REVISIÓN DE ESTRATEGIAS BASADAS EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y MACHINE LEARNING PARA EL CONTROL DE LA OPERACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

CRISTIAN CAMILO CARRILLO TARAZONA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2020

REVISIÓN DE ESTRATEGIAS BASADAS EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y MACHINE LEARNING PARA EL CONTROL DE LA OPERACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

CRISTIAN CAMILO CARRILLO TARAZONA

Trabajo de grado para optar título de ESPECIALISTA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Director:
JUAN MANUEL REY LOPEZ
Doctor en ingeniería electrónica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2020

DEDICATORIA

A Dios por las bendiciones recibidas y guiar mis pasos.

A mis padres y hermana por su amor incondicional y apoyo brindado en cada etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por la oportunidad de pertenecer a la institución y la formación brindada en este ciclo académico.

Al profesor Juan Manuel Rey López por la asistencia brindada durante la dirección de este proyecto.

CONTENIDO

pág.

INTRODUCCIÓN 15

1 OBJETIVOS 17
1.1 OBJETIVO GENERAL 17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 17

2 INTRODUCCIÓN A LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y MACHINE LEARNING 18

3 INTELIGENCIA ARTIFICIAL AL SERVICIO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. REVISIÓN LITERARIA 23
3.1 MODELOS DE MANTENIMIENTO Y TOMA DE DECISIONES EN LA RED ELÉCTRICA 23
3.2 MODELO PARA LA DETECCIÓN, IDENTIFICACIÓN Y UBICACIÓN DE FALLAS ELÉCTRICAS 25
3.3 GESTIÓN EFICIENTE DE MICRO REDES ELÉCTRICAS 25
3.4 PRONÓSTICO DE ENERGÍAS RENOVABLES 27
3.5 GESTIÓN EFICIENTE DE MOVILIDAD ELÉCTRICA 28
3.6 CONSUMO EFICIENTE DE ENERGÍA A NIVEL RESIDENCIAL 31
3.7 DIAGNÓSTICO DE ERRORES EN MEDIDORES DE ENERGÍA 31
3.8 ROBO Y PÉRDIDAS TÉCNICAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA 32
3.9 SEGURIDAD CIBERNÉTICA DE LA RED ELÉCTRICA INTELIGENTE 33
3.10 ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN 34
3.11 MONITOREO Y VALORACIÓN DE ESTADO DEL SISTEMA ELÉCTRICO 35
3.12 DETECCIÓN INTELIGENTE DE PROBLEMAS ELÉCTRICOS BASADO EN INSPECCIONES TERMOGRÁFICAS 35

3.13 PRONÓSTICO DE FALLAS Y PROTECCIÓN DINÁMICA CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS 36
3.14 RESTAURACIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA 37
3.15 ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN 38
3.16 DISEÑO DE DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ALTERNATIVOS.....38
3.17 PREDICCIÓN DEL PRECIO DE VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA 39

4 CLASIFICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y MACHINE LEARNING IMPLEMENTADAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS 41
4.1 MANTENIMIENTO Y TOMA DE DECISIONES EN LA RED ELÉCTRICA.....41
4.2 ESTRATEGIAS DE DETECCIÓN, IDENTIFICACIÓN Y UBICACIÓN DE FALLAS EN LA RED ELÉCTRICA.....42
4.3 ESTRATEGIAS DE GESTIÓN DE MICRO REDES ELÉCTRICAS 42
4.4 ESTRATEGIAS PARA PRONÓSTICO DE ENERGÍAS RENOVABLES.....43
4.5 ESTRATEGIAS PARA GESTIÓN EFICIENTE DE MOVILIDAD ELÉCTRICA.....45
4.6 ESTRATEGIAS PARA CONSUMO EFICIENTE DE ENERGÍA A NIVEL RESIDENCIAL.....49
4.7 ESTRATEGIAS PARA DIAGNÓSTICO DE ERRORES EN MEDIDORES DE ENERGÍA 50
4.8 ESTRATEGIAS PARA DETECCIÓN DE ROBO Y PÉRDIDAS TÉCNICAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....50
4.9 ESTRATEGIAS DE SEGURIDAD CIBERNÉTICA EN LA RED ELÉCTRICA INTELIGENTE 51

4.10 ESTRATEGIAS DE ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN 52
4.11 ESTRATEGIAS DE MONITOREO Y VALORACIÓN DE ESTADO DEL SISTEMA ELÉCTRICO 52
4.12 ESTRATEGIAS DE DETECCIÓN INTELIGENTE DE PROBLEMAS ELÉCTRICOS BASADO EN TERMOGRAFÍA 53
4.13 ESTRATEGIAS PARA PRONÓSTICO DE FALLAS Y PROTECCIÓN DINÁMICA CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS 53
4.14 ESTRATEGIAS DE RESTAURACIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN 54
4.15 ESTRATEGIAS PARA PREDICCIÓN DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA 54
4.16 ESTRATEGIAS PARA DISEÑO DE DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA 55
4.17 ESTRATEGIAS PARA PREDECIR EL PRECIO DE VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA 55
4.18 CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE IA Y AA IMPLEMENTADAS EN EL DISEÑO DE ESTRATEGIAS REVISADAS 56

5 CONCLUSIONES 58

6 LÍNEAS POTENCIALES DE INVESTIGACIÓN Y TRABAJOS FUTUROS 60

BIBLIOGRAFÍA 62

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Estrategias para mantenimiento y toma de decisiones en la red eléctrica. 41
Tabla 2. Estrategias para detección, identificación y ubicación de fallas eléctricas.....42
Tabla 3. Estrategias para la gestión eficiente de micro redes eléctricas.....42
Tabla 4. Estrategias para el pronóstico de generación de energía eólica.....43
Tabla 5. Estrategias para el pronóstico de generación de energía solar. 44
Tabla 6. Estrategias para enrutamiento de VEs y maximización del rango. 45
Tabla 7. Estrategias para gestión de la congestión de VEs.....46
Tabla 8. Estrategias para gestión del balance de cargas VEs.....47
Tabla 9. Estrategias para gestión de mercado de energía de VEs.....47
Tabla 10. Estrategias para fijación de precios de congestión de VEs.....48
Tabla 11. Estrategias para gestión de sistema V2G 48
Tabla 12. Estrategias para consumo eficiente de energía a nivel residencial.....49
Tabla 13. Estrategias para diagnóstico de errores en medidores de energía.....50
Tabla 14. Estrategias para detección de robo y pérdidas técnicas de energía.....50
Tabla 15. Estrategias para seguridad cibernética de la red inteligente.....51
Tabla 16. Estrategias de análisis de confiabilidad en sistemas de distribución.....52
Tabla 17. Estrategias de monitoreo y valoración de estado del sistema eléctrico. 52
Tabla 18. Estrategia de detección de problemas eléctricos basado en termografía.....53
Tabla 19. Estrategias para pronóstico de fallas contra descargas atmosféricas.....53

Tabla 20. Estrategias de restauración de energía en sistemas de distribución.....54
Tabla 21. Estrategias de análisis y predicción de armónicos en sistemas de distribución.....54
Tabla 22. Estrategias para diseño de dispositivos de almacenamiento de energía.....55
Tabla 23. Estrategias para predecir el precio de venta de electricidad en Colombia.....55
Tabla 24. Clasificación de estrategias de IA y AA según técnicas de diseño implementadas.....56

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Relación entre Inteligencia artificial, machine learning y deep learning. 20
Figura 2. Proceso de análisis de datos en redes eléctricas. 24
Figura 3. Configuración típica de una micro red eléctrica AC/DC. 27
Figura 4. Esquema de investigación de vehículos eléctricos. 30
Figura 5. Aplicación de aprendizaje automático en seguridad de la red eléctrica. 34

GLOSARIO

ALGORITMO: conjunto ordenado de operaciones sistemáticas o comandos de programación que permite a una computadora hacer un cálculo y hallar la solución de un tipo de problema.

CAPA: conjunto de neuronas cuyas entradas provienen de una capa anterior o de los datos de entrada en caso de ser la primera capa, y cuyas salidas son la entrada de una capa posterior.

ENTRENAMIENTO: procedimiento de inteligencia artificial para enseñar a una red neuronal artificial a hacer una asociación entre una muestra de valores de entrada y los valores de salida correctos.

INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA (AMI): integración de componentes y sistemas destinados a la medición, recolección y análisis de información en tiempo real referente al uso de la energía eléctrica.

INTERNET DE LAS COSAS: sistema de interconexión digital utilizado para la vinculación y transferencia de información entre dispositivos tecnológicos integrados a procesos comunes.

MALWARE: software maligno diseñado con objetivo de infiltrarse en un sistema informático para ejecutar acciones no deseadas de forma intencional sin el conocimiento del usuario.

MICRO RED ELÉCTRICA: sistema eléctrico a pequeña escala integrado por varios recursos energéticos distribuidos, dispositivos de almacenamiento y los usuarios finales de la red eléctrica.

NEURONA ARTIFICIAL: elemento de procesamiento en una red neuronal, con varias entradas y una salida, que coopera y se comunica con otras neuronas.

RED NEURONAL ARTIFICIAL: algoritmo construido para modelar la forma en que el cerebro humano procesa la información a través de capas de neuronas que transmiten señales entre sí, produciendo valores de salida.

REGISTRADOR DE PERTURBACIONES DE FRECUENCIA (FDR): dispositivo de adquisición de datos conectado a la red eléctrica usado para monitorear en tiempo real señales de frecuencia, voltaje y ángulo de fase durante la operación del sistema.

SMART GRID: se refiere a la nueva generación de redes eléctricas, integrada por nuevos desarrollos tecnológicos de las ingenierías eléctrica, de comunicaciones y de información, con características de eficiencia energética, operación optimizada y costos reducidos.

TIEMPO MEDIO ENTRE FALLAS: tiempo promedio transcurrido entre dos eventos de fallo presentes en un componente reparable.

VEHÍCULO ELÉCTRICO: automóvil cuya fuente de potencia para la producción de energía y movimiento es un motor eléctrico combinado con una batería recargable usada para acumular energía.

VEHÍCULO HÍBRIDO: automóvil que combina dos fuentes de potencia para la producción de energía y movimiento, generalmente un motor de combustión interna y un motor eléctrico.

RESUMEN

TÍTULO: REVISIÓN DE ESTRATEGIAS BASADAS EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y MACHINE LEARNING PARA EL CONTROL DE LA OPERACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA [*]

AUTOR: CRISTIAN CAMILO CARRILLO TARAZONA[**]

PALABRAS CLAVE: Inteligencia artificial (IA), aprendizaje automático (AA), sistemas de distribución de energía eléctrica, red eléctrica inteligente.

DESCRIPCIÓN: La evolución de los sistemas eléctricos tradicionales hacia un nuevo modelo de redes eléctricas inteligentes fundamenta su restructuración en la integración eficiente de las más novedosas tecnologías y variadas disciplinas de la ingeniería, requiriendo soluciones tecnológicas para gestionar los complejos escenarios de operación del sistema proyectados. Ante esta situación, el desarrollo de la inteligencia artificial aparece como el elemento diferenciador a implementar en la red eléctrica capaz de afrontar los escenarios dinámicos esperados, el cual, mediante el análisis y extracción de valor de los grandes volúmenes de datos obtenidos en diversos procesos, permite abordar correctamente los desafíos ligados a la integración de nuevos actores, tecnologías, y además gestionar eficientemente los activos y procesos existentes en los distintos sectores de la cadena de energía eléctrica.

El propósito de esta monografía es revisar el estado de avance en el diseño e implementación de estrategias basadas en inteligencia artificial y aprendizaje automático aplicadas directamente en los sistemas de distribución de energía eléctrica, contribuyendo específicamente a su transformación hacia un sistema eléctrico inteligente, mediante revisión de la literatura donde se detalle el campo de aplicación, los aportes e impactos ya establecidos y esperados por estas técnicas, inconvenientes en dicha implementación y limitantes presentes en el proceso de integración al sistema eléctrico.

[*] Monografía.

[**] Escuela de Ingenierías Físico-Mecánicas, Facultad de Ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones. Director: Juan Manuel Rey López. Ingeniero PhD.

ABSTRACT

TITLE: REVIEW OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING BASED CONTROL STRATEGIES FOR DISTRIBUTION POWER SYSTEMS OPERATION[*]

AUTHOR: CRISTIAN CAMILO CARRILLO TARAZONA[**]

KEY WORDS: Artificial intelligence (AI), machine learning (ML), power distribution, Smart grid.

DESCRIPTION: The evolution of traditional electrical systems towards a new model of smart grids bases its restructuring on an efficient integration of the latest technologies and various engineering disciplines, requiring technological solutions to manage the complex operating scenarios of the projected system. The development of artificial intelligence appears as the differentiating element to be implemented in the power grid capable of facing the expected dynamic scenarios, which, through the analysis and extraction of big data, allows to properly address the challenges related to the integration of new actors and technologies, and also to efficiently manage existing processes in the different sectors of the electric power chain.

The purpose of this monograph is to review the state of the art of artificial intelligence and machine learning based control strategies applied directly to power distribution systems, specifically contributing to their transformation towards a Smart grid. For this purpose, a literature review will be presented describing the fields of application, the contributions and impacts already established and expected by these techniques, the drawbacks in the implementation and the present limitations in the process of integration into the power system.

[*] Monograph.

[**] Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of electrical, electronic and telecommunications engineering. Director: Juan Manuel Rey López PhD Engineer.

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente la operación de los sistemas de distribución eléctrica ha estado marcada en condiciones normales por procesos estables, enfrentando escenarios generalmente conocidos, dominables y relativamente sencillos de gestionar, apoyándose fundamentalmente en aportes de valor entregados por la experiencia de los operadores de red y centros de control, así como la gestión de herramientas clásicas de predicción y programación, para así ofrecer a sus usuarios el suministro del servicio eléctrico bajo estándares de calidad, confiabilidad y economía.

Sin embargo, la presencia de nuevos e importantes actores involucrados en el sistema, el aumento de la energía consumida por los usuarios finales, así como el desarrollo de tecnologías emergentes de diversa índole, evidencian un aumento significativo en la exigencia y complejidad para la gestión y toma de decisiones que recae en personal humano y las herramientas clásicas utilizadas hasta el momento, exponiendo la eficiencia y calidad del sistema eléctrico. Por esta razón se hace necesario encaminar a los sistemas de distribución de energía eléctrica hacia una reestructuración profunda y actualización.

Paralelamente a esta reestructuración del sistema eléctrico, la ciencia de la computación e informática experimenta una auténtica revolución con el desarrollo de la inteligencia artificial -IA-, disciplina en la que por largo tiempo se ha invertido gran cantidad de esfuerzos y recursos, alcanzando un nivel de madurez suficiente para hacer posible su incorporación de manera natural en la cotidianidad de las personas y procesos industriales, de manera que a través de estrategias sistemáticas sea posible gestionar, interpretar y predecir escenarios de alta complejidad o tomar una decisión informada bajo términos de alta eficiencia y productividad.

Ante la coyuntura actual del sistema eléctrico, es una realidad la necesidad de integrar activamente la inteligencia artificial a su proceso de gestión, acercando el sistema tradicional al concepto de red eléctrica inteligente. El empleo de inteligencia artificial mediante técnicas de análisis y procesamiento de enormes cantidades de datos recolectadas durante la operación del proceso mismo, aportará beneficios de tipo administrativo (gestión, predicción, toma de decisiones), técnico (eficiencia en diagnóstico de fallas, simplificar los procesos de control y operación), ambiental (óptima gestión de energías renovables, disminución de emisiones de carbono en el proceso de generación), económico (reducción de costos producción, incremento del valor económico del sector productivo) y social (reducción de brecha entre empresas con economías emergentes y empresas con economías desarrolladas), entre muchos otros aspectos a ser analizados, los cuales permiten un uso más eficiente de la energía eléctrica en términos de eficiencia, calidad y seguridad.

En adelante, este documento está organizado de la siguiente manera: El capítulo 2 expone una introducción conceptual de inteligencia artificial y machine learning, el capítulo 3 presenta la revisión literaria realizada en torno a las aplicaciones de inteligencia artificial y machine learning diseñadas al servicio de los sistemas de distribución de energía eléctrica, el capítulo 4 clasifica y sintetiza las estrategias de inteligencia artificial y machine learning implementadas en el sistema eléctrico, el capítulo 5 presenta las conclusiones resultantes de la revisión literaria, y finalmente el capítulo 6 propone líneas potenciales de investigación y trabajos futuros referentes al tema de interés.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una revisión de la literatura que permita caracterizar los avances en la implementación y empleo de estrategias basadas en inteligencia artificial y *machine learning* para el control de la operación de sistemas de distribución de energía eléctrica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Elaborar una sinopsis fundamentada en la revisión de la literatura de la implementación y empleo de las principales estrategias basadas en inteligencia artificial y *machine learning* para el control de la operación de sistemas de distribución de energía eléctrica.

Analizar las diferentes estrategias de inteligencia artificial y *machine learning* para el control de la operación de sistemas de distribución de energía eléctrica, identificando sus ventajas, inconvenientes y limitaciones operativas.

Clasificar las estrategias analizadas a partir de sus características operativas, con el fin de identificar potenciales líneas de investigación futura.

2 INTRODUCCIÓN A LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y MACHINE LEARNING

La nueva era digital vivida actualmente, en la que las tecnologías modernas de la información y comunicación están llevando a cabo cambios profundos en la sociedad, ofrece potenciales extraordinarios de desarrollo a quienes contemplen este nuevo escenario como una oportunidad y hagan uso de estas herramientas tecnológicas. Bajo este principio, la inteligencia artificial -IA- destaca como una disciplina revolucionaria en el ámbito del desarrollo tecnológico y computacional, toda vez que su aplicación práctica en organizaciones y procesos hacen de esta un elemento diferenciador con resultados altamente favorables[1].

El desarrollo de la IA como una disciplina tecnológica capaz de generar impacto en los procesos a los que se asocie, ha requerido de evolución y depuración de las tecnologías de apoyo que intervienen en sus procesos, por lo cual su definición y alcance también ha experimentado cambios a lo largo de los años. Como concepto, el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica -IEEE- en la segunda edición del documento estándar internacional ISO/IEC/IEEE 24765:2017 define la inteligencia artificial como “la rama de la informática dedicada al desarrollo de sistemas de procesamiento de datos que realizan funciones normalmente asociadas con la inteligencia humana, como el razonamiento, el aprendizaje y el auto mejoramiento”[2]. De acuerdo con esto, se entiende el deseo en la comunidad científica por desarrollar una tecnología capaz de emular el funcionamiento del cerebro humano a través de procesos tecnológicos artificiales con el objetivo de gestionar grandes cantidades de información para automatizar tareas intelectuales y solucionar problemas de manera razonable.

[1] Van, D. “Nuevas capacidades de las personas para la era digital,” *IE Insights*, 2019. Disponible en https://www.ie.edu/insights/es/articulos/nuevas-capacidades-de-las-personas-para-la-era-digital/

[2] X. IEEE, “INTERNATIONAL STANDARD ISO / IEC / IEEE 24765,” vol. 2017, p. 29, 2017.

Para que este comportamiento “inteligente” en procesos y máquinas sea posible, la IA ha abordado un determinado número de campos de investigación y a partir de ello se han creado diversos subcampos y técnicas analíticas para la gestión de la información. Son varias las ramas de interés de la IA por su alta capacidad de implementación y resultados, entre las que destaca el aprendizaje automático o machine learning como principal técnica analítica, seguida por otras como son la minería de datos[3], los sistemas expertos[4], métodos estadísticos como el modelo gaussiano[5] o el modelo de Márkov[6], que aunque son herramientas de análisis de datos tradicionales, sirven como un apoyo importante a las nuevas técnicas de análisis en auge.

Referente al aprendizaje automático -AA- o machine learning -ML-, se entiende como un subcampo de la IA en el cual los algoritmos diseñados son entrenados con información obtenida en bases de datos propias del proceso, para así adquirir conocimientos y experiencia que permitirá de manera precisa detectar patrones o tendencias durante el procesamiento de nueva información, razón por la cual se considera una técnica con alto potencial debido al gran volumen de recolección y digitalización de la información de procesos[7]. El entrenamiento y depuración de las técnicas de ML está basado en dos modalidades las cuales son aprendizaje supervisado y aprendizaje no supervisado. El aprendizaje supervisado tiene lugar

[3] Green, R. C.; Wang, L. y Alam, M. “Applications and trends of high performance computing for electric power systems: Focusing on smart grid,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2. p. 926.

[4] B. K. Bose, “Artificial Intelligence Techniques in Smart Grid and Renewable Energy Systems - Some Example Applications,” *Proc. IEEE*. 2017. vol. 105, no. 11, p. 2265.

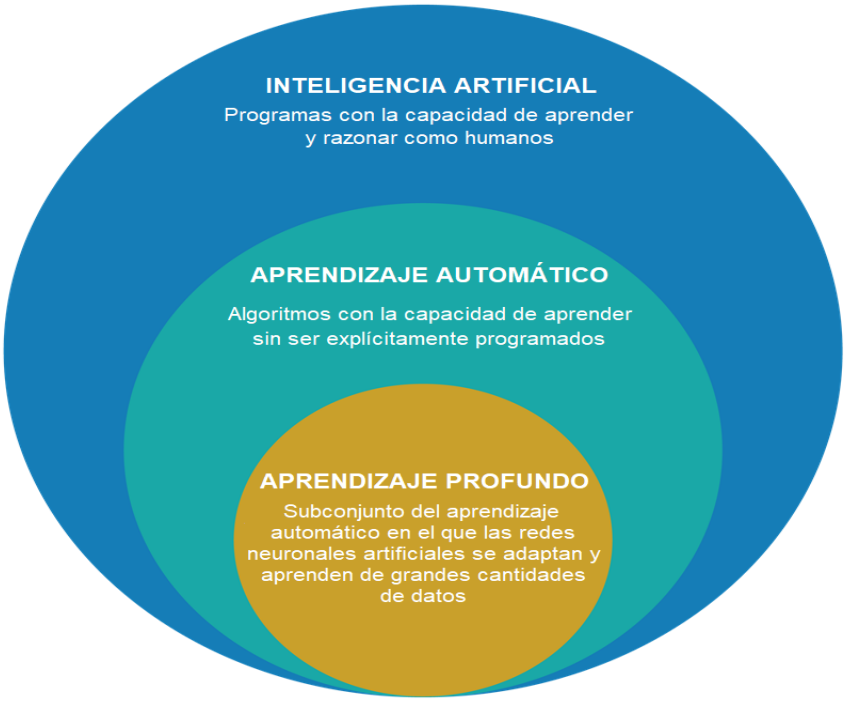
[5] He, M.; Murugesan, S., y Zhang, J., “Multiple timescale dispatch and scheduling for stochastic reliability in smart grids with wind generation integration,” *Proc. - IEEE INFOCOM*, 2011. pp. 462.

[6] Niyato, D.; Hossain, E. yFallahi A. “Sleep and wakeup strategies in solar-powered wireless sensor/mesh networks: Performance analysis and optimization,” *IEEE Trans. Mob. Comput.* 2007. vol. 6, no. 2, pp. 221.

[7] Pyle, D. y San Jose, C. “An executive’s guide to machine learning,” *McKinsey Q.* 2015. p. 1.

cuando los datos de entrada y salida con los que son entrenados los algoritmos son previamente etiquetados y categorizados por parte del equipo humano de IA, para que posteriormente dicho algoritmo entregue una respuesta acertada de forma automática sin ninguna intervención humana. En cuanto al aprendizaje no supervisado, los datos de entrada y salida para el entrenamiento de los algoritmos no son etiquetados, de manera que este detecta por sí mismo similitudes y diferencias entre los datos suministrados para así establecer conclusiones y entregar respuestas estructuradas de forma acertada[8].

Figura 1. Relación entre Inteligencia artificial, machine learning y deep learning.



Fuente: Deep Learning: Raza, Matheen; Cinquegrana, Piero. The Latest Trend in AI and ML. Qubole. (Recuperado en 19 de mayo 2020) Disponible en https://www.qubole.com/blog/deep-learning-the-latest-trend-in-ai-and-ml/
Traducción del autor para el presente trabajo.

[8] Saravanan, R. y Sujatha, P. "Algorithms : A Perspective of Supervised Learning Approaches in Data Classification," in *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS).* 2018, no. Iciccs. p.945.

Como un subcampo importante en el ML aparece el aprendizaje profundo o Deep learning, técnica mediante la cual se simula la conexión neuronal del cerebro humano mediante redes neuronales artificiales conectadas entre sí de forma sucesiva procesando la información desde la capa inicial, pasando por una serie de capas internas hasta la capa final y de esta manera obtener una salida con alta precisión y exactitud[9].

Mediante la implementación de la IA y sus técnicas analíticas en distintos sectores productivos, es posible automatizar potencialmente ciertas actividades físicas bajo contextos estructurados o predecibles, y simultáneamente abordar situaciones complejas para la resolución de problemas de alta dificultad, mejorando el desempeño de los procesos en tiempo real. Algunas áreas de implementación de la IA en el sector productivo son el mantenimiento predictivo, mediante el análisis de grandes volúmenes de datos como imágenes, fechas o registros de funcionamiento de los equipos[10]. En marketing digital hay un gran potencial ante el estudio del comportamiento de potenciales compradores en la web, desarrollando un posicionamiento de productos o marcas exitoso en las plataformas digitales[11]. En medicina, el diagnóstico avanzados de enfermedades degenerativas como el Alzhéimer a través del procesamiento de imágenes del cerebro de los pacientes para detección de signos de la enfermedad[12]. Igualmente, se identifican algunos tipos de problemas que es posible abordar de manera satisfactoria como lo son la clasificación de valores de entrada, detección de anomalías en los valores de entrada, asociación en datos de entrada según patrones o tendencias detectadas.

---

[9] Bengio, Y. “La Edad De Oro De La Inteligencia Artificial,” *Investig. Cienc.*. 2016. pp. 6.

[10] Chui,M, *et al*. “Notes from the IA frontier. Insights from hundreds of use cases,” *McKinsey Global Institute*. 2018. p.7.

[11] Escobar, H.; Alcivar M. y Puris, A. “Aplicaciones de Minería de Datos en Marketing, ”*Rev. Publicando*, 2016. vol. 3, no. 8. p. 505.

[12] R. McCullom, “Inteligencia artificial contra el alzhéimer,” *Investig. Cienc.*, 2019.

Ante la oportunidad puntual de integrar activamente la IA a los sistemas eléctricos, el empleo de técnicas programadas para el análisis y procesamiento de enormes cantidades de datos e información recolectada durante la operación de la red eléctrica en expansión, aportará beneficios en aplicaciones administrativas (monitoreo, gestión, predicción, y toma de decisiones acordes a los escenarios presenciados), técnicas (eficiencia en el diagnóstico de fallas, simplificar los procesos de control y operación[13]), ambientales (óptima gestión de energías renovables, disminución de la huella de carbono en la cadena de energía), económicas (reducción de tiempos de costos y tiempos de producción, incremento del valor económico del sector productivo), sociales (reducción de brecha entre empresas con economías emergentes y empresas con economías desarrolladas), entre muchos otros aspectos a ser analizados, generando todo esto un uso más eficiente de la energía eléctrica en términos de eficiencia, calidad y seguridad.

[13] L. B. Yang, "Application of Artificial Intelligence in Electrical Automation Control," *Procedia Comput. Sci.*, 2020. vol. 166, p. 293.

3 INTELIGENCIA ARTIFICIAL AL SERVICIO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. REVISIÓN LITERARIA

Recientemente, los métodos de IA y ML han sido propuestos en la literatura para la gestión de redes eléctricas. La adopción de estas tecnologías en los sistemas de generación, transmisión y distribución de energía permitirá desarrollar procesos automatizados e inteligentes, facilitando así el diseño de estrategias eficientes para su gestión y operación[14]. Este capítulo presenta importantes avances en la implementación y empleo de estrategias basadas en IA y ML para el control de la operación de sistemas de distribución de energía eléctrica.

3.1 MODELOS DE MANTENIMIENTO Y TOMA DE DECISIONES EN LA RED ELÉCTRICA

El artículo desarrollado por [15], presenta un modelo de mantenimiento y toma de decisiones basado en técnicas de IA para la evolución de los sistemas eléctricos tradicionales hacia las redes eléctricas inteligentes. Este modelo fue implementado usando como caso de estudio la red de distribución de la ciudad de Nueva York. Sin embargo, este es perfectamente adaptable a cualquier sistema eléctrico a nivel mundial.

El modelo de gestión analizado se fundamenta en una serie de algoritmos de aprendizaje automático supervisados, complementados con análisis estadísticos y árboles de clasificación–regresión entrenados a partir del procesamiento de las

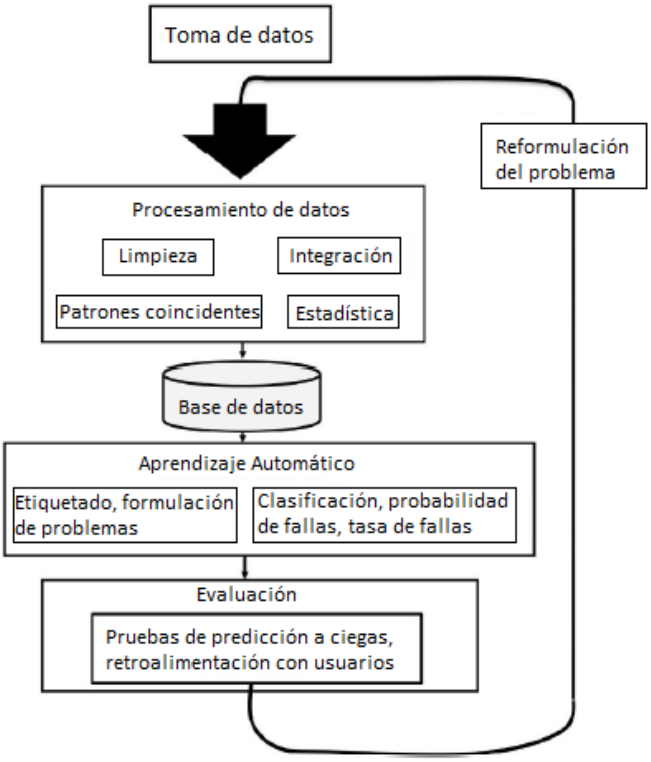
---

[14] Ullah, Z. *et al*. “Applications of Artificial Intelligence and Machine learning in smart cities,” *Comput. Commun.*, 2020. vol. 154, no. March, pp. 314.

[15] Rudin, C., *et al.*, “Machine learning for the New York City power grid,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2012, vol. 34, no. 2, pp. 328–345.

amplias bases de datos históricos del sistema eléctrico de la ciudad, con el objetivo de clasificar, según la probabilidad de falla, terminales, transformadores, así como calcular la probabilidad de ocurrencia de eventos extraños en los pozos de inspección y tasas de falla de componentes.

Figura 2. Proceso de análisis de datos en redes eléctricas.



Fuente:[16]. Traducción del autor para el presente trabajo.

A pesar que el modelo de gestión durante su etapa de entrenamiento presentó algunos desafíos de aplicación como carencia de datos, sesgos de información relevante o inexactitudes en datos dinámicos, dichas situaciones se superaron mediante técnicas estadísticas o estimaciones computacionales, para así obtener como resultado global respuestas de valor que permiten adoptar políticas

[16] Ibid., p. 332.

eficientes de mantenimiento e inversión, programas de confiabilidad y toma de decisiones que favorecen la correcta operación del sistema eléctrico.

3.2 MODELO PARA LA DETECCIÓN, IDENTIFICACIÓN Y UBICACIÓN DE FALLAS ELÉCTRICAS

En [17], los autores presentan un modelo unificado basado en datos para la detección, identificación y ubicación de fallas en la red eléctrica inteligente a través de la agrupación de algoritmos de aprendizaje automático. En el modelo presentado, un dispositivo registrador de perturbaciones de frecuencia -FDR- mide las señales de frecuencia y voltaje del sistema en tiempo real para alimentar los algoritmos de análisis, los cuales mediante la extracción de características y asociación de simbología distinguen condiciones de operación normales o de falla en la red.

No obstante, la eficiencia de la aplicación práctica del modelo de falla en sistemas eléctricos estará directamente relacionada con la instalación óptima de los FDR, debido a los costos de instalación y operación que limitará su montaje en cada circuito y con esto la calidad del muestreo de señales de operación.

3.3 GESTIÓN EFICIENTE DE MICRO REDES ELÉCTRICAS

Los trabajos realizados por[18] y [19] se enfocan en establecer un modelo de gestión eficiente para micro redes eléctricas en términos de potencia y costo mediante

[17] Jiang, H., *et al.*, "Fault detection, identification, and location in smart grid based on data-driven computational methods," *IEEE Trans. Smart Grid*, 2014, vol. 5, no. 6, pp. 2947–2956.

[18] Jayaraj, S.; Ahamed, I. y Kunju, B., "Application of Reinforcement Learning Algorithm for Scheduling of Microgrid," *2019 Glob. Conf. Adv. Technol.*, 2020. pp. 1–5.

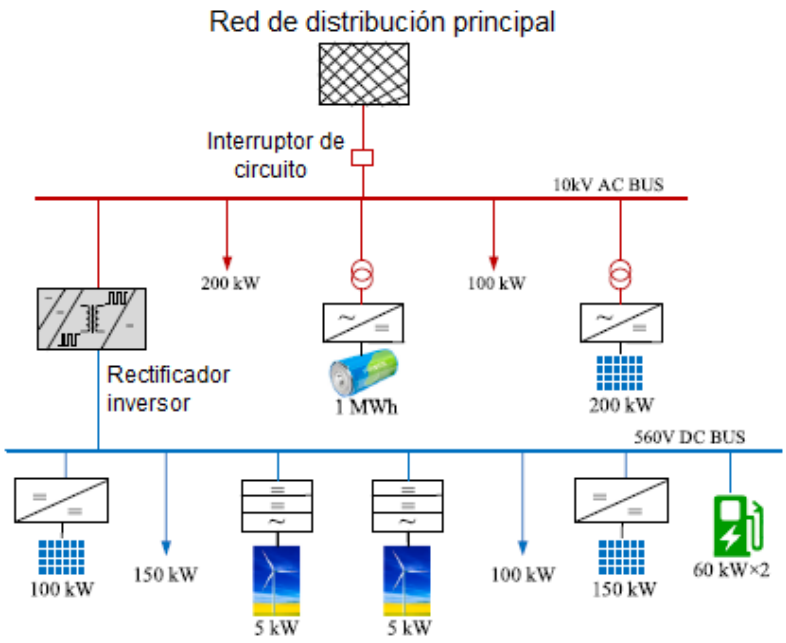
[19] Kuznetsova, E., *et al.*, "Reinforcement learning for microgrid energy management," *Energy Int. J.*, 2013, vol. 59, pp. 133–146.

algoritmos de aprendizaje Q que permitan programar el uso de las baterías eléctricas para minimizar la tarifa por consumo de energía de la red. Bajo disponibilidad de proyecciones diarias de demanda, capacidad de generación de energía alternativa y costo por hora de energía de la red que alimentan el algoritmo de aprendizaje, este elabora el cronograma de operación diario para el banco de baterías bajo los estados de carga (periodos pico de generación renovable), descarga (periodos de alta demanda) y flotación (cuando esté con carga máxima y la tarifa de energía en la red no esté en su punto máximo), disminuyendo así en gran medida la utilización de la red principal y con esto, obteniendo una reducción significativa en la tarifa de energía en entornos de cambio constante.

Complementando los trabajos antes mencionados, [20] estructura un modelo de gestión de energía para micro redes eléctricas basado en técnicas de aprendizaje por refuerzo en el que incluye la variable de costos por degradación de las baterías eléctricas como un factor de alto impacto en la estimación del beneficio económico del modelo de gestión. Los autores consideran importante incluir en el modelo diseñado el costo por degradación debido a la afectación de la vida útil que experimentan las baterías por los constantes procesos de carga-descarga y su futura necesidad de reposición, razón por la que dicho costo presenta incidencia directa en el cálculo del ingreso operativo neto de la micro red, mientras que las políticas de despacho de energía bajo las cuales opera el algoritmo diseñado permanecen igual.

[20] Y. Shang, *et al.*, “Stochastic dispatch of energy storage in microgrids: An augmented reinforcement learning approach,” *Appl. Energy*, vol. 261, no. December 2019. 2020, p. 114423.

Figura 3. Configuración típica de una micro red eléctrica AC/DC.



Fuente: [21]. Traducción del autor para el presente trabajo.

3.4 PRONÓSTICO DE ENERGÍAS RENOVABLES

En [22], los autores exponen una serie de estrategias de IA que favorecen el proceso de integración de fuentes de energía renovable en la red eléctrica inteligente, gracias a su capacidad de pronóstico acertado en el cálculo de generación de energía a partir de estas fuentes de naturaleza variable, permitiendo al sistema planificar eficientemente sus procesos y dar una participación más activa a las fuentes de energía renovable reemplazando parcialmente el uso de fuentes de energía fósil[23].

---

[21] Ibid., p. 8.

[22] Hossain, E., *et al.*, "Application of Big Data and Machine Learning in Smart Grid, and Associated Security Concerns: A Review," *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 13960–13988.

[23] UPME "Unidad de Planeación Minero Energetica," *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. 2015, p. 24.

Las estrategias de IA revisadas por [24] gestionan las fuentes de energía renovables eólica y solar, permitiendo su programación y comercialización. Para la gestión de la energía eólica, se revisan seis estrategias combinando técnicas de aprendizaje automático, algoritmos de regresión, probabilidad bayesiana, entre otras, superando la intermitencia de esta fuente de generación mediante la creación de modelos de predicción en la capacidad de energía a partir del análisis de parámetros ambientales, pronóstico de las velocidades del viento, diagnóstico y predicción de fallas en turbinas eólicas bajo el análisis de las bases de datos de los sistemas SCADA. Referente a la energía solar, se revisan cinco estrategias basadas en aprendizaje profundo, lógica difusa, regresión gaussiana, entre otras, que permiten gestionar los obstáculos de generación confiable a través de sistemas de predicción de irradiación solar bajo consideración de datos meteorológicos, determinación de máxima potencia en un sistema fotovoltaico y modelos para el pronóstico de generación de energía a muy corto plazo.

3.5 GESTIÓN EFICIENTE DE MOVILIDAD ELÉCTRICA

La investigación realizada por [25], compila una serie de estrategias de IA que incluyen aprendizaje automático, coordinación de agentes basado en utilidades, entre otras, con el objetivo de gestionar eficientemente la integración a gran escala de vehículos eléctricos -VE- a la red eléctrica inteligente. Dichas estrategias proponen alternativas de solución a importantes retos de aplicación, clasificables en tres categorías: enrutamiento de VE con eficiencia energética y maximización del rango, la gestión de la congestión, y la integración eficiente de VE en la red inteligente.

---

[24] E. Hossain. Op. cit., pp. 13960–13988.

[25] Rigas, E.; Ramchurn, S. y Bassiliades, N., “Managing Electric Vehicles in the Smart Grid Using Artificial Intelligence: A Survey,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 1619–1635.

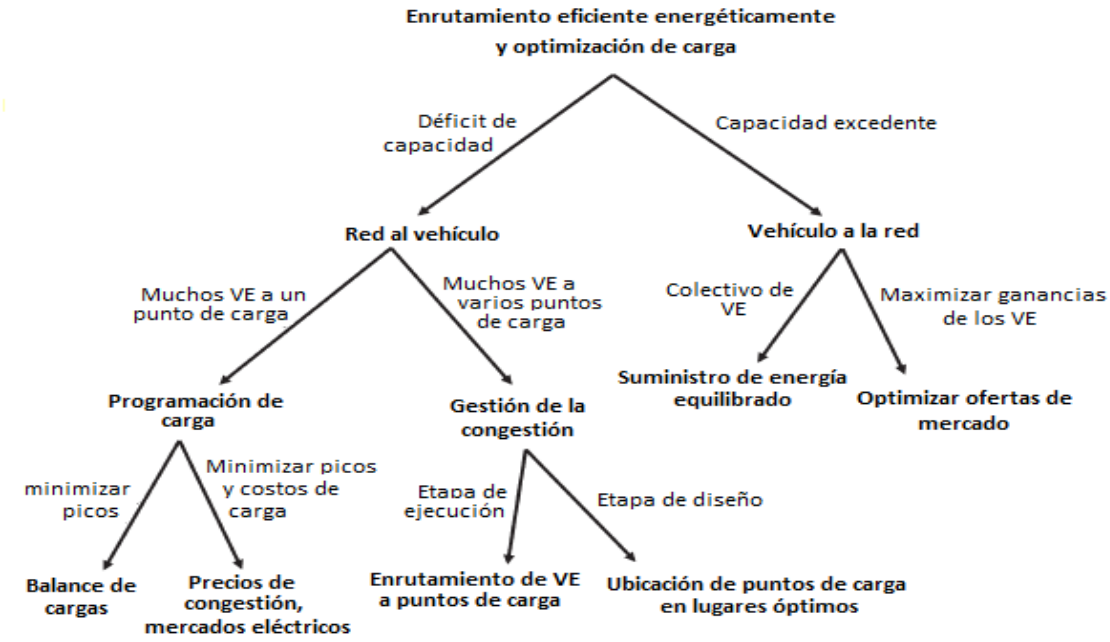
Enrutamiento de VE con eficiencia energética y maximización del rango: Mediante la revisión de siete diferentes estrategias de IA, se abordan retos de aplicación como el consumo energético por trayecto del vehículo y disminución de la vida útil de la batería eléctrica, ocasionados por los frecuentes procesos de carga y descarga a los que se someten los VE. Estos algoritmos revisados ofrecen al usuario rutas de transito optimizando la energía consumida durante el trayecto de viaje, contemplando diversidad de criterios como el trayecto más corto entre dos puntos, la posibilidad de encontrar estaciones de recarga en dicho trayecto, el ahorro de energía al transitar por pendientes descendentes, el nivel de batería al inicio del viaje, aspectos constructivos del vehículo, gestión de carga de supercondensadores, e incluso restricciones de tiempo del conductor, siempre mediante la adaptación de aplicaciones existentes, como es el caso del algoritmo de Dijkstra, útil para determinar la ruta más corta entre dos puntos.

Gestión de la congestión: En esta sección, los autores exponen siete aplicaciones gráficas basadas en IA para gestionar eficientemente escenarios complejos como el suministro de carga a VE y la ubicación óptima de estaciones de carga en la red vial, con el fin de brindar tiempos razonables de espera y carga en las estaciones y mayor confort a los conductores. Estas aplicaciones atienden criterios de diseño como la sugerencia de puntos de recarga con baja congestión de VE sin salir del trayecto, actualizaciones de la congestión de estaciones de carga en tiempo real basado en la interacción en plataforma de otros conductores, o la fijación de precios e incentivo a conductores para el uso de determinadas estaciones. Igualmente, se revisan aplicaciones de diseño para la ubicación óptima de estaciones y ranuras de carga necesarias de acuerdo con la predicción de energía requerida por los usuarios al transitar determinados trayectos.

Integración de VE a la red inteligente: Se exponen diversas estrategias de IA diseñadas para solucionar los desafíos que implica la conexión de VEs a la red

inteligente bajo dos esquemas de conexión: red a vehículo (G2V) y vehículo a red (V2G). Para el sistema G2V, se revisan veintisiete estrategias de IA que gestionan eficientemente los eventos de carga de VE y sus costos asociados, sin que estos eventos generen picos de demanda o sobrecargas en el sistema eléctrico. Las estrategias diseñadas gestionan escenarios como el equilibrio de cargas, la fijación de precios y los mercados eléctricos, ofreciendo beneficios como ubicación óptima de estaciones de carga, programación efectiva de eventos de carga, bajos tiempos de espera, definición de tarifas fijas y de congestión, entre otras; referente al sistema V2G, se exponen ocho soluciones de IA que gestionan el flujo de energía desde los VE hacia la red inteligente bajo carga previa e idealmente a partir de energías renovables, permitiendo ampliar el tiempo de aprovechamiento de estas fuentes de energía y ofreciendo beneficios económicos a los conductores al poder comercializar la energía de forma individual o ligado a agentes colectivos.

Figura 4. Esquema de investigación de vehículos eléctricos.



Fuente: [26]. Traducción del autor para el presente trabajo.

[26] Ibid., p. 1620.

3.6 CONSUMO EFICIENTE DE ENERGÍA A NIVEL RESIDENCIAL

La investigación presentada en [27], propone tres estrategias de aprendizaje automático para la predicción de hábitos de consumo de energía de usuarios residenciales que permiten sugerir nuevas alternativas para el consumo eficiente de energía manteniendo niveles de confort adecuados al usuario, además de otorgarle reducción de su factura mientras que la red eléctrica experimenta menor consumo de energía en horas pico. Estas estrategias son diseñadas mediante máquina de soporte vectorial, perceptrón multicapa y clasificador bayesiano, los cuales predicen el nivel de confort que experimentarían los usuarios basándose en una serie de encuestas contestadas por los mismos donde se sugieren nuevas combinaciones y horarios de uso para las cargas eléctricas residenciales de mayor consumo de energía, integrando activamente al usuario hacia el propósito de consumo eficiente de energía mediante incentivos como reducción de su factura y niveles de comodidad aceptables en cuanto al uso de dispositivos eléctricos.

3.7 DIAGNÓSTICO DE ERRORES EN MEDIDORES DE ENERGÍA

El estudio presentado en [28] propone un modelo combinado de técnicas de AA para la predicción y reconocimiento de fallas en los medidores inteligentes de energía eléctrica valiéndose de la información recolectada en el proceso de medición. En el estudio expuesto, se valora de forma remota el estado operativo del equipo de medición a través de tres algoritmos diseñados bajo técnicas de máquinas de vectores, clasificador bayesiano y regresión lineal, los cuales recolectan, filtran y limpian la información, para así mejorar la calidad de los datos a analizar y

[27] Li, B, *et al.*, “Predicting user comfort level using machine learning for smart grid environments,” *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur. ISGT Eur.*, 2011, pp. 1–6.

[28] Helong, L.; Haibo, Y. y Jinshuai, Y., “Intelligent Energy Meter Fault Prediction Based on Machine Learning,” *Proc. - 2019 15th Int. Conf. Comput. Intell. Secur. CIS 2019*, 2019, pp. 296–300.

atribuirles determinadas características que permitan captar tendencias de cambio en la medición y asociar el funcionamiento del equipo a alguna de las categorías de falla en los históricos de equipos pares, pronosticando en tiempo real y con alta precisión el tipo de falla que experimenta el medidor inteligente.

3.8 ROBO Y PÉRDIDAS TÉCNICAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En [29] el autor presenta un estudio comparativo entre cuatro modelos de detección de robo de electricidad diseñados bajo diferentes técnicas de AA con el objetivo de clasificarlos de acuerdo a su eficiencia en la predicción de prácticas fraudulentas por parte de los usuarios de compañías de energía. Los modelos analizados usan algoritmos de regresión logística, máquina de soporte vectorial, K-NN y redes neuronales, entrenados bajo el análisis de variables como la tendencia a la reducción del consumo de energía por parte de los usuarios y alarmas de manipulación emitida por medidores inteligentes que permiten calcular índices de sensibilidad positiva y falsa alarma para la precisión en la detección de robo, que resultará en la preselección de usuarios sospechosos para revisión de su equipo de medida. Como resultado final, el estudio citado define los modelos de máquinas de soporte vectorial y regresión lineal como los más precisos y de mejor rendimiento.

Por otra parte, [30] desarrolló dos modelos de regresión difusa que mediante simulación en MATLAB predicen las pérdidas técnicas que experimentan las compañías de energía en las redes eléctricas. Mientras que los modelos tradicionales de estimación de pérdidas de energía procesan información incompleta, requieren de suposiciones y depende de múltiples factores, los

[29] Gu, G., *et al.,* "Comparison of Machine Learning Techniques for the Detection of the Electricity Theft," *Proc. 2018 IEEE 3rd Int. Conf. Cloud Comput. Internet Things, CCIOT 2018*, pp. 116–119.

[30] Mogilenko, A., "Application of artificial intelligence methods for definition of electric power losses," *INTELEC 05 - Twenty-Seventh Int. Telecommun. Conf.*, 2005, pp. 595–599.

modelos propuestos basados en métodos estadísticos y regresión difusa con algoritmos genéticos proyectan mayor confiabilidad en los procesos de estimación y predicción de las pérdidas técnicas totales de energía centrando su dependencia al flujo total de energía circulante por el sistema.

3.9 SEGURIDAD CIBERNÉTICA DE LA RED ELÉCTRICA INTELIGENTE

En [31] los autores presentan el uso de cinco estrategias de IA para combatir ataques cibernéticos programados con la intención de vulnerar la estabilidad de la red eléctrica inteligente mediante el acceso y uso indebido de grandes cantidades de información crítica que fluye a través de la infraestructura de medición avanzada, ocasionando efectos devastadores al sistema eléctrico y terceros. Los sistemas de protección de la información revisados basan su operación en algoritmos de aprendizaje automático apoyado en técnicas como minería de datos, teoría de juegos y otras, diseñadas para brindar seguridad cibernética a partir de la detección de intrusos, anomalías, inyección de datos falsos o robo de energía en el sistema mediante el análisis de variables como el hallazgo de patrones desconocidos en la red, comportamientos extraños en la gestión del sistema o el reconocimiento de inyección de datos incorrectos, garantizando así la correcta operación de la red.

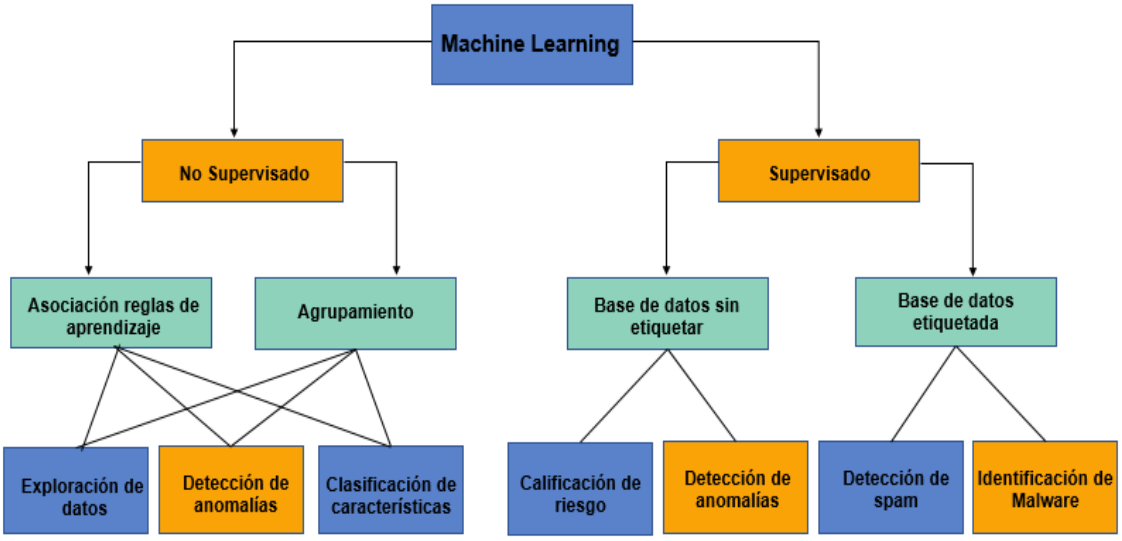
Por su parte, [32] propone cuatro sistemas de detección de ataques cibernéticos mediante estrategias de aprendizaje automático que ejercer monitoreo y control a la operación de la red eléctrica inteligente. Las técnicas revisadas trabajan bajo métodos de detección supervisada, no supervisada, detección en tiempo real e híbridos, cuyo fin es analizar las mediciones y características de vectores asociadas al sistema con el fin de clasificarlas como seguras o atacadas,

[31] Hossain, E. Op. cit., pp. 13973–13988.

[32] Ozay, M., *et al.* “Machine Learning Methods for Attack Detection in the Smart Grid,” *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.*, 2016, vol. 27, no. 8, pp. 1773–1786.

generando alarmas de detección de ataques tanto observables como no observables a la red por inyección de datos falsos que pretendan desestabilizar el sistema eléctrico.

Figura 5. Aplicación de aprendizaje automático en seguridad de la red eléctrica.



Fuente: [33]. Traducción del autor para el presente trabajo.

3.10 ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

La investigación realizada por [34] propone un modelo para el análisis de confiabilidad de sistemas de distribución eléctricos mediante técnicas de aprendizaje supervisado basado en redes neuronales artificiales y escrito en lenguaje de programación C++. El modelo planteado establece como prioridad el cálculo de índices de confiabilidad en el sistema (tasa de falla, tiempo medio de falla, tipo de falla, indisponibilidad promedio, etc.), para así solventar las

[33] Hossain, E. Op. cit., p. 13971.

[34] Zhou, X., *et al*, "Research of distribution system reliability based on intelligence algorithms," *2010 Int. Conf. Meas. Technol. Mechatronics Autom. ICMTMA 2010*, vol. 2, pp. 1060–1063.

dificultades que presentan los métodos tradicionales de análisis de confiabilidad entre los que se encuentran: la baja precisión, la dificultad en el manejo de grandes volúmenes de datos y la precisión en el modelado.

3.11 MONITOREO Y VALORACIÓN DE ESTADO DEL SISTEMA ELÉCTRICO

En [35] los autores plantean un esquema de monitoreo y valoración inteligente del sistema eléctrico, diseñado mediante técnicas de redes de memoria a corto plazo prolongada (Long short-Term memory -LSTM-) el cual evalúa el estado de la red eléctrica a través del cálculo de desviación existente entre las pérdidas de energía medidas durante la operación del sistema y las definidas en su etapa de diseño. El modelo propuesto es entrenado haciendo uso de bases de datos que incluyen información estimada en la ingeniería de diseño del sistema eléctrico, variables actuales de operación como flujo de potencia, voltaje, cargas proyectadas, e incluso parámetros no estimados en detalle o desconocidas durante el diseño del sistema pero con alta incidencia en la operación como el flujo bidireccional de energía debido a micro redes o prosumidores conectados a la red, entre otras, permitiendo elaborar un análisis preciso de la situación operativa, clasificar el estado de la red en estados de operación normal, vigilancia o criticidad, o incluso predecir con precisión fallas actuales en el sistema eléctrico.

3.12 DETECCIÓN INTELIGENTE DE PROBLEMAS ELÉCTRICOS BASADO EN INSPECCIONES TERMOGRÁFICAS

El trabajo realizado por [36] expone y evalúa cuatro modelos de aprendizaje automático supervisados para la clasificación y detección de anomalías durante la

[35] Loaneş A. y R. Tirnovan, “Power Grid Health Assessment Using Machine Learning Algorithms,” *2019 11th Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng. ATEE 2019*, pp. 22–25.

[36] Olivatti, Y., *et al.* “Analysis of artificial intelligence techniques applied to thermographic inspection for automatic detection of electrical problems,” *2018 IEEE Int. Smart Cities Conf. ISC2 2018*, 2019.

operación de componentes eléctricos basado en inspecciones termográficas. Los modelos expuestos hacen uso de las técnicas de diseño de redes neuronales artificiales, máquina de soporte vectorial, lógica difusa y algoritmo K-NN, cuya función consiste en procesar bases de datos etiquetadas que contienen imágenes térmicas captadas de los elementos a inspeccionar para separar y ubicar en primer plano las regiones de interés a analizar, buscando con esto corregir ruidos como interferencias atmosféricas que amplían los rangos de temperatura, o problemas de resolución en los cámaras termográficas, logrando precisión en la detección de irregularidades en los componentes.

Además, los modelos de detección fueron evaluados mediante experimentos en los cuales dos tipos de bombillas fueron puestos en operación bajo condiciones de subtensión, tensión optima y sobretensión. Estos dos tipos de bombillas pertenecen a la base de datos con la que fueron entrenados los algoritmos, los cuales al realizar análisis en las imágenes térmicas captadas a dichos objetos obtuvieron alta precisión y efectividad en la predicción de fallas; sin embargo, al exponerse a una tercera clase de bombillo no perteneciente a la base de datos de entrenamiento de los algoritmos, su precisión disminuyó considerablemente, mostrando dificultades operativas al exponerse a situaciones desconocidas.

3.13 PRONÓSTICO DE FALLAS Y PROTECCIÓN DINÁMICA CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

El modelo expuesto en [37] propone una alternativa para el pronóstico de fallas y la protección dinámica contra descargas atmosféricas en redes inteligentes, diseñado mediante técnicas de redes neuronales artificiales con el propósito de mejorar la confiabilidad del servicio prestado por las empresas de energía ante eventos de tormenta eléctrica. El proceso de predicción de fallas requiere una

[37] C. Tong *et al.*, “Artificial intelligence-based lightning protection of smart grid distribution system,” *2017 Int. Symp. Light. Prot. XIV SIPDA 2017*, 2017, no. October, pp. 279–286.

primera etapa de detección y análisis, donde el algoritmo recibe información en tiempo real de presencia y ubicación de rayos para su debido procesamiento, posteriormente una segunda etapa de pronóstico donde se predice los componentes de la red eléctrica con mayor probabilidad de sufrir perturbaciones o experimenten fallas, finalmente establecer una alerta visual dirigida a los operadores a través del sistema SCADA; mientras que la función de protección dinámica se vale de voltaje en bucle para supervisar que la tensión de suministro a los usuarios no sufra perturbaciones ocasionadas por rayos.

3.14 RESTAURACIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En el trabajo [38] los autores proponen un modelo descentralizado para la restauración inteligente de energía en sistemas de distribución eléctricos con prestación del servicio a cargas de alta prioridad. La filosofía de operación del modelo propuesto consiste en descentralizar la toma de decisiones en los sistemas de distribución mediante su zonificación y equipamiento con agentes de zona programados con técnicas de Q-Learning, hábiles para atender protocolos de comunicación, coordinación y toma de decisiones entre sí que durante la ocurrencia de eventos de falla les permita a través de múltiples iteraciones, encontrar la combinación de maniobras en el sistema mejor calificada para mantener aislada la zona de falla y a su vez restaurar de forma segura el servicio de energía a las demás zonas afectadas en función de la capacidad disponible en el sistema, de acuerdo a variables de diseño como la calificación de prioridad de cargas, la maximización del número de cargas restauradas y la integración generadores distribuidos, respetando las restricciones operativas del sistema.

[38] Kalysh, *et al.,* “Machine Learning-based Service Restoration Scheme for Smart Distribution Systems with DGs and High Priority Loads,” *2019 Int. Conf. Smart Energy Syst. Technol.*, 2019, pp. 2–7.

3.15 ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

En [39] los autores formulan un modelo alternativo para el análisis y la predicción de armónicos en sistemas de distribución de energía diseñado usando técnicas de redes neuronales artificiales. El entrenamiento del algoritmo propuesto se realiza mediante el procesamiento de variables de tensión, corriente, entre otros parámetros de calidad de energía medidos en las tres fases de una red eléctrica, obteniendo un modelo altamente eficiente en el proceso de predicción de valores de distorsión armónica presentes en cada fase de la red de distribución. Este algoritmo puede ser útil para las compañías eléctricas en las etapas de decisión, para mitigar efectos indeseados que afectan directamente la calidad del servicio.

3.16 DISEÑO DE DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ALTERNATIVOS

La revisión realizada por [40] expone una serie de modelos basados en IA y AA diseñados con el propósito de identificar nuevas composiciones de materiales que permitan el desarrollo de batería alternativas con mayores índices de rendimiento, durabilidad y menor contaminación que los dispositivos tradicionales. Los algoritmos combinan técnicas como redes neuronales, máquina de soporte vectorial, perceptrón multicapa, entre otras, y son entrenados con bases de datos alimentadas con resultados de experimentos de laboratorio para la caracterización de materiales, permitiendo predecir con precisión el comportamiento de determinadas combinaciones de materiales que definen la composición y

[39] Paracha, Z.; Kalam, A. y Ali, R., “A novel approach of harmonic analysis in power distribution networks using artificial intelligence,” *2009 Int. Conf. Inf. Commun. Technol.*, 2009, no. 2, pp. 4–7.

[40] Barrett, D. y Haruna, A., “Artificial intelligence and machine learning for targeted energy storage solutions,” *Curr. Opin. Electrochem.*, 2020, vol. 21, pp. 160–166.

estructura final del nuevo dispositivo de almacenamiento, reduciendo los tiempos y costos experimentales tradicionales.

Como limitación operacional, las bases de datos para entrenamiento de estos modelos son relativamente limitadas, razón por la cual, las comunidades científicas promueven la creación de plataformas y bibliotecas para la transferencia de información referente a experimentos realizados, incluidos aquellos con resultados fallidos, que sean de utilidad para la investigación de nuevas composiciones de baterías.

3.17 PREDICCIÓN DEL PRECIO DE VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA

En [41] los autores proponen una iniciativa para predecir a través IA el precio de oferta diario de energía eléctrica por parte de los principales agentes de generación hidráulica y térmica en el mercado de energía mayorista colombiano. La metodología propuesta considera reglas de comportamiento de los agentes, factores externos que inciden en el comportamiento de las centrales generadoras como el volumen de embalses, demanda comercial atendida en bolsa, precio de bolsa del día anterior, precio del gas, precio del carbón, entre muchos otros, y posteriormente asigna un porcentaje de incidencia para así poder estimar el precio diario de venta de energía en bolsa.

Finalmente, la evaluación del modelo propuesto revela que, aunque se obtuvo estimaciones de precios aproximadas a los valores reales de algunas generadoras, en general no fue posible estimar con eficiencia el precio ofertado por cada agente debido a la imprecisión que conlleva generalizar la incidencia que

[41] Hurtado, L.; Quintero, O. y García, J., “Estimación del precio de oferta de la energía eléctrica en Colombia mediante inteligencia artificial,” *Rev. Métodos Cuantitativos para la Econ. y la Empres.*, vol. 18, pp. 54–87, 2014, [Online]. Available: http://hdl.handle.net/10419/113876.

ejerce cada variable externa en el proceso de generación y venta de energía, haciendo de esta estrategia de estimación de precios una alternativa en desarrollo, en la que es necesario reevaluar aspectos del modelado que permitan mejorar la fiabilidad de sus resultados.

4 CLASIFICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y MACHINE LEARNING IMPLEMENTADAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

En este capítulo se expone a través de tablas resumen la información relevante de las estrategias de IA y ML contenidas en las referencias bibliográficas objeto de la revisión literaria desarrollada en el capítulo tres del presente trabajo.

4.1 MANTENIMIENTO Y TOMA DE DECISIONES EN LA RED ELÉCTRICA

Tabla 1. Estrategias para mantenimiento y toma de decisiones en la red eléctrica.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
15	Clasificación de fallas en circuitos alimentadores	Aprendizaje automático supervisado	Clasificación, predicción	probabilidad de falla, eventos extraños, vulnerabilidad de alimentadores
15	Clasificación de falla en cables, uniones, terminales y transformadores	Aprendizaje automático supervisado	Clasificación, predicción	Probabilidad de falla, vulnerabilidad de componentes
15	Modelado de tasa de fallas, tiempo medio entre fallas	Algoritmo de regresión, árbol de clasificación, análisis estadístico	Categorización predicción	Cálculo de MTBF y tasa de falla, probabilidad de falla, clasificación por relevancia de documentos
15	Clasificación vulnerabilidad de eventos en pozos de inspección	Aprendizaje automático supervisado	Clasificación, predicción	Predecir ocurrencia de eventos extraños dentro de pozos, clasificación por relevancia de docs.

Fuente: Autor. (2020)

4.2 ESTRATEGIAS DE DETECCIÓN, IDENTIFICACIÓN Y UBICACIÓN DE FALLAS EN LA RED ELÉCTRICA

Tabla 2. Estrategias para detección, identificación y ubicación de fallas eléctricas.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
17	Modelo de gestión para la detección, identificación y localización de fallas en sistemas de energía	Aprendizaje automático, Descomposición en busca de patrones, diccionario atómico gaussiano, Algoritmo de agrupamiento híbrido	Detección, identificación, localización, optimización	Medición y caracterización de señales de frecuencia para detección e identificación de fallas; Medición y caracterización de señales de voltaje para localización de fallas

Fuente: Autor. (2020)

4.3 ESTRATEGIAS DE GESTIÓN DE MICRO REDES ELÉCTRICAS

Tabla 3. Estrategias para la gestión eficiente de micro redes eléctricas.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
18	Modelo de gestión para programación de micro redes eléctricas con generación solar fotovoltaica	Aprendizaje automático por refuerzo, Q learning	Programación, optimización	Programación de uso de batería de acuerdo con pronósticos diarios de demanda, capacidad de generación y precio de mercado de electricidad

Tabla 3. Continuación.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
19	Modelo de gestión para programación de micro redes eléctricas con generación eólica	Aprendizaje automático por refuerzo, Q learning, cadena de Markov	Programación, optimización	Programación de uso de batería de acuerdo con pronósticos diarios de capacidad de generación, precio de mercado de electricidad, carga inelástica
20	Modelo de gestión para programación de micro redes eléctricas	Aprendizaje automático por refuerzo, Q learning	Programación, optimización	Programación de uso de baterías de acuerdo con pronósticos diarios de capacidad de generación, precio de mercado de electricidad, costo por degradación

Fuente: Autor. (2020)

4.4 ESTRATEGIAS PARA PRONÓSTICO DE ENERGÍAS RENOVABLES

Tabla 4. Estrategias para el pronóstico de generación de energía eólica.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
22	Diagnóstico y predicción de fallas en turbinas eólicas	Aprendizaje automático	Predicción, detección	Procesamiento de información en base de datos operativos del sistema SCADA
22	Predicción de generación eólica a corto plazo	Aprendizaje automático, regresión cuantil	Predicción, optimización	Consideración de temperatura ambiente, velocidad del viento

Tabla 4. Continuación.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
22	Modelo de pronóstico híbrido de doble etapa para programación y comercialización de energía eólica	Agrupamiento y probabilidad bayesiana, aprendizaje profundo	Clasificación, optimización	Pronóstico de potencia eólica para generación y comercialización en mercado eléctrico
22	Estrategia de comercialización de energía eólica en redes inteligentes	Aprendizaje automático por refuerzo	Clasificación, optimización, categorización de datos	Análisis de bases de datos de mercado eléctrico referente a energía producida y costos de energía

Fuente: Autor. (2020)

Tabla 5. Estrategias para el pronóstico de generación de energía solar.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
22	Modelo para pronóstico a corto plazo de generación de energía solar	Mínimos cuadrados recursivos	Predicción, categorización de datos	Uso de datos de medidor inteligente y demás componentes en subestación MT/BT
22	Sistema para determinar potencia máxima en micro red con energía solar	Aprendizaje profundo, lógica difusa	Detección	Consideración de datos meteorológicos (irradiancia solar y temperatura)
22	Sistema inteligente para predicción de energía solar con un día de anticipación	Aprendizaje profundo, lógica difusa	Predicción, programación	Consideración de modelos meteorológicos, demanda de carga, reducción de costos operativos

Fuente: Autor. (2020)

4.5 ESTRATEGIAS PARA GESTIÓN EFICIENTE DE MOVILIDAD ELÉCTRICA

Tabla 6. Estrategias para enrutamiento de VEs y maximización del rango.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
25	Ruta de VE eficiente energéticamente sin recuperación de energía, con carga en ruta	Aprendizaje profundo, Búsqueda basada en gráficos	Predicción, optimización	Predicción de la ruta más corta sin considerar recuperación de energía por frenado o pendientes descendientes, reconocimiento de puntos de carga en ruta a transitar
25	Ruta de VE eficiente energéticamente con recuperación de energía	Aprendizaje profundo, Búsqueda basada en gráficos	Predicción, optimización	Predicción de la ruta más corta considerando nivel de batería, recuperación de energía por frenado o pendientes descendientes
25	Ruta de VE eficiente energéticamente con variables de confort	Aprendizaje profundo, Búsqueda basada en gráficos	Predicción, optimización	Predicción de la ruta más corta considerando restricciones de tiempo del conductor, necesidad de recarga en ruta
25	Optimización de eficiencia del dispositivo de almacenamiento de energía	Programación matemática, aprendizaje automático	Optimización	Gestión de procesos de carga y descarga en supercondensadores de almacenamiento de energía

Fuente: Autor. (2020)

Tabla 7. Estrategias para gestión de la congestión de VEs.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
25	Software de navegación para predecir congestión en estaciones de carga y reducir tiempos de viaje	Optimización estocástica	Predicción, optimización	Retroalimentación con agentes externos para actualización de información en software y predecir congestión en estaciones de carga
25	Gestión de la congestión en estaciones de carga para minimizar tiempos de espera y carga	Búsqueda basada en gráficos, programación matemática	Predicción, optimización	Programación de carga, comunicación entre conductor y estación de carga, fijación de precios de carga, incentivo a VE por reserva y uso de ranuras de carga
25	Ubicación óptima de estaciones de carga	Búsqueda basada en gráficos, programación matemática, optimización heurística	Clasificación, optimización	Ubicación de puntos de carga en una red vial bajo restricción de nivel de batería del VE
25	Optimización del número de ranuras en una estación de carga, y energía disponible para entregar	Teoría de las probabilidades	Programación, optimización	Determinación óptima de número de ranuras por estación de carga y energía disponible basado en predicciones de demanda real

Fuente: Autor. (2020)

Tabla 8. Estrategias para gestión del balance de cargas VEs.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
25	Balance de cargas para reducir picos de demanda e impuesto al carbono	Programación matemática	Optimización, predicción, programación	Programa de carga VE híbridos, predicción por horas consumo de energía, reducción consumo de carbono
25	Programación de carga de conjuntos de VE para reducir picos de demanda	Coordinación de agentes basado en utilidades	Optimización, programación	Mantener carga en el rango del transformador de distribución, minimizar sobrecostos
25	Programación de carga de VEs según energías renovables disponibles	Programación matemática	Optimización, predicción, programación	Oferta y programa. de carga de VE según disponibilidad de generación de renovable

Fuente: Autor. (2020)

Tabla 9. Estrategias para gestión de mercado de energía de VEs.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
25	Estrategia de participación para licitar en mercado eléctrico con una hora de anticipación	Programación matemática, optimización estocástica	Optimización, programación	Operación de mercado con una hora de anticipación para carga de VEs, estimación de demanda de VEs incierta
25	Asignación de unidades de energía a agentes (dueños de VE) con intereses privados	Subastas, Coordinación de agentes basado en utilidad	Optimización, programación	Estimulo de reserva de ranura para carga de VE colectivos, ofrecer rentabilidad a los colectivos de VE

Fuente: Autor. (2020)

Tabla 10. Estrategias para fijación de precios de congestión de VEs.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
25	Programación de tarifas de carga por regiones para minimizar picos de demanda	Coordinación de agentes basado en utilidades, teoría de juego	Optimización, programación	Definición de tarifa de energía por regiones en la red, disminución de congestión en la red
25	Programación de cobro utilizando precios fijos y precios de congestión para reducir picos y costo	Coordinación de agentes basado en utilidades	Optimización, programación	Definir precios fijos hasta número máximo de VE, definir precios de congestión para inducir a VEs a buscar otra estación de carga

Fuente: Autor. (2020)

Tabla 11. Estrategias para gestión de sistema V2G

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
25	Equilibrio de oferta y demanda de energía, minimizar costos	Aprendizaje automático	Optimización	Uso de colectivo de VEs para equiparar oferta y demanda de VE hacia la red
25	Carga y descarga de VEs para aprovechamiento de energías renovables	Programación matemática	Optimización, programación	Intercambio de energía entre VEs y red eléctrica, carga de energía desde fuentes renovables y venta al mercado eléctrico en horas pico, rentabilidad para VEs, reducir emisiones CO2

Tabla 11. Continuación.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
25	Coaliciones de VEs para participar en mercados de energía y maximizar ingresos	Teoría de juegos, subastas	Optimización, programación	Venta de energía de VEs a mercado eléctrico mediante coaliciones para alcanzar valores mínimos en transacciones de energía

Fuente: Autor. (2020)

4.6 ESTRATEGIAS PARA CONSUMO EFICIENTE DE ENERGÍA A NIVEL RESIDENCIAL

Tabla 12. Estrategias para consumo eficiente de energía a nivel residencial.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
27	Modelo de predicción del nivel de confort de usuarios residenciales conectados a la red eléctrica inteligente	Aprendizaje automático, máquina de soporte vectorial, perceptrón multicapa, clasificador bayesiano	Optimización, predicción	Cuestionario a usuarios sobre nivel de comodidad de uso de principales dispositivos de consumo (aire acondicionado, lavadora, secadora, cocina, lavavajillas) para diferentes configuraciones de uso combinado y horario

Fuente: Autor. (2020)

4.7 ESTRATEGIAS PARA DIAGNÓSTICO DE ERRORES EN MEDIDORES DE ENERGÍA

Tabla 13. Estrategias para diagnóstico de errores en medidores de energía.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
28	Modelo de predicción de fallas del medidor de energía basado en aprendizaje automático	Máquina de soporte vectorial, regresión logística, clasificador bayesiano ingenuo	Agrupamiento, clasificación, predicción	Caracterización de información recolectada durante proceso de medición para detección de errores

Fuente: Autor. (2020)

4.8 ESTRATEGIAS PARA DETECCIÓN DE ROBO Y PÉRDIDAS TÉCNICAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Tabla 14. Estrategias para detección de robo y pérdidas técnicas de energía.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
29	Modelo para la detección inteligente de robo de electricidad	Regresión logística, algoritmo K-NN, máquina de vectores, redes neuronales	Detección, clasificación	Reducción imprevista en consumo de energía, señales digitales de manipulación emitidas por medidor inteligente
29	Modelo para predecir pérdidas técnicas de energía el sistema eléctrico	análisis de regresión difusa con algoritmos genéticos	Predicción, optimización	Estimación de pérdidas de energía en función del flujo total circulante de energía en la red

Fuente: Autor. (2020)

4.9 ESTRATEGIAS DE SEGURIDAD CIBERNÉTICA EN LA RED ELÉCTRICA INTELIGENTE

Tabla 15. Estrategias para seguridad cibernética de la red inteligente.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
31	Seguridad cibernética, detección de intrusos y anomalías	Aprendizaje automático, minería de datos	Detección, reconocimiento de patrones	Detección de ataques basado en firmas, comportamientos inesperados del sistema, hallazgo de patrones desconocidos
31	Seguridad cibernética y detección de inyección de datos falso	Aprendizaje automático, análisis con wavelet	Detección, reconocimiento de patrones	Reconocimiento de datos incorrectos, reconocimiento de dominio, inyección de datos falsos
31	Detección de robo de energía	Aprendizaje profundo, teoría de juego	Detección, reconocimiento de patrones	Detección de anomalías en la infraestructura de medición avanzada
32	Sistemas de detección de ataques cibernéticos con métodos supervisados y semi supervisados	Aprendizaje automático, máquina de vectores, perceptrón multicapa	Detección, clasificación	Clasificación de medidas como seguras o atacadas según mediciones de vectores, análisis de muestras linealmente separables
32	Detección de ataques cibernéticos en tiempo real	Aprendizaje automático no supervisado, perceptrón	Detección, clasificación	Observación de medidas del sistema sin procesar en tiempo real

Fuente: Autor. (2020)

4.10 ESTRATEGIAS DE ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Tabla 16. Estrategias de análisis de confiabilidad en sistemas de distribución.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
34	Modelo de análisis de confiabilidad de sistemas de energía	Aprendizaje automático supervisado, Redes neuronales artificiales, perceptrón multicapa	Optimización, identificación, Diagnóstico	Estimación precisa de índices de confiabilidad, modelado de sistemas complejos, grandes cálculos, tiempos de respuesta cortos

Fuente: Autor. (2020)

4.11 ESTRATEGIAS DE MONITOREO Y VALORACIÓN DE ESTADO DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Tabla 17. Estrategias de monitoreo y valoración de estado del sistema eléctrico.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
35	Monitoreo y valoración de estado del sistema eléctrico	Algoritmo de memoria de largo plazo (LSTM)	Optimización, identificación, Diagnóstico	Comparación de parámetros de diseño con valores medidos en operación, clasificación de estado en categorías de operación normal, vigilancia o crítico

Fuente: Autor. (2020)

4.12 ESTRATEGIAS DE DETECCIÓN INTELIGENTE DE PROBLEMAS ELÉCTRICOS BASADO EN TERMOGRAFÍA

Tabla 18. Estrategia de detección de problemas eléctricos basado en termografía.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
36	Detección inteligente de problemas eléctricos basado en inspecciones termográficas	Aprendizaje supervisado, Redes neuronales artificiales, máquina de vectores, lógica difusa, árboles de decisión, algoritmo K-NN	Clasificación, detección, optimización	Segmentación de imágenes de interés con entornos irrelevantes, clasificación de fallas, eliminación de ruidos del entorno de operación en imagen térmica

Fuente: Autor. (2020)

4.13 ESTRATEGIAS PARA PRONÓSTICO DE FALLAS Y PROTECCIÓN DINÁMICA CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Tabla 19. Estrategias para pronóstico de fallas contra descargas atmosféricas.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
37	Pronóstico de fallas y protección dinámica contra descargas atmosféricas en redes inteligentes	Redes neuronales artificiales, sistemas expertos	Predicción, detección, clasificación	Detección de rayos en tiempo real, pronóstico de fallas, controlar tensión de salida de fuentes durante descargas atmosféricas.

Fuente: Autor. (2020)

4.14 ESTRATEGIAS DE RESTAURACIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Tabla 20. Estrategias de restauración de energía en sistemas de distribución.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
38	Restauración inteligente de energía en sistemas de distribución de energía eléctrica	Q-Learning	Restauración, identificación, optimización	Restaurar servicio en cargas de alta prioridad, gestión de generadores distribuidos, maximizar usuarios restaurados, cumplimiento de restricciones operativas

Fuente: Autor. (2020)

4.15 ESTRATEGIAS PARA PREDICCIÓN DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA

Tabla 21. Estrategias de análisis y predicción de armónicos en sistemas de distribución.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
39	Análisis y Predicción de armónicos en sistemas de distribución mediante algoritmos de IA	Aprendizaje automático supervisado, redes neuronales artificiales, perceptrón multicapa	Identificación, predicción	Procesamiento de parámetros de calidad de energía del sistema eléctrico, predicción de valores de armónicos en cada fase del sistema

Fuente: Autor. (2020)

4.16 ESTRATEGIAS PARA DISEÑO DE DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Tabla 22. Estrategias para diseño de dispositivos de almacenamiento de energía

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
40	Desarrollo acelerado de baterías de litio con mayor capacidad y vida útil prolongada	máquina de vectores, árbol de decisión, regresión de cresta, bosque aleatorio	Clasificación, identificación, predicción, optimización	Clasificar propiedades de materiales de diseño, predicción energética de componentes y vida útil de baterías
40	Predecir propiedades electroquímicas y combinaciones de materiales de nuevos modelos de baterías	Redes neuronales artificiales	Clasificación, identificación, predicción, optimización	Clasificar propiedades de materiales, predicción energética de componentes y vida útil de baterías

Fuente: Autor. (2020)

4.17 ESTRATEGIAS PARA PREDECIR EL PRECIO DE VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA

Tabla 23. Estrategias para predecir el precio de venta de electricidad en Colombia.

Cita bibl.	Propósito de la estrategia	Técnica de diseño	Categoría	Criterios de diseño
41	Predicción del precio de venta de electricidad en Colombia	Lógica difusa, redes neuronales artificiales	Predicción, estimación, identificación	Precio de bolsa del día anterior, coste marginal, volumen del embalse, disponibilidad de la central, precio de gas y carbón

Fuente: Autor. (2020)

4.18 CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE IA Y AA IMPLEMENTADAS EN EL DISEÑO DE ESTRATEGIAS REVISADAS

Tabla 24. Clasificación de estrategias de IA y AA según técnicas de diseño implementadas.

#	Técnica de diseño	Cita
1	Aprendizaje automático supervisado	15, 17, 18, 19, 22, 25, 32, 34, 36, 39, 40
2	Aprendizaje profundo	22, 25, 29, 34, 36
3	Agrupamiento y probabilidad gaussiana	22
4	Algoritmo de agrupamiento híbrido	17
5	Algoritmo de memoria a largo plazo (LSTM)	35
6	Algoritmo de regresión	15
7	Algoritmo K-NN	29, 36
8	Análisis con Wavelet	22
9	Análisis de regresión difusa con algoritmos genéticos	30
10	Árbol de decisión	15, 36, 40
11	Búsqueda basada en gráficos	25
12	Cadena de Markov	19
13	Clasificador bayesiano	27, 28
14	Coordinación de agentes basado en utilidades	25
15	Diccionario atómico gaussiano	17
16	Lógica difusa	22, 36, 41
17	Máquina de soporte vectorial	27, 28, 29, 32, 36, 40
18	Minería de datos	22
19	Mínimos cuadrados recursivos	22

Tabla 24. Continuación.

#	Técnica de diseño	Cita
20	Optimización estocástica	25
21	Optimización heurística	25
22	Perceptrón multicapa	27, 32, 34, 39, 40
23	Programación matemática	25
24	Q-Learning	18, 19, 20, 38
25	Redes neuronales artificiales	29, 34, 36, 37, 39, 40, 41
26	Regresión Cuantil	22
27	Regresión de cresta	38
28	Regresión logística	28, 29
29	Sistemas Expertos	37
30	Subastas	25
31	Teoría de las probabilidades	25
32	Teoría de juegos	22, 25

Fuente: Autor. (2020)

5 CONCLUSIONES

- La etapa de transición que experimentan los sistemas eléctricos tradicionales hacia las redes eléctricas inteligentes implica la integración eficiente de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en los variados procesos de la cadena de energía, perfilándose como una herramienta tecnológica de alto impacto capaz de promover el crecimiento, la productividad e innovación del sector eléctrico gracias a su nivel de adaptabilidad y emulación de conocimiento.

- La versatilidad ofrecida por la inteligencia artificial y el aprendizaje automático desempeña un papel muy importante en la gestión de redes eléctricas inteligentes gracias a la posibilidad de diseñar estrategias eficientes para las múltiples etapas del sistema, capaces de manejar los complejos y dinámicos escenarios de operación, incorporar nuevas tecnologías, implicar nuevos actores del proceso y analizar grandes cantidades de información en tiempo real, reflejándose en la prestación del servicio eléctrico de calidad.

- El empleo de inteligencia artificial y aprendizaje automático en los sistemas eléctricos permite ejecutar políticas de operación que conlleven a la obtención de beneficios de tipo administrativo (toma de decisiones basada en análisis completos), técnico (eficiencia de procesos), ambiental (óptima gestión de energías renovables, reducción de emisiones de carbono), económico (reducción de tiempos y costos de producción), entre muchos otros, promoviendo un uso más eficiente de la energía eléctrica.

- El desarrollo de estrategias de inteligencia artificial al servicio del sistema eléctrico requiere de un alto compromiso a nivel gerencial, fundamentado en la

considerable inversión a destinar en componentes tecnológicos de alta precisión al inicio del proyecto, y la obtención de los beneficios esperados a mediano plazo debido a los tiempos necesarios para la creación de bases de datos, el diseño y entrenamiento de estrategias, para finalizar con la evaluación de resultados de dichas estrategias.

- La principal limitación operativa que afecta la precisión de las estrategias de inteligencia artificial se relaciona con la calidad y cantidad de datos de análisis, por lo que su implementación en los sistemas eléctricos requiere el acompañamiento de robustos sistemas de medida y comunicación que ofrezcan eficiencia en los procesos de medición, transmisión y almacenamiento de datos.

- Si bien las tecnologías de inteligencia artificial han alcanzado un nivel de madurez suficiente para su adopción en el sistema eléctrico, aún cuentan con un amplio margen de mejora teniendo en cuenta que las redes eléctricas inteligentes están en etapa temprana de construcción, dando espacio al perfeccionamiento de sus técnicas resultante de continuos avances tecnológicos.

- La adopción estratégica de la inteligencia artificial dentro del sistema eléctrico ofrece un impacto positivo tanto en la industria como en trabajadores, ya que permitirá establecer procesos de producción más robustos, seguros y confiables, y a su vez trabajadores más competentes que fortalecen sus habilidades en tecnologías digitales adquiridas mediante capacitación e interacción con el sistema.

6 LÍNEAS POTENCIALES DE INVESTIGACIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

- Proponer la creación de grupos de trabajo de inteligencia artificial encargados de promover la investigación y capacitación en el área, para así impulsar mediante estrategias inteligentes la transformación tecnológica y el aumento de productividad del sector eléctrico, y de igual manera apoyar procesos de innovación de disciplinas relacionadas.

- Analizar la implementación de la inteligencia artificial dentro de las iniciativas de redes inteligentes en el sistema eléctrico colombiano promovidas por la Unidad de Planeación Minero Energética -UPME- y empresas líderes del sector eléctrico a través de proyectos piloto dirigidos a áreas de interés como la gestión de activos, gestión de cargas, e integración de generación distribuida.

- Siendo la seguridad cibernética el área de mayor aplicación de inteligencia artificial en la industria nacional, es importante revisar el proceso y resultados obtenidos en su implementación para que mediante los conocimientos adquiridos sea posible adaptar eficientemente dichas estrategias inteligentes de ciberseguridad al sistema eléctrico colombiano.

- Elaborar una hoja de ruta (local – regional - nacional) que plantee estrategias funcionales para la incorporación masiva de sistemas de movilidad eléctrico, priorizando definiciones de aspectos sensibles como la ubicación optima de estaciones de recarga, balanceo de cargas y precios de mercado, esto en función de la proyección de demanda de energía esperada por parte de la movilidad eléctrica, considerada como futura integrante del grupo de grandes consumidores a nivel nacional en mediano plazo.

- Se recomienda analizar en detalle los comportamientos y variables externas a las que se enfrentan las centrales generadoras de electricidad en Colombia, con el propósito de diseñar estrategias de inteligencia artificial que permitan predecir eficientemente los precios diarios ofertados por los agentes del mercado de energía mayorista, debido a la dificultad y baja eficiencia resultante de iniciativas anteriores en el propósito de estimación de precios diarios de venta de energía

BIBLIOGRAFÍA

Barrett, Dean H., and Aderemi Haruna. 2020. “Artificial Intelligence and Machine Learning for Targeted Energy Storage Solutions.” *Current Opinion in Electrochemistry* 21: 160–66.

Bengio, Yoshua. 2016. “La Edad De Oro De La Inteligencia Artificial.” *Investigación y Ciencia*: 5–7.

Bose, Bimal K. 2017. “Artificial Intelligence Techniques in Smart Grid and Renewable Energy Systems - Some Example Applications.” *Proceedings of the IEEE* 105(11): 2262–73.

Chui, Michael et al. 2018. “Notes from the IA Frontier. Insights from Hundreds of Use Cases.” *McKinsey Global Institute*: 5–8.

Van Dam, Nick. 2019. “Nuevas Capacidades de Las Personas Para La Era Digital.” *IE Insights*. https://www.ie.edu/insights/es/articulos/nuevas-capacidades-de-las-personas-para-la-era-digital/.

Escobar Terán, Harold, M. Alcivar, and A. Puris. 2016. “Aplicaciones de Minería de Datos En Marketing.” *Revista Publicando* 3(8): 503–12.

Green, Robert C., Lingfeng Wang, and Mansoor Alam. 2013. “Applications and

Trends of High Performance Computing for Electric Power Systems: Focusing on Smart Grid." *IEEE Transactions on Smart Grid* 4(2): 922–31.

Gu, Guodong, Qingsu He, Bo Wang, and Bo Dai. 2018. "Comparison of Machine Learning Techniques for the Detection of the Electricity Theft." *Proceedings of 2018 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Internet of Things, CCIOT 2018*: 116–19.

He, Miao, Sugumar Murugesan, and Junshan Zhang. 2011. "Multiple Timescale Dispatch and Scheduling for Stochastic Reliability in Smart Grids with Wind Generation Integration." *Proceedings - IEEE INFOCOM*: 461–65.

Helong, Li, Yu Haibo, and Yuan Jinshuai. 2019. "Intelligent Energy Meter Fault Prediction Based on Machine Learning." *Proceedings - 2019 15th International Conference on Computational Intelligence and Security, CIS 2019*: 296–300.

Hossain, Eklas et al. 2019. "Application of Big Data and Machine Learning in Smart Grid, and Associated Security Concerns: A Review." *IEEE Access* 7: 13960–88.

Hurtado Moreno, Laura, Olga Lucía Quintero Montoya, and John Jairo García Rendón. 2014. "Estimación Del Precio de Oferta de La Energía Eléctrica En Colombia Mediante Inteligencia Artificial." *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa* 18: 54–87. http://hdl.handle.net/10419/113876.

IEEE, Xplore. 2017. "INTERNATIONAL STANDARD ISO / IEC / IEEE 24765." 2017: 29.

Ioaneş, Andrei, and Radu Tirnovan. 2019. “Power Grid Health Assessment Using Machine Learning Algorithms.” *2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, ATEE 2019*: 22–25.

Jayaraj, Saritha, Imthias Ahamed T P, and Bijuna Kunju K. 2020. “Application of Reinforcement Learning Algorithm for Scheduling of Microgrid.” *2019 Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*: 1–5.

Jiang, Huaiguang, Jun J. Zhang, Wenzhong Gao, and Ziping Wu. 2014. “Fault Detection, Identification, and Location in Smart Grid Based on Data-Driven Computational Methods.” *IEEE Transactions on Smart Grid* 5(6): 2947–56.

Kalysh, I et al. 2019. “Machine Learning-Based Service Restoration Scheme for Smart Distribution Systems with DGs and High Priority Loads.” *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*: 2–7.

Kuznetsova, Elizaveta et al. 2013. “Reinforcement Learning for Microgrid Energy Management.” *Energy The international journal* 59: 133–46.

Li, Bei, Siddharth Gangadhar, Samuel Cheng, and Pramode K. Verma. 2011. “Predicting User Comfort Level Using Machine Learning for Smart Grid Environments.” *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, ISGT Europe*: 1–6.

McCullom, Rod. 2019. “Inteligencia Artificial Contra El Alzhéimer.” *Investigación y Ciencia*.

Mogilenko, A.V. 2005. “Application of Artificial Intelligence Methods for Definition of Electric Power Losses.” *INTELEC 05 - Twenty-Seventh International Telecommunications Conference*: 595–99.

Niyato, Dusit, Ekram Hossain, and Afshin Fallahi. 2007. “Sleep and Wakeup Strategies in Solar-Powered Wireless Sensor/Mesh Networks: Performance Analysis and Optimization.” *IEEE Transactions on Mobile Computing* 6(2): 221–36.

Olivatti, Yuri, Cristiane Penteado, Plinio Thomaz Aquino, and Rodrigo Filev Maia. 2019. “Analysis of Artificial Intelligence Techniques Applied to Thermographic Inspection for Automatic Detection of Electrical Problems.” *2018 IEEE International Smart Cities Conference, ISC2 2018*.

Ozay, Mete et al. 2016. “Machine Learning Methods for Attack Detection in the Smart Grid.” *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* 27(8): 1773–86.

Paracha, Zahir J, Akhtar Kalam, and Rubbiya Ali. 2009. “A Novel Approach of Harmonic Analysis in Power Distribution Networks Using Artificial Intelligence.” *2009 International Conference on Information and Communication Technologies* (2): 4–7.

Pyle, Dorian, and Cristina San Jose. 2015. “An Executive’s Guide to Machine Learning.” *McKinsey Quarterly*: 2–3.

Rigas, Emmanouil S., Sarvapali D. Ramchurn, and Nick Bassiliades. 2015. “Managing Electric Vehicles in the Smart Grid Using Artificial Intelligence: A

Survey.” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16(4): 1619–35.

Rudin, Cynthia et al. 2012. “Machine Learning for the New York City Power Grid.” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 34(2): 328–45.

Saravanan, R, and Pothula Sujatha. 2018. “Algorithms : A Perspective of Supervised Learning Approaches in Data Classification.” In *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, IEEE, 945–49.

Shang, Yuwei et al. 2020. “Stochastic Dispatch of Energy Storage in Microgrids: An Augmented Reinforcement Learning Approach.” *Applied Energy* 261(December 2019): 114423. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114423.

Tong, Chong et al. 2017. “Artificial Intelligence-Based Lightning Protection of Smart Grid Distribution System.” *2017 International Symposium on Lightning Protection, XIV SIPDA 2017* (October): 279–86.

Ullah, Zaib, Fadi Al-Turjman, Leonardo Mostarda, and Roberto Gagliardi. 2020. “Applications of Artificial Intelligence and Machine Learning in Smart Cities.” *Computer Communications* 154(March): 313–23.

UPME “Unidad de Planeación Minero Energetica.” 2015. Ministerio de Minas y Energía *Integración de Las Energías Renovables No Convencionales En Colombia*.
http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf.

Yang, Li Bo. 2020. “Application of Artificial Intelligence in Electrical Automation Control.” *Procedia Computer Science* 166: 292–95. https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.097.

Zhou, Xue Song et al. 2010. “Research of Distribution System Reliability Based on Intelligence Algorithms.” *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2010* 2: 1060–63.