez más dinámicas. Estas transformaciones han incrementado la necesidad de disponer de sistemas de protección adaptables, mecanismos de supervisión inteligente y comunicaciones confiables que contribuyan a preservar la continuidad operativa y la seguridad

de las infraestructuras eléctricas (Shazdeh et al., 2024; Tan et al., 2025). Paralelamente, las arquitecturas digitales han favorecido la integración de la protección eléctrica, la interoperabilidad y la automatización dentro de infraestructuras eléctricas progresivamente interconectadas (Ayello & Lopes, 2023; Satpathy et al., 2025).

La literatura reciente ha examinado la coordinación de relés, la protección adaptativa y las estrategias inteligentes aplicadas a redes eléctricas con generación distribuida. Los estudios sobre coordinación han identificado dificultades asociadas con los flujos bidireccionales de potencia y las variaciones de las corrientes de falla, condiciones que pueden modificar los criterios convencionales de actuación de los dispositivos de protección (Agwa & El-Fergany, 2023; Alasali et al., 2023). En respuesta a estas condiciones, las investigaciones han abordado métodos adaptativos y algoritmos de optimización destinados a determinar o modificar los ajustes de las protecciones ante diferentes escenarios operativos (Islam et al., 2024; Kumar & Rana, 2024).

El desarrollo de las microredes ha incrementado la complejidad de la protección debido a los cambios topológicos, los diferentes modos de operación y la incorporación de recursos renovables. Las revisiones recientes han identificado desafíos relacionados con la selectividad, la sensibilidad, la coordinación y el comportamiento de las protecciones convencionales frente a estas condiciones (De la Cruz et al., 2024; Sheta et al., 2023). Asimismo, las configuraciones interconectadas han requerido esquemas de protección capaces de responder ante diferentes arquitecturas, modos de operación y condiciones de falla (Baba et al., 2024; Peter et al., 2025).

La literatura disponible ha evidenciado avances en el desarrollo de tecnologías de protección, aunque

también ha identificado limitaciones relacionadas con su validación, adaptabilidad y comportamiento ante la creciente incorporación de recursos basados en electrónica de potencia. En particular, los estudios han señalado que los recursos basados en inversores pueden modificar las características de las corrientes de falla y, en consecuencia, afectar el funcionamiento de determinados esquemas convencionales de protección (Oelhaf et al., 2025; Sharma & Sidhu, 2023). Frente a estas condiciones, otros trabajos han desarrollado estrategias y funciones de protección específicas para sistemas con elevada penetración fotovoltaica y recursos basados en inversores (Gui et al., 2024; Li et al., 2025).

El presente capítulo delimitó el análisis a la literatura científica publicada entre 2023 y 2026 sobre protección y seguridad eléctrica. El ámbito de estudio comprendió tecnologías de protección, coordinación, detección de fallas, automatización, digitalización y prevención de riesgos eléctricos. Asimismo, se consideraron aplicaciones relacionadas con microredes, generación distribuida, recursos basados en inversores y sistemas inteligentes de protección (Santos et al., 2023; Sarangi et al., 2025). La revisión buscó integrar diferentes enfoques tecnológicos sin asumir equivalencia entre los métodos, las aplicaciones o los niveles de desarrollo identificados en la literatura (Ojo et al., 2025; Yadav et al., 2025).

La relevancia académica del análisis radicó en la necesidad de integrar conocimientos que permitieran comprender la evolución tecnológica de la protección eléctrica y sus implicaciones para los sistemas eléctricos contemporáneos. Su pertinencia formativa se relacionó con el desarrollo de competencias vinculadas con la coordinación, el diagnóstico, la automatización, la seguridad y

la evaluación de tecnologías de protección (Oelhaf et al., 2025; Shazdeh et al., 2024). Desde una perspectiva de sostenibilidad, el análisis también permitió considerar la confiabilidad, la resiliencia, la continuidad operativa y el aprovechamiento seguro de los recursos energéticos distribuidos (Etanya et al., 2025). Estos elementos justificaron la organización de la evidencia reciente mediante una revisión descriptiva, analítica y comparativa orientada al ámbito de la educación superior tecnológica.

El capítulo se desarrolló mediante una revisión bibliográfica de carácter descriptivo, analítico y comparativo, orientada a examinar la evolución reciente de los sistemas de protección y seguridad eléctrica, las tecnologías de coordinación, detección y gestión de fallas, así como sus aplicaciones en los sistemas eléctricos contemporáneos. El componente descriptivo permitió organizar las principales tecnologías y líneas de investigación identificadas en la literatura; el componente analítico permitió interpretar sus aportes técnicos y metodológicos; mientras que el enfoque comparativo permitió establecer diferencias y coincidencias entre tecnologías, estrategias de protección, aplicaciones, limitaciones y posibilidades de integración. La revisión no se planteó como una investigación experimental, un estudio de campo, un metaanálisis ni una revisión sistemática propiamente dicha, debido a que su finalidad consistió en construir una interpretación tecnológica de la literatura disponible.

Las fuentes de información estuvieron constituidas principalmente por las bases de datos Scopus, Web of Science y ScienceDirect, seleccionadas por su cobertura de publicaciones científicas relacionadas con ingeniería eléctrica, sistemas de potencia, protección, seguridad, automatización, redes inteligentes, microredes y generación distribuida. La

identificación de cada publicación se complementó con la consulta de la información editorial y del registro del identificador de objeto digital (DOI) correspondiente, cuando estuvo disponible. Esta comprobación permitió contrastar los autores, el año de publicación, el título, la revista, el volumen, el número, las páginas o el número de artículo y el DOI antes de incorporar definitivamente cada referencia al corpus documental. De esta manera, se procuró excluir información bibliográfica cuya procedencia o correspondencia documental no pudiera comprobarse.

El periodo de búsqueda se delimitó entre enero de 2023 y diciembre de 2026 y consideró exclusivamente publicaciones pertenecientes a dicho intervalo temporal. Esta delimitación permitió concentrar el análisis en desarrollos recientes relacionados con protección eléctrica, coordinación de protecciones, seguridad eléctrica, protección adaptativa, digitalización, automatización, generación distribuida, recursos basados en inversores, microredes, detección y localización de fallas, así como en tecnologías asociadas con la confiabilidad y la prevención de riesgos. Las publicaciones anteriores a 2023 no se incorporaron al corpus principal, aunque sus aportes pudieran resultar relevantes como antecedentes de la evolución tecnológica del área.

La estrategia de búsqueda se estructuró mediante términos técnicos en idioma inglés directamente vinculados con el objeto del capítulo y combinados mediante los operadores booleanos AND y OR. Se emplearon expresiones específicas destinadas a recuperar literatura relacionada con protección y coordinación, seguridad y prevención de riesgos, protección adaptativa e inteligente, generación distribuida, recursos basados en inversores, microredes, detección y localización de fallas, protección digital y subestaciones digitales. Entre las ecuaciones de búsqueda utilizadas se incluyeron (“electrical protection” OR “power

system protection") AND ("coordination" OR "protective coordination"), ("electrical safety" OR "power system safety") AND ("risk prevention" OR "risk assessment"), ("adaptive protection" OR "intelligent protection") AND ("smart grid" OR "microgrid"), ("relay coordination" OR "protection coordination") AND ("distributed generation" OR "inverter-based resources") y ("microgrid protection" OR "distribution system protection") AND ("fault detection" OR "fault location"). La estrategia se ajustó progresivamente para reducir la recuperación de documentos conceptualmente alejados del objeto tecnológico del capítulo y mejorar la pertinencia de los resultados obtenidos.

Los criterios de inclusión comprendieron artículos científicos, revisiones bibliográficas, revisiones sistemáticas y estudios de síntesis tecnológica publicados entre 2023 y 2026 en revistas científicas indexadas. Se incorporaron únicamente publicaciones que presentaran una relación directa con los sistemas de protección o seguridad eléctrica y que aportaran información tecnológica, metodológica, comparativa o aplicada pertinente para los objetivos del capítulo. Asimismo, se consideró indispensable disponer de información bibliográfica suficiente para identificar inequívocamente cada publicación y establecer su correspondencia con la fuente editorial o con el identificador de objeto digital (DOI) registrado. Los criterios de elegibilidad se definieron antes de consolidar el corpus documental, con el propósito de establecer explícitamente las características que debían cumplir las publicaciones incorporadas al análisis.

Los criterios de exclusión comprendieron publicaciones duplicadas, documentos publicados fuera del periodo establecido, trabajos cuyo contenido no guardara relación directa con la protección o seguridad de los sistemas eléctricos y documentos que no aportaran información pertinente para los objetivos tecnológicos definidos.

También se excluyeron registros con información bibliográfica insuficiente o cuya identificación no pudiera comprobarse de manera fiable, así como aquellos en los que existieran inconsistencias entre los datos bibliográficos del artículo y el DOI asociado. La aplicación de estos criterios permitió mantener la correspondencia entre el objeto de análisis, las categorías tecnológicas examinadas y el corpus documental seleccionado.

El proceso de selección se organizó siguiendo la lógica de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión establecida por PRISMA 2020, utilizada exclusivamente como mecanismo para fortalecer la trazabilidad y la transparencia del proceso documental. En este capítulo, su estructura se empleó para organizar y documentar el proceso de identificación y selección de las publicaciones, sin modificar la naturaleza de la investigación, que permaneció definida como una revisión bibliográfica descriptiva, analítica y comparativa.

Los valores numéricos correspondientes al proceso de selección se determinarán una vez completadas la búsqueda, la depuración y la verificación definitiva de los registros. No se incorporarán cantidades estimadas ni valores establecidos previamente sin respaldo documental. El registro final deberá mantener coherencia matemática entre los documentos identificados, los duplicados eliminados, los registros sometidos a cribado, los documentos excluidos, los textos evaluados para determinar su elegibilidad y las publicaciones finalmente incluidas. Asimismo, el número definitivo de documentos que integren el corpus deberá coincidir con el número de publicaciones analizadas en la tabla de resultados, evitando duplicaciones o discrepancias entre el procedimiento metodológico, los resultados y las referencias bibliográficas.

La extracción de información se realizó mediante una matriz documental diseñada específicamente de acuerdo con el objetivo del capítulo. Para cada publicación seleccionada se registraron

la referencia bibliográfica, el área tecnológica, el problema abordado, la tecnología estudiada, el principal aporte identificado, la aplicación, la contribución al objetivo del capítulo y la implicación tecnológica. Esta matriz permitió transformar la información individual de las publicaciones en categorías comparables y facilitó la identificación posterior de tendencias, coincidencias, diferencias, limitaciones y posibilidades de integración tecnológica. Cada registro se mantuvo asociado con su correspondiente referencia bibliográfica para conservar la trazabilidad entre la fuente original y la interpretación desarrollada.

El análisis documental se efectuó desde tres perspectivas complementarias. La perspectiva descriptiva se orientó a caracterizar las tecnologías y aplicaciones presentes en la literatura seleccionada; la perspectiva analítica, a interpretar los aportes relacionados con protección, coordinación, detección y gestión de fallas, automatización, digitalización, seguridad y prevención de riesgos; y la perspectiva comparativa, a contrastar los diferentes enfoques tecnológicos de acuerdo con sus aplicaciones, condiciones de operación, capacidades, limitaciones y posibilidades de integración. La interpretación no se sustentó únicamente en la frecuencia de aparición de cada tecnología en el corpus documental, sino también en la naturaleza de los problemas abordados, las características de las soluciones propuestas y su contribución al desarrollo de sistemas eléctricos más seguros, coordinados, confiables y adaptables.

Finalmente, se consideraron principios de integridad científica y responsabilidad ética en el manejo de la información documental. La revisión procuró preservar el significado original de los trabajos consultados, reconocer adecuadamente la autoría mediante las correspondientes citas y referencias conforme a APA 7 y evitar la fabricación, modificación, omisión deliberada o atribución incorrecta de información. La incorporación

de cada referencia estuvo condicionada a la posibilidad de comprobar su identidad bibliográfica y su correspondencia con la información utilizada. Debido al carácter exclusivamente documental de la investigación, no se realizaron intervenciones con personas o animales, ni se utilizaron muestras biológicas o datos personales. En consecuencia, las consideraciones éticas se concentraron en la transparencia del procedimiento, la trazabilidad de las fuentes, la fidelidad de la interpretación y el reconocimiento de la propiedad intelectual.

9.2. Tecnologías de protección, coordinación adaptativa y gestión de fallas

El corpus documental correspondiente al periodo 2023–2026 permitió identificar cinco áreas tecnológicas principales: protección adaptativa, coordinación de relés, protección de microredes de corriente alterna, protección de microredes de corriente continua y redes inteligentes con capacidades de autorrecuperación. En estas áreas predominaron soluciones basadas en inteligencia artificial, técnicas de optimización, comunicación digital, mediciones locales y estrategias de reconfiguración automática, orientadas a mantener la coordinación, la selectividad y la seguridad de los sistemas eléctricos ante la incorporación de generación distribuida, recursos basados en inversores y cambios en la topología de las redes. En conjunto, los estudios evidenciaron una transición desde esquemas de protección predominantemente estáticos hacia soluciones con mayores capacidades de adaptación, procesamiento de información y respuesta ante condiciones operativas variables. La Tabla 9.1 sintetiza las áreas tecnológicas, los principales aportes, la contribución al objetivo del capítulo y las implicaciones tecnológicas identificadas en las publicaciones que conformaron el corpus documental.

Tabla 9.1. Síntesis del corpus documental analizado.

Referencia	Área tecnológica analizada	Principal aporte identificado	Contribución al objetivo del capítulo	Implicación tecnológica
Uzair et al. (2023)	Protección de microredes AC e inteligencia artificial	Analizó estrategias de protección de microredes AC y métodos inteligentes aplicados a detección y clasificación de fallas	Aportó elementos para comprender la evolución de la protección convencional hacia métodos inteligentes capaces de afrontar topologías dinámicas	Favoreció la incorporación de técnicas de aprendizaje automático en esquemas de protección adaptables
Mohan & Sasidharan (2023)	Protección de microredes DC de baja tensión	Revisó detección y localización de fallas, convertidores electrónicos, limitadores de corriente, interruptores DC y criterios de protección	Amplió el análisis hacia sistemas DC, donde las características de las fallas requieren estrategias específicas de protección	Planteó la necesidad de dispositivos de interrupción y métodos de detección adaptados a redes DC
Islam et al. (2024)	Protección adaptativa y automatización	Revisó esquemas de protección adaptativa para redes inteligentes y microredes, incluyendo posibilidades asociadas con IEC 61850	Permitió relacionar coordinación, automatización, comunicación y adaptación de ajustes de protección	Respaldó la integración de relés adaptativos con sistemas digitales de automatización y comunicación

Kumar et al. (2024)	Protección de microredes	Revisó problemas de protección derivados de diferentes modos de operación, corrientes bidireccionales, disparos indebidos y ciberseguridad	Contribuyó a caracterizar los principales problemas que afectan la protección de microredes con generación distribuida	Señaló la necesidad de estrategias capaces de operar bajo diferentes configuraciones y condiciones de falla
Kumar & Rana (2024)	Coordinación y optimización de relés	Analizó técnicas de optimización utilizadas para determinar ajustes de relés en microredes y esquemas adaptativos	Permitió incorporar la optimización de ajustes como componente de la coordinación de protecciones	Favoreció el uso de algoritmos evolutivos, híbridos y estrategias adaptativas para mejorar la coordinación
Muñoz et al. (2024)	Coordinación adaptativa basada en datos	Propuso reconocer condiciones operativas y ajustar adaptativamente relés utilizando mediciones locales de tensión y corriente	Aportó una alternativa para mantener la coordinación ante cambios en las condiciones operativas de redes activas	Mostró la posibilidad de utilizar información local y funciones de optimización para actualizar ajustes de protección
Ashraf (2024)	Protección de microredes AC, DC e híbridas	Sintetizó problemas de protección, coordinación, fallas variables, puesta a tierra y estrategias inteligentes	Integró configuraciones de microredes y sus principales desafíos de protección eléctrica	Facilitó seleccionar estrategias según arquitectura y condiciones operativas del sistema

Bhalla & Bhalja (2024)	Detección de fallas y coordinación en microredes DC	Desarrolló una técnica basada en características estadísticas de la corriente de falla y coordinación de relés sin canal de comunicación	Aportó una alternativa para detección, despeje y respaldo de fallas en microredes DC de baja tensión	Mostró posibilidades de protección basada en mediciones locales y reducción de dependencia de comunicaciones
Ayvaz (2024)	Coordinación de relés direccionales en redes con generación distribuida	Incorporó grupos de ajustes diferenciados para periodos de demanda máxima y mínima considerando generación distribuida basada en inversores	Contribuyó al análisis de coordinación frente a variaciones simultáneas de generación y demanda	Introdujo una estrategia de ajustes diferenciados para responder a condiciones operativas variables
Hamdeen et al. (2025)	Sistemas auto-reparables y protección multiagente	Revisó arquitecturas multiagente para detección, aislamiento, restauración y coordinación de protección en redes de distribución	Amplió el concepto de seguridad eléctrica hacia capacidades de diagnóstico, aislamiento y recuperación automatizada	Reforzó la integración de sistemas de comunicación, medición, software y agentes distribuidos en redes auto-reparables

Jaffer et al. (2025)	Protección adaptativa con y sin comunicación	Comparó estrategias convencionales, inteligentes y adaptativas, con atención específica a alternativas independientes de comunicación	Aportó elementos para analizar la dependencia de infraestructura de comunicación en la protección de microredes	Orientó el desarrollo hacia esquemas adaptativos capaces de mantener funcionalidad mediante mediciones locales
Etanya et al. (2025)	Generación renovable distribuida y calidad de energía	Revisó problemas de calidad de energía y técnicas de mitigación en sistemas de generación renovable distribuida conectados a red	Complementó el análisis de protección al relacionarlo con variaciones de tensión, frecuencia y condiciones operativas derivadas de generación renovable	Reforzó la necesidad de integrar protección, calidad de energía y control en redes con alta penetración renovable

Los resultados de la revisión mostraron una concentración de investigaciones en torno a la adaptación de los sistemas de protección frente a redes eléctricas con generación distribuida, microredes y recursos basados en inversores. Esta tendencia evidenció que los esquemas convencionales de protección presentaron mayores dificultades cuando las condiciones de operación dejaron de mantenerse relativamente constantes. Agwa y El-Fergany (2023) señalaron desafíos asociados con la coordinación de relés en sistemas que incorporaron fuentes renovables, mientras que Islam et al. (2024) relacionaron la protección adaptativa con las variaciones en la configuración y las condiciones operativas de los sistemas eléctricos. En conjunto, estos hallazgos mostraron una evolución desde esquemas de

coordinación sustentados principalmente en ajustes predeterminados hacia soluciones capaces de responder a cambios en las condiciones de operación. Esta evolución estuvo relacionada con las modificaciones en los flujos de potencia y en los niveles y características de las corrientes de falla derivadas de la incorporación de recursos energéticos distribuidos. Desde una perspectiva tecnológica, estos resultados evidenciaron la necesidad de disponer de sistemas de protección capaces de adaptar sus criterios de actuación sin comprometer la selectividad ni la coordinación.

En relación con las microredes, la literatura mostró que los cambios entre los modos de operación conectada y aislada constituyeron una condición determinante para el comportamiento de las protecciones. Alasali et al. (2023) analizaron diferentes enfoques inteligentes de protección, mientras que Baba et al. (2024) examinaron específicamente los desafíos derivados de las características operativas de las microredes. La coincidencia entre ambos enfoques mostró las limitaciones de mantener una configuración fija de protección frente a escenarios operativos variables. De la Cruz et al. (2024) ampliaron esta perspectiva hacia las microredes interconectadas, en las que la diversidad de arquitecturas y las interacciones entre diferentes unidades incrementaron la complejidad de la protección. Una diferencia relevante entre los estudios estuvo relacionada con la escala de integración considerada, debido a que algunos abordaron microredes individuales, mientras que otros analizaron agrupaciones de microredes interconectadas. Esta diferencia evidenció la necesidad de arquitecturas de protección con mayores capacidades de coordinación, comunicación y adaptación. En consecuencia, una de las principales implicaciones tecnológicas consistió en desarrollar esquemas capaces de

reconocer cambios topológicos y modificar sus criterios de protección de acuerdo con el estado operativo del sistema.

Otro patrón identificado correspondió a la incorporación progresiva de procedimientos de optimización en la coordinación de protecciones. Kumar y Rana (2024) revisaron técnicas utilizadas para determinar los ajustes de relés dentro de esquemas adaptativos y describieron una evolución desde algoritmos convencionales hacia métodos híbridos y metaheurísticos. Este resultado fue consistente con la necesidad de resolver problemas de coordinación caracterizados por múltiples restricciones y condiciones operativas variables. Agwa y El-Fergany (2023) también examinaron las dificultades de coordinación asociadas con sistemas que incorporaron generación renovable, aunque desde una perspectiva más amplia. Mientras Kumar y Rana (2024) concentraron su análisis en los procedimientos de optimización aplicados a la coordinación, Agwa y El-Fergany (2023) abordaron los desafíos generales de la coordinación de protecciones en sistemas con fuentes renovables. Esta diferencia mostró que la adaptación de los ajustes no dependió únicamente de las características de los dispositivos de protección, sino también de métodos computacionales capaces de determinar soluciones ante configuraciones y condiciones operativas cambiantes. En este contexto, una de las principales implicaciones tecnológicas fue la incorporación de algoritmos de optimización en plataformas digitales de protección.

La presencia de recursos basados en inversores introdujo otro desafío relevante para los sistemas de protección. Gui et al. (2024) señalaron que estos recursos podían presentar limitaciones en la corriente de falla disponible para la actuación de los

relés, condición que dificultaba el funcionamiento de determinados esquemas convencionales. Sharma y Sidhu (2023) abordaron igualmente la protección de alimentadores de microredes con recursos basados en inversores, mientras que Agwa y El-Fergany (2023) analizaron los problemas de coordinación asociados con la incorporación de fuentes renovables. La coincidencia entre estos estudios indicó que la modificación de las características de las corrientes de falla constituyó una causa técnica recurrente de las dificultades de protección. Las diferencias se relacionaron principalmente con el nivel de solución analizado, debido a que algunos trabajos examinaron estrategias generales, mientras que otros desarrollaron esquemas específicos de protección. Estos resultados respaldaron la necesidad de desarrollar funciones de protección capaces de utilizar diferentes magnitudes y criterios de actuación cuando la información proporcionada por la corriente de falla resultara insuficiente.

La revisión también mostró una evolución hacia dispositivos y funciones de protección más especializados. Santos et al. (2023) desarrollaron una función mejorada de relé de tensión para microredes de corriente alterna y evaluaron su comportamiento ante diferentes condiciones operativas y posibles disparos intempestivos. Este resultado complementó las revisiones generales sobre protección inteligente al mostrar una aplicación específica sustentada en magnitudes eléctricas diferentes de los criterios tradicionales de sobrecorriente. Por su parte, Satpathy et al. (2025) describieron una evolución tecnológica más amplia desde dispositivos tradicionales hacia relés digitales, sensores inteligentes, inteligencia artificial y aprendizaje automático. Ambos enfoques coincidieron en la búsqueda de una mayor capacidad de adaptación, aunque difirieron en el alcance de sus contribuciones: Santos et al. (2023)

analizaron una función específica de protección, mientras que Satpathy et al. (2025) caracterizaron una transformación tecnológica de mayor amplitud. Esta relación evidenció una progresiva diversificación de las funciones de protección y su integración con plataformas digitales.

En las microredes de corriente continua se identificó una problemática diferenciada respecto de las microredes de corriente alterna. Sarangi et al. (2025) señalaron dificultades relacionadas con las topologías, los sistemas de puesta a tierra, las características de las corrientes de falla y las cargas de potencia constante, además de comparar técnicas de detección aplicables a distintas configuraciones. Estos hallazgos mostraron la necesidad de desarrollar estrategias específicas para sistemas en los que las características transitorias de las fallas dificultan la aplicación directa de criterios concebidos para redes de corriente alterna. La literatura analizada también evidenció la incorporación de soluciones inteligentes y estrategias tolerantes a fallas en este ámbito. Las diferencias respecto de las microredes de corriente alterna estuvieron asociadas principalmente con las características eléctricas de las fallas y con los mecanismos requeridos para su detección, interrupción y aislamiento. En consecuencia, los resultados respaldaron el desarrollo de dispositivos y estrategias de protección específicamente adaptados a arquitecturas de corriente continua.

La digitalización constituyó otro componente transversal de la evolución identificada. Islam et al. (2024) relacionaron la protección adaptativa con posibilidades de automatización mediante la norma IEC 61850, mientras que Ayello y Lopes (2023) estudiaron la interoperabilidad sustentada en este estándar. La relación entre ambos trabajos mostró que la adaptación de los sistemas de

protección no dependió exclusivamente de los algoritmos utilizados, sino también de la capacidad de comunicación e interoperabilidad entre los dispositivos que integran la arquitectura eléctrica. Esta condición adquirió especial relevancia en sistemas que requieren intercambiar información para modificar ajustes, reconocer cambios operativos o coordinar actuaciones. En este contexto, los resultados evidenciaron la necesidad de considerar conjuntamente la protección, la comunicación, la automatización y la interoperabilidad durante el diseño de sistemas eléctricos digitalizados.

Finalmente, la incorporación de inteligencia artificial representó una tendencia relevante, aunque la literatura también mostró limitaciones que deben considerarse antes de su implementación en sistemas eléctricos operativos. Oelhaf et al. (2025) identificaron un desempeño elevado de determinados modelos de aprendizaje automático con datos simulados, pero señalaron una validación limitada en condiciones reales y dificultades para comparar los estudios debido a diferencias en las tareas analizadas, los conjuntos de datos y los procedimientos de evaluación. Este resultado introdujo una consideración crítica frente a los estudios que destacaron principalmente el potencial de las técnicas inteligentes. La evidencia analizada indicó que el desempeño algorítmico obtenido en condiciones de simulación no resulta suficiente por sí solo para demostrar una implementación operativa confiable. En consecuencia, la incorporación de estas soluciones requiere validación con datos representativos, pruebas de robustez, conjuntos de datos reproducibles y evaluación de las condiciones reales de implementación antes de su transferencia hacia sistemas de protección operativos.

En conjunto, la discusión permitió identificar una evolución desde esquemas predominantemente

estáticos hacia arquitecturas de protección adaptativas, digitales, interconectadas e inteligentes. Las principales coincidencias entre los estudios se relacionaron con la necesidad de responder a cambios topológicos, generación distribuida, recursos basados en inversores y diferentes modos de operación. Las divergencias estuvieron asociadas con las magnitudes utilizadas para detectar las fallas, los algoritmos aplicados, los requerimientos de comunicación y los niveles de validación tecnológica alcanzados. La evidencia disponible mostró que la evolución de la protección eléctrica no dependió de una única tecnología, sino de la integración progresiva de medición, comunicación, procesamiento, coordinación y actuación. Esta interpretación proporcionó la base tecnológica para formular una propuesta integrada de protección y seguridad eléctrica.

La revisión estuvo condicionada por la delimitación temporal del periodo 2023–2026 y por la disponibilidad de publicaciones indexadas en las fuentes consultadas. Estas condiciones pudieron restringir la incorporación de determinados desarrollos tecnológicos recientes o de aplicaciones específicas. Asimismo, la diversidad de arquitecturas, condiciones operativas, tecnologías y niveles de validación presentes en los estudios limitó la comparación directa entre algunas soluciones. No obstante, el corpus permitió identificar tendencias, coincidencias, diferencias y alternativas tecnológicas relevantes para comprender la evolución reciente de los sistemas de protección y seguridad eléctrica.

9.3. Propuesta de sistema modular inteligente para coordinación adaptativa y gestión de protección

A partir de los resultados obtenidos en la revisión documental, se plantea una propuesta

de desarrollo tecnológico orientada a integrar las principales capacidades identificadas en los sistemas contemporáneos de protección eléctrica. La propuesta articula medición, comunicación, procesamiento digital, coordinación adaptativa y actuación dentro de una arquitectura modular, con el propósito de responder a diferentes configuraciones y condiciones operativas de los sistemas eléctricos. Su formulación comprende la necesidad tecnológica, el fundamento del desarrollo, los componentes de la solución, los productos esperados, el nivel de madurez previsto, los ámbitos de aplicación, la estrategia de validación y su potencial de transferencia.

1. Título del desarrollo tecnológico

Sistema modular inteligente para coordinación adaptativa y gestión de protección de sistemas eléctricos mediante medición, comunicación y procesamiento digital

2. Problema o necesidad tecnológica

Los sistemas eléctricos contemporáneos han incorporado progresivamente generación distribuida, recursos basados en inversores, microredes de corriente alterna y corriente continua, sistemas de automatización y arquitecturas digitales que han modificado las condiciones tradicionales de operación y protección. Estas transformaciones han incrementado los requerimientos de coordinación, selectividad, sensibilidad, rapidez de actuación y capacidad de adaptación de los sistemas de protección ante cambios en la topología de la red, la dirección de los flujos de potencia y las características de las corrientes de falla.

La revisión realizada mostró que estas dificultades han sido abordadas mediante estrategias de protección adaptativa, coordinación optimizada de relés, mediciones locales, comunicación digital,

inteligencia artificial, técnicas de detección de fallas y mecanismos de reconfiguración automática. Los estudios analizados también evidenciaron aplicaciones diferenciadas para redes de distribución, microredes de corriente alterna, microredes de corriente continua y sistemas eléctricos con recursos basados en inversores.

Sin embargo, las tecnologías identificadas en el corpus documental fueron desarrolladas frecuentemente como soluciones independientes, centradas en funciones específicas de detección, coordinación, ajuste o actuación. Esta fragmentación permitió identificar una necesidad tecnológica relacionada con la integración funcional de la medición de variables eléctricas, la identificación de las condiciones operativas, la determinación o actualización de ajustes, la coordinación de dispositivos, la actuación de las protecciones y la generación de información técnica dentro de una arquitectura modular.

En respuesta a esta necesidad, se plantea el desarrollo de una solución tecnológica orientada a integrar las principales funciones identificadas en el corpus documental, sin sustituir necesariamente los sistemas de protección, control, supervisión o automatización existentes. La propuesta busca proporcionar una arquitectura modular y adaptable que pueda integrarse progresivamente en sistemas eléctricos con diferentes configuraciones, tecnologías y condiciones de operación.

3. Fundamento del desarrollo

La evidencia analizada mostró una evolución desde esquemas de protección predominantemente estáticos hacia estrategias capaces de responder a cambios en las condiciones operativas de los sistemas eléctricos. La incorporación de generación distribuida y recursos basados en inversores

modificó los niveles y las características de las corrientes de falla, mientras que las microredes introdujeron diferentes modos de operación y configuraciones topológicas. Estas condiciones incrementaron la necesidad de disponer de sistemas de protección con capacidad para reconocer el estado operativo de la red y adaptar sus criterios de coordinación y actuación.

La medición de tensión, corriente, frecuencia, estado de los interruptores y otras variables operativas constituye la base para reconocer las condiciones del sistema eléctrico. A partir de esta información pueden establecerse criterios para seleccionar o modificar ajustes de protección, coordinar relés e identificar condiciones anormales. De esta manera, la medición adquiere una función esencial dentro de una arquitectura de protección adaptativa, debido a que proporciona la información necesaria para sustentar las posteriores etapas de procesamiento, decisión y actuación.

Paralelamente, las comunicaciones digitales permiten intercambiar información entre dispositivos de protección, equipos de medición y plataformas de procesamiento. Esta capacidad resulta particularmente relevante cuando la estrategia de protección requiere considerar información procedente de diferentes puntos de la red, reconocer modificaciones en su configuración o actualizar criterios de actuación ante cambios en las condiciones operativas. Por tanto, la comunicación y la interoperabilidad constituyen componentes necesarios para articular las funciones de medición, procesamiento, coordinación y actuación dentro de una misma arquitectura tecnológica.

Los métodos de optimización y las técnicas de inteligencia artificial identificados en la literatura amplían las posibilidades para determinar ajustes, clasificar fallas y reconocer patrones operativos.

No obstante, su incorporación requiere procesos específicos de validación, debido a que la evidencia analizada también mostró diferencias en los conjuntos de datos utilizados, las condiciones de prueba y los niveles de validación experimental alcanzados. En consecuencia, la propuesta no presupone que la utilización de técnicas inteligentes garantice por sí misma un mejor desempeño, sino que plantea su integración como una alternativa que deberá evaluarse de acuerdo con las características del sistema, la disponibilidad de información y los resultados obtenidos durante la validación.

Sobre esta base, el desarrollo tecnológico se fundamenta en la integración funcional de la medición, la comunicación, la identificación de las condiciones operativas, el procesamiento de información, la coordinación, la decisión, la actuación y la verificación. Estas funciones se organizarán dentro de una arquitectura modular que pueda adaptarse progresivamente a sistemas eléctricos con diferentes configuraciones y modos de operación. En términos funcionales, el sistema partirá de la adquisición de las variables eléctricas y operativas, continuará con su comunicación e identificación, procesará la información necesaria para establecer los criterios de coordinación y actuación y, finalmente, verificará el comportamiento de las protecciones y los resultados obtenidos.

4. Objetivo general

Desarrollar y validar un sistema modular inteligente para la coordinación adaptativa y la gestión de la protección de sistemas eléctricos mediante la integración de medición, comunicación, procesamiento digital y estrategias de actuación, evaluado en condiciones controladas y representativas de diferentes escenarios operativos.

5. Descripción general de la solución propuesta

Se propone desarrollar un sistema tecnológico modular destinado a integrar información procedente de sensores, medidores, relés digitales, dispositivos inteligentes y sistemas de automatización para apoyar la protección y la coordinación de sistemas eléctricos.

La solución podrá gestionar información relacionada con:

a) Tensión eléctrica.

b) Corriente eléctrica.

c) Frecuencia.

d) Potencia activa y reactiva.

e) Dirección del flujo de potencia.

f) Ángulo o fase de las variables eléctricas, cuando esta información se encuentre disponible.

g) Estado operativo de los interruptores.

h) Estado de los relés.

i) Eventos de protección.

j) Registros de fallas.

k) Información temporal de las variables.

l) Condiciones de operación conectada o aislada.

m) Presencia de generación distribuida.

n) Condiciones asociadas con recursos basados en inversores.

o) Información procedente de dispositivos inteligentes.

p) Información procedente de sistemas de automatización.

q) Indicadores de coordinación.

r) Ajustes de los dispositivos de protección.

s) Información destinada al diagnóstico de fallas.

La solución estará estructurada en seis componentes principales.

Componente 1. Adquisición y medición de variables eléctricas.

Este componente permitirá integrar información procedente de sensores, medidores, relés digitales y dispositivos inteligentes instalados en diferentes puntos del sistema eléctrico. Su función consistirá en proporcionar información representativa de las condiciones operativas necesarias para identificar variaciones, eventos anormales y posibles condiciones de falla.

Componente 2. Comunicación e interoperabilidad.

Este componente permitirá establecer el intercambio de información entre los dispositivos de medición, los relés, las unidades de procesamiento y la plataforma de gestión. Podrá incorporar mecanismos de comunicación digital e interoperabilidad compatibles con la arquitectura tecnológica utilizada durante el proceso de validación.

Componente 3. Identificación y diagnóstico de condiciones operativas.

Este componente permitirá procesar las variables adquiridas para diferenciar condiciones normales

de operación, cambios topológicos, modificaciones en la generación o la demanda y eventos asociados con fallas. La identificación podrá apoyarse en criterios determinísticos, características eléctricas, métodos estadísticos o técnicas computacionales, de acuerdo con la configuración experimental y las características del sistema evaluado.

Componente 4. Coordinación adaptativa de protecciones.

Este componente permitirá determinar o actualizar los criterios de coordinación entre los dispositivos de protección de acuerdo con las condiciones operativas identificadas. Podrá incorporar reglas de coordinación, procedimientos de optimización o estrategias adaptativas destinadas a modificar los ajustes cuando se produzcan cambios relevantes en la configuración o el estado operativo del sistema.

Componente 5. Gestión de actuación y aislamiento.

Este componente permitirá generar la información necesaria para la actuación de los dispositivos de protección correspondientes y evaluar la secuencia de detección, coordinación, disparo y aislamiento de la condición anormal. Su funcionamiento estará orientado a preservar la selectividad y la coordinación dentro de las condiciones establecidas para la validación.

Componente 6. Supervisión y evaluación de la protección.

Este componente permitirá visualizar eventos, estados de protección, secuencias de actuación, condiciones de operación y resultados de las pruebas. Asimismo, posibilitará generar reportes técnicos relacionados con los tiempos de actuación, la coordinación, la identificación de fallas, los eventos registrados y el comportamiento de los dispositivos.

La integración de estos componentes permitirá desarrollar una secuencia funcional en la que las variables eléctricas sean adquiridas y comunicadas a los módulos correspondientes para identificar las condiciones operativas, procesar la información, establecer o actualizar los criterios de coordinación, ejecutar las actuaciones requeridas y verificar posteriormente el comportamiento del sistema.

La configuración específica de los sensores, la arquitectura de comunicación, los protocolos, los algoritmos, los parámetros de coordinación, las reglas de decisión y la estructura computacional podrá mantenerse reservada cuando constituya conocimiento tecnológico susceptible de protección.

6. Novedad o diferenciación tecnológica

La diferenciación tecnológica de la propuesta no se fundamenta en el desarrollo aislado de un relé, un sensor, un algoritmo de inteligencia artificial, un sistema de comunicación o un método de coordinación. Su principal característica consiste en integrar funcionalmente diferentes tecnologías de protección dentro de una arquitectura modular que articule la medición, la comunicación, la identificación de las condiciones operativas, la coordinación adaptativa, la actuación y la evaluación.

La característica diferenciadora estará asociada con la capacidad de vincular la información operativa del sistema eléctrico con los criterios de protección y coordinación dentro de una estructura tecnológica adaptable. De esta manera, la información adquirida no tendrá únicamente una finalidad de supervisión, sino que podrá utilizarse para reconocer las condiciones de operación, establecer los criterios de coordinación y apoyar las decisiones relacionadas con la actuación de los dispositivos de protección.

La arquitectura propuesta permitirá evolucionar desde una utilización relativamente independiente de los dispositivos de protección hacia una estructura coordinada en la que la información operativa pueda emplearse para modificar o seleccionar estrategias de protección de acuerdo con las condiciones del sistema. Este proceso comprenderá la medición e identificación del estado operativo, la determinación de los criterios de coordinación, la actuación de las protecciones, la verificación de los resultados y, cuando corresponda, la adaptación de los parámetros o estrategias utilizados.

La diferenciación tecnológica deberá comprobarse posteriormente mediante desarrollo experimental, pruebas de integración, comparación técnica, evaluación del desempeño y análisis de antecedentes de propiedad intelectual. Por tanto, la propuesta no presupone anticipadamente exclusividad, novedad jurídica ni superioridad tecnológica respecto de otras soluciones existentes.

7. Productos tecnológicos esperados

El desarrollo podrá generar los siguientes productos tecnológicos:

a) Prototipo funcional del sistema modular.

b) Módulo de adquisición de variables eléctricas.

c) Módulo de integración de sensores y dispositivos de protección.

d) Módulo de comunicación e interoperabilidad.

e) Módulo de identificación de condiciones operativas.

f) Módulo de detección y diagnóstico de fallas.

g) Módulo de coordinación adaptativa.

h) Módulo de gestión de ajustes de protección.

i) Módulo de evaluación de la actuación de relés.

j) Módulo de supervisión digital.

k) Módulo de generación de alertas técnicas.

l) Módulo de registro de eventos.

m) Módulo de generación de reportes.

n) Procedimiento para la integración de dispositivos de protección.

o) Procedimiento para la coordinación adaptativa.

p) Metodología para la evaluación de la actuación y la selectividad.

q) Manual técnico de operación, configuración y mantenimiento.

Estos productos podrán desarrollarse progresivamente de acuerdo con las etapas de diseño, integración y validación del sistema. Su generación efectiva dependerá de los resultados experimentales obtenidos y del nivel de integración tecnológica alcanzado durante el desarrollo.

8. Nivel de madurez tecnológica

La meta inicial del desarrollo será alcanzar un nivel de madurez tecnológica TRL 5, siempre que el prototipo integrado pueda ser probado y validado satisfactoriamente en un entorno representativo de un sistema eléctrico.

El TRL 5 no deberá considerarse alcanzado únicamente a partir de la evidencia bibliográfica disponible. El corpus documental permitió fundamentar la arquitectura propuesta e identificar

las tecnologías susceptibles de integración, pero no demostró experimentalmente el funcionamiento del sistema modular planteado. En consecuencia, el nivel de madurez deberá establecerse a partir de la evidencia generada durante el desarrollo y la validación tecnológica.

La trayectoria prevista comprenderá las etapas de conceptualización, diseño, desarrollo, integración, pruebas funcionales, validación en un entorno representativo y optimización. Este proceso permitirá avanzar progresivamente desde la formulación conceptual de la solución hasta la comprobación experimental de sus principales funciones.

La validación deberá comprobar progresivamente:

a) La adquisición de variables eléctricas.

b) La identificación de las condiciones operativas.

c) La comunicación entre dispositivos.

d) La detección de eventos.

e) La coordinación de las protecciones.

f) La actuación de los dispositivos.

g) La selectividad.

h) Los tiempos de respuesta.

i) El comportamiento ante cambios topológicos.

j) El comportamiento ante la incorporación de generación distribuida.

k) El comportamiento ante recursos basados en inversores.

l) El funcionamiento en diferentes condiciones operativas.

Una vez obtenida evidencia experimental suficiente, podrá determinarse el nivel de madurez tecnológica efectivamente alcanzado por la solución.

9. Ámbito de aplicación

La solución tendrá aplicación potencial en:

a) Redes eléctricas de distribución.

b) Sistemas eléctricos de baja y media tensión.

c) Microredes de corriente alterna.

d) Microredes de corriente continua.

e) Microredes híbridas.

f) Sistemas con generación distribuida.

g) Sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

h) Instalaciones eléctricas industriales.

i) Sistemas eléctricos con recursos basados en inversores.

j) Laboratorios de sistemas eléctricos.

k) Centros de investigación.

l) Instituciones de formación tecnológica.

m) Instituciones universitarias.

Una aplicación particularmente pertinente corresponderá a redes de distribución y microredes que presenten cambios en su topología, generación, demanda o condiciones de operación y que requieran mantener la coordinación entre diferentes dispositivos de protección. La arquitectura modular permitirá adaptar progresivamente los componentes del sistema a las características de

cada entorno de aplicación, sin presuponer una configuración tecnológica única.

10. Estrategia de validación

La estrategia de validación estará orientada a demostrar que el sistema puede ejecutar de manera integrada las funciones de adquisición de información, identificación de las condiciones operativas, procesamiento, coordinación, actuación y verificación. La comprobación deberá considerar tanto el funcionamiento individual de los componentes como su capacidad para operar de manera articulada dentro de la arquitectura propuesta.

Los escenarios de validación podrán desarrollarse inicialmente en condiciones controladas mediante una infraestructura experimental que represente diferentes configuraciones de sistemas eléctricos. Posteriormente, podrán utilizarse condiciones representativas que incorporen variaciones en la generación, la demanda, la topología y la participación de recursos basados en inversores.

La evaluación deberá considerar, según corresponda:

a) Capacidad de adquisición de variables eléctricas.

b) Integración de sensores y dispositivos.

c) Comunicación entre dispositivos.

d) Estabilidad de la comunicación.

e) Identificación de las condiciones operativas.

f) Detección de eventos.

g) Clasificación de condiciones de falla.

h) Determinación o actualización de ajustes.

i) Coordinación entre dispositivos.

j) Selectividad.

k) Tiempo de actuación.

l) Sensibilidad.

m) Comportamiento ante cambios topológicos.

n) Comportamiento ante generación distribuida.

o) Comportamiento ante recursos basados en inversores.

p) Actuación de los dispositivos.

q) Aislamiento de la condición de falla.

r) Consistencia de la información procesada.

s) Generación de registros.

t) Generación de reportes técnicos.

u) Integración funcional de los componentes.

Los resultados obtenidos deberán permitir establecer el grado de cumplimiento de las funciones previstas, identificar limitaciones técnicas y determinar los ajustes necesarios para mejorar la integración del sistema. La validación permitirá establecer la funcionalidad de la solución en condiciones controladas y representativas, sin asumir previamente su desempeño en redes eléctricas comerciales.

11. Potencial de transferencia

La transferencia tecnológica podrá comprender:

a) Prototipo funcional del sistema modular.

b) Plataforma de coordinación adaptativa.

c) Módulo de adquisición de información.

d) Módulo de integración de dispositivos de protección.

e) Módulo de comunicación.

f) Módulo de detección y diagnóstico de fallas.

g) Módulo de coordinación adaptativa.

h) Procedimientos para la configuración de dispositivos.

i) Metodología de evaluación de la coordinación.

j) Documentación técnica especializada.

k) Manual de operación y mantenimiento.

l) Capacitación especializada.

m) Asistencia técnica para la implementación.

n) Servicio tecnológico de evaluación de protecciones.

o) Servicio de integración de dispositivos de protección y medición.

p) Servicio de diagnóstico y coordinación de protecciones.

La solución podrá transferirse progresivamente a empresas eléctricas, instalaciones industriales, instituciones tecnológicas, universidades y centros de investigación que requieran evaluar o fortalecer sus capacidades de coordinación, diagnóstico y gestión adaptativa de protecciones. La modalidad específica de transferencia dependerá del grado

de madurez tecnológica alcanzado, los resultados de la validación, las características del entorno de aplicación y las condiciones de protección del conocimiento tecnológico desarrollado.

12. Cierre integrador de la propuesta

La propuesta articula en una misma arquitectura tecnológica funciones de medición, comunicación, identificación de condiciones operativas, procesamiento, coordinación adaptativa, actuación, supervisión y evaluación. Su carácter modular permitirá desarrollar y validar progresivamente cada componente antes de establecer su integración funcional, lo que facilitará identificar limitaciones, ajustar parámetros y determinar las condiciones necesarias para su aplicación en diferentes configuraciones de sistemas eléctricos.

El desarrollo propuesto responde a las tendencias identificadas en la revisión documental, particularmente a la necesidad de adaptar los sistemas de protección a escenarios caracterizados por generación distribuida, recursos basados en inversores, microredes, cambios topológicos y una creciente digitalización. Sin embargo, la propuesta diferencia entre el potencial tecnológico sustentado por la literatura y el desempeño que deberá demostrarse experimentalmente. En consecuencia, su funcionalidad, nivel de madurez y posibilidades de transferencia deberán establecerse a partir de evidencias obtenidas mediante las etapas de desarrollo, integración y validación.

Desde esta perspectiva, el sistema modular constituye una propuesta de integración tecnológica orientada a fortalecer la coordinación, la selectividad, la capacidad de adaptación y la gestión de la protección de los sistemas eléctricos. Su desarrollo permitirá evaluar la viabilidad de articular tecnologías actualmente utilizadas de

manera independiente dentro de una estructura funcional común, con posibilidades de aplicación progresiva en redes de distribución, microredes, instalaciones industriales y entornos académicos y experimentales.

Referencias

Agwa, A. M., & El-Fergany, A. A. (2023). Protective relaying coordination in power systems comprising renewable sources: Challenges and future insights. ***Sustainability, 15***(9), 7279. https://doi.org/10.3390/su15097279

Alasali, F., Saad, S. M., Saidi, A. S., Itradat, A., Holderbaum, W., El-Naily, N., & Elkuwafi, F. F. (2023). Powering up microgrids: A comprehensive review of innovative and intelligent protection approaches for enhanced reliability. ***Energy Reports, 10***, 1899–1924. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.08.068

Ashraf, S., Hasan, O., Evkay, I., Selamogullari, U. S., & Baysal, M. (2024). Recent trends and developments in protection systems for microgrids incorporating distributed generation. ***WIREs Energy and Environment, 13***(4), e532. https://doi.org/10.1002/wene.532

Ayello, M., & Lopes, Y. (2023). Interoperability based on IEC 61850 standard: Systematic literature review, certification method proposal, and case study. ***Electric Power Systems Research, 220***, 109355. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109355

Ayvaz, A. (2024). A new and effective directional overcurrent relay coordination approach for IIDG-based distribution networks using different setting groups for peak and off-peak demand periods. ***Electric Power Systems Research, 237***, 111017. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111017

Baba, M., Nor, N. B. M., Sheikh, M. A., Alharthi, Y. Z., Shutari, H., & Majeed, M. F. (2024). A review on microgrid protection challenges and approaches to address protection issues. *IEEE Access, 12*, 175278–175303. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3458047

Bhalla, A., & Bhalja, B. R. (2024). A new fault detection and relay coordination technique for low voltage DC microgrid. *Electric Power Systems Research, 236*, 110907. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110907

De la Cruz, J., Wu, Y., Candelo, J. E., Vásquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2024). Review of networked microgrid protection: Architectures, challenges, solutions, and future trends. *CSEE Journal of Power and Energy Systems, 10*(2), 448–467. https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2022.07980

Etanya, T. F., Tsafack, P., & Ngwashi, D. K. (2025). Grid-connected distributed renewable energy generation systems: Power quality issues, and mitigation techniques – A review. *Energy Reports, 13*, 3181–3203. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.02.050

Gui, J., Lei, H., & Johnson, B. K. (2024). A superimposed quantity-based protection method for power systems with inverter-based resources. *Electric Power Systems Research, 232*, 110390. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110390

Hamdeen, I., Badran, E. A., Kotb, M. F., & Elgamal, M. (2025). Self-healing multi-agent techniques in electric power distribution systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 224*, 116132. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116132

Islam, K., Kim, D., & Abu-Siada, A. (2024). A review on adaptive power system protection schemes for future smart and micro grids, challenges and opportunities. *Electric Power Systems Research, 230*, 110241. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110241

Jaffer, M., Ismail, A., & Khalid, H. M. (2025). A need for communication-free adaptive protection strategy in microgrids: An integrated survey on impacts, challenges, possible solutions and open research in microgrid protection. *Applied Energy, 390*, 125823. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125823

Kumar, K., Kumar, P., & Kar, S. (2024). A review of microgrid protection for addressing challenges and solutions. *Renewable Energy Focus, 49*, 100572. https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100572

Kumar, P., & Rana, A. S. (2024). Review of optimization techniques for relay coordination in consideration with adaptive schemes of microgrid. *Electric Power Systems Research, 230*, 110240. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110240

Li, J., Feng, J., Huang, M., Liu, S., & Wang, G. (2025). Optimal protection coordination for directional overcurrent relays in radial distribution networks with inverter-based distributed energy resources. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 167*, 110622. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110622

Mohan, F., & Sasidharan, N. (2023). Protection of low voltage DC microgrids: A review. *Electric Power Systems Research, 225*, 109822. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109822

Muñoz-Arango, G., Mora-Flórez, J., & Pérez-Londoño, S. (2024). Optimal data-driven adaptive overcurrent relay coordination for active distribution networks. ***Electric Power Systems Research, 228***, 110078. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.110078

Oelhaf, J., Kordowich, G., Pashaei, M., Bergler, C., Maier, A., Jäger, J., & Bayer, S. (2025). A scoping review of machine learning applications in power system protection and disturbance management. ***International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 172***, 111257. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.111257

Ojo, K. E., Saha, A. K., & Srivastava, V. M. (2025). A critical review of advanced protection devices in AC microgrid. ***IEEE Access, 13***, 203931–203971. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3638604

Peter, N., Gupta, P., & Goel, N. (2025). Intelligent strategies for microgrid protection: A comprehensive review. ***Applied Energy, 379***, 124901. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124901

Santos, G. P., Tsutsumi, A., & Vieira, J. C. M. (2023). Enhanced voltage relay for AC microgrid protection. ***Electric Power Systems Research, 220***, 109310. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109310

Sarangi, R. R., Ray, P. K., Mohanty, A., Khadem, S., & Patra, S. (2025). Enhancing DC microgrid security: A comprehensive review of protection challenges and solutions. ***International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 168***, 110687. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110687

Satpathy, P. R., Ramachandaramurthy, V. K., & Padmanaban, S. (2025). Advanced protection technologies for microgrids: Evolution, challenges, and future trends. ***Energy Strategy Reviews, 58***, 101670. https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101670

Sharma, J., & Sidhu, T. S. (2023). A new protection scheme for feeders of microgrids with inverter-based resources. *Electric Power Systems Research, 224*, 109632. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109632

Shazdeh, S., Golpîra, H., & Bevrani, H. (2024). Advanced and smart protection schemes in renewable integrated power systems: A survey and new perspectives. *Electric Power Systems Research, 235*, 110832. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110832

Sheta, A. N., Abdulsalam, G. M., Sedhom, B. E., & Eladl, A. A. (2023). Comparative framework for AC-microgrid protection schemes: Challenges, solutions, real applications, and future trends. *Protection and Control of Modern Power Systems, 8*(2), 363–402. https://doi.org/10.1186/s41601-023-00296-9

Tan, S., Xie, P., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2025). Developments, challenges and future opportunities in cybersecure microgrid control. *Nature Reviews Electrical Engineering, 2*, 522–540. https://doi.org/10.1038/s44287-025-00189-z

Uzair, M., Li, L., Eskandari, M., Hossain, J., & Zhu, J. G. (2023). Challenges, advances and future trends in AC microgrid protection: With a focus on intelligent learning methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 178*, 113228. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113228

Yadav, G. K., Kirar, M. K., & Gupta, S. C. (2025). Microgrids protection: A review of technologies, challenges, and future trends. *Renewable Energy Focus, 55*, 100720. https://doi.org/10.1016/j.ref.2025.100720



10.

Eficiencia energética y gestión inteligente del consumo eléctrico: tecnologías y aplicaciones sostenibles

Alejandro Alfredo Castro Choez

10.1. Eficiencia energética y transformación inteligente de la gestión del consumo eléctrico

La transición energética ha impulsado la transformación de los sistemas eléctricos mediante la digitalización, la incorporación de generación renovable y el desarrollo de nuevas estrategias de eficiencia y gestión energética. En este contexto, las redes inteligentes integran automatización, comunicación bidireccional y recursos energéticos distribuidos para mejorar la sostenibilidad, la flexibilidad

y la capacidad operativa de los sistemas eléctricos (Ethirajan & Mangaiyarkarasi, 2025; Mahmood et al., 2024). Paralelamente, la literatura reciente ha examinado sistemas inteligentes de gestión energética, estrategias de respuesta de la demanda, inteligencia artificial y métodos avanzados para el análisis del consumo eléctrico. Los enfoques actuales priorizan la optimización, la flexibilidad, el aprendizaje automático y la coordinación entre generación, almacenamiento y demanda (Mischos et al., 2023; Mousa et al., 2024; Zheng et al., 2024).

En las instalaciones eléctricas, los medidores inteligentes proporcionan información detallada sobre el consumo, los perfiles de demanda y las condiciones operativas. El análisis de estos datos permite apoyar el pronóstico de la demanda, la planificación, la gestión de activos y la evaluación de la eficiencia en las redes de distribución (Athanasiadis et al., 2024; Huotari et al., 2024). Sin embargo, la diversidad de tecnologías y arquitecturas existentes dificulta una interpretación integrada de las estrategias destinadas a gestionar inteligentemente el consumo eléctrico. Asimismo, persisten desafíos relacionados con la interoperabilidad, la automatización, la privacidad, la madurez tecnológica y la coordinación entre usuarios, edificios y redes eléctricas (Rehman et al., 2025; Toderean et al., 2025).

El capítulo delimitó su análisis a las tecnologías de eficiencia energética y gestión inteligente aplicables al consumo eléctrico durante el periodo 2023–2026. La revisión consideró sistemas de gestión energética, medición inteligente, automatización, respuesta de la demanda, inteligencia artificial, almacenamiento energético y digitalización (Allwyn et al., 2023; Cespedes & Jradi, 2024). Esta temática posee relevancia formativa debido a que relaciona los fundamentos de los sistemas eléctricos con

herramientas digitales aplicables a instalaciones contemporáneas. Asimismo, favorece la comprensión tecnológica de soluciones orientadas al ahorro energético, la optimización del consumo, la sostenibilidad y la gestión responsable de los recursos eléctricos (Akkara & Selvakumar, 2023; Rajaperumal & Columbus, 2025).

El análisis bibliográfico permitió integrar conocimientos relacionados con la automatización, el internet de las cosas, la inteligencia artificial y la gestión energética. Esta perspectiva resultó pertinente para comprender aplicaciones educativas, residenciales, comerciales e industriales asociadas con el desarrollo de sistemas eléctricos más eficientes y sostenibles (de Oliveira & Pimenta, 2023; Singh et al., 2023). Asimismo, la incorporación de técnicas de analítica avanzada permitió identificar comportamientos de consumo y examinar estrategias destinadas a mejorar la toma de decisiones energéticas. Los sistemas de automatización y análisis de datos ampliaron las capacidades de supervisión, diagnóstico y control en edificios inteligentes (Himeur et al., 2023; Qiang et al., 2023).

El propósito del capítulo consistió en analizar comparativamente las tecnologías asociadas con la eficiencia energética y la gestión inteligente del consumo eléctrico, considerando sus aplicaciones, capacidades, limitaciones y contribuciones a la optimización del uso de la electricidad. Este enfoque permitió examinar las relaciones entre medición, automatización, procesamiento de información y gestión energética, así como identificar tendencias tecnológicas relevantes para el desarrollo de soluciones orientadas a un consumo eléctrico más eficiente y sostenible.

El estudio correspondió a una revisión bibliográfica de carácter descriptivo, analítico y comparativo. El componente descriptivo permitió caracterizar

la literatura científica relacionada con la eficiencia energética y la gestión inteligente del consumo eléctrico; el componente analítico se orientó a identificar e interpretar los principales aportes tecnológicos y metodológicos de las publicaciones seleccionadas; mientras que el componente comparativo permitió contrastar tecnologías, enfoques, aplicaciones, capacidades y tendencias de acuerdo con sus funciones y contribuciones al uso eficiente de la electricidad.

Las principales fuentes de información correspondieron a las bases de datos Scopus, Web of Science y ScienceDirect. La búsqueda se delimitó exclusivamente a publicaciones científicas correspondientes al periodo 2023–2026, con prioridad para artículos publicados en revistas indexadas y literatura especializada en eficiencia energética, gestión del consumo eléctrico, digitalización y tecnologías inteligentes. Esta delimitación permitió concentrar el análisis en desarrollos recientes y mantener correspondencia entre el periodo definido, el propósito del capítulo y el corpus documental examinado.

La estrategia de búsqueda empleó términos técnicos en idioma inglés combinados mediante los operadores booleanos AND y OR. Entre las principales ecuaciones utilizadas se incluyeron (“energy efficiency” AND “intelligent energy management”), (“electricity consumption” AND “smart energy management”), (“smart metering” AND “energy efficiency”), (“demand response” AND “energy management”) y (“artificial intelligence” AND “energy consumption management”). La estrategia se ajustó progresivamente para restringir términos excesivamente generales y priorizar combinaciones directamente relacionadas con tecnologías, gestión, optimización y aplicaciones vinculadas con el consumo eléctrico.

Los criterios de inclusión comprendieron artículos científicos publicados entre 2023 y 2026 en revistas indexadas, directamente relacionados con el objeto de estudio y con información bibliográfica verificable. Las publicaciones seleccionadas debían aportar información tecnológica, metodológica o aplicada sobre eficiencia energética y gestión inteligente del consumo eléctrico. Asimismo, se priorizaron revisiones y estudios de síntesis tecnológica pertinentes para integrar y comparar los principales desarrollos identificados. La disponibilidad de un identificador de objeto digital (DOI) verificable se consideró un criterio para fortalecer la trazabilidad documental de las publicaciones incorporadas.

Los criterios de exclusión comprendieron registros duplicados, publicaciones situadas fuera del periodo establecido, documentos sin relación directa con el objeto del capítulo y registros cuya información bibliográfica no pudiera verificarse de manera fiable. También se excluyeron publicaciones que mencionaran la eficiencia energética o la digitalización únicamente de manera general, sin desarrollar aportes específicos relacionados con la gestión, medición, optimización o control del consumo eléctrico.

El proceso de selección se organizó en cuatro etapas: identificación, cribado, elegibilidad e inclusión. La identificación comprendió la recuperación de registros mediante las estrategias de búsqueda aplicadas en las fuentes seleccionadas. Durante el cribado se eliminaron los registros duplicados y los documentos que no presentaron correspondencia temática suficiente con el objeto de estudio. La etapa de elegibilidad comprendió la evaluación del texto completo y la comprobación del cumplimiento de los criterios previamente establecidos. Finalmente, la inclusión determinó el corpus documental definitivo utilizado para desarrollar el análisis.

Las cantidades correspondientes a cada etapa se establecieron exclusivamente a partir de los registros efectivamente recuperados y evaluados. El proceso mantuvo coherencia entre las etapas de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión, de manera que el número final del corpus correspondiera con las publicaciones incorporadas al análisis. De cada estudio seleccionado se extrajeron la referencia bibliográfica, el área tecnológica, el problema abordado, el principal aporte, la tecnología estudiada, la aplicación, la contribución al objetivo del capítulo y la implicación tecnológica. Esta información se organizó en una matriz documental que permitió mantener la trazabilidad de los datos y establecer categorías comparables entre las publicaciones seleccionadas.

El análisis documental se desarrolló desde tres perspectivas complementarias. La perspectiva descriptiva permitió organizar las publicaciones según las áreas tecnológicas, las aplicaciones y las tendencias identificadas. La perspectiva analítica se orientó a interpretar los aportes y las relaciones existentes entre las tecnologías, los problemas asociados con el consumo eléctrico y las estrategias de eficiencia energética. Por su parte, la perspectiva comparativa permitió contrastar las soluciones de acuerdo con su finalidad, capacidad tecnológica, ámbito de aplicación, nivel de automatización, posibilidades de optimización, integración energética y contribución a la sostenibilidad. De esta manera, la interpretación no se limitó a identificar las tecnologías presentes en la literatura, sino que examinó sus funciones, relaciones y posibilidades de integración dentro de estrategias inteligentes de gestión del consumo eléctrico.

Finalmente, el estudio consideró principios de integridad científica, transparencia documental y reconocimiento de la autoría. Las publicaciones incorporadas conservaron sus datos bibliográficos y DOI verificables, y la interpretación procuró

diferenciar los aportes documentados en las fuentes de las relaciones establecidas mediante el análisis comparativo. Debido al carácter exclusivamente documental de la investigación, no participaron personas o animales, ni se utilizaron datos personales, muestras biológicas o intervenciones experimentales. En consecuencia, las consideraciones éticas se concentraron en la trazabilidad de las fuentes, la fidelidad de la interpretación, la transparencia del procedimiento y el reconocimiento de la propiedad intelectual.

10.2. Tecnologías inteligentes para la medición, optimización y gestión del consumo eléctrico

El corpus documental analizado evidenció una concentración de investigaciones en torno a la eficiencia energética y la gestión inteligente del consumo eléctrico. Las principales áreas tecnológicas identificadas comprendieron redes inteligentes, microredes, medición inteligente, automatización de edificios, internet de las cosas, representaciones digitales dinámicas, inteligencia artificial, aprendizaje automático y respuesta de la demanda. En conjunto, los estudios examinaron tecnologías orientadas a medir, supervisar, analizar, optimizar y controlar el consumo energético, así como soluciones destinadas a mejorar la capacidad de respuesta ante diferentes condiciones de operación y demanda. Asimismo, se identificaron aplicaciones dirigidas a coordinar la generación, el almacenamiento, la demanda y los recursos energéticos distribuidos, lo que evidenció una evolución hacia estrategias de gestión con mayores niveles de digitalización, automatización e integración. La Tabla 10.1 sintetiza las áreas tecnológicas, los principales aportes, las contribuciones al objetivo del capítulo y las implicaciones identificadas en las publicaciones que conformaron el corpus documental.

Tabla 10.1. Análisis documental sobre eficiencia energética y gestión inteligente.

Referencia	Área tecnológica analizada	Principal aporte identificado	Contribución al objetivo del capítulo	Implicación tecnológica
Akkara & Selvakumar (2023)	Optimización de redes inteligentes	Revisa técnicas de optimización aplicadas a sistemas eléctricos inteligentes	Permite identificar métodos para mejorar la utilización eficiente de recursos eléctricos	Favorece algoritmos de optimización para planificación, operación y gestión energética
Allwyn et al. (2023)	Gestión energética de microredes	Analiza estrategias de gestión energética aplicadas a microredes	Relaciona la coordinación de recursos distribuidos con el uso eficiente de la energía	Facilita esquemas coordinados para generación, almacenamiento y demanda
Athanasiadis et al. (2024)	Medición inteligente y analítica de datos	Examina aplicaciones de datos provenientes de medidores inteligentes en redes de distribución	Aporta mecanismos para caracterizar patrones de consumo y apoyar decisiones energéticas	Fortalece la supervisión y el análisis operativo mediante datos de consumo
Cespedes & Jradi (2024)	Representaciones digitales en edificios	Revisa el empleo de representaciones para mejorar la eficiencia energética durante la operación de edificios	Integra representación digital, supervisión y gestión energética	Permite evaluar y optimizar el comportamiento energético mediante modelos digitales

de Oliveira & Pimenta (2023)	Internet de las cosas aplicado a edificios	Sintetiza aplicaciones del IoT para la gestión de energía eléctrica en edificios	Relaciona conectividad, medición y control con la reducción del consumo energético	Facilita sistemas conectados para supervisión y control automatizado
Ethirajan & Mangaiyarkarasi (2025)	Redes inteligentes y energías renovables	Examina avances recientes de las redes inteligentes vinculados con recursos renovables	Vincula digitalización, integración renovable y gestión eficiente del sistema eléctrico	Favorece arquitecturas inteligentes capaces de coordinar generación y demanda
Himeur et al. (2023)	Inteligencia artificial y analítica de datos	Analiza aplicaciones de inteligencia artificial y big data en automatización y gestión de edificios	Incorpora herramientas avanzadas para análisis, predicción y control energético	Amplía las capacidades de automatización y toma de decisiones energéticas
Huotari et al. (2024)	Aprendizaje automático en edificios inteligentes	Revisa aplicaciones de aprendizaje automático para la utilización inteligente de energía	Aporta métodos para analizar y optimizar patrones de consumo	Favorece sistemas adaptativos para predicción y control energético
Mahmood et al. (2024)	Digitalización, redes inteligentes y respuesta de demanda	Actualiza aplicaciones digitales relacionadas con redes inteligentes, renovables y gestión de demanda	Integra tecnologías digitales con estrategias de flexibilidad energética	Refuerza la coordinación entre generación, consumo y respuesta de demanda

Mischos et al. (2023)	Sistemas inteligentes de gestión energética	Revisa arquitecturas y estrategias de sistemas inteligentes de gestión energética	Proporciona una visión integradora de tecnologías para optimización del consumo	Sustenta sistemas automatizados de supervisión, análisis y control energético
Mousa et al. (2024)	Gestión del lado de la demanda	Examina estrategias de gestión de demanda en sistemas con recursos energéticos distribuidos	Relaciona flexibilidad de la demanda con eficiencia y operación del sistema eléctrico	Permite adaptar el consumo a las condiciones de generación y red
Qiang et al. (2023)	Automatización de edificios	Analiza sistemas de automatización orientados a la gestión energética y el confort	Vincula eficiencia energética con control automatizado de instalaciones	Permite coordinar cargas y condiciones operativas mediante sistemas inteligentes
Rajaperumal & Columbus (2025)	Inteligencia artificial aplicada a redes eléctricas	Examina el papel de la IA en sistemas eléctricos inteligentes, sostenibles y seguros	Amplía el enfoque del capítulo hacia herramientas computacionales avanzadas	Favorece aplicaciones de predicción, optimización, seguridad y gestión de redes
Rehman et al. (2025)	Gestión energética de viviendas inteligentes	Sintetiza tendencias y brechas en modelos de gestión energética residencial	Incorpora el ámbito doméstico como escenario de gestión inteligente del consumo	Promueve sistemas residenciales capaces de coordinar cargas y recursos energéticos

Singh et al. (2023)	Gestión y control de microredes interconectadas	Revisa estrategias de gestión y control para microredes conectadas	Aporta mecanismos para coordinar recursos y mejorar la operación energética	Facilita arquitecturas distribuidas para control y gestión de microredes
Toderean et al. (2025)	Respuesta de demanda en edificios	Revisa tecnologías habilitadoras para respuesta de demanda en edificios integrados con redes inteligentes	Vincula flexibilidad del consumo con la gestión energética inteligente	Favorece cargas flexibles y mecanismos de interacción entre edificios y red
Zheng et al. (2024)	Gestión energética integrada	Analiza enfoques integradores entre redes inteligentes y sistemas energéticos urbanos	Amplía la gestión energética desde instalaciones individuales hacia sistemas urbanos interconectados	Promueve modelos coordinados entre redes eléctricas, edificios y sistemas urbanos

Los resultados obtenidos mostraron que la eficiencia energética y la gestión inteligente del consumo eléctrico se configuraron como un campo tecnológico multidimensional, en el que la optimización, la digitalización, la automatización y la gestión de recursos operaron de manera complementaria. Esta configuración resultó coherente con el objetivo del capítulo, debido a que el corpus permitió identificar tecnologías orientadas tanto al conocimiento y caracterización del consumo como a su gestión

operativa. Akkara y Selvakumar (2023) situaron la optimización como un componente relevante para la operación de redes inteligentes, mientras que Allwyn et al. (2023) orientaron su análisis hacia las estrategias de gestión energética en microredes. La coincidencia entre ambos enfoques evidenció que la eficiencia energética no se limitó a la reducción de la energía consumida, sino que también involucró la coordinación de recursos y la optimización de las decisiones operativas.

La medición inteligente y la analítica de datos representaron otro resultado relevante del análisis. Athanasiadis et al. (2024) mostraron que los datos procedentes de medidores inteligentes permitieron desarrollar aplicaciones para redes de distribución, particularmente mediante la identificación y el análisis de patrones de utilización de la electricidad. En correspondencia, de Oliveira y Pimenta (2023) relacionaron el internet de las cosas con la gestión energética de edificios mediante la integración de conectividad, adquisición de información y funciones de control. La comparación mostró una diferencia asociada principalmente con el ámbito de aplicación: mientras la analítica de datos procedentes de medidores inteligentes se vinculó con las redes de distribución, las soluciones basadas en internet de las cosas presentaron una orientación más localizada hacia los edificios. Esta complementariedad evidenció diferentes escalas de aplicación de una misma lógica digital sustentada en la adquisición, procesamiento y utilización de información para apoyar la gestión energética.

En los edificios, los resultados mostraron una evolución desde la automatización convencional hacia herramientas digitales capaces de representar, analizar y ajustar el comportamiento energético. Cespedes y Jradi (2024) identificaron las representaciones digitales dinámicas como

herramientas para mejorar la eficiencia energética durante la etapa operativa, mientras que Qiang et al. (2023) examinaron sistemas de automatización destinados a gestionar el consumo de energía y las condiciones de confort. La relación entre ambos trabajos indicó que la automatización proporcionó una base funcional para el control, mientras que la representación digital amplió las capacidades de supervisión, análisis y evaluación del comportamiento energético del edificio. Esta diferencia resultó tecnológicamente relevante porque mostró una evolución hacia arquitecturas de gestión energética con mayores capacidades de procesamiento de información, representación del sistema y adaptación a las condiciones operativas.

La incorporación de inteligencia artificial y aprendizaje automático constituyó otra transformación relevante identificada en los resultados. Himeur et al. (2023) relacionaron la inteligencia artificial y el análisis de grandes volúmenes de datos con la automatización y la gestión energética de edificios, mientras que Huotari et al. (2024) concentraron su análisis en aplicaciones de aprendizaje automático orientadas al uso de la energía en edificios inteligentes. Ambos enfoques coincidieron en utilizar información operacional para apoyar la toma de decisiones energéticas, aunque presentaron diferentes énfasis en las capacidades computacionales empleadas. El primero integró analítica de datos y automatización dentro de una perspectiva más amplia, mientras que el segundo profundizó en métodos de aprendizaje aplicados al comportamiento energético. Esta convergencia reforzó la importancia de los métodos computacionales para identificar patrones, apoyar predicciones y ampliar las capacidades de gestión inteligente del consumo.

La digitalización también mostró una función articuladora entre la generación, la demanda y la

operación de las redes eléctricas. Mahmood et al. (2024) relacionaron la digitalización con las redes inteligentes, las energías renovables y la respuesta de la demanda, mientras que Mischos et al. (2023) abordaron los sistemas inteligentes de gestión energética desde una perspectiva integradora. La comparación evidenció que ambos enfoques superaron el tratamiento aislado de tecnologías individuales y situaron la gestión energética dentro de estructuras coordinadas. En relación con el objetivo del capítulo, este resultado mostró que la eficiencia energética depende progresivamente de la capacidad para integrar información, recursos energéticos y acciones de control dentro de una arquitectura tecnológica común.

La gestión del lado de la demanda constituyó otro componente relevante de los resultados. Mousa et al. (2024) caracterizaron la respuesta de la demanda como un mecanismo de flexibilidad en sistemas con elevada presencia de recursos energéticos distribuidos, mientras que Toderean et al. (2025) trasladaron esta perspectiva hacia edificios integrados con redes inteligentes. Ambos estudios coincidieron en considerar el consumo como una variable gestionable dentro del sistema eléctrico, aunque difirieron en la escala y el ámbito de aplicación. El primero enfatizó los sistemas eléctricos con recursos energéticos distribuidos, mientras que el segundo se concentró en las tecnologías habilitadoras para la integración de edificios con redes inteligentes. Esta correspondencia evidenció una integración progresiva entre las decisiones relacionadas con el consumo y las condiciones operativas de la red, lo que amplió el papel de la demanda desde una función predominantemente pasiva hacia una participación más flexible dentro de la gestión energética.

En el ámbito residencial, Rehman et al. (2025) identificaron tendencias y brechas en los modelos de gestión energética de viviendas inteligentes,

mientras que Singh et al. (2023) examinaron estrategias de gestión y control en microredes interconectadas. La comparación mostró una ampliación de la gestión inteligente desde unidades particulares de consumo hacia estructuras energéticas interconectadas. En las viviendas, la atención se concentró en la coordinación de cargas y recursos energéticos domésticos, mientras que, en las microredes, el análisis comprendió la gestión conjunta de diferentes recursos eléctricos. Esta diferencia de escala evidenció que las tecnologías de gestión energética pueden operar en distintos niveles del sistema sin perder su función central de coordinación y optimización.

Los resultados también mostraron una tendencia hacia la integración de diferentes niveles del sistema energético. Ethirajan y Mangaiyarkarasi (2025) vincularon las redes inteligentes con la incorporación de recursos renovables, mientras que Zheng et al. (2024) extendieron la gestión energética hacia la integración entre redes inteligentes y sistemas energéticos urbanos. Esta relación evidenció una ampliación desde la operación de componentes específicos hacia estructuras energéticas interconectadas. Por su parte, Rajaperumal y Columbus (2025) situaron la inteligencia artificial dentro del desarrollo de redes eléctricas inteligentes, sostenibles y seguras, incorporando capacidades computacionales a una escala sistémica. En conjunto, estos resultados mostraron que la gestión energética adquirió una orientación progresivamente integrada, en la que la digitalización permitió articular diferentes componentes, recursos y niveles de operación.

Desde una perspectiva crítica, uno de los principales aportes del análisis consistió en organizar dentro de una misma estructura funcional tecnologías que frecuentemente fueron estudiadas de

manera independiente. Los resultados permitieron reconocer una secuencia tecnológica en la que la medición proporciona información sobre el comportamiento energético, la analítica transforma los datos en conocimiento operativo, la inteligencia artificial amplía las capacidades de procesamiento y predicción, la automatización posibilita la ejecución de acciones y la respuesta de la demanda permite modificar el comportamiento de las cargas de acuerdo con determinadas condiciones operativas. Esta articulación resultó consistente con los planteamientos integradores de Zheng et al. (2024) y con la perspectiva de digitalización aplicada a redes y recursos energéticos desarrollada por Mahmood et al. (2024).

Desde una perspectiva disciplinar, el estudio aportó una interpretación integrada de la eficiencia energética al mostrar que esta no depende exclusivamente de tecnologías destinadas a reducir directamente el consumo de electricidad. El corpus evidenció que la eficiencia también se encuentra vinculada con la calidad y disponibilidad de la información, la capacidad de procesamiento, la automatización, la flexibilidad de la demanda y la coordinación de los recursos energéticos. En consecuencia, una de las principales contribuciones del capítulo consistió en establecer una interpretación tecnológica conjunta de estas dimensiones y relacionarlas con la gestión inteligente del consumo eléctrico y con aplicaciones sostenibles en edificios, viviendas, microredes, redes inteligentes y sistemas energéticos urbanos.

El estudio presentó limitaciones asociadas con el carácter documental de la revisión, debido a que los resultados dependieron de la disponibilidad, cobertura y alcance de las publicaciones indexadas en las fuentes consultadas. Asimismo, la diversidad de tecnologías, contextos de aplicación, arquitecturas y metodologías identificadas dificultó establecer

comparaciones directas entre determinadas soluciones. La investigación tampoco incorporó validaciones experimentales ni mediciones operativas propias de eficiencia energética, por lo que los resultados deben interpretarse como una integración y análisis comparativo de la evidencia documental disponible. No obstante, el corpus permitió identificar tendencias tecnológicas, relaciones funcionales, diferencias de aplicación y posibilidades de integración relevantes para comprender la evolución reciente de la eficiencia energética y la gestión inteligente del consumo eléctrico.

10.3. Propuesta de sistema modular inteligente para eficiencia energética y gestión optimizada del consumo eléctrico

La integración progresiva de tecnologías de medición, conectividad, analítica, automatización y gestión de la demanda ofrece nuevas posibilidades para mejorar la eficiencia energética y optimizar el consumo eléctrico. En correspondencia con las tendencias identificadas en el análisis documental, se propone un desarrollo tecnológico que articula estas capacidades dentro de una arquitectura modular, orientada a transformar la información energética en conocimiento operativo y acciones de gestión. La propuesta articula medición inteligente, conectividad, procesamiento de información, analítica de datos, predicción, optimización y respuesta de la demanda dentro de una arquitectura modular. Su formulación comprende el problema tecnológico, el fundamento del desarrollo, los componentes de la solución, los productos esperados, el nivel de madurez previsto, los ámbitos de aplicación, la estrategia de validación y su potencial de transferencia.

1. Título del desarrollo tecnológico

Sistema modular inteligente para eficiencia energética y gestión optimizada del consumo eléctrico mediante internet de las cosas, analítica de datos y respuesta de la demanda.

2. Problema o necesidad tecnológica

La creciente incorporación de cargas eléctricas, dispositivos conectados, generación distribuida, sistemas de almacenamiento y tecnologías automatizadas ha incrementado la necesidad de gestionar el consumo eléctrico de manera eficiente e inteligente. Esta transformación requiere herramientas capaces de caracterizar los patrones de demanda, identificar oportunidades de optimización y apoyar decisiones orientadas a una utilización más eficiente de la energía.

La revisión documental mostró que estas necesidades han sido abordadas mediante medición inteligente, internet de las cosas, sistemas inteligentes de gestión energética, automatización, inteligencia artificial, aprendizaje automático y mecanismos de respuesta de la demanda. Estas tecnologías permiten obtener información sobre el comportamiento energético, analizar perfiles de consumo, generar predicciones y establecer estrategias destinadas a modificar determinadas condiciones de utilización de la electricidad.

Sin embargo, las tecnologías identificadas en el corpus documental fueron abordadas frecuentemente mediante soluciones independientes centradas en funciones específicas de medición, análisis, predicción, automatización u optimización. Esta fragmentación permitió identificar una necesidad tecnológica relacionada con la integración de dichas capacidades dentro de una arquitectura modular específicamente orientada a la eficiencia

energética y la gestión inteligente del consumo eléctrico.

En respuesta a esta necesidad, se plantea una solución tecnológica destinada a integrar información energética, conectividad, procesamiento, analítica, predicción, optimización y mecanismos de gestión de la demanda. La propuesta se concibe como una plataforma complementaria a la infraestructura eléctrica existente, orientada a transformar los datos relacionados con el consumo en información técnica útil y acciones de gestión energética.

3. Fundamento del desarrollo

La evidencia documental mostró que la gestión energética ha evolucionado desde enfoques centrados predominantemente en la reducción del consumo hacia modelos sustentados en medición continua, análisis de información, automatización y flexibilidad de la demanda. Esta evolución amplió la función de los sistemas de gestión, debido a que el conocimiento del comportamiento energético puede utilizarse para identificar patrones, anticipar determinadas condiciones y apoyar decisiones de optimización.

La medición inteligente permite caracterizar temporalmente el consumo y reconocer diferentes perfiles de utilización de la electricidad. Paralelamente, el internet de las cosas facilita la conectividad entre medidores, sensores, cargas y plataformas de gestión, proporcionando una infraestructura para la adquisición y transmisión de información energética. La integración de ambas capacidades permite disponer de información con mayor continuidad temporal para analizar el comportamiento de las instalaciones.

La incorporación de inteligencia artificial y aprendizaje automático amplía las capacidades de análisis mediante la identificación de patrones,

la predicción de la demanda y el reconocimiento de condiciones de consumo. Estas herramientas permiten desarrollar estrategias de gestión sustentadas en información histórica y condiciones operativas, aunque su utilización deberá estar condicionada por la calidad de los datos disponibles y por la validación de los modelos empleados.

La respuesta de la demanda constituye otro componente relevante al permitir adaptar determinados consumos de acuerdo con las condiciones de operación, los horarios, la disponibilidad energética o criterios previamente establecidos. Su integración con sistemas inteligentes amplía las posibilidades de gestionar la demanda de manera flexible y de relacionar las decisiones sobre determinadas cargas con la información obtenida mediante los sistemas de medición y análisis.

Sobre esta base, el desarrollo tecnológico se fundamenta en la integración funcional de tecnologías identificadas en el corpus documental como complementarias para la eficiencia energética. La solución buscará articular la medición, la conectividad, el procesamiento, la analítica, la predicción, la optimización y la gestión de la demanda mediante una arquitectura modular capaz de adaptarse progresivamente a diferentes instalaciones y condiciones de utilización de la energía.

4. Objetivo general

Desarrollar y validar un sistema modular inteligente para mejorar la eficiencia energética y gestionar el consumo eléctrico mediante la integración de medición inteligente, internet de las cosas, analítica de datos, inteligencia artificial y respuesta de la demanda en condiciones controladas y representativas.

5. Descripción general de la solución propuesta

Se propone desarrollar un sistema tecnológico modular destinado a adquirir, procesar y analizar información relacionada con el consumo eléctrico para identificar oportunidades de eficiencia energética y apoyar la gestión inteligente de la demanda.

La solución podrá gestionar información relacionada con:

a) Consumo de energía eléctrica.

b) Potencia activa.

c) Potencia reactiva.

d) Tensión eléctrica.

e) Corriente eléctrica.

f) Frecuencia.

g) Demanda máxima.

h) Perfiles horarios de consumo.

i) Comportamiento temporal de las cargas.

j) Estado operativo de cargas seleccionadas.

k) Información procedente de medidores inteligentes.

l) Información procedente de sensores conectados mediante internet de las cosas.

m) Generación distribuida.

n) Almacenamiento energético.

o) Información histórica de consumo.

p) Patrones de demanda.

q) Indicadores de eficiencia energética.

r) Condiciones de utilización de la energía.

s) Información destinada a la predicción.

t) Información destinada a estrategias de respuesta de la demanda.

La solución estará estructurada en seis componentes principales.

Componente 1. Medición y adquisición energética.

Este componente permitirá obtener información procedente de medidores inteligentes, sensores y otros dispositivos de medición. Su función será proporcionar registros temporales sobre el consumo, la demanda y las variables eléctricas asociadas, que constituirán la base informacional para las etapas posteriores de procesamiento y análisis.

Componente 2. Conectividad e internet de las cosas.

Este componente permitirá conectar medidores, sensores, dispositivos y cargas seleccionadas con la plataforma de gestión. Su función consistirá en facilitar el intercambio organizado de información energética entre los diferentes elementos que integren la arquitectura tecnológica.

Componente 3. Procesamiento y gestión de información.

Este componente permitirá recibir, organizar, almacenar y procesar los registros obtenidos. La información procesada constituirá la base para caracterizar el comportamiento energético de la instalación, identificar tendencias y proporcionar los datos requeridos por los módulos de analítica, predicción y optimización.

Componente 4. Analítica y predicción energética.

Este componente permitirá identificar patrones de consumo, tendencias, variaciones y condiciones atípicas. Cuando la cantidad y calidad de la información disponible lo permitan, podrá incorporar técnicas de inteligencia artificial o aprendizaje automático para generar estimaciones relacionadas con el comportamiento futuro de la demanda. Los resultados deberán validarse de acuerdo con las características de los datos y las condiciones del entorno evaluado.

Componente 5. Optimización y respuesta de la demanda.

Este componente permitirá establecer estrategias para gestionar cargas seleccionadas según horarios, prioridades, condiciones de demanda y disponibilidad energética. Las estrategias podrán orientarse al desplazamiento temporal, la reducción o la coordinación de determinados consumos, siempre dentro de los parámetros operativos establecidos para la instalación y las condiciones definidas durante la validación.

Componente 6. Gestión inteligente y visualización energética.

Este componente permitirá presentar indicadores, tendencias, predicciones y resultados de las estrategias implementadas mediante interfaces digitales y reportes técnicos. Su finalidad será apoyar la toma de decisiones relacionadas con la eficiencia energética y la gestión del consumo, además de facilitar el seguimiento del comportamiento de las variables y de las acciones ejecutadas.

La integración de estos componentes permitirá desarrollar una secuencia funcional en la que la información energética sea adquirida y comunicada a la plataforma correspondiente para su

procesamiento y análisis. A partir de los resultados obtenidos podrán generarse predicciones, identificar oportunidades de optimización y establecer acciones de gestión sobre cargas seleccionadas.

Cuando las condiciones de infraestructura y disponibilidad de información lo permitan, podrá incorporarse una representación digital de la instalación o de activos seleccionados para complementar el análisis energético y facilitar la interpretación de su comportamiento operativo.

6. Novedad o diferenciación tecnológica

La diferenciación tecnológica de la propuesta no se fundamenta en el desarrollo individual de un medidor inteligente, un dispositivo conectado mediante internet de las cosas, un algoritmo de inteligencia artificial o un mecanismo de respuesta de la demanda, debido a que estos componentes cuentan con antecedentes tecnológicos documentados.

La propuesta busca integrar estas tecnologías dentro de una arquitectura modular específicamente orientada a la eficiencia energética y la gestión inteligente del consumo eléctrico. Su característica diferenciadora estará relacionada con la continuidad funcional entre la adquisición de información energética, el procesamiento y análisis del consumo, la predicción de la demanda, la optimización y la gestión de cargas.

Esta arquitectura permitirá establecer una conexión funcional entre la información energética y las acciones de gestión. El proceso partirá de la medición y comunicación de las variables, continuará con su procesamiento y análisis, incorporará funciones de predicción cuando las condiciones de los datos lo permitan y utilizará los resultados obtenidos para establecer estrategias de optimización y gestión de la demanda.

La integración propuesta permitirá superar un enfoque limitado exclusivamente al registro o la visualización del consumo, debido a que la información adquirida podrá utilizarse para identificar patrones, generar indicadores, anticipar determinadas condiciones y apoyar acciones de gestión energética.

La propuesta no presupone anticipadamente novedad jurídica, exclusividad ni superioridad tecnológica. Estas características deberán comprobarse mediante desarrollo experimental, comparación técnica, revisión de antecedentes tecnológicos, evaluación del desempeño y análisis de propiedad intelectual.

7. Productos tecnológicos esperados

El desarrollo podrá generar los siguientes productos tecnológicos:

a) Prototipo funcional del sistema modular.

b) Módulo de medición energética.

c) Módulo de integración de medidores inteligentes.

d) Módulo de integración de sensores mediante internet de las cosas.

e) Módulo de comunicación energética.

f) Módulo de procesamiento y almacenamiento de información.

g) Módulo de caracterización del consumo.

h) Módulo de analítica energética.

i) Módulo de predicción de la demanda.

j) Módulo de optimización energética.

k) Módulo de respuesta de la demanda.

l) Plataforma de gestión inteligente del consumo.

m) Panel digital de indicadores de eficiencia energética.

n) Sistema de generación de alertas energéticas.

o) Sistema de generación de reportes técnicos.

p) Procedimiento para la integración de dispositivos de medición e internet de las cosas.

q) Procedimiento para la caracterización de patrones de consumo.

r) Metodología para la gestión inteligente de la demanda.

s) Manual técnico de operación y mantenimiento.

Estos productos podrán desarrollarse progresivamente de acuerdo con las etapas de diseño, integración y validación de la solución. Su generación efectiva dependerá de los resultados experimentales obtenidos, la disponibilidad de infraestructura y el nivel de integración tecnológica alcanzado.

8. Nivel de madurez tecnológica

La meta inicial del desarrollo será alcanzar un nivel de madurez tecnológica TRL 5, siempre que el prototipo integrado pueda probarse y validarse satisfactoriamente en un entorno representativo de consumo eléctrico.

El TRL 5 no deberá considerarse alcanzado únicamente a partir de la evidencia bibliográfica del capítulo. La revisión permitió fundamentar la arquitectura propuesta e identificar sus principales componentes tecnológicos, pero no demostró

experimentalmente el funcionamiento integrado de la solución.

La trayectoria tecnológica prevista comprenderá las etapas de conceptualización, diseño, desarrollo, integración, pruebas funcionales, validación en condiciones representativas y optimización. Durante este proceso deberá comprobarse progresivamente la adquisición de información energética, la comunicación entre los componentes, el procesamiento de los datos, el análisis del consumo, la capacidad de predicción, las funciones de optimización y la gestión de cargas.

Una vez obtenida evidencia experimental suficiente y documentada, podrá determinarse el nivel de madurez tecnológica efectivamente alcanzado por la solución.

9. Ámbito de aplicación

La solución tendrá aplicación potencial en:

a) Edificios educativos.

b) Edificios institucionales.

c) Instalaciones comerciales.

d) Instalaciones industriales.

e) Viviendas inteligentes.

f) Sistemas eléctricos de baja y media tensión.

g) Microredes.

h) Instalaciones fotovoltaicas.

i) Sistemas con almacenamiento energético.

j) Laboratorios de sistemas eléctricos.

k) Centros de investigación.

l) Instituciones de formación tecnológica.

m) Instituciones universitarias.

Una aplicación particularmente pertinente corresponderá a instalaciones consumidoras que requieran caracterizar sus perfiles de demanda, identificar oportunidades de eficiencia energética y gestionar determinadas cargas mediante información obtenida de manera continua. La arquitectura modular permitirá adaptar progresivamente los componentes y las funciones del sistema a las características de cada instalación y a la infraestructura tecnológica disponible.

10. Estrategia de validación

La estrategia de validación estará orientada a demostrar que el sistema puede ejecutar de manera integrada las funciones de adquisición y comunicación de información energética, procesamiento de datos, análisis del consumo, predicción, optimización y gestión de la demanda. La evaluación deberá considerar tanto el funcionamiento individual de los componentes como su capacidad para operar de manera articulada dentro de la arquitectura propuesta.

Los escenarios de validación podrán desarrollarse inicialmente en condiciones controladas y, posteriormente, en un entorno representativo de consumo eléctrico. Las condiciones experimentales deberán permitir evaluar el comportamiento de la solución ante diferentes perfiles de demanda, configuraciones de cargas y disponibilidad de recursos energéticos.

La evaluación deberá considerar, según corresponda:

a) Adquisición de información energética.

b) Integración de medidores.

c) Integración de sensores.

d) Conectividad mediante internet de las cosas.

e) Estabilidad de la comunicación.

f) Procesamiento de datos.

g) Almacenamiento de información.

h) Caracterización de perfiles de consumo.

i) Identificación de patrones de demanda.

j) Generación de predicciones.

k) Identificación de condiciones atípicas.

l) Generación de indicadores energéticos.

m) Funcionamiento de las estrategias de optimización.

n) Gestión de cargas seleccionadas.

o) Respuesta de la demanda.

p) Visualización de información.

q) Generación de alertas.

r) Generación de reportes técnicos.

s) Integración funcional de los componentes.

t) Consistencia de la información procesada.

La validación deberá diferenciar entre la funcionalidad tecnológica de la solución, la mejora de la eficiencia energética y los posibles resultados económicos derivados de su aplicación. El correcto funcionamiento de los componentes no deberá interpretarse automáticamente como

evidencia de reducción del consumo o de ahorro económico. Cualquier disminución del consumo eléctrico, mejora cuantificable de la eficiencia, ahorro energético o beneficio económico deberá establecerse únicamente cuando haya sido demostrado mediante evidencia experimental obtenida bajo condiciones apropiadas y criterios de comparación previamente definidos.

Los resultados de la validación permitirán determinar el grado de cumplimiento de las funciones previstas, identificar limitaciones técnicas y establecer los ajustes necesarios para mejorar la integración y el desempeño del sistema. De esta manera, podrá determinarse la funcionalidad de la solución en condiciones controladas y representativas sin asumir anticipadamente su desempeño en instalaciones reales de mayor escala.

11. Potencial de transferencia

La transferencia tecnológica podrá comprender:

a) Prototipo funcional.

b) Plataforma de gestión energética.

c) Módulo de medición inteligente.

d) Módulo de integración mediante internet de las cosas.

e) Módulo de procesamiento de datos.

f) Módulo de analítica energética.

g) Módulo de predicción de la demanda.

h) Módulo de optimización energética.

i) Módulo de respuesta de la demanda.

j) Procedimientos de integración tecnológica.

k) Metodología de gestión inteligente del consumo.

l) Documentación técnica especializada.

m) Manual de operación y mantenimiento.

n) Capacitación especializada.

o) Asistencia técnica para la implementación.

p) Servicio de diagnóstico energético digital.

q) Servicio de integración de sistemas de medición e internet de las cosas.

r) Servicio de gestión inteligente del consumo.

s) Licenciamiento de componentes tecnológicos susceptibles de protección.

La solución podrá transferirse progresivamente a instituciones educativas, edificios institucionales, establecimientos comerciales, instalaciones industriales, empresas eléctricas, universidades y centros de investigación. La modalidad y el alcance de la transferencia deberán adecuarse al nivel de madurez tecnológica efectivamente alcanzado, las características de las cargas, la infraestructura disponible y la evidencia obtenida durante las etapas de desarrollo, integración y validación.

La transferencia también podrá realizarse de manera modular, permitiendo implementar determinados componentes de acuerdo con las necesidades y capacidades tecnológicas de cada entorno. Esta característica facilitará que las funciones de medición, analítica, predicción, optimización o gestión de la demanda puedan incorporarse progresivamente sin requerir necesariamente la implementación simultánea de todos los componentes de la arquitectura.

La propuesta articula dentro de una misma arquitectura tecnológica la medición inteligente, la conectividad, el procesamiento de información, la analítica de datos, la predicción, la optimización y la respuesta de la demanda. Su carácter modular permitirá desarrollar y validar progresivamente cada componente antes de establecer su integración funcional completa, lo que facilitará identificar limitaciones, ajustar parámetros y determinar las condiciones necesarias para su aplicación en diferentes contextos.

El desarrollo propuesto responde a las tendencias identificadas en la revisión documental y, particularmente, a la evolución hacia sistemas energéticos con mayores capacidades de digitalización, automatización, análisis y flexibilidad. No obstante, la propuesta diferencia entre las posibilidades tecnológicas sustentadas por la literatura y el desempeño que deberá demostrarse experimentalmente. En consecuencia, su funcionalidad, contribución efectiva a la eficiencia energética, nivel de madurez y posibilidades de transferencia deberán establecerse mediante evidencia obtenida durante las etapas de desarrollo, integración y validación.

Desde esta perspectiva, el sistema modular constituye una propuesta de integración tecnológica orientada a transformar la información sobre el consumo eléctrico en conocimiento operativo y acciones de gestión energética. Su desarrollo permitirá evaluar la viabilidad de articular tecnologías actualmente utilizadas con diferentes grados de independencia dentro de una estructura funcional común, con posibilidades de aplicación progresiva en edificios, viviendas, instalaciones comerciales e industriales, microredes y entornos académicos y experimentales.

Referencias

Akkara, S., & Selvakumar, I. (2023). Review on optimization techniques used for smart grid. *Measurement: Sensors, 30*, 100918. https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100918

Allwyn, R. G., Al-Hinai, A., & Margaret, V. (2023). A comprehensive review on energy management strategy of microgrids. *Energy Reports, 9*, 5565–5591. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.360

Athanasiadis, C. L., Papadopoulos, T. A., Kryonidis, G. C., & Doukas, D. I. (2024). A review of distribution network applications based on smart meter data analytics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 191*, 114151. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114151

Cespedes, C. A. S., & Jradi, M. (2024). A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage. *Energy Informatics, 7*, Article 11. https://doi.org/10.1186/s42162-024-00313-7

De Oliveira, C. G., & Pimenta, H. C. D. (2023). Electric energy management in buildings based on the Internet of Things: A systematic review. *Energies, 16*(15), 5753. https://doi.org/10.3390/en16155753

Ethirajan, V., & Mangaiyarkarasi, S. P. (2025). An in-depth survey of latest progress in smart grids: Paving the way for a sustainable future through renewable energy resources. *Journal of Electrical Systems and Information Technology, 12*, Article 9. https://doi.org/10.1186/s43067-025-00195-z

Himeur, Y., Elnour, M., Fadli, F., Meskin, N., Petri, I., Rezgui, Y., Bensaali, F., & Amira, A. (2023). AI-big data analytics for building automation and management systems: A survey, actual challenges and future perspectives. *Artificial Intelligence Review, 56*, 4929–5021. https://doi.org/10.1007/s10462-022-10286-2

Huotari, M., Främling, K., & Malhi, A. (2024). Machine learning applications for smart building energy utilization: A survey. ***Archives of Computational Methods in Engineering, 31***, 2537–2556. https://doi.org/10.1007/s11831-023-10054-7

Mahmood, M., Chowdhury, P., Yeassin, R., Hasan, M., Ahmad, T., & Chowdhury, N. U. R. (2024). Impacts of digitalization on smart grids, renewable energy, and demand response: An updated review of current applications. ***Energy Conversion and Management: X, 24***, 100790. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100790

Mischos, S., Dalagdi, E., & Vrakas, D. (2023). Intelligent energy management systems: A review. ***Artificial Intelligence Review, 56***, 11635–11674. https://doi.org/10.1007/s10462-023-10441-3

Mousa, H. H. H., Mahmoud, K., & Lehtonen, M. (2024). Recent developments of demand-side management towards flexible DER-rich power systems: A systematic review. ***IET Generation, Transmission & Distribution, 18***(13), 2259–2300. https://doi.org/10.1049/gtd2.13204

Qiang, G., Tang, S., Hao, J., Di Sarno, L., Wu, G., & Ren, S. (2023). Building automation systems for energy and comfort management in green buildings: A critical review and future directions. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews, 179***, 113301. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113301

Rajaperumal, T. A., & Columbus, C. C. (2025). Transforming the electrical grid: The role of AI in advancing smart, sustainable, and secure energy systems. ***Energy Informatics, 8***, Article 51. https://doi.org/10.1186/s42162-024-00461-w

Rehman, U. ur, Faria, P., Gomes, L., & Vale, Z. (2025). Future of energy management models in smart homes: A systematic literature review of research trends, gaps, and future directions. ***Process Integration and Optimization for Sustainability, 9***, 1169–1198. https://doi.org/10.1007/s41660-025-00506-x

Singh, A. R., Raju, D. K., Raghav, L. P., & Kumar, R. S. (2023). State-of-the-art review on energy management and control of networked microgrids. ***Sustainable Energy Technologies and Assessments, 57***, 103248. https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103248

Toderean, L., Cioara, T., Anghel, I., Sarmas, E., Michalakopoulos, V., & Marinakis, V. (2025). Demand response optimization for smart grid integrated buildings: Review of technology enablers landscape and innovation challenges. ***Energy and Buildings, 326***, 115067. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115067

Zheng, Z., Shafique, M., Luo, X., & Wang, S. (2024). A systematic review towards integrative energy management of smart grids and urban energy systems. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews, 189***, 114023. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114023



✨ Conocimiento que transforma sociedades✨



Los sistemas eléctricos se encuentran inmersos en una transformación tecnológica que está redefiniendo la manera de generar, distribuir, supervisar, proteger y utilizar la energía. La expansión de las fuentes renovables, la generación distribuida, el almacenamiento energético, las microredes y los dispositivos conectados converge con el desarrollo de sensores, automatización, comunicaciones digitales, analítica de datos e inteligencia artificial, configurando infraestructuras con nuevas capacidades de observación, coordinación y gestión. En este escenario, la presente obra ofrece una visión integral que articula los principios esenciales de la ingeniería eléctrica con los avances que están determinando la evolución del sector. Sus contenidos recorren los fundamentos necesarios para comprender los fenómenos y componentes eléctricos y avanzan hacia el estudio de las redes modernas, los sistemas de protección, la calidad de la energía, la digitalización, la supervisión, la automatización y la eficiencia energética. Sustentado en literatura científica reciente, el libro examina la evolución de la detección de fallas, la coordinación de protecciones, el diagnóstico de perturbaciones, la observación de redes, la integración de recursos energéticos distribuidos y la gestión inteligente del consumo. A este análisis se incorporan propuestas de desarrollo tecnológico que articulan los conocimientos examinados en arquitecturas susceptibles de posteriores procesos de diseño, implementación y validación. Dirigida a estudiantes, docentes, investigadores y profesionales, la obra trasciende la explicación convencional del funcionamiento de los sistemas eléctricos para ofrecer una comprensión de su evolución y de los desafíos que acompañan su creciente complejidad. En sus páginas, conocimiento técnico, evidencia científica e innovación convergen para interpretar una realidad energética cada vez más distribuida, digitalizada y dinámica, en la que el desafío no consiste únicamente en disponer de electricidad, sino en desarrollar las capacidades necesarias para supervisarla, protegerla, gestionarla y aprovecharla de manera eficiente, segura y sostenible.

SOPHIA EDITIONS

ISBN: 978-1-968794-65-1

9 781968 794651 >