

Estudio del uso y contribución de la inteligencia artificial para la operación en redes eléctricas

Study of the use and contribution of artificial intelligence to the operation in electric power grids

Luis Ferney Ortiz-Torres ^{1a}, Eduardo Gómez-Luna ^{1b}, Eduardo Marlés-Sáenz ^{1c}

¹ Grupo de Investigación de Alta Tensión (GRALTA), Escuela de Ingenierías Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Colombia. Orcid: 0000-0003-0440-2675 ^a, 0000-0003-2263-6758 ^b, 0000-0001-8792-4190 ^c. Correos electrónicos: ortiz.luis@correounivalle.edu.co ^a, eduardo.gomez@correounivalle.edu.co ^b, eduardo.marles@correounivalle.edu.co ^c

Recibido: 15 julio, 2023. Aceptado: 23 marzo, 2024. Versión final: 3 abril, 2024.

Resumen

Este estudio tiene como objetivo mostrar el panorama actual de la operación de las redes eléctricas con la influencia de la inteligencia artificial (IA), la cual a través de sus técnicas y algoritmos que la respaldan, ha venido dando aportes significativos. Se abarcó una amplia literatura, logrando mostrar la perspectiva de sus bondades, y su aporte de forma general, destacando sus diferentes usos y contribuciones para el cumplimiento en la operación de las redes eléctricas. El estudio muestra características y usos de la IA en la operación del sistema de distribución eléctrica. Asocia las técnicas que más se han destacado para contribuir en la operación de las redes de distribución eléctrica, generando valor de grandes cantidades de datos. Se destacan los procesos necesarios para la implementación de la IA en las redes eléctricas comprendiendo elementos físicos, humanos y virtuales. Las ventajas que proyecta la IA abarcan la eficiencia, comodidad y confiabilidad; entre sus desventajas se identificaron la falta de: hardware, software, política regulatoria, seguridad, escasa actualización de tecnologías y capacitación humana. Se encontró que la IA en las redes eléctricas requiere de la digitalización para poder habilitar todos sus beneficios y generando una mayor resiliencia en estas. Finalmente, se concluyó que la IA es una herramienta clave para la operación presente y futura de las redes eléctricas, donde se recomienda la incorporación de tecnologías, hardware, software, políticas regulatorias y capacitación humana, para dar el paso hacia un progreso óptimo y descentralizado.

Palabras clave: aprendizaje automático; datos; inteligencia artificial; red eléctrica; técnicas; tecnología.

Abstract

The objective of this study is to show the current panorama of the operation of electrical grids with the influence of artificial intelligence (AI), which through its techniques and algorithms that support it, has been making significant contributions. A wide literature was covered, managing to show the perspective of its benefits, and its contribution in general, highlighting its different uses and contributions for compliance in the operation of power grids. The study shows characteristics and uses of AI in power distribution system operation. It associates the techniques that have been most highlighted to contribute to the operation of electrical distribution networks, generating value from large amounts

of data. It highlights the necessary processes for the implementation of AI in electric grids comprising physical, human and virtual elements. The advantages projected by AI include efficiency, comfort and reliability, and among its disadvantages were identified the lack of: hardware, software, regulatory policy, security, scarce updating of technologies and human training. It was found that AI in power grids requires digitalization in order to enable all its benefits and generate greater resilience in these. Finally, it was concluded that AI is a key tool for the present and future operation of electric grids, where the incorporation of technologies, hardware, software, regulatory policies and human training is recommended, in order to take the step towards a more optimal and decentralized progress.

Keywords: machine learning; data; artificial intelligence; power grid; techniques; technology.

1. Introducción

Se ha evidenciado que la operación de las redes eléctricas se ha transformado en una labor compleja, dado el aumento de las interconexiones eléctricas con el pasar del tiempo, trayendo consigo un mayor aumento en los datos que esta provee en sus diferentes etapas y, a su vez, haciendo que las herramientas clásicas y la experiencia del personal no sean suficientes para atender las tareas requeridas en relación con la predicción y programación independiente de las redes eléctricas.

Dada el auge que ha tenido la Inteligencia Artificial (IA) en la operación de las redes eléctricas, en donde su introducción ha implicado el desarrollo de diferentes tecnologías, tanto de dispositivos como algoritmos, permitió dar lugar para el desarrollo del presente estudio, siendo el de describir el uso y la contribución de la IA para estas. La recopilación de diferentes referencias bibliográficas a nivel mundial, las cuales corresponden desde el año 2012 hasta el 2024, permitió hacer un compendio de información que dio el aporte para su desarrollo.

Con el fin de cumplir con el objetivo propuesto, el estudio se organizó como se describe a continuación: en la sección II se describen las características de la IA en la operación de las redes eléctricas. En la sección III se indican los usos de la generación, transmisión, distribución y comercialización en la operación de las redes eléctricas. En la sección IV se dan a conocer las técnicas y procesos requeridos para implementar la IA en la operación del sistema de distribución.

En la sección V se evidencian las ventajas y desventajas de implementar la IA en las redes eléctricas. En la sección VI se hace referencia a las tecnologías requeridas para que la IA pueda incursionar en las redes eléctricas.

Finalmente, en la sección VII se dan a conocer las conclusiones del estudio.

2. Características de la inteligencia artificial en la operación de las redes eléctricas

La IA ofrece una oportunidad para que las empresas del sector energético incursionen acelerando acciones de

control y predicción que ayuden a solventar de manera eficiente la demanda de energía. A continuación, se presentan las siguientes características de la IA en la operación de las redes eléctricas.

2.1. Análisis de los datos

El potencial de la IA ha tenido grandes usos, en donde se ha evidenciado como el tener datos aplicables, y poder sacar provecho de estos, ha generado destacables beneficios en el sector de la energía eléctrica [1], [2], [3], [4], [5], [6]. La capacidad de IA se puede utilizar para obtener una visión coherente de los datos en todas las organizaciones y casos de uso. Desde 2005, la cantidad de datos almacenados globalmente se duplicó a 33 zettabytes (10^{21} bytes) en 2018, y se prevé que aumente a 175 zettabytes para el 2025 [7], [8], [9].

2.2. Mayor capacidad computacional y robótica inteligente

La evolución de los enfoques de IA y la creciente demanda en recopilación de datos requiere una capacidad cada vez mayor para realizar cálculos, y aumentar el poder de cómputo para realizar entrenamientos [10]. La robótica inteligente se está usando para mejorar aún más la eficiencia y la inteligencia de los robots asociados con las áreas que permiten diseñar, desarrollar y producir energía [11].

2.3. Detección y defensa contra ciberataques

La prevención de ciberataques en las redes eléctricas se ha convertido en un área de gran relevancia actualmente. La adopción de modelos de IA resulta útil para detectar un ataque cibernético, con la ayuda del estudio de datos falsos, permitiendo que estos datos ayuden a despejar la amenaza antes de que genere una afectación agravante en el sistema eléctrico [12], [13].

2.4. Mejoramiento y optimización de los recursos renovables

La red convencional está cambiando al integrar una gran cantidad de energías renovables y el uso de nuevos

modelos de control de IA [14], [15]. Esta puede mitigar este tipo de desafíos y hacer que la energía renovable sea un actor igualitario en el suministro de energía del país. La IA utilizada con la incorporación de baterías inteligentes que se combinan con plataformas de administración de energía solar y equipos para la carga de vehículos eléctricos [16], [17].

2.5. Optimización del rendimiento energético

La generación de energía está sujeta a la cantidad disponible de los activos para la producción. Con el objetivo de aumentar el retorno de la inversión, las empresas de servicios públicos han utilizado rápidamente técnicas de optimización y modelos de IA para mejorar la eficiencia de generación de energía con ajustes en tiempo real [18], [19].

2.6. Eficiencia y estabilidad

Se puede concebir una red inteligente, como una combinación de diferentes tipos de fuentes de energía e infraestructura de Internet de las Cosas (IoT) [20], donde la IA se caracteriza porque puede analizar altas proporciones de datos que pueden brindar eficiencia y estabilidad a estas nuevas fuentes de información [21], [22], [23], [24].

3. Usos de la inteligencia artificial en la operación de las redes eléctricas

3.1. El uso de la inteligencia artificial en la generación de la energía eléctrica

El uso de la IA, alcanzado en esta etapa, incluye la optimización del rendimiento operativo a través de análisis, optimización de parques eólicos mediante la previsión de la velocidad del viento, generación distribuida flexible, integración de microgeneración, inspecciones de equipos con drones, producción de generación conectada a la red en tiempo real, gestión activa de la demanda, optimización autónoma de generación, optimización de generación renovable, entre otras [25], [26], [27], [28], [29].

Por ejemplo, Di Santo et al. [21], [30], explicó cómo se puede optimizar y utilizar la gestión activa del lado de la demanda (ADSM) de una red inteligente para los hogares equipados con paneles fotovoltaicos en Brasil. Estos autores utilizaron una red neuronal artificial (ANN) autorregresiva no lineal con entradas exógenas (NARX) para predecir la mejor potencia de la batería en cualquier momento, lo que permitió que el sistema optimizara el almacenamiento de la batería y limitara la pérdida de energía fotovoltaica.

3.2. El uso de la inteligencia artificial en la transmisión de la energía eléctrica

Los modelos de IA se utilizan para medir óptimamente el flujo de energía y la capacidad en la red de transmisión eléctrica, como también para la fiabilidad del sistema. La IA ha tenido un uso popular en el control de la frecuencia y la tensión para la estabilidad del sistema eléctrico, el control y dimensionamiento de los dispositivos del sistema de transmisión de corriente alterna flexible (FACT) [31].

En Kanchan- jha et al. [32] se han propuesto varios dispositivos DFACTS en asociación con diferentes algoritmos convencionales, adaptativos y basados en IA para mitigar los desafíos en nodos PQ asociados con una red débil para mejorar los niveles de penetración de la energía solar fotovoltaica.

3.3. El uso de la inteligencia artificial en la distribución de la energía eléctrica

Las tareas de detección y estimación de daños son, respectivamente, procesos de clasificación y regresión basados en imágenes del sistema. La Figura 1 muestra la arquitectura de una unidad inteligente de estimación y detección de daños para postes de distribución de energía, donde las unidades clasificadoras y estimadoras de daños con Redes Neuronales Convolucionales (CNN) basadas en clasificación y regresión entrenadas en una cantidad suficiente de imágenes de postes de distribución en diversas condiciones [33], [34].

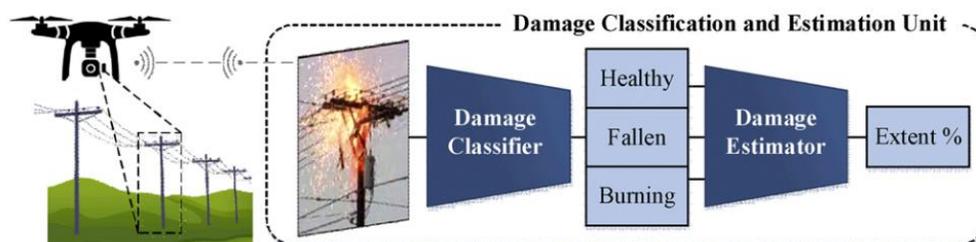


Figura 1. Detección de daños en postes distribución. Fuente: [33]

En la **Tabla 1** se resumen el uso y aplicación de la IA en la operación del sistema de distribución eléctrica.

Tabla 1. Resumen de las estadísticas del uso de aplicaciones de IA en la operación del sistema de distribución eléctrica

Aplicación	Usando estadísticas
Modelado y Análisis de Operaciones de Distribución	28.25%
Infrarrojos prospectivos	7.03%
Estimación de estados	17.69%
Análisis de calidad de energía	4.87%
Estabilizador de sistemas de energía	0.75%
Despacho económico	2.99%
Control de tensión y potencia reactiva	17.25%
Coordinación de acciones de emergencia	7.29%
Coordinación de las acciones de restauración	13.87%

* Se puede ver que el campo del despacho económico y los estabilizadores de sistemas de potencia no ha sido investigado extensamente en los últimos años.

Fuente:[35].

3.4. El uso de la inteligencia artificial en la comercialización de la energía eléctrica

En la actualidad se viene evidenciando como grandes consumidores industriales y comerciales generan su energía y luego la devuelven a una empresa de servicios públicos o a una central eléctrica cercana. También está el caso de que algunos consumidores generan su energía renovable y devuelven el exceso de energía a la red [36], [37].

El amplio abanico de usos con IA sobre el comercio de la energía está relacionado con gestores automatizados, la inteligencia de mercado, el comercio algorítmico, las transacciones, el enrutamiento inteligente, localización de fraudes, supervisión de las operaciones, y evaluación de coberturas y riesgos, sumado a la optimización de los recursos y su análisis [38], [39].

En la **Figura 2**, se da a conocer una de las aplicaciones en la comercialización, como lo es la detección de robo de energía con el uso de IA. Se visualiza una estructura de red propuesta mediante modelos de IA que incluye varios tipos de edificios, como los gubernamentales, mercados, casas, centros comerciales y centros de negocios. La zona del barrio conecta los medidores inteligentes (SM) de los edificios y el centro de control local.

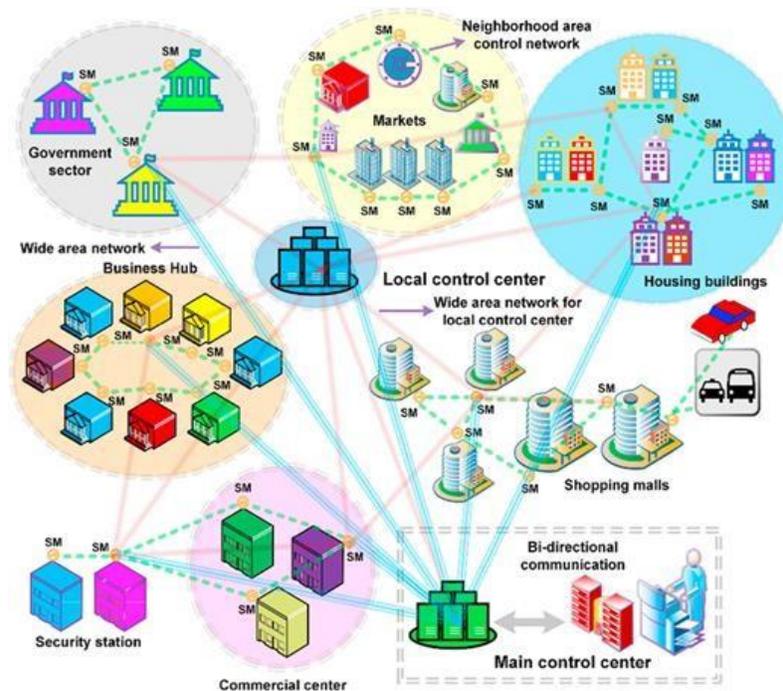


Figura 2. Estructura de red de IA para la detección de robo de energía. Fuente: [43].

El centro de control local supervisa una pequeña área de la red y desempeña un papel de puente entre los medidores inteligentes y el centro de control principal. El centro de control principal supervisa el comportamiento de la carga de los clientes a nivel de ciudad o distrito [41], [42].

4. Técnicas y procesos requeridas para implementar la IA en la operación del sistema de distribución eléctrica

4.1. Técnicas de IA

La operación y gestión de las redes eléctricas son procesos de toma de decisiones complejos, por ser aún más desafiantes si se tiene en cuenta el aumento de la introducción de recursos de energía renovable, que están agregando más variabilidad e incertidumbre en la operación de las redes eléctricas [26], [35], [40].

En este sentido, se describen las técnicas de IA con mayor relevancia en el sistema de distribución eléctrica en la Figura 3, los cuales pueden contribuir a operar, mantener y planificar los sistemas de distribución eléctricos, al tratar y extraer valor de grandes volúmenes de datos, ocupándose de su variedad y velocidad, a través de cálculos mucho más rápidos [44].

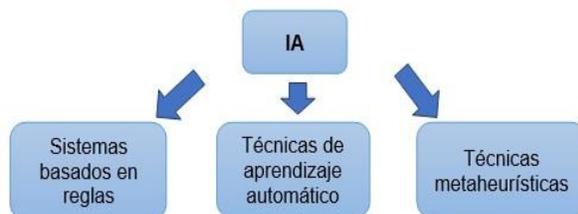


Figura 3. Categorías de la IA. Fuente: [35], [40].

4.1.1. Técnicas de aprendizaje automático

El aprendizaje automático conocido como Machine Learning (ML) está dividido en tres subgrupos: aprendizaje supervisado, no supervisado y de refuerzo [35], [45], [46], [47], ver la Figura 4.

En [48] se presenta un Sistema de Monitoreo (MS) para medir las variables eléctricas y ambientales para producir datos instantáneos e históricos, que permitan estimar parámetros relacionados con la eficiencia de una planta fotovoltaica. Además, usando el mismo MS, proponen un modelo lineal recursivo para detectar fallas en el sistema, mientras usan la irradiancia y la temperatura en el panel fotovoltaico como señales de entrada y potencia como salida.

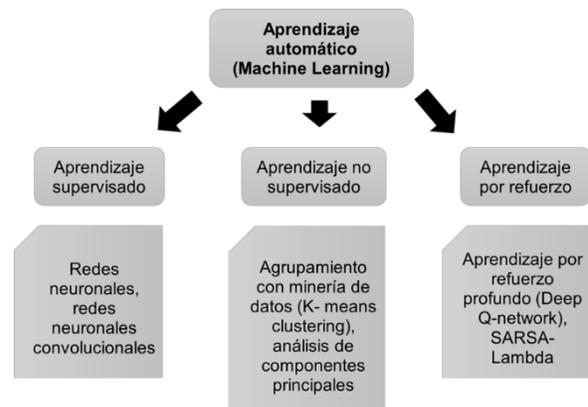


Figura 4. Categorías de aprendizaje automático. Fuente: [35].

La precisión de la detección de fallas para una planta de energía de 5 kW utilizada en la prueba es del 93,09%, considerando 16 días y alrededor de 143 horas de fallas en diferentes condiciones. Una vez que este modelo detecta una falla, un método basado en el aprendizaje automático clasifica cada falla en los siguientes casos: cortocircuito, circuito abierto, sombreado parcial y degradación. Utilizando los mismos días y fallas aplicados en el módulo de detección, la precisión de la etapa de clasificación es del 95,44% para un modelo de Red Neuronal Artificial (ANN). Al combinar la detección y la clasificación, la precisión general es del 92,64 %.

En [49] presentan una antena inteligente inalámbrica de quinta generación (5G) para realizar tanto la comunicación de la subestación de energía (dirección del haz en el dominio espacial) como la detección de descargas electrostáticas (impulso "UHF" de frecuencia ultra alta en el dominio del tiempo). La misma antena inteligente que se utiliza para comunicarse con otras antenas inalámbricas en el patio de conexiones, así como con la sala de control, se utiliza para recopilar cíclicamente datos de aparatos eléctricos, barras colectoras e interruptores donde pueden ocurrir descargas electrostáticas (ESD).

La misma antena inteligente en la que se diseña la rotación del haz en el dominio del espacio mediante la implementación de una red neuronal artificial (ANN) también se entrena en el dominio del tiempo para identificar cualquiera de las señales recibidas que coincidan con los pulsos de descarga electrostática de banda de frecuencia ultra alta que pueden ser superpuesta a la corriente eléctrica a frecuencia industrial.

4.1.2. Técnicas metaheurísticas

Las técnicas metaheurísticas especifican un grupo de algoritmos que se pueden dividir en dos subgrupos: los basados en la trayectoria y los basados en la población, también llamados inteligencia de enjambre [35], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], especificado en la Figura 5.

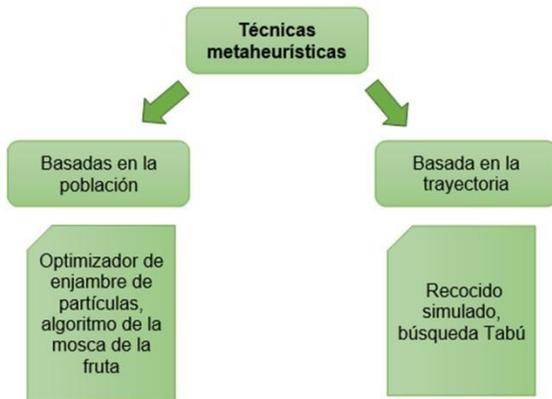


Figura 5. Categorías de las técnicas metaheurísticas.

Fuente: [26], [35].

Se presenta en [60] un algoritmo eficiente para la reconfiguración de alimentadores de distribución de objetivos múltiples basado en el enfoque de optimización de apareamiento de abejas melíferas modificadas (MHBMO). El objetivo principal de la reconfiguración del alimentador de distribución (DFR) es minimizar la pérdida de potencia real, desviación del voltaje de los nodos. Debido al hecho de que los objetivos son diferentes y no conmensurables, es difícil resolver el problema mediante enfoques convencionales que pueden optimizar un solo objetivo.

También se evidenció como en Liang et al. [61] proponen un algoritmo mejorado de optimización de la mosca de la fruta para resolver el problema del despacho económico. Para ello se implementan múltiples modificaciones como funciones de penalización para la integración de las restricciones de operación del sistema. Para probar, los sistemas IEEE de 6, 40 y 10 buses se utilizan para ejecutar múltiples pruebas. Mientras que las dos primeras redes permanecen estáticas y la última dinámica en su comportamiento de carga y generación.

4.1.3. Sistemas basados en reglas

Los sistemas basados en reglas son un grupo de técnicas de IA que permiten la integración directa del conocimiento humano [35], [62], [63], [64], [65], [66],

[67], [68], [69], [70]. En la Figura 6, se especifica la actuación del sistema basado en reglas en las redes eléctricas.

Se destaca en Blazakis et al. [71] donde se proponen un sistema de inferencia difuso neuro adaptativo (ANFIS) para la detección de pérdidas no técnicas, como el consumo ilegal de energía eléctrica, por ejemplo, la manipulación de medidores o la manipulación de la red. El sistema ANFIS es la combinación de una ANN que utiliza retropropagación con un sistema de inferencia difuso sugeno que consta de cinco capas. La primera es una capa difusa, seguida de una capa de producto que combina los resultados de la primera capa.

Luego, para la tercera capa, todos los valores se normalizan seguidos de una capa de desfuzzificación antes de que todos los nodos se agreguen en la capa de salida. Como escenarios de prueba se identifican tres casos base, siendo hurto parcial, cuando el consumo es constantemente menor, sobrecarga, cuando el consumo es constantemente mayor y hurto periódico, consumo reducido en horas específicas del día.



Figura 6. Categorías de métodos basados en reglas.

Fuente: [35].

Al variar el porcentaje del consumo total, se crean trece escenarios diferentes. El conjunto de datos utilizado en este estudio contiene 5000 datos de hogares de Irlanda recopilados durante 6 meses en una resolución de 30 minutos. Como entrada para el ANFIS, la media, la mediana, el factor de carga y la entropía se seleccionaron de un rango de características posibles utilizando el análisis de componentes de vecindad.

4.2. Procesos requeridos para implementar la IA en la operación de los sistemas de distribución eléctrica

La transición que se requiere para implementar la IA en las redes eléctricas lleva consigo una serie de procesos requeridos para implementar la IA en el sistema de

distribución, los cuales contemplan requerimientos técnicos, requisitos regulares, roles y responsabilidad [72], [73], [74], [75]. A continuación, se hace un desglose de estos.

4.2.1. Infraestructura y Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC)

Es un proceso importante en donde se han empezado a identificar las empresas de servicios públicos que se han visto obligadas a fortalecer su infraestructura de TIC [76], [77].

4.2.2. Recopilación de datos y gobernanza

En esta etapa parte de la disponibilidad y el acceso a conjuntos de datos de alta calidad son requerimientos clave para habilitar las técnicas de IA [24].

4.2.3. Integración y uso compartido de datos

Luego de tener enfoques acordados, la interoperabilidad de los conjuntos de datos y las soluciones basadas en datos es esencial para garantizar una amplia adopción dentro y entre las aplicaciones, por ejemplo, el intercambio de datos entre los Operadores de Sistemas de Distribución (DSO) y los Operadores del Sistema de Transmisión (TSO) de manera justa y transparente [78], [79], [80].

4.2.4. Procesamiento de datos, análisis y modelos de negocio

Se aplican al sector energético técnicas actualizadas de análisis de datos en Minería de datos (DM), ML, análisis estadístico, gestión de datos y visualización de datos. Los desarrollos continuos y recientemente más frecuentes han llevado a tecnologías avanzadas que facilitan significativamente el uso de IA, no solo en aplicaciones energéticas [81].

4.2.5. Seguridad, privacidad y cuestiones legales

La trascendencia en los avances que se han venido desarrollando por la incorporación de nuevos elementos tecnológicos en el sistema eléctrico, resaltando elementos de la ciberseguridad, la cual es una preocupación fundamental por el creciente número de incidentes en los últimos tiempos. Además, se debe garantizar la privacidad y seguridad para proteger al cliente y los riesgos y posibles impactos en la seguridad del suministro. En la Unión Europea (UE), una de las legislaciones clave en este sentido es la Directiva sobre seguridad de Redes y Sistemas de Información [82]. A su vez, en países como China y EE. UU., ya se han

introducido leyes y políticas de ciberseguridad [83], [84], [85].

4.2.6. Profesionales y habilidades

No menos importante para que se complete el cierre del proceso, es poder contar con empleados capacitados y educados en la operación de los sistemas de distribución que puedan usar tecnologías de IA y aprovechar la experiencia en datos. Esto se puede lograr inscribiendo a expertos de otros sectores más maduros, como finanzas o marketing o proporcionando a los estudiantes de nivel de maestría una sólida formación en técnicas específicas de IA [86].

5. Técnicas y procesos requeridas para implementar la IA en el DSO

Véase [Tabla 2](#).

Tabla 2. IA en el DSO

Ventajas	Desventajas
Gestión del periodo de vida de los activos	Problemas de seguridad en la infraestructura de la red.
Optimización e integración de la red	Falta de inyección de capital.
Tecnologías para el ahorro de energía	Inseguridad cibernética
Materiales y dispositivos energéticos	Falta de experiencia financiera, capital y financiación
Eficiencia energética y las nanotecnologías	Poco conocimiento y capacitación sobre la IA.
Almacenamiento de energía	Falta de poder de cómputo
Personalización de los servicios	Déficit de confianza en los procesos de la IA
Servicios integrados para los usuarios	Fluctuaciones con energías renovables

Fuente: elaboración propia.

6. Tecnologías necesarias para implementar la inteligencia artificial en las redes eléctricas

Para describir la incorporación de los elementos tecnológicos requeridos para implementar la IA en las redes eléctrica, se muestra en la [Figura 7](#) una arquitectura compuesta por cinco capas [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93], [94], [95], [96].

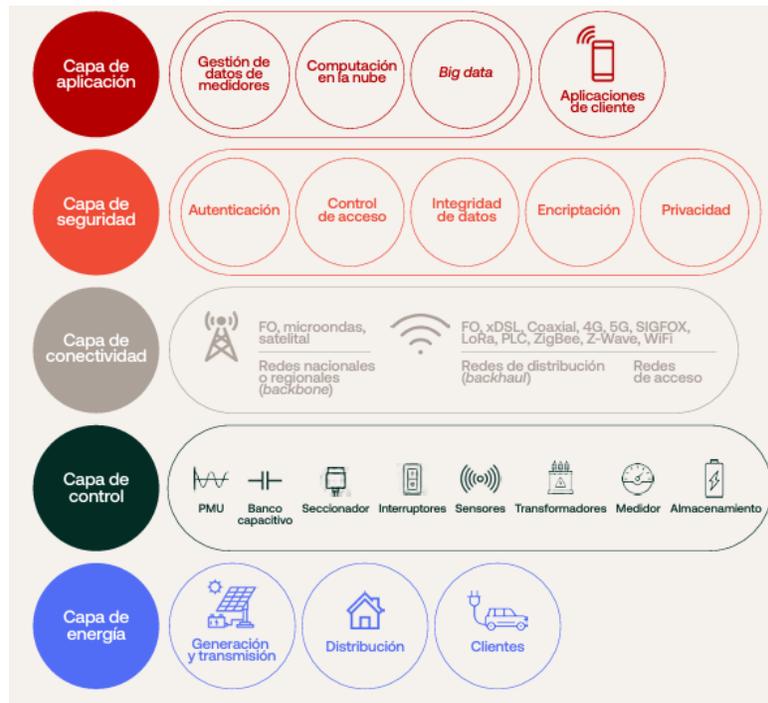


Figura 7. Esquemas y tecnologías digitales aplicados a infraestructuras y activos del sector de la energía eléctrica.

Fuente: [97].

Implementar la IA en el sector energético involucra en esencia elementos de la capa de energía, capa de control y, en menor medida, elementos de la capa de conectividad [98], [99], [100], [101], [102].

Para involucrar la IA en los procesos que tiene asociado las redes eléctricas requiere de una serie de componentes, entre estos están sensores y equipos para monitorear y controlar, los cuales obtienen altas proporciones de datos y requieren el empleo de equipos de cómputo (hardware) que faciliten almacenar y procesar la información recopilada por medio de aplicaciones [103], [104], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116].

En la Figura 8, se muestra como se ha consolidado la información presentada con el aporte de más de 100 artículos revisados a nivel mundial, evidenciando como las herramientas de inteligencia artificial pueden hacer de la operación de las redes eléctricas, algo más eficiente y confiable, dando las pautas para la consolidación de las redes eléctricas futuras [116]. Se visualiza que la interacción de la inteligencia artificial permitirá una mayor descentralización y autonomía, frente a diferentes anomalías que se presentan en el día a día sobre estas, aportando a su rápida identificación y ayudando en las tareas de los agentes encargados de la red eléctrica, para el cumplimiento de su demanda.

7. Conclusiones

Las herramientas especializadas basadas en la inteligencia artificial se hacen cada vez más importantes para la toma de decisiones, en la operación de las redes eléctricas, la cual consiste en poder contar con una información aplicable, extraída de los datos tomados de las interacciones de los elementos o subsistemas de las diferentes organizaciones, para una adecuada toma de decisiones por parte del DSO.

La utilización de las técnicas de inteligencia artificial y las mejoras en la capacidad de procesamiento de los datos recopilados a través de los IoT permitirán al DSO y comercializadores, impulsar la gestión, control de la oferta y la demanda con las energías renovables teniendo en cuenta su dependencia de la variabilidad meteorológica, esto hace que la operación del sistema a nivel de DSO sea más flexible para la entrada de nuevos mercados.

Existe una necesidad en relación con la formación y capacitación del personal técnico, ya que al consolidarse el potencial profesional competente permitir avanzar rápidamente en la implementación y utilización de tecnologías de IA en los sectores energéticos.

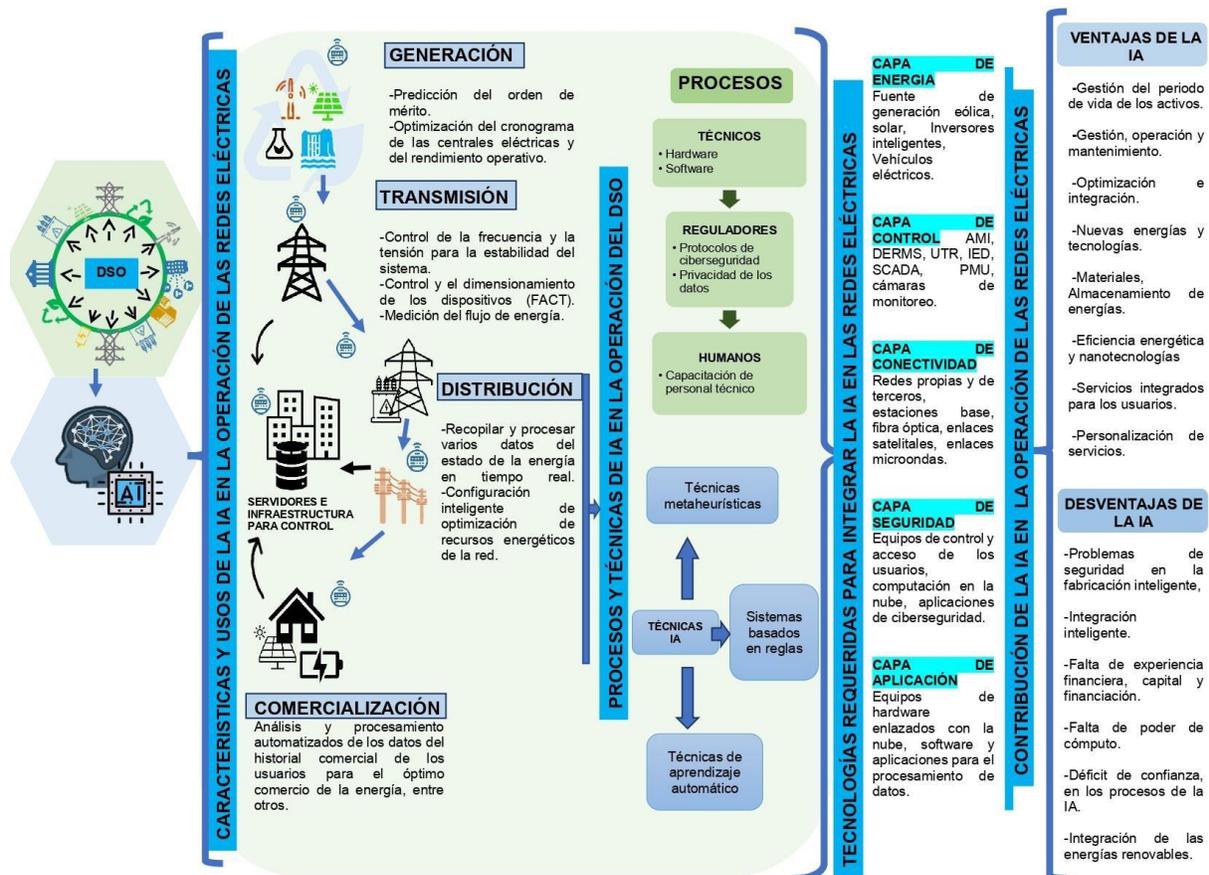


Figura 8. Resumen del uso y contribución de la IA en la operación de las redes eléctricas. Fuente: elaboración propia.

Existen algunos requerimientos necesarios para el adecuado desarrollo de las tecnologías de la IA en las redes eléctricas, como son: el desarrollo de las TIC, la conectividad móvil y el desarrollo de la banda ancha, con el fin de incorporar nuevos equipos y dispositivos, para evidenciar las mejoras en la red.

Se pudo concluir que se requiere investigación adicional para aprovechar todas las ventajas de la IA en términos de: reducción de costos a través de la mejora de la eficiencia del sistema de energía, la supervisión y el control distribuido, entre otros. Pero también, sobre la estructura de caja negra de la mayoría de los enfoques de IA, que no permite verificar si el sistema desarrollado se está comportando según lo previsto en todas las situaciones, siendo un tema que requiere mayor exploración en las redes eléctricas.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo y colaboración del grupo de investigación GRALTA de la Universidad del Valle, por los comentarios y sugerencias realizadas al trabajo realizado.

Financiación

No aplica.

Contribución de los autores

L. F. Ortiz-Torres: Conceptualización, Metodología, Investigación, Escritura-revisión y edición. E. Gómez-Luna: Conceptualización, Metodología, Investigación, Visualización, Supervisión. E. Marlés-Sáenz: Conceptualización, Metodología, Investigación, Visualización, Supervisión.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] S. Das, T. K. Choudhury, S. K. Mohapatra, “Data analytics to increase efficiency of the AI based energy consumption predictor”, *2020 International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSE)*, 2020, pp. 1-4, doi: <https://doi.org/10.1109/CISPSSE49931.2020.9212200>
- [2] A. Ameyoud, R. Touileb, M. Boudour, “Interest of Power System Data Analysis with Renewable Energy Sources”, *2019 Algerian Large Electrical Network Conference (CAGRE)*, 2019, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/CAGRE.2019.8713310>
- [3] L. Lugnani, M. R. A. Paternina, D. Dotta, J. H. Chow, Y. Liu, “Power System Coherency Detection From Wide-Area Measurements by Typicality-Based Data Analysis”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, n.º 1, pp. 388-401, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3088261>
- [4] D. Feng, T. Wang, C. Liu, S. Su, “Extracting Log Patterns Based on Association Analysis for Power Quality Disturbance Detection”, *2017 14th Web Information Systems and Applications Conference (WISA)*, 2017, pp. 80-83, doi: <https://doi.org/10.1109/WISA.2017.15>
- [5] S. Mitra, B. Chakraborty, P. Mitra, “Smart meter data analytics applications for secure, reliable and robust grid system: Survey and future directions”, *Energy*, vol. 289, p. 129920, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129920>
- [6] D. Osorio-Vásquez, S. Pérez-Londoño, J. Mora-Flórez, “New data-based load modeling for active distribution networks”, *Revista UIS Ingenierías*, vol. 22, n.º 4, pp. 93-102, 2023, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n4>
- [7] A. Woodie, “Global DataSphere to Hit 175 Zettabytes by 2025, IDC Says”. [En línea]. Disponible en: <https://www.datanami.com/2018/11/27/globaldatasphere-to-hit-175-zettabytes-by-2025-idc-says/>
- [8] J. Taylor, “Inteligencia artificial e Internet de la energía (IoE)”, *SparkCognition*, 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.ourenergypolicy.org/wpcontent/uploads/2017/08/SparkCognition_Artificial_Intelligence_and_the_Internet_of_Energy_IoE_.pdf
- [9] A. Rhodes, “Digitalisation of Energy An Energy Futures Lab Briefing Paper”, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://imperial.ac.uk/energy-futures-lab>
- [10] D. Amodei, D. Hernandez, “AI and Compute”, OPENAI. [En línea]. Disponible en: <https://openai.com/blog/ai-and-compute/>
- [11] L. Hu, Y. Miao, G. Wu, M. M. Hassan, I. Humar, “iRobot-Factory: An intelligent robot factory based on cognitive manufacturing and edge computing”, *Future Generation Computer Systems*, vol. 90, pp. 569-577, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.08.006>
- [12] F. Li, Y. Shi, A. Shinde, J. Ye, W. Song, “Enhanced Cyber-Physical Security in Internet of Things Through Energy Auditing”, *IEEE Internet Things J*, vol. 6, n.º 3, pp. 5224-5231, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2899492>
- [13] A. Sahu, V. Venkatraman, R. Macwan, “Reinforcement Learning Environment for CyberResilient Power Distribution System”, *IEEE Access*, vol. 11, pp. 127216-127228, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3282182>
- [14] M. Marzband, F. Azarnejadian, M. Savaghebi, E. Poursmaeil, J. M. Guerrero, G. Lightbody, “Smart transactive energy framework in grid-connected multiple home microgrids under independent and coalition operations”, *Renew Energy*, vol. 126, pp. 95-106, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.021>
- [15] M. Qin, W. Hu, X. Qi, T. Chang, “Do the benefits outweigh the disadvantages? Exploring the role of artificial intelligence in renewable energy”, *Energy Econ*, vol. 131, p. 107403, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107403>

- [16] N. Shaukat *et al.*, “A survey on consumers empowerment, communication technologies, and renewable generation penetration within Smart Grid”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81. pp. 1453-1475, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.208>
- [17] X. Zhang, K. Khan, X. Shao, C. Oprean-Stan, Q. Zhang, “The rising role of artificial intelligence in renewable energy development in China”, *Energy Econ*, vol. 132, p. 107489, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107489>
- [18] General Electric, “Digital Wind Operations Optimization from GE Renewable Energy”, 2017.
- [19] K. Nandi, B. Chatterjee, S. Dalai, “Classification of Power Quality Disturbances using Artificial Intelligence: A Review”, *2023 IEEE 3rd Applied Signal Processing Conference (ASPCON)*, 2023, pp. 171-175. doi: <https://doi.org/10.1109/ASPCON59071.2023.10395948>
- [20] C.M. Medina, J.C. Blandón A., C.M. Zapata, J. I. Ríos, “IoT Best Practices and their Components: A Systematic Literature Review”, *EEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 20, n.º 10, 2022.
- [21] K. G. di Santo, S. G. di Santo, R. M. Monaro, y M. A. Saidel, “Active demand side management for households in smart grids using optimization and artificial intelligence”, *Measurement (Lond)*, vol. 115, pp. 152-161, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.010>
- [22] Y. Yang, Q. Guo, Z. He, H. Gao, “Artificial Intelligence Based Fault Diagnosis and Analysis in the Distribution Network”, en *2023 Panda Forum on Power and Energy (PandaFPE)*, 2023, pp. 1771-1775, doi: <https://doi.org/10.1109/PandaFPE57779.2023.10140738>
- [23] M. Zakizadeh y M. Zand, “Transforming the Energy Sector: Unleashing the Potential of AI-Driven Energy Intelligence, Energy Business Intelligence, and Energy Management System for Enhanced Efficiency and Sustainability”, en *2024 20th CSI International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP)*, 2024, pp. 1-7, doi: <https://doi.org/10.1109/AISP61396.2024.10475298>
- [24] U. Lubo-Matallana, A. Marquez-Martínez, “DERs-Load Flow Convergence Sensitivity Analysis Using Topological Reconfiguration”, *Revista UIS Ingenierías*, vol. 23, no. 1, 2024, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v23n1-2024001>
- [25] T. Ahmad *et al.*, “Energetics Systems and artificial intelligence: Applications of industry 4.0”, *Energy Reports*, vol. 8. pp. 334-361, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.256>
- [26] B. Makala, T. Bakovic, “Artificial Intelligence in the Power Sector”, *Int Financ Corp*, 2020.
- [27] W. Luan, J. Peng, M. Maras, J. Lo, B. Harapnuk, “Smart Meter Data Analytics for Distribution Network Connectivity Verification”, *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 6, n.º 4, pp. 1964 - 1971, 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2421304>
- [28] IEA, “Smart Grids”, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/smart-grids>
- [29] F. Dkhichi, B. Oukarfi, “Intelligent control in photovoltaic systems by neural network”, *2015 Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, 2015, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/ISACV.2015.7106181>
- [30] P. Delanoë, D. Tchente, G. Colin, “Method and evaluations of the effective gain of artificial intelligence models for reducing CO2 emissions”, *J Environ Manage*, vol. 331, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117261>
- [31] T. S. Sidhu, Z. Ao, “On-line evaluation of capacity and energy losses in power transmission systems by using artificial neural networks”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, no. 4, doi: <https://doi.org/10.1109/61.473363>
- [32] K. Jha, A. G. Shaik, “A comprehensive review of power quality mitigation in the scenario of solar PV integration into utility grid”, *Electronics and Energy*, vol. 3, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2022.100103>
- [33] M. M. Hosseini y M. Parvania, “Artificial intelligence for resilience enhancement of power distribution systems”, *Electricity Journal*, vol. 34, no. 1, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106880>

- [34] R. Franco-Manrique, E. Gómez-Luna, C. A. Ramos-Sánchez, “Smart grid analysis and management in Colombia towards ETAP Real Time solution”, *Revista chilena de ingeniería*, 2017.
- [35] S. Stock, D. Babazadeh, y C. Becker, “Applications of artificial intelligence in distribution power system operation”, *IEEE Access*, vol. 9, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3125102>
- [36] A. Paudel, K. Chaudhari, C. Long, H. B. Gooi, “Peer-to-Peer Energy Trading in a Prosumer-Based Community Microgrid: A Game-Theoretic Model”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 8, pp. 6087-6097, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2874578>
- [37] W. Shi, X. Han, X. Wang, S. Gu, Y. Hao, “Application of Artificial Intelligence and Its Interpretability Analysis in Power Grid Dispatch and Control”, en *2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/ACPEE56931.2023.10135998>
- [38] C. Zhang *et al.*, “A multifunctional ternary Cu (II) carboxylate coordination polymeric nanocomplex for cancer thermochemotherapy”, *Int J Pharm*, vol. 549, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.06.048>
- [39] M. A. Khan, A. M. Saleh, M. Waseem, I. A. Sajjad, “Artificial Intelligence Enabled Demand Response: Prospects and Challenges in Smart Grid Environment”, *IEEE Access*, vol. 11, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3231444>
- [40] H. Quan, A. Khosravi, D. Yang, D. Srinivasan, “A Survey of Computational Intelligence Techniques for Wind Power Uncertainty Quantification in Smart Grids”, *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, vol. 31, no. 11, pp. 4582-4599, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2019.2956195>
- [41] V. Sámano-Ortega *et al.*, “Electrical energy consumption monitoring system in the residential sector using IoT”, *IEEE LAT AM T*, vol. 21, no. 1, pp. 158–166, Oct. 2022.
- [42] T. Ahmad, H. Chen, “Short and medium-term forecasting of cooling and heating load demand in building environment with data-mining based approaches”, *Energy Build*, vol. 166, pp. 460-476, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.066>
- [43] T. Ahmad *et al.*, “Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities”, *J Clean Prod*, vol. 289, p. 125834, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125834>
- [44] K. Zhou, C. Fu, S. Yang, “Big data driven smart energy management: From big data to big insights”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 215-225, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.050>
- [45] C. Li, “Deep Reinforcement Learning”, *Reinforcement Learning for Cyber-Physical Systems*, pp. 125-154, 2019, doi: <https://doi.org/10.1201/9781351006620-6>
- [46] S. Zhao, F. Blaabjerg, H. Wang, “An Overview of Artificial Intelligence Applications for Power Electronics”, *IEEE Trans Power Electron*, vol. 36, n.º 4, pp. 4633 - 4658, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3024914>
- [47] D. P. Kingma, J. L. Ba, “Adam: A method for stochastic optimization”, *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015 - Conference Track Proceedings*, pp. 1-15, 2015.
- [48] A. E. Lazzaretti *et al.*, “A monitoring system for online fault detection and classification in photovoltaic plants”, *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, pp. 1-30, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20174688>
- [49] L. M. Singkang *et al.*, “Model based-testing of spatial and time domain artificial intelligence smart antenna for ultra-high frequency electric discharge detection in digital power substations”, *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 99, pp. 91-101, 2021, doi: <https://doi.org/10.2528/pierm20090301>.
- [50] L. Abualigah, A. Diabat, “Advances in Sine Cosine Algorithm: A comprehensive survey,” vol. 54, *Artif Intell Rev*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09909-3>
- [51] S. S. Mohar, S. Goyal, R. Kaur, “Fruit Fly Optimization Algorithm for Intelligent IoT Applications”, *Fog, Edge, and Pervasive Computing in Intelligent IoT Driven Applications*, pp. 287-309, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/9781119670087.ch16>
- [52] T. Nurcahyadi, C. Blum, “Adding negative learning to ant colony optimization: A comprehensive study”, *Mathematics*, vol. 9, no. 4, pp. 1-23, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/math9040361>

- [53] S. Katoch, S. S. Chauhan, V. Kumar, “A review on genetic algorithm: past, present, and future,” *Multimedia Tools and Applications*, vol. 80, no. 5, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>
- [54] V. Yadav, A. K. Yadav, M. Kaur, D. Singh, “Trigonometric mutation and successful-parent-selection based adaptive asynchronous differential evolution”, *J. Ambient Intell Humaniz Comput*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03269-8>
- [55] J. K. Pattanaik, M. Basu, D. P. Dash, “Optimal power flow with FACTS devices using artificial immune systems”, *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Technological Advancements in Power and Energy: Exploring Energy Solutions for an Intelligent Power Grid, TAP Energy 2017*, pp. 1-6, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/TAPENERGY.2017.8397213>
- [56] R. Toorajipour, V. Sohrabpour, A. Nazarpour, P. Oghazi, M. Fischl, “Artificial intelligence in supply chain management: A systematic literature review”, *J Bus Res*, vol. 122, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.09.009>
- [57] EK Burke y G. Kendall, *Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques*. Springer: New York, 2014.
- [58] W. Deng, R. Yao, H. Zhao, X. Yang, G. Li, “A novel intelligent diagnosis method using optimal LSSVM with improved PSO algorithm”, *Soft comput*, vol. 23, n.º 7, pp. 2445-2462, 2019.
- [59] B. Naama, H. Bouzeboudja, A. Allali, “Application of Tabu Search and Genetic Algorithm in Minimize Losses in Power System. Using the BCoefficient Method”, *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 687693, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.079>
- [60] J. Olamaei, T. Niknam, S. B. Arefi, “Distribution feeder reconfiguration for loss minimization based on modified honey bee mating optimization algorithm”, *Energy Procedia*, 2012, pp. 304-311. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.934>
- [61] W. Hou, J. Li, J. Xu, K. Y. Lee, Y. Huang, “Visual-detection based fruit fly optimization algorithm for robust analysis of integrated energy systems”, en *IFAC-PapersOnLine*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.801>
- [62] K. R. Chowdhary, *Fundamentals of artificial intelligence*. Springer, 2020.
- [63] L. Caponetti, *Fuzzy Logic for image processing A gentle introduction Using Java*. Springer, 2017.
- [64] L. Yin, S. Luo, Y. Wang, F. Gao, J. Yu, “Coordinated complex-valued encoding dragonfly algorithm and artificial emotional reinforcement learning for coordinated secondary voltage control and automatic voltage regulation in multi-generator power systems”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 180520-180533, 2020.
- [65] M. Zhou, Y. Wang, A. K. Srivastava, Y. Wu, P. Banerjee, “Ensemble-based algorithm for synchrophasor data anomaly detection”, *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2979-2988, 2018.
- [66] I. Srivastava, S. Bhat, V. S. G. Thadikemalla, A. R. Singh, “A hybrid machine learning and meta-heuristic algorithm based service restoration scheme for radial power distribution system”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 6, p. e12894, 2021.
- [67] H. B. Guliyev, “Reactive power adaptive control system in networks with distributed generation based on fuzzy set theory”, *2019 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, IEEE, 2019, pp. 1-5.
- [68] C. Hotz, C. Becker, “Online monitoring of power system small signal stability using artificial neural networks”, *NEIS 2019; Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems*, VDE, 2019, pp. 1-6.
- [69] L. Chao, Z. Lei, L. Yuhang, “Topology checking method for low voltage distribution network based on fuzzy C-means clustering algorithm”, *2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)*, IEEE, 2020, pp. 10771080.
- [70] X. Wang, Y. Wang, D. Shi, J. Wang, Z. Wang, “Two-stage WECC composite load modeling: A double deep Q-learning networks approach”, *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 11, no. 5, pp. 4331-4344, 2020.

- [71] K. v. Blazakis, T. N. Kapetanakis, y G. S. Stavrakakis, “Effective electricity theft detection in power distribution grids using an adaptive neuro fuzzy inference system”, *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 12, , 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/en13123110>
- [72] K. Andresen, *Design and Use Patterns of Adaptability in Enterprise Systems*, vol. 5. GITO mbH Verlag, 2006.
- [73] N. Hatziaargyriou *et al.*, “Definition and classification of power system stability–revisited & extended”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 4, pp. 3271-3281, 2020.
- [74] S. Möws, V. Scheffer, C. Becker, “Probabilistic power forecast of renewable distributed generation for provision of control reserve using vine copulas”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 25, pp. 6312-6318, 2020.
- [75] R. Monaco, C. Bergaentzlé, J. A. Leiva Vilaplana, E. Ackom, P. S. Nielsen, “Digitalization of power distribution grids: Barrier analysis, ranking and policy recommendations”, *Energy Policy*, vol. 188, p. 114083, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114083>
- [76] K. Zhou, C. Fu, S. Yang, “Big data driven smart energy management: From big data to big insights”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 215-225, 2016.
- [77] European Smart Grids Task Force, “Interoperability, Standards and Functionalities applied in the large scale roll out of smart metering”. 2015.
- [78] L. P. Ciminelli, “Electricity Without Borders”, *Vital Speeches Day*, vol. 70, n.º 11, p. 344, 2004.
- [79] S. Paul, A. Poudyal, S. Poudel, A. Dubey, Z. Wang, “Resilience assessment and planning in power distribution systems: Past and future considerations”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, p. 113991, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113991>
- [80] R. A. Moise y A. Fratu, “Artificial Intelligence in Power Distribution Systems”, en *Smart Mobile Communication & Artificial Intelligence*, M. E. Auer y T. Tsiatsos, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 151-159.
- [81] M. Chui *et al.*, “Notes from the AI frontier: Applications and value of deep learning”, *McKinsey global institute discussion paper*, April, 2018.
- [82] E. Parliament, “Directive (EU) 2016/1148 of the European Parliament and of the Council of 6 July 2016 concerning measures for a high common level of security of network and information systems across the Union”, *Official Journal of the European Union*, Office for Official Publications of the European Union Luxembourg, 2016.
- [83] OEA, “Un abordaje integral de la Ciberseguridad”, 2019.
- [84] David Ramírez Morán, “Ciberseguridad en China”, 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.rsaconference.com/writable/presentations/file_upload/law-w04
- [85] Victor Meza Jimenez y Ernesto Perez, “The Role of Artificial Intelligence in Latin America’s Energy Transition”, *2404 IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, 2022.
- [86] International Renewable Energy Agency, “Artificial Intelligence and Big Data: Innovation Landscape Brief”, *Irena*, p. 24, 2019.
- [87] M. A. Ahmed, “Design and Development of Audio Processing and Speech Recognition Algorithm”, en *2021 Seventh International Conference on Aerospace Science and Engineering (ICASE)*, 2021, pp. 1-7, doi: <https://doi.org/10.1109/ICASE54940.2021.9904277>
- [88] A. Yarali, “Wireless Sensors/IoT and Artificial Intelligence for Smart Grid and Smart Home”, en *Intelligent Connectivity: AI, IoT, and 5G IEEE*, 2022, pp. 239 - 249, doi: <https://doi.org/10.1002/9781119685265.ch13>
- [89] N. Amurova, S. Abdullaeva, Y. Borisova, I. Narzullayev, I. Siddikov, “Development of Current Converters in the Power Supply Control and Management System Using Renewable Energy Sources Through Artificial Intelligence in the Sphere of Telecommunications”, *2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT)*, 2021, pp. 1-5, doi: <https://doi.org/10.1109/ICISCT52966.2021.9670128>

- [90] Z. Li, M. Shahidehpour, F. Aminifar, “Cybersecurity in Distributed Power Systems”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, n.º 7, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2687865>
- [91] Y. Wang, “Towards Energy-Efficient Systems for Artificial Intelligence in the Future”, *2020 IEEE 19th International Conference on Cognitive Informatics & Cognitive Computing (ICCI*CC)*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ICCICC50026.2020.9450224>
- [92] S. Kokin, N. Djagarov, U. Bumtsend, J. Ahyoev, S. Dmitriev, M. Safaraliev, “Optimization of electric power system modes by methods of artificial intelligence”, *2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/EPE51172.2020.9269195>
- [93] Y. Shu-jun, S. Xiao-yan, W. Yan, Y. Yu-xin, Y. Zhi, “Research on dynamic characteristics of Unified Power Flow Controller (UPFC)”, *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/DRPT.2011.5993940>
- [94] F. Heymann, H. Quest, T. Lopez Garcia, C. Ballif, M. Galus, “Reviewing 40 years of artificial intelligence applied to power systems – A taxonomic perspective”, *Energy and AI*, vol. 15, p. 100322, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100322>
- [95] Banco Interamericano de Desarrollo, “Tecnologías de Inteligencia Artificial (AI) en el Mantenimiento de Activos del Sector Eléctrico”, 2023.
- [96] “Anexo 1-Guía práctica para incorporar la digitalización en los proyectos del sector de la energía eléctrica”.
- [97] P. M. Attia *et al.*, “Closed-loop optimization of fast-charging protocols for batteries with machine learning”, *Nature*, vol. 578, n.º 7795, pp. 397-402, 2020, doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-1994-5>
- [98] U. S. DOE, “DOE global energy storage database”, [En línea]. Disponible en: <https://gesdb.sandia.gov/>
- [99] J. Li, B. Pradhan, S. Gaur, J. Thomas, “Predictions and Strategies Learned from Machine Learning to Develop High-Performing Perovskite Solar Cells”, *Advanced Energy Materials*, 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201901891>
- [100] E.E Gaona, T. Morales Vega, C.L Trujillo, F. Santamaría, “Esquemas de transmisión de datos en una Microrred a través de una Infraestructura de medición avanzada”, *Revista UIS Ingenierías*, vol. 15, no. 2, pp. 8592, ene. 2017, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v15n2-2016007>
- [101] F. Gutiérrez, F. Almenares, L. Calderón, E. Romero, “Prospectiva de seguridad de las redes de sensores inalámbricos”, *Revista UIS Ingenierías*, vol. 20, n.º 3, 2021, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021014>
- [102] J. M. Grothoff, “Battery storage for renewables: market status and technology outlook”, *International Renewable Energy Agency (IRENA)*, Abu Dhabi, 2015.
- [103] M. Andoni *et al.*, “Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 100, pp. 143-174, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>
- [104] K. D. Thoben, S. A. Wiesner, T. Wuest, ““Industrie 4.0” and smart manufacturing-a review of research issues and application examples”, *International Journal of Automation Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 416, 2017, doi: <https://doi.org/10.20965/ijat.2017.p0004>
- [105] S. Phuyal, D. Bista, y R. Bista, “Challenges, Opportunities and Future Directions of Smart Manufacturing: A State of Art Review”, *Sustainable Futures*, vol. 2, p. 100023, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2020.100023>
- [106] Y. Guo *et al.*, “Deep learning-based fault diagnosis of variable refrigerant flow air-conditioning system for building energy saving”, *Appl Energy*, vol. 225, pp. 732-745, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.075>
- [107] Y. Guo *et al.*, “An expert rule-based fault diagnosis strategy for variable refrigerant flow air conditioning systems”, *Appl Therm Eng*, vol. 149, pp. 1223-1235, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.132>
- [108] A. C. Şerban, M. D. Lytras, “Artificial Intelligence for Smart Renewable Energy Sector in Europe—Smart Energy Infrastructures for Next Generation Smart Cities”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 77364 - 77377, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990123>

[109] A. Ashfaq, M. Kamran, F. Rehman, N. Sarfaraz, H. U. Ilyas, H. H. Riaz, “Role of Artificial Intelligence in Renewable Energy and its Scope in Future”, *2022 5th International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE)*, 2022, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/ICECE54634.2022.9758957>

[110] A. de Paola, G. L. Re, M. Morana, M. Ortolani, “SmartBuildings: an Aml system for energy efficiency”, *2015 Sustainable Internet and ICT for Sustainability (SustainIT)*, 2015, pp. 1-7, doi: <https://doi.org/10.1109/SustainIT.2015.7101372>

[111] B. A. Wokoma, E. N. Osegi, “A Resonant Fault Current Limiting Prediction Technique based on Auditory Machine Intelligence”, en *2019 2nd International Conference of the IEEE Nigeria Computer Chapter (NigeriaComputConf)*, 2019, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/NigeriaComputConf45974.2019.8949653>

[112] M. J. B. Reddy, D. v Rajesh, P. Gopakumar, D. K. Mohanta, “Smart Fault Location for Smart Grid Operation Using RTUs and Computational Intelligence Techniques”, *IEEE Syst J*, vol. 8, n.º 4, 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2014.2303833>

[113] L. Fernando Rueda-Vásquez, J. Guillermo Barrero-Pérez, C. Duarte, “El conmutador inteligente de potencia y la sub-medición por circuito como herramientas para la gestión energética residencial”, *Revista UIS Ingenierías*, vol. 16, núm. 1, pp. 35-46, 2017.

[114] J. M. Sánchez, M. P. González, M. P. Sánchez, “La Sociedad de la Información: Génesis, Iniciativas, Concepto y su Relación con Las TIC”, *Revista UIS Ingenierías*, vol. 11, 2012.

[115] D. I. Cruz, “Guía específica de trabajo sobre: "Por qué la transición energética necesita a la inteligencia artificial?" Fundación San Patricio, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.programainvestiga.org/pdf/guias2023-2024/GuiaintroductorialaitemaPorquelatransicionenergeticaneceitaalainteligenciaartificial.pdf>