

**Análisis de técnicas en ciencia de datos aplicadas a la matriz energética renovable en
Colombia**

Fredy Ulices Olivares Velasco

Asesor

PhD(c). Freddy Alexander Torres Payoma

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI

Especialización en Ciencia de Datos y Analítica

2025

Agradecimientos

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento, en primer lugar, a Dios, por brindarme la oportunidad y la fortaleza necesarias para llevar a cabo este trabajo de especialización. Su guía constante me ha permitido enfrentar cada desafío en este camino académico.

A mis padres, por su amor incondicional y su apoyo constante en cada etapa de este proceso; su ejemplo y sabiduría han sido pilares vitales en mi formación personal y profesional. A mi esposa, por ser mi refugio en los momentos de incertidumbre, por su paciencia infinita y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Su amor y aliento han sido la luz que me ha guiado en los días más oscuros. A mis hermanos, familiares y amigos, por su compañía, palabras de aliento y por estar presentes en cada paso de este viaje. Su presencia ha sido un recordatorio constante de que no estoy solo en esta travesía. A todas las personas que, de alguna manera, brindaron su apoyo para culminar exitosamente mis estudios, les expreso mi más sincera gratitud.

Un agradecimiento especial al tutor Freddy Torres, por su orientación, guía y apoyo durante el desarrollo de este trabajo. Sé que sus consejos enriquecieron significativamente este proceso. Asimismo, agradezco a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, y a cada uno de los docentes que, a lo largo de mi formación profesional, contribuyeron a construir los cimientos de este logro, gracias por compartir su sabiduría y por fomentar en mí una actitud crítica y proactiva frente al aprendizaje.

Resumen

El presente trabajo aborda el análisis de técnicas en ciencia de datos aplicadas a la generación, transporte y distribución de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables, como la solar y la eólica, en el contexto de la transición energética en Colombia. Este proceso busca diversificar la matriz energética nacional, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y promoviendo fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER).

La implementación de modelos predictivos y algoritmos de inteligencia artificial permiten la predicción precisa de condiciones meteorológicas y la adaptación dinámica a las variaciones de la demanda energética, facilitando la integración de las FNCER al sistema interconectado nacional. De igual manera, la aplicación de técnicas de ciencia de datos contribuye a la planificación proactiva del mantenimiento de infraestructuras energéticas renovables, mejorando su eficiencia operativa y disponibilidad. De esta manera, se avanza hacia la construcción de un sistema energético más confiable, resiliente y sostenible a largo plazo, alineado con las metas nacionales de desarrollo sostenible y compromiso climático.

Palabras clave: Energías renovables, transición energética, ciencia de datos, machine Learning, inteligencia artificial.

Abstract

This study addresses the analysis of data science techniques applied to the generation, transmission, and distribution of electricity from renewable sources, such as solar and wind, within the context of Colombia's energy transition. This process aims to diversify the national energy matrix by reducing dependence on fossil fuels and promoting non-conventional renewable energy sources (NCRE).

The implementation of predictive models and artificial intelligence algorithms enables accurate forecasting of meteorological conditions and dynamic adaptation to variations in energy demand, facilitating the integration of NCRE into the national interconnected system. Additionally, the application of data science techniques contributes to proactive planning for the maintenance of renewable energy infrastructures, enhancing their operational efficiency and availability. In this way, progress is made toward building a more reliable, resilient, and sustainable energy system in the long term, aligned with national sustainable development goals and climate commitments.

Keywords: Renewable energy, energy transition, data science, machine learning, artificial intelligence.

Tabla de Contenido

Descripción del Problema	14
Planteamiento del Problema	14
Justificación	16
Objetivos	17
Objetivo General	17
Objetivos Específicos.....	17
Fundamentación Teórica.....	18
Energía	18
Energía Eléctrica	18
Ruta de la Energía Eléctrica.....	19
Generación	20
Fuentes de Energía Renovables	20
Hidráulica.....	20
Biomasa.....	21
Eólica	22
Solar	23
Tipos de Paneles Solares.....	24
Panel Solar Fotovoltaico.....	24
Panel Solar Térmico.....	24
Panel Solar Híbrido.....	25
Energía Geotérmica	25
Fuentes de Energía No Renovables	26

Combustibles Fósiles	27
Energía Sostenible	28
Generación de Energía Eléctrica en Colombia	29
Cogeneración	30
Autogeneración	30
Generación	30
Elementos de la Generación Eléctrica	30
Plantas de Generación.....	30
Turbinas y Generadores	31
Tipos de Turbinas	33
Turbina Hidráulica	33
Turbina Eólica.....	33
Turbina de Vapor	33
Turbina de Gas.....	33
Transmisión	34
Redes del Sistema Interconectado Nacional	34
Sistema de Transmisión Nacional (STN)	35
Sistema de Transmisión Secundaria (STS).....	35
Elementos de la Transmisión Eléctrica.....	37
Transformador	37
Transformador de Potencia	39
Transformador de Distribución.....	40
Transformador Elevador	40

Transformador Reductor	40
Autotransformador	40
Transformador de Aislamiento	40
Líneas de Transmisión	41
Distribución	41
ADD Oriente.....	42
ADD Centro	42
ADD Sur	42
ADD Occidente.....	43
Elementos Clave en la Distribución Eléctrica	43
Subestaciones.....	43
Protecciones Eléctricas	44
Transformadores de Corriente (CT).....	45
Transformadores de Voltaje (PT)	46
Monitoreo de Energía	47
Comercialización de la Energía Eléctrica	47
Entidades Participantes en el Sector Energético Colombiano	49
Política y Marco Legal para la Eficiencia Energética en Colombia	52
Aplicaciones de la Ciencia de Datos y Analítica en Energía Eléctrica Renovable	54
Predicción de Demanda Eléctrica	55
Mantenimiento Predictivo.....	56
Gestión de Energías Renovables.....	57
Operación de Redes Inteligentes (Smart Grids)	58

Detección de Pérdidas y Fraudes	59
Ciberseguridad Energética	60
Ciencia de Datos y Analítica en el Sector Energético Renovable Colombiano	61
Metodología	63
Llave de Búsqueda	64
Resultados	74
Artículos Científicos por Año	74
Fuente de Investigaciones de Artículos	75
Predominio General de "Energías Renovables" y "Energía Solar"	76
Interés en Combinaciones y Otras Fuentes Específicas	77
Menor Representación de Otras Fuentes	77
Técnicas Empleadas en las Investigaciones	78
Liderazgo de las Redes Neuronales	78
Importancia de la Simulación y Optimización	79
Uso de Algoritmos de Aprendizaje Automático (Machine Learning)	79
Otras Técnicas Relevantes	80
Nube de Palabras	81
Diagrama de Barras Apiladas	82
Observaciones Clave y Tendencias	82
Heapmap Fuentes de Energía por Técnicas Empleadas	84
Prueba Chi Cuadrado de Independencia	85
Conclusiones	87
Recomendaciones	89

Referencias Bibliográficas	91
Apéndices.....	94

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Ruta de la Energía Eléctrica</i>	19
Figura 2 <i>Central Hidroeléctrica y sus Componentes</i>	21
Figura 3 <i>Generación Eléctrica a Través de Biomasa</i>	22
Figura 4 <i>Generación de Electricidad a Partir de Energía Eólica</i>	23
Figura 5 <i>Sistema Generador Fotovoltaico</i>	23
Figura 6 <i>Central Geotérmica</i>	26
Figura 7 <i>Central Térmica</i>	27
Figura 8 <i>Central de Energía Nuclear</i>	28
Figura 9 <i>Fuentes de Generación de Energía Eléctrica en Colombia</i>	29
Figura 10 <i>Componentes de la Turbina</i>	32
Figura 11 <i>Sistema Interconectado Nacional en Colombia-(SIN)</i>	36
Figura 12 <i>Componentes del Transformador Eléctrico</i>	39
Figura 13 <i>Protecciones y Fusibles</i>	45
Figura 14 <i>Algunos Tipos de CT y PT</i>	46
Figura 15 <i>Componentes de la Tarifa de Energía Eléctrica en Colombia</i>	49
Figura 16 <i>Logos de Entidades Colombianas en el Sector Energético</i>	52
Figura 17 <i>Cantidad de Artículos Encontrados por Año</i>	75
Figura 18 <i>Artículos por Fuente de Energía</i>	76
Figura 19 <i>Técnicas Empleadas en las Investigaciones</i>	78
Figura 20 <i>Nube de Palabras de Técnicas Empleadas en las Investigaciones</i>	81
Figura 21 <i>Diagrama de Barras por Fuente de Energía</i>	82
Figura 22 <i>Heatmap Fuente de Energía por Técnicas</i>	85

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Participación de las Empresas Dentro del Sistema de Transmisión Nacional Colombiano</i>	37
Tabla 2 <i>Marco Normativo en Colombia</i>	52
Tabla 3 <i>Llave de Búsqueda</i>	65
Tabla 4 <i>Resumen de Estudios sobre Ciencia de Datos y Energías Renovables en Colombia</i>	66

Lista de Apendices

Apéndice A *Base de Datos Artículos Relacionados con Ciencia de Datos y Energías Renovables*

..... 94

Introducción

La diversificación de la matriz energética colombiana incluye fuentes de energía renovables como la solar, eólica y biomasa, que no solo contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también fortalece la seguridad energética del país, reduciendo dependencia histórica de fuentes hidroeléctricas y combustibles fósiles.

La ciencia de datos desempeña un papel significativo al permitir la optimización y gestión eficiente de los recursos energéticos. A través del análisis de grandes volúmenes de datos, el modelado predictivo y la inteligencia artificial, es posible mejorar la planificación, el monitoreo y la integración de energías renovables en la red eléctrica. Esto facilita la toma de decisiones estratégicas en la gestión de la oferta y la demanda energética, optimizando costos y minimizando riesgos asociados a la variabilidad de fuentes renovables.

La interacción entre las energías renovables y la ciencia de datos representa una oportunidad clave para la innovación y el desarrollo sostenible en Colombia, impulsando un modelo energético más eficiente, resiliente y respetuoso con el medio ambiente.

Descripción del Problema

En la actualidad, el uso de fuentes de energía renovables y sostenibles se ha vuelto una meta esencial, motivada por el desafío de mitigar los efectos del cambio climático y garantizar un acceso energético confiable a largo plazo. A pesar de los avances en la diversificación de la matriz energética, el país aún enfrenta desafíos relacionados con la intermitencia de las energías renovables, la modernización de la infraestructura y la necesidad de establecer políticas públicas que favorezcan su integración a gran escala.

La incorporación de energías renovables en la matriz energética colombiana no solo responde a la necesidad de mitigar los efectos del cambio climático, sino que también ofrece oportunidades para fortalecer la seguridad energética y reducir la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles. (Di Pietro, S, 2022). Sin embargo, su implementación requiere un enfoque integral que abarque desde el desarrollo tecnológico hasta la gestión eficiente de los recursos. En este sentido, la ciencia de datos y el aprendizaje automático han emergido como herramientas clave para optimizar la operación de sistemas energéticos, mejorar la predicción de la generación de energía y facilitar la toma de decisiones estratégicas en la planificación energética (Levicán, 2023).

Planteamiento del Problema

Históricamente, los recursos no renovables han sido elementales para el abastecimiento energético de Colombia, pero su explotación conlleva un impacto ambiental significativo y una dependencia de mercados internacionales que puede afectar la estabilidad económica del país. La transición energética representa una oportunidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, disminuir la vulnerabilidad frente a fenómenos climáticos extremos y fomentar el desarrollo sostenible (Palacios et al., 2020).

Este estudio busca analizar cómo la combinación de energías renovables y ciencia de datos puede impulsar la evolución del modelo energético colombiano hacia uno más sostenible, eficiente y resiliente. Además, se explorarán las oportunidades que ofrece el análisis de datos para mejorar la planificación energética, optimizar el uso de los recursos y promover un crecimiento económico sostenible basado en fuentes de energía limpias. Asimismo, se pretende responder al interrogante: ¿Cómo ha contribuido la ciencia de datos al análisis y la implementación de energías renovables en la matriz energética de Colombia?

Justificación

El mundo se enfrenta al desafío de sustituir progresivamente la forma de generar energía eléctrica, de combustibles fósiles por otro tipo de fuentes energéticas (Allal et al., 2024), con el aprovechamiento de estas fuentes se reduce el impacto producido por el cambio climático y se observa un crecimiento en los niveles de acceso al servicio eléctrico, realizando una transición energética que brinde soluciones a problemáticas presentes.

Es así como surgen nuevos desafíos para que este tipo de energías puedan garantizar un abastecimiento constante en industrias y ciudades, de manera sostenible y duradera, el sector de las energías renovables se reinventa constantemente, con métodos de investigación e innovación para adaptarse a una demanda cada vez mayor, realizando su producción en forma descentralizada, pero con el objetivo de llegar a cualquier parte donde se requiera (Levicán, 2023).

La ciencia de datos juega un papel vital al utilizar modelos estadísticos, matemáticos y de inteligencia artificial para anticipar condiciones ambientales y meteorológicas en la producción de energía eléctrica, abarcando fuentes como la solar, eólica, mareomotriz y termosolar (Paredes et al., 2020). Estos modelos anticipan factores climáticos, técnicos y geográficos, evaluando la implementación de sistemas energéticos (Di Pietro, S, 2022). El uso de técnicas de ciencias de datos, como el aprendizaje automático y el big data ha permitido procesar, almacenar y analizar información de diversos sensores e instrumentos para comprender el entorno y responder eficazmente, acercándose cada vez más a cumplir objetivos clave en el sector energético: un suministro sostenible, constante y adecuado.

Objetivos

Objetivo General

Analizar la implementación de técnicas en ciencia de datos en la matriz energética renovable evaluando la ruta energética en Colombia, en los últimos diez años.

Objetivos Específicos

Describir la ruta de la energía eléctrica identificando cada una de las etapas que la componen, así como los actores y elementos clave que intervienen en cada fase.

Investigar la configuración actual de la matriz energética colombiana, con énfasis en la participación de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), y su evolución en la última década.

Evaluar el potencial de la ciencia de datos en la planificación y monitoreo, al momento de la generación eléctrica utilizando fuentes de energía renovables.

Analizar estadísticamente la aplicación de la ciencia de datos en energías renovables en Colombia, identificando comportamientos y patrones relevantes.

Fundamentación Teórica

Energía

La energía se define como la capacidad de un cuerpo o sistema para generar cambios en sí mismo o en su entorno. Estos cambios pueden ser de naturaleza física o química, incluyendo desplazamientos, generación de calor, emisión de luz, reacciones químicas y transformaciones de estado, entre otros (Bordons et al., 2015). Según, Cardona & Cifuentes (2016) el concepto de energía está ligado a las interacciones cinéticas y potenciales que ocurren en la naturaleza y son esenciales para el sostenimiento de la vida. La energía es el motor detrás de todos los acontecimientos en el universo; cada transformación requiere la intervención de diversas formas de energía. Tanto los organismos vivos como las máquinas dependen de ella para crecer, desarrollarse y operar.

Energía Eléctrica

La energía eléctrica es una forma de energía altamente versátil y primordial en nuestra vida cotidiana, su capacidad para transformarse en luz, calor o movimiento la convierte en un fenómeno físico esencial en aplicaciones de ingeniería, desde la iluminación de hogares y el funcionamiento de electrodomésticos hasta el suministro de energía a grandes industrias y sistemas de transporte. Esta energía se genera a partir del movimiento de electrones a lo largo de un conductor y se mide en unidades como Joules (J) o electronvoltios (eV) (Paniagua & Duarte Pérez, 2021).

De Kuyper (2014) menciona que una de las características más destacada de la energía eléctrica es la capacidad de ser transportada de manera eficiente a través de redes eléctricas. Estas redes permiten que la electricidad generada en un lugar se distribuya a hogares, industrias y comercios en diferentes regiones. Aunque la energía eléctrica no se encuentra libremente en la

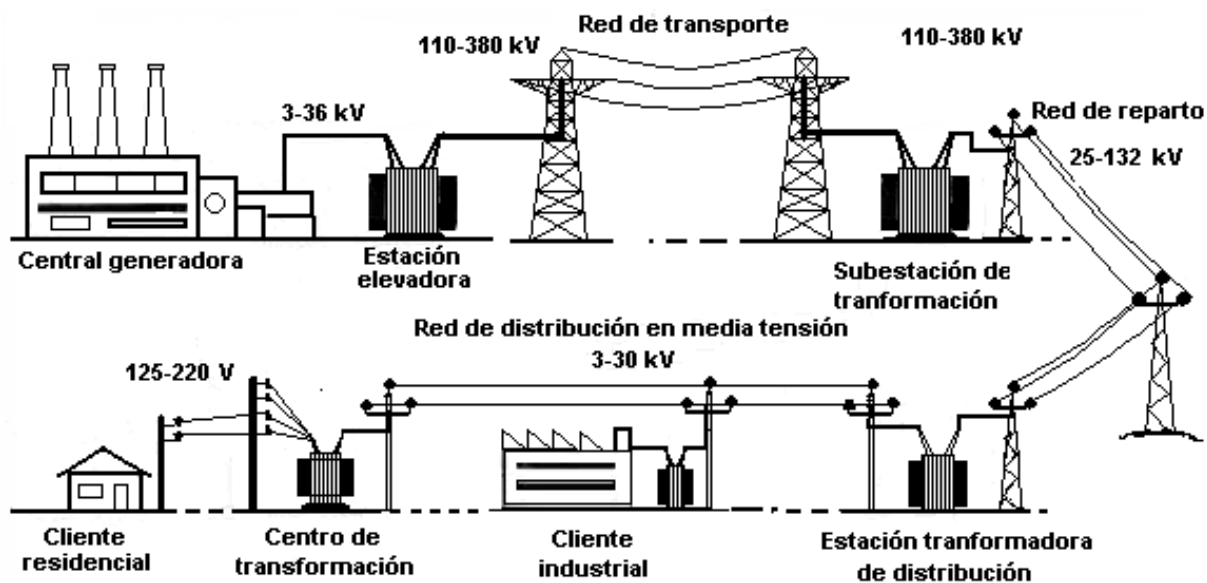
naturaleza y su manifestación en fenómenos como tormentas eléctricas no puede ser capturada, su producción en centrales eléctricas de fuentes renovables y no renovables, es esencial para garantizar un suministro constante y confiable, haciendo de la energía eléctrica un componente indispensable en nuestra vida diaria y en el funcionamiento de la industria moderna.

Ruta de la Energía Eléctrica

La ruta de la energía eléctrica detalla el camino que recorre la electricidad desde su producción hasta los lugares de consumo, como hogares, industrias y comercios. Este proceso se compone de cuatro etapas: generación, transporte o transmisión, distribución y comercialización, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Ruta de la Energía Eléctrica



Nota. El gráfico muestra la ruta de la energía eléctrica en Colombia, tomado de (*Transmisión de energía eléctrica: Wikipedia, 2022*).

Generación

La generación de energía eléctrica es el proceso de transformar diversas fuentes de energía en electricidad. Esta se produce en estaciones generadoras, y mediante transformadores, se eleva su voltaje para facilitar su transporte a largas distancias. Este paso representa el primer eslabón en la cadena de suministro de cualquier sistema eléctrico (Ramírez, 2023).

Existen diversas fuentes para generar electricidad de tipo renovables, no renovables y energía sostenible.

Fuentes de Energía Renovables

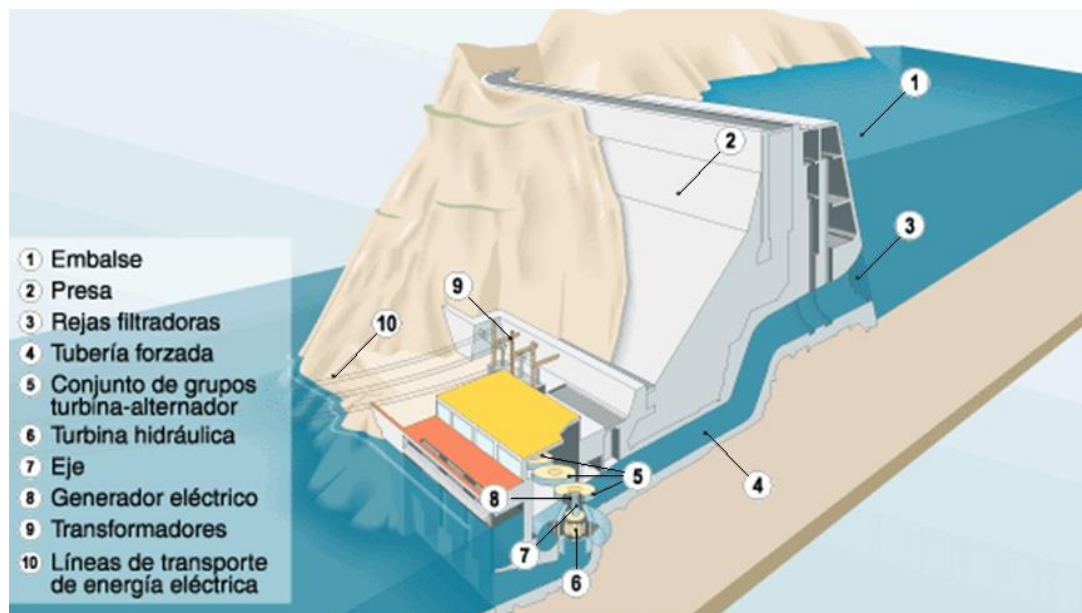
La generación de energía eléctrica mediante fuentes de energía renovables aprovecha recursos naturales que son inagotables o se regeneran rápidamente. Estas tecnologías son clave en la transición hacia un sistema energético más sostenible y menos dependiente de los combustibles fósiles, ayudando a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático (De Kuyper, 2014). Entre las fuentes renovables tenemos:

Hidráulica

Se produce aprovechando la energía potencial del agua almacenada en embalses o represas. Esta agua, al ser liberada, fluye a gran velocidad por conductos especiales llamados compuertas o canales de descarga, y su fuerza cinética es utilizada para mover turbinas hidráulicas acopladas a generadores eléctricos, los generadores transforman la energía mecánica en energía eléctrica, la cual puede ser transportada a través de redes de transmisión para su distribución y consumo, como se ilustra en la Figura 2, este proceso es altamente eficiente y no produce emisiones contaminantes directas, lo que convierte a la hidroeléctrica en una de las fuentes más limpias dentro del portafolio energético.

Figura 2

Central Hidroeléctrica y sus Componentes



Nota. La imagen muestra los componentes de una central hidroeléctrica, tomado de (*¿Cómo funciona una central hidroeléctrica?: Ingeoexpert, 2018*).

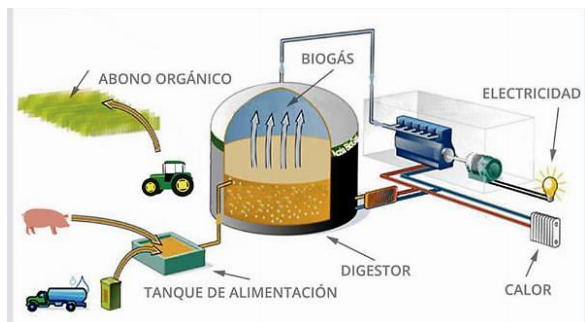
Biomasa

Es una fuente de energía renovable que aprovecha materia orgánica, como residuos vegetales y animales, para generar electricidad. A través de procesos termoquímicos y termoeléctricos, esta materia se transforma en energía útil. Entre sus principales formas se encuentran el bagazo, el biogás y el biodiésel (Martínez & Lora, 2015). En Colombia, el bagazo de caña de azúcar se utiliza para producir electricidad en ingenios azucareros, mientras que el biogás se genera a partir de residuos orgánicos mediante digestión anaeróbica, produciendo metano que puede utilizarse como combustible, el biodiésel, por su parte, se obtiene de aceites

vegetales o grasas animales y se utiliza como sustituto del diésel convencional en motores de combustión interna. En la Figura 3 podemos observar este proceso.

Figura 3

Generación Eléctrica a Través de Biomasa



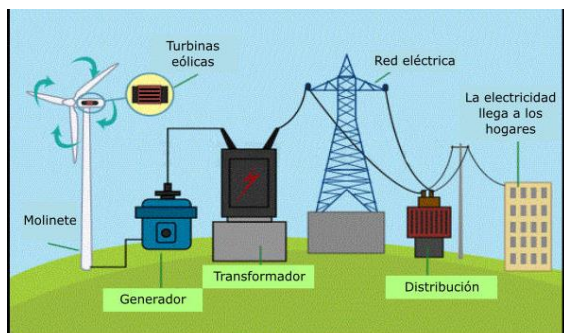
Nota. En la ilustración se observa el proceso de generación eléctrica a partir de la biomasa, tomado de (*La biomasa, fuente de energía renovable de gran potencial: Top Cable, 2014*).

Eólica

Se genera mediante el aprovechamiento de la fuerza del viento, que impulsa las aspas de los aerogeneradores, transformando su energía cinética en electricidad, proceso que se describe en la Figura 4. Este tipo de energía limpia ayuda a reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuye el impacto ambiental, (Arias et al. 2022).

Figura 4

Generación de Electricidad a Partir de Energía Eólica



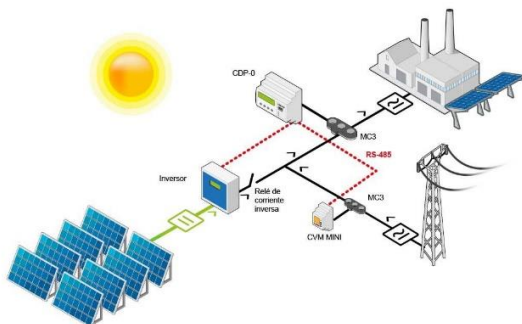
Nota. La imagen muestra un sistema de generación eólico, tomado de (*Aerogeneradores: Funcionamiento y Componentes: Siemens Gamesa, 2023*).

Solar

Se produce aprovechando la radiación del Sol para generar electricidad mediante procesos fotovoltaicos o termoelectrónicos. Dentro de sus variantes se encuentran la energía fotovoltaica, ilustrada en la Figura 5, que convierte la luz en electricidad, y la termosolar, que utiliza el calor solar para generar energía. (Paniagua & Duarte Pérez, 2021)

Figura 5

Sistema Generador Fotovoltaico



Nota. Ilustración de un sistema generador fotovoltaico, tomado de (*Sistema fotovoltaico: Prodergy Solar, s.f.*).

Tipos de Paneles Solares

Panel Solar Fotovoltaico

Noguera-Salas et al. (2018), definen un panel solar como un dispositivo encargado de captar los fotones de la luz solar, cuando la luz impacta sobre el silicio, los fotones liberan electrones en el material, lo que provoca el movimiento de estos electrones y, por tanto, la generación de corriente eléctrica, este proceso es conocido como el efecto fotovoltaico, dentro de los paneles solares fotovoltaicos también tenemos varios tipos:

Monocristalinos. Fabricados a partir de un único cristal de silicio, lo que les permite tener una alta eficiencia (entre el 18% y el 22%) y un rendimiento superior en condiciones de baja luz, aunque son más costosos, se destacan por su eficiencia y mejor desempeño en espacios reducidos.

Policristalinos. Están hechos de silicio que ha sido fundido y cristalizado en varios fragmentos, lo que resulta en paneles de menor eficiencia (15%-17%) pero a un precio más accesible, son ideales para instalaciones más grandes donde el costo es un factor determinante.

Flexibles, de Película Delgada o Células Amorfas. Se fijan a materiales como plásticos, tejidos o vidrios, lo que permite crear células fotovoltaicas con un espesor mucho menor que los paneles tradicionales. Esto resulta en un ahorro significativo en materias primas y, por lo tanto, en un precio más bajo. Sin embargo, su eficiencia es baja, lo que implica que se necesitarían instalar más paneles para generar la misma cantidad de energía.

Panel Solar Térmico

También conocidos como colectores solares, convierten la energía solar en energía térmica que puede utilizarse para calentar agua, climatizar piscinas o incluso generar vapor para procesos industriales. Su funcionamiento se basa en un colector solar compuesto por un

absorbedor, generalmente de color negro para maximizar la captación de luz solar, y un fluido térmico que circula por su interior. Cuando la radiación solar incide sobre el absorbedor, este se calienta y transfiere ese calor al fluido, el cual transporta la energía térmica hacia un sistema de almacenamiento o distribución, como un tanque de agua o una red de calefacción. (Noguera-Salas et al., 2018). Existen diferentes tipos entre los que tenemos:

Colector de Baja Temperatura. También llamado captador solar plano no protegido su uso principal es calentar agua sanitaria y calefacción, a una temperatura máxima hasta de 50 °C.

Colector de Media Temperatura. Incluye una envoltura transparente que evita la pérdida de calor, temperatura máxima de hasta 90 °C, mejora respecto al de baja temperatura gracias a su mejor aislamiento.

Colector de Alta Temperatura. Añade una segunda envoltura entre la anterior y el convertidor, con una temperatura máxima de hasta 150 °C, empleados principalmente para generar vapor para mover turbinas y producir electricidad.

Panel Solar Híbrido

Peña. (2019) señala que este tipo de panel combina las funciones del panel fotovoltaico y el térmico, permitiendo generar electricidad y calor al mismo tiempo. Esta tecnología optimiza el uso del espacio al unir ambos sistemas en un solo panel, aprovechando mejor la energía solar por metro cuadrado. Es ideal para lugares con alta demanda energética y espacio limitado, como viviendas, hoteles o piscinas climatizadas. Aunque todavía no es muy conocido, está ganando popularidad por su eficiencia y versatilidad.

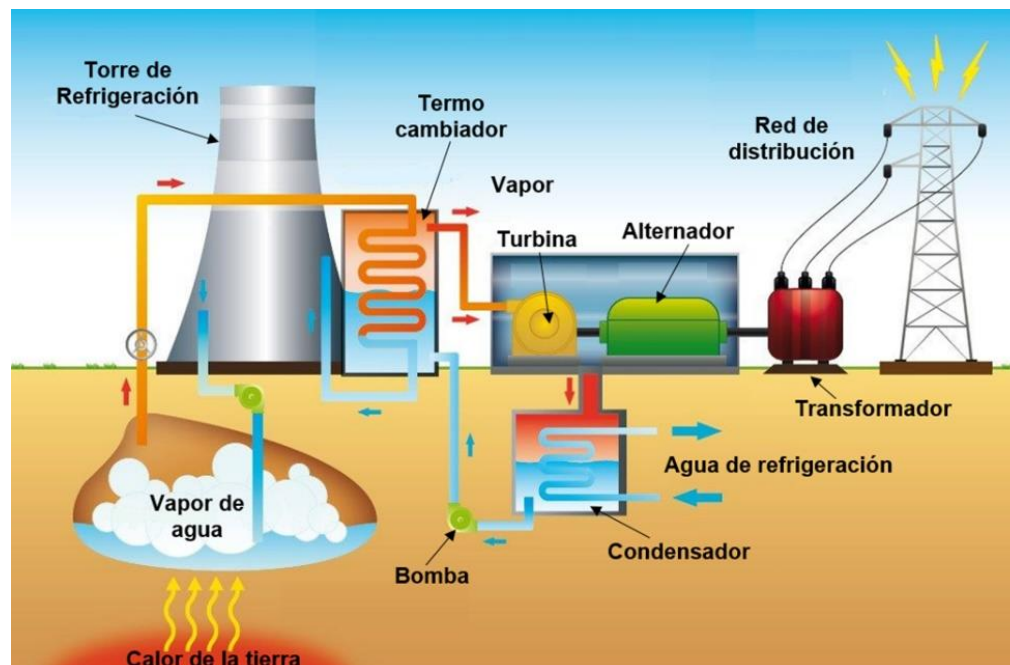
Energía Geotérmica

Se utiliza el calor del interior de la Tierra para generar electricidad. En estas centrales, el calor geotérmico se utiliza para calentar agua y producir vapor que acciona turbinas conectadas a

generadores, proceso descrito en la Figura 6. Este tipo de energía suele estar disponible en regiones con actividad geotérmica, como zonas volcánicas o con actividad tectónica. (Martínez & Lora, 2015).

Figura 6

Central Geotérmica



Nota. La imagen muestra un sistema generador de electricidad a partir de energía geotérmica, tomado de (*Energía geotérmica esquema: Esquema.net, s.f.*).

Fuentes de Energía No Renovables

Son recursos naturales limitados que no pueden regenerarse o reabastecerse en un tiempo corto una vez que se agotan. Estas fuentes de energía se formaron a lo largo de millones de años mediante procesos geológicos y químico. Arias et al. (2022) plantean que el uso de estas fuentes, aunque es esencial para satisfacer las necesidades energéticas actuales, conlleva desafíos ambientales como la emisión de gases de efecto invernadero y la contaminación, lo que impulsa

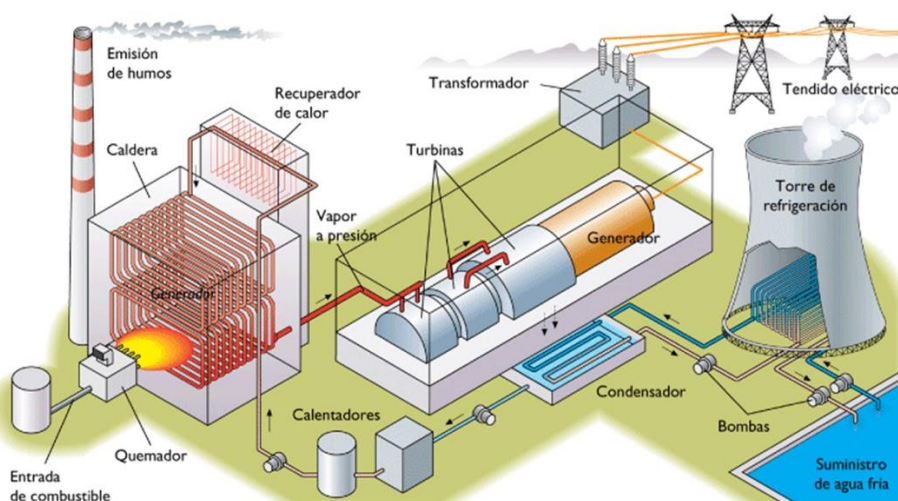
la búsqueda de fuentes de energía renovables más sostenibles. Dentro de este tipo de fuentes están:

Combustibles Fósiles

Martínez y Lora (2015), mencionan que son una fuente de energía no renovable obtenida a partir de materiales como el petróleo, el gas natural y el carbón, esquema ilustrado en la Figura 7. A través de procesos termoquímicos y termoelectrónicos, estos combustibles se convierten en electricidad. En Colombia, este tipo de generación es conocida como energía térmica.

Figura 7

Central Térmica



Nota. En la ilustración se observa el esquema de generación de electricidad a partir de combustibles fósiles, tomado de (*Esquema del funcionamiento de una central térmica: Otero, S. 2021*).

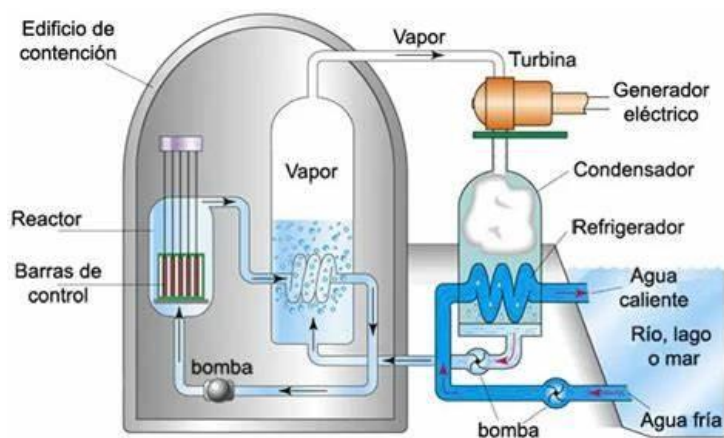
Energía Sostenible

Galeano (2023) propone que la energía nuclear a menudo se clasifica como una forma de energía sostenible, ya que puede generar electricidad de manera constante durante décadas, gracias a la alta densidad energética del uranio y los avances tecnológicos, las centrales nucleares pueden operar de forma continua por más de 40 o 50 años, proporcionando una fuente estable de energía que contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Esta energía se genera mediante la fisión nuclear, donde el núcleo de átomos pesados como el uranio se divide en átomos más pequeños, liberando una gran cantidad de energía en forma de calor. Este calor se utiliza para calentar agua y producir vapor que acciona turbinas conectadas a generadores, tal como se observa En la Figura 8.

Figura 8

Central de Energía Nuclear



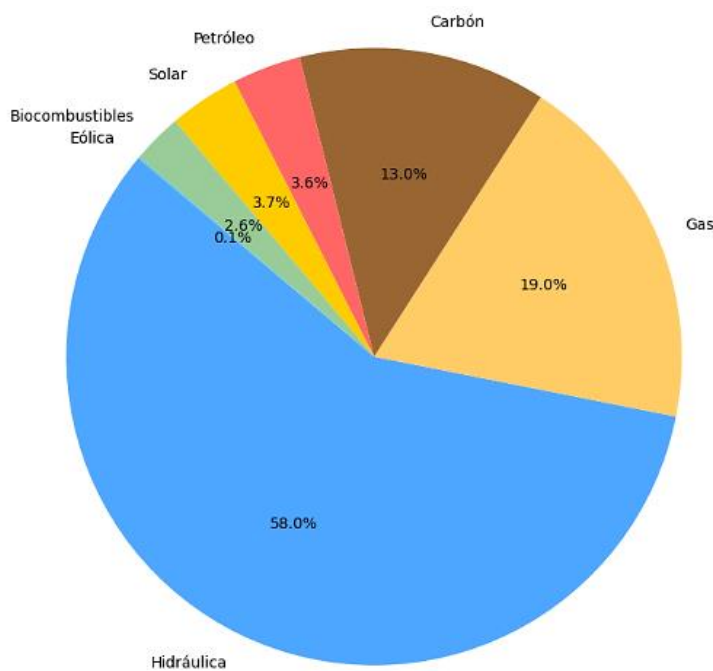
Nota. En la ilustración se muestra un sistema generador de energía nuclear, tomado de (*¿Cómo funciona una central nuclear de fisión?: Planas, O, 2022*).

Generación de Energía Eléctrica en Colombia

En Colombia se emplean fuentes de energía renovables y no renovables para la generación eléctrica, la fuente que mayor electricidad genera es la hidráulica con un 58%, los combustibles fósiles aún constituyen más de un 34%, entre estos, el gas es el que más contribuye con un 19%, seguido del carbón con un 13%, y el petróleo con el del 3.6%, la energía solar genera el 3.7% de la electricidad, el 2,6% es generada a través de los biocombustibles y por ultimo esta la eólica con un 0,1%, (Castillo,2024), datos que se resumen en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

Figura 9

Fuentes de Generación de Energía Eléctrica en Colombia



Nota: Esta imagen representa las principales fuentes de generación de la energía eléctrica en Colombia en el año 2024. Autor, 2025.

La generación eléctrica en Colombia también se puede clasificar según su principal actividad productiva como:

Cogeneración

Es un proceso que permite la producción simultánea de energía eléctrica y térmica dentro de una actividad productiva cuya principal función no es la generación de electricidad. La energía obtenida puede ser utilizada tanto para el consumo propio como para terceros, optimizando la eficiencia energética en sectores industriales y comerciales.

Autogeneración

Consiste en la producción de energía eléctrica con el objetivo principal de abastecer el consumo propio. En caso de generar excedentes, estos pueden ser entregados al Sistema Interconectado Nacional, contribuyendo al suministro energético general.

Generación

Se refiere a la producción de energía eléctrica como actividad principal. Dentro de esta categoría se incluyen las plantas menores, que cuentan con una capacidad instalada inferior a 20 MW. Sin embargo, los autogeneradores y cogeneradores quedan excluidos de esta clasificación.

Elementos de la Generación Eléctrica

Plantas de Generación

Constituyen el eje medular que permite la transformación de diversas fuentes de energía en la electricidad que impulsa el funcionamiento de la sociedad contemporánea. Este vasto entramado abarca desde grandes instalaciones de producción energética, como las centrales nucleares y las plantas térmicas que operan con combustibles fósiles (carbón, gas natural, petróleo) o mediante complejos procesos de fisión nuclear, hasta las modernas instalaciones dedicadas a las energías renovables, tales como extensos parques eólicos y campos solares

fotovoltaicos. Cada una de estas configuraciones posee sus propias particularidades técnicas y metodologías de operación, adaptadas a la naturaleza de su fuente primaria y a los requisitos de la red. Sin embargo, todas comparten el propósito primordial de asegurar un suministro de electricidad constante y fiable, indispensable para satisfacer las crecientes necesidades diarias de hogares, industrias, comercios y servicios, garantizando así el desarrollo y la estabilidad de la vida moderna (Palacios et al., 2020).

En Colombia, existe una variedad de instalaciones de generación eléctrica que abarcan tecnologías hidráulicas, térmicas y eólicas, operando tanto a gran escala como en proyectos más pequeños. Estas plantas están ubicadas estratégicamente dentro del sistema interconectado eléctrico, especialmente en las regiones noroeste y central del país, donde hay una abundancia de recursos naturales y una cercanía a los principales centros de consumo.

Turbinas y Generadores

Una turbina eléctrica es un dispositivo rotativo diseñado para convertir la energía cinética de un fluido en movimiento en electricidad. Este equipo cuenta con un rotor que posee aspas o paletas que giran al ser impulsadas por el fluido, mientras que el estator contiene bobinas que generan una corriente eléctrica al interactuar con el campo magnético del rotor, en la Figura 10 se representan sus principales componentes. Las turbinas eléctricas son fundamentales en centrales eléctricas y plantas de energía que utilizan diversas fuentes, como el agua, el viento o el vapor, para producir electricidad de manera eficiente.

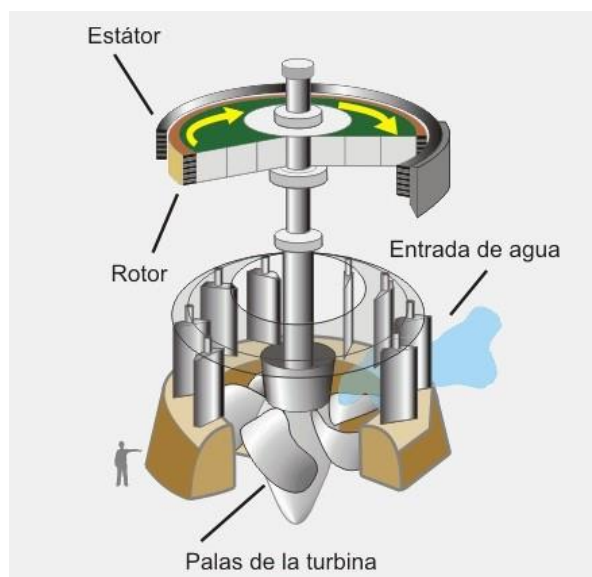
Un generador eléctrico es un aparato que transforma la energía mecánica en energía eléctrica utilizando el principio de la inducción electromagnética. Su funcionamiento se basa en el giro de un rotor, que es impulsado por una fuente de energía mecánica, como una turbina o un motor, dentro de un campo magnético (Martínez & Lora, 2015). Este movimiento genera una

corriente eléctrica en las bobinas de un estator, que puede ser utilizada para alimentar diferentes equipos y sistemas eléctricos. Según su diseño, los generadores pueden producir corriente continua (CC) o corriente alterna (CA), y son vitales en la producción de electricidad en plantas de energía, automóviles y diversas aplicaciones industriales.

Estos equipos varían según su aplicación y tipo de energía primaria utilizada. En entornos industriales, los generadores trifásicos son preferidos por su eficiencia. También se emplean ampliamente en energías renovables, como la eólica e hidroeléctrica, gracias a su adaptabilidad, su evolución ha mejorado el rendimiento y reducido las pérdidas energéticas.

Figura 10

Componentes de la Turbina



Nota. Imagen de una turbina eléctrica y sus componentes, tomado de (*Comunidad de Electricistas de Córdoba, s.f.*).

Tipos de Turbinas

Turbina Hidráulica

Aprovechan la energía del agua en movimiento para generar electricidad. En las centrales hidroeléctricas, el agua fluye a través de las turbinas, haciendo girar sus palas y generando electricidad, este tipo de turbina es eficiente y se utiliza principalmente en presas, ofreciendo una fuente de energía renovable que produce electricidad de forma continua mientras haya suficiente agua (Romero, 2017).

Turbina Eólica

Capturan la energía del viento mediante grandes palas aerodinámicas que giran con la fuerza del viento. Estas turbinas están ubicadas en parques eólicos, tanto en tierra como en el mar, son una fuente limpia y renovable de electricidad, aprovechando el viento constante para generar energía sin emisiones de carbono.

Turbina de Vapor

Convierten el vapor de agua caliente en electricidad, e vapor se genera a partir de la quema de combustibles como carbón o gas, o de la energía nuclear. Este vapor pasa por las palas de la turbina, haciendo que gire y produzca electricidad, este tipo de turbina es común en centrales térmicas, donde se requiere generar grandes cantidades de energía de manera constante (Martínez & Lora, 2015).

Turbina de Gas

Utilizan gases calientes generados por la quema de gas natural para mover sus palas y generar electricidad. Son rápidas y eficientes, especialmente en centrales de ciclo combinado, donde se combinan con turbinas de vapor para mejorar la eficiencia, son ideales para satisfacer demandas rápidas y cubrir picos de consumo energético.

Transmisión

La transmisión de energía eléctrica es el proceso mediante el cual la electricidad generada en las plantas se transporta a largas distancias a través de redes de alta tensión, hasta llegar a las subestaciones de transformación y posteriormente a los centros de consumo. El proceso inicia en las plantas generadoras, donde la electricidad se produce en niveles de media tensión y se eleva a 220 kV o 500 kV en subestaciones para minimizar pérdidas durante su transporte, luego, en subestaciones intermedias, el voltaje se reduce gradualmente para facilitar su distribución, permitiendo que la electricidad llegue de manera eficiente a ciudades, industrias y hogares mediante redes de media y baja tensión. (Ramírez, 2023).

Redes del Sistema Interconectado Nacional

El Sistema Interconectado Nacional (SIN) representa una infraestructura clave para el suministro eléctrico en el país, compuesta por una red extensa y compleja de líneas de transmisión, subestaciones y equipos especializados que trabajan en conjunto para transportar energía desde las plantas generadoras hacia los puntos de consumo. Este sistema integra no solo los componentes necesarios para el manejo de la electricidad a nivel nacional, sino también las interconexiones internacionales que facilitan el intercambio energético con países vecinos, el SIN de Colombia se observa en la Figura 11. Además, el SIN está dividido en dos subsistemas principales: el Sistema de Transmisión Nacional (STN), encargado de la transferencia de energía a grandes distancias y de manera centralizada, y el Sistema de Transmisión Regional (STR), que se enfoca en la distribución a nivel regional y local. Esta estructura garantiza que la electricidad llegue de manera eficiente, segura y confiable a todos los usuarios finales, incluyendo hogares, empresas e industrias, contribuyendo significativamente al desarrollo económico y social del país.

Sistema de Transmisión Nacional (STN)

Es la red interconectada de transmisión de energía eléctrica en Colombia, conformada por líneas y módulos de conexión que operan a tensiones de 220 kV o superiores. Su función principal es transportar la electricidad desde las plantas generadoras hasta los sistemas regionales de distribución, garantizando la estabilidad y confiabilidad del suministro eléctrico en el país.

Sistema de Transmisión Secundaria (STS)

Es el sistema interconectado de transmisión de energía eléctrica que abarca redes de transmisión de alcance regional o interregional. Está compuesto por líneas y subestaciones, junto con sus equipos asociados, que operan a tensiones inferiores a 220 kV y no forman parte de un sistema de distribución local

Figura 11

Sistema Interconectado Nacional en Colombia-(SIN)



Nota. Mapa de Colombia con el SIN, tomado de (Unidad de Planeación Minero Energética, 2023).

La transmisión de energía eléctrica es un componente clave para el funcionamiento eficiente del mercado eléctrico. Su relevancia radica en que actúa como el vínculo entre los

generadores y los comercializadores, permitiendo el flujo de la electricidad, facilitando la competencia y optimizando el uso de los recursos de generación a través de los intercambios. La participación de las distintas empresas de transmisión dentro del Sistema de Transmisión Nacional (STN) se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1

Participación de las Empresas Dentro del Sistema de Transmisión Nacional Colombiano

Empresa	Participación
INTERCOLOMBIA	50.39%
Grupo Energía Bogotá-GEB SA ESP	19.91%
Grupo ISA	11.92%
Empresas Publicas de Medellín- EPM	7.31%
Empresa de Servicios Publicos Mixta -TRANSELCA	6.64%
Empresa de energía del Grupo Argos -CELSIA	1.73%
Empresa de energía colombiana- ESSA (Santander)	1.03%
Desarrollo Eléctrico Suria S.A.S (Delsur)	0.54%
DISTASA S.A	0.22%
CENS Grupo EPM (N.Santander)	0.14%
Empresa de Energía de Boyacá -EBSA	0.13%
CHEC E.S.P. Grupo EPM	0.04%
Total	100%

Nota. Participación de las empresas colombianas en la transmisión eléctrica del STN, tomado de (XM Administradores del Mercado Eléctrico, 2024).

Elementos de la Transmisión Eléctrica

Transformador

Es un dispositivo eléctrico que permite convertir la energía eléctrica alterna de un nivel de tensión a otro mediante el fenómeno de la inducción electromagnética, funcionando en

corriente alterna y basándose en los principios de la Ley de Faraday y la Ley de Lenz. Su principal función es aumentar (transformadores elevadores) o disminuir (transformadores reductores) el voltaje en un circuito eléctrico, sus partes están representadas en la Figura 12, lo que no solo facilita el transporte de electricidad a largas distancias, sino que también ayuda a minimizar las pérdidas de energía durante la transmisión (Ramírez, 2023). Además, los transformadores pueden servir como elementos de protección al aislar un circuito de otro

La ecuación primordial del transformador describe cómo la tensión (voltaje) y la corriente se ajustan entre el lado primario y el lado secundario, a través de la relación entre el número de vueltas en los devanados primario y secundario, el transformador puede aumentar o disminuir el voltaje, mientras que la corriente se ajusta de manera inversa para mantener la potencia. (Pérez & López 2018). La ecuación (1) básica del transformador se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} \quad (1)$$

Donde:

$V_P =$ Voltaje primario.

$V_S =$ Voltaje Secundario.

$N_P =$ Numero vueltas primario.

$N_S =$ Numero vueltas secundario.

La corriente se invierte en proporción a las tensiones (ecuación 2), y se expresa como:

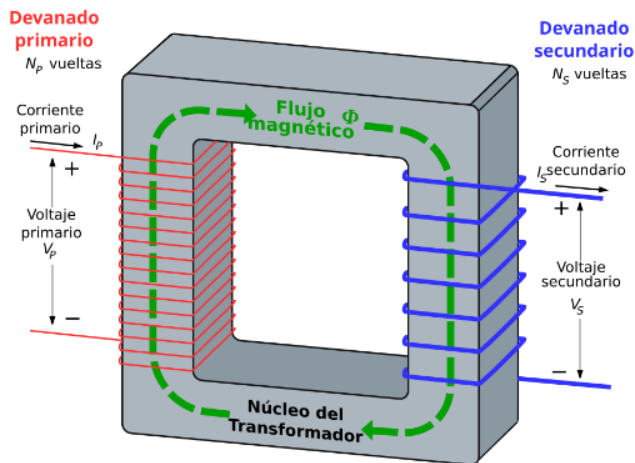
$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{N_S}{N_P} \quad (2)$$

En un transformador ideal (sin pérdidas), la potencia se mantiene constante entre el primario y el secundario. La ecuación (3) de potencia es:

$$P_p = P_s \quad (3)$$

Figura 12

Componentes del Transformador Eléctrico



Nota. Esta imagen refleja los principales componentes de un transformador eléctrico, tomado de (¿Qué es un transformador? Características, usos y aplicaciones: Electropreguntas, s.f).

Existen diferentes tipos de transformadores, cada uno con características y aplicaciones específicas que los hacen esenciales en la infraestructura eléctrica.

Transformador de Potencia

Se utiliza principalmente en las redes de transmisión eléctrica para elevar o reducir el voltaje entre plantas generadoras y subestaciones, permite transportar electricidad a largas distancias con mínima pérdida de energía, esencial en sistemas eléctricos de alta tensión.

Transformador de Distribución

Reduce el voltaje de transmisión a un nivel más bajo para el uso doméstico o comercial, se encuentra comúnmente en postes, cajas urbanas o subestaciones cercanas a los hogares, su función es llevar la energía eléctrica ya utilizable hasta el usuario final.

Transformador Elevador

Aumenta la tensión de salida con respecto a la de entrada, se usa principalmente en centrales eléctricas, justo después de la generación de energía, permite transmitir electricidad a alta tensión, reduciendo pérdidas por distancia.

Transformador Reductor

Disminuye el voltaje de entrada para adaptarlo a aparatos o sistemas de menor tensión, muy común en instalaciones industriales, maquinaria y electrodomésticos, protege los equipos al suministrarles el nivel de voltaje adecuado.

Autotransformador

Tiene un solo devanado que actúa como primario y secundario, lo que lo hace más compacto y económico, se utiliza para ajustes pequeños de voltaje o en aplicaciones donde el aislamiento eléctrico no es necesario, ideal para motores, sistemas de audio o equipos electrónicos.

Transformador de Aislamiento

No modifica el voltaje, pero separa eléctricamente dos circuitos, encargados de brindar seguridad, protección contra descargas y evita interferencias eléctricas, se utiliza en hospitales, laboratorios, servidores y entornos sensibles.

Líneas de Transmisión

Las líneas de transmisión son estructuras clave en el sistema eléctrico, diseñadas para transportar energía eléctrica desde las centrales generadoras hasta las zonas de consumo, como ciudades, industrias y hogares. Funcionan mediante cables de alta tensión, que pueden ser aéreos o subterráneos, y permiten llevar grandes cantidades de electricidad a largas distancias de forma eficiente, Galeano, (2023) dice que las líneas de transmisión en corriente alterna facilitan el uso de transformadores, los cuales permiten elevar el voltaje para reducir las pérdidas de energía durante el trayecto y luego reducirlo nuevamente para un uso seguro. Gracias a esta tecnología, la electricidad puede llegar a los usuarios finales con estabilidad y menor pérdida energética. Además, las líneas de transmisión están formadas por elementos como torres metálicas, aisladores y conductores que garantizan un transporte seguro, el diseño de estas líneas toma en cuenta factores como la distancia, el terreno y la capacidad de carga, su correcto funcionamiento es esencial para mantener la confiabilidad y continuidad del suministro eléctrico en todo el sistema.

Distribución

Es el proceso mediante el cual se transporta la electricidad desde las redes de transmisión hasta los usuarios finales, ya sean residenciales, comerciales o industriales. En Colombia este proceso opera bajo la regulación de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) y la supervisión de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), garantizando que el servicio se preste de manera eficiente y segura. La distribución se realiza a través de redes que operan a tensiones inferiores a 220 kV y abarca la recepción de la energía generada, su reducción de tensión en subestaciones y su posterior transferencia a los transformadores ubicados en postes de las ciudades y municipios. Dicho sistema está conformado por un conjunto de

líneas, subestaciones y equipos asociados, cuya función es asegurar el suministro eléctrico dentro de un área específica, ya sea municipal, distrital o local. (Davies, L., & Saygin, D. 2023). A diferencia de los Sistemas de Transmisión Regional, las redes de distribución están destinadas exclusivamente a la prestación del servicio dentro de estas áreas, permitiendo que la electricidad llegue de manera eficiente a los hogares, comercios e industrias que dependen de ella para su funcionamiento diario.

Las Áreas de Distribución de Energía (ADD) en Colombia se dividen en cuatro zonas: Centro, Occidente, Oriente y Sur.

ADD Oriente

Enel Colombia

Empresa de Energía de Arauca S.A. E.S.P. (Enelar)

Empresa de Energía de Boyacá S.A. E.S.P. (EBSA)

Electrificadora del Huila S.A. E.S.P.

ADD Centro

Energía de Pereira

Electrificadora de Santander

Centrales Eléctricas de Norte de Santander

Empresas Públicas de Medellín EPM

Empresa de Energía del Quindío EDEQ

Central Hidroeléctrica de Caldas CHEC

ADD Sur

Empresa de Energía del Valle de Sibundoy S. A. E.S.P. – EMEVASI

Electrificadora del Caquetá S.A. E.S.P. – ELECTROCAQUETA

Empresa de Energía del Putumayo S.A. E.S.P. – EEPUTUMAYO

Empresa de Energía del Bajo Putumayo S.A. E.S.P. – EEBP

Electrificadora del Meta S. A. E.S.P. – EMSA

Empresa de Energía de Casanare S.A. E.S.P. – ENERCA

ADD Occidente

Celsia Colombia s.a. E.s.p.

Centrales eléctricas de Nariño s.a. E.s.p.

Compañía de electricidad de Tuluá s.a. E.s.p.

Compañía energética de occidente s.a.s. E.s.p.

Empresa municipal de energía eléctrica s.a. E.s.p.

Empresas municipales de Cali e.i.c.e. E.s.p.

Empresa de energía de Pereira s.a. E.s.p.

Elementos Clave en la Distribución Eléctrica

Subestaciones

Una subestación eléctrica es una instalación clave dentro de un sistema eléctrico que tiene como objetivo principal transformar la tensión de la electricidad para su correcta distribución y transmisión. Estas instalaciones realizan múltiples funciones esenciales, como la modificación de los parámetros de la potencia eléctrica y la regulación del flujo energético entre distintas líneas del sistema. Su ubicación estratégica, tanto cerca de las centrales generadoras como en las áreas periféricas de consumo, es vital para asegurar que la electricidad llegue de manera eficiente a diversas zonas geográficas (Ramírez, 2023). Además, las subestaciones se pueden clasificar según sus funciones y componentes, desempeñando un papel crucial en el funcionamiento óptimo y seguro de la red eléctrica. También incorporan sistemas de monitoreo y

protección que permiten identificar y solucionar problemas en tiempo real, garantizando flujos de corrientes estable, a cada uno de los dispositivos que pertenecen a un sistema eléctrico, ayudando a que dicho sistema sea optimo y estable.

Protecciones Eléctricas

Mujal-Rosas, (2014) menciona que son sistemas y dispositivos diseñados para salvaguardar el equipo y la infraestructura del sistema eléctrico, así como para garantizar la seguridad de las personas. Su función principal es detectar y responder a condiciones anormales o fallas dentro de la red eléctrica, minimizando así el riesgo de daños y asegurando un suministro constante y seguro de electricidad, varias protecciones se ilustran en la Figura 13. Algunas de las protecciones más comunes incluyen:

Relés de Protección. Dispositivos que monitorean las condiciones eléctricas y pueden desconectar automáticamente el equipo en caso de sobrecargas, cortocircuitos u otras anomalías. Su uso es esencial para mantener la estabilidad del sistema eléctrico y prevenir fallas mayores.

Interruptores Automáticos. Estos dispositivos interrumpen el flujo de corriente cuando detectan una falla, evitando daños en los transformadores, líneas de transmisión y otros equipos. Pueden ser rearmados manual o automáticamente para restablecer el servicio una vez corregida la falla.

Fusibles. Elementos que se funden y rompen el circuito cuando la corriente excede un nivel seguro, protegiendo así el equipo conectado. Una vez que se activa, el fusible debe ser reemplazado para restablecer el circuito.

Sistemas de Tierra. Se encargan de desviar corrientes no deseadas hacia el suelo, protegiendo tanto a las personas como a la infraestructura de posibles descargas eléctricas. Son fundamentales para evitar choques eléctricos y mejorar la seguridad del sistema.

Dispositivos Contra Sobretensiones. Protegen el equipo de picos de voltaje causados por descargas eléctricas o perturbaciones en la red. Actúan desviando el exceso de energía y evitando que llegue a los componentes sensibles.

Figura 13

Protecciones y Fusibles



Nota. La ilustración muestra algunos tipos de protecciones, tomado de (*Fusible de potencia: Sensoricx, s.f.*).

Transformadores de Corriente (CT)

Se utilizan para reducir niveles de corriente elevados a valores más bajos y manejables, que pueden ser utilizados para medir o proteger equipos. Un CT consiste en un devanado primario que se conecta en serie con el circuito a medir y un devanado secundario que produce una corriente proporcional a la corriente del primario, estableciendo la relación entre las corrientes mediante la relación de vueltas de ambos devanados. Se utilizan comúnmente en aplicaciones de medición, como en medidores de energía, y en protección, como en relés de sobrecarga y cortocircuito (Mujal-Rosas, 2014). Los CT son esenciales porque permiten medir corrientes altas sin tener que conectar instrumentos directamente al circuito, lo que podría ser peligroso.

Transformadores de Voltaje (PT)

Son dispositivos diseñados para reducir altos voltajes a niveles más bajos y seguros, lo que permite realizar mediciones y control en el sistema eléctrico. Funcionan de manera similar a los transformadores de corriente (CT), pero en este caso, se conectan de tal forma que el voltaje se reduce; el devanado primario se conecta al circuito de alto voltaje, mientras que el devanado secundario ofrece un voltaje proporcional que puede ser utilizado para medir o controlar. Los PT se utilizan comúnmente en aplicaciones de medición de voltaje en sistemas de potencia y para alimentar dispositivos de protección y control. Al igual que los CT, los PT garantizan la seguridad al permitir medir voltajes altos de forma segura (Mujal-Rosas, 2014). Los CT y los PT se representan en la Figura 14.

Figura 14

Algunos Tipos de CT y PT



Nota. Representación de tipos de CT y PT, tomado de (*Tipos y aplicaciones de transformadores de corriente*: Linquip, 2021).

Monitoreo de Energía

El monitoreo de energía, tanto en entornos industriales como en viviendas, es vital para optimizar el consumo energético y mejorar la eficiencia. En el ámbito industrial, permite a las empresas rastrear el consumo eléctrico de maquinaria y procesos, identificando patrones y anomalías que ayudan a reducir costos operativos y minimizar el desperdicio de recursos. Por otro lado, en el contexto doméstico, proporciona a los propietarios información detallada sobre su consumo eléctrico a través de dispositivos inteligentes y aplicaciones móviles, lo que les permite ajustar sus hábitos y reducir sus facturas de electricidad. (Rincón & Camargo, 2018). En conjunto, el monitoreo de energía en ambos escenarios promueve un uso más consciente y responsable de la energía, contribuyendo a la sostenibilidad y al desarrollo de un futuro más eficiente.

Comercialización de la Energía Eléctrica

Es una etapa fundamental dentro del sistema eléctrico, que consiste en la compra y venta de energía en el mercado mayorista, con el propósito de hacerla llegar a los usuarios finales a través de contratos o servicios regulados. Este proceso abarca todas las fases del ciclo de vida de la electricidad: generación, transporte, distribución y consumo, en las que participan distintos agentes del mercado. Empresas generadoras producen la energía, los operadores de red la transportan y distribuyen, y los comercializadores la adquieren en el mercado para revenderla a los consumidores, ya sean hogares, industrias o comercios.

En Colombia, la comercialización se desarrolla dentro de un sistema mixto de mercado mayorista y minorista, que está regulado por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) y administrado por el Centro Nacional de Despacho (CND), bajo la supervisión de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD). Este esquema opera bajo lo

dispuesto por la Resolución CREG 024 de 1994, que establece las normas del mercado mayorista, y distingue entre el mercado regulado, donde los precios y condiciones están controlados por el Estado, y el no regulado, donde los usuarios con alto consumo pueden negociar libremente sus contratos.

La distribución de la energía está a cargo del Operador de Red, quien tiene la responsabilidad de planificar, operar, mantener y expandir las redes eléctricas en su zona de influencia. Este operador garantiza que la energía llegue desde las subestaciones hasta los puntos de consumo. Por su parte, los comercializadores son los agentes encargados de adquirir la energía en el mercado mayorista, a través de contratos bilaterales o compras en bolsa, y luego venderla a los usuarios finales, gestionando además la facturación, el cobro y el servicio al cliente.

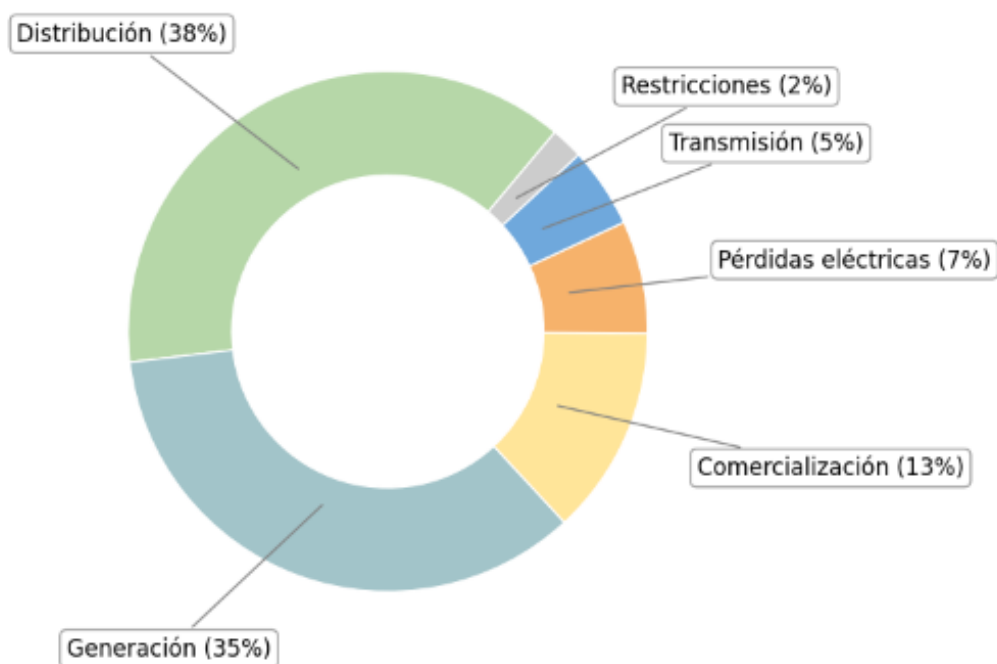
El mercado eléctrico colombiano funciona bajo un modelo de libre competencia, donde los precios se determinan por la oferta y la demanda. Esto permite que tanto empresas públicas como privadas puedan participar, siempre y cuando estén afiliadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN) y cumplan con los requisitos del mercado. En este sistema, el Estado no fija el precio de la energía, sino que los precios se negocian directamente entre generadores y comercializadores, mediante contratos a corto, mediano o largo plazo, lo cual promueve la eficiencia, la transparencia y la seguridad en el suministro eléctrico. Los componentes de la tarifa de energía eléctrica se pueden observar en la Figura 15.

Este modelo busca incentivar la inversión en infraestructura, fomentar la competencia entre agentes y mejorar la calidad del servicio para los usuarios. Además, se implementan mecanismos regulatorios y de supervisión a cargo de entidades como la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) y la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD),

que velan por el cumplimiento de las normas y la protección del usuario. También existen programas de subsidios para usuarios de bajos ingresos, financiados mediante aportes cruzados entre estratos, lo que contribuye a la equidad en el acceso al servicio.

Figura 15

Componentes de la Tarifa de Energía Eléctrica en Colombia



Nota: Este gráfico muestra el porcentaje de cada componente con el que se calcula el costo de la tarifa de la energía eléctrica a los usuarios, según la CREG, en el año 2024. Autor, 2025.

Entidades Participantes en el Sector Energético Colombiano

Existen diversas entidades que desempeñan roles importantes en el sector energético colombiano, encargadas de regular, gestionar y monitorear los procesos relacionados con la transformación eléctrica y su comercialización. Entre estas entidades, se destacan aquellas que establecen las normativas y estándares técnicos que garantizan la seguridad y eficiencia de las

operaciones, así como las que supervisan la generación, transmisión, distribución y venta de energía. Además, participan en la planificación del desarrollo energético del país, asegurando la sostenibilidad de los recursos y promoviendo el uso de fuentes renovables. Estas organizaciones también se encargan de fomentar la competencia en el mercado, garantizar la calidad del servicio y proteger los derechos de los consumidores, contribuyendo así al fortalecimiento de una infraestructura energética confiable y moderna. Su trabajo conjunto es esencial para asegurar un sistema energético eficiente y accesible para todos los colombianos. Dentro de estas tenemos:

CREG: (Comisión de Regulación de Energía, Gas y Combustibles) Es una entidad eminentemente técnica cuyo objetivo es lograr que los servicios de energía eléctrica, gas natural, gas licuado de petróleo (GLP) y combustibles líquidos se presten al mayor número posible de personas, al menor costo posible para los usuarios y con una remuneración adecuada para las empresas que permita garantizar calidad, cobertura y expansión. De esta manera, la CREG busca equilibrar las necesidades de los consumidores con la viabilidad económica de las empresas del sector, asegurando así un acceso eficiente y sostenible a estos servicios esenciales.

XM: es una empresa clave en el sector energético de Colombia, especializada en la gestión de sistemas de tiempo real, lo que le permite supervisar y controlar el flujo de energía de manera continua y eficiente. Esta labor garantiza una adecuada distribución de la energía y mantiene un equilibrio entre la oferta y la demanda. Además, XM administra el Mercado de Energía Mayorista (MEM), donde se realizan transacciones de grandes cantidades de energía, facilitando así la operación efectiva y competitiva de generadores y comercializadores. El Centro Nacional de Despacho (CND) es el núcleo de sus operaciones, donde se toman decisiones en tiempo real para asegurar el funcionamiento óptimo del sistema eléctrico. También se dedica a desarrollar soluciones y servicios innovadores relacionados con la energía y la información, lo

que le permite mejorar continuamente sus procesos. En conclusión, XM ofrece estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico colombiano, asegurando que la energía llegue a todos de manera confiable

UPME: Unidad de Planeación Minero Energética, es una entidad del gobierno colombiano que se encarga de la planificación del sector minero y energético del país. Su principal objetivo es garantizar el suministro de energía y recursos minerales de manera sostenible y eficiente, contribuyendo al desarrollo económico y social de Colombia. Entre sus funciones, la UPME realiza estudios y análisis sobre la oferta y demanda de energía, el desarrollo de proyectos de infraestructura energética, y la formulación de políticas y planes para el sector.

Ministerio de Minas y Energía: es una entidad gubernamental encargada de regular, supervisar y promover el uso eficiente y sostenible de los recursos energéticos y mineros en un país. Su función principal es formular políticas, planes y programas para el desarrollo de estos sectores, garantizando la seguridad energética, la competitividad de la industria y la protección del medio ambiente. Además, el Ministerio de Minas y Energía es responsable de la exploración, explotación, transporte y comercialización de recursos como el petróleo, el gas natural, el carbón y otros minerales estratégicos. Los logros de las entidades del sector energético en Colombia se representan en la figura 16.

Figura 16

Logos de Entidades Colombianas en el Sector Energético



Nota. Entidades colombianas participantes en el sector eléctrico, tomado de (*Entidades energéticas nacionales, s.f.*)

Política y Marco Legal para la Eficiencia Energética en Colombia

En la Tabla 2 se resumen las normas y políticas del sector energético colombiano.

Tabla 2

Marco Normativo en Colombia

Ley/Institución	Descripción
Decreto 2811 de 1974	Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, fue el primer gran paso hacia una legislación ambiental en Colombia, y establece los principios generales para la conservación, uso y manejo de los recursos naturales renovables. Su objetivo es garantizar que el desarrollo económico y social del país se realice de manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente.
Ley 99 de 1993	Establece el marco legal para la protección del medio ambiente en Colombia, creando el Ministerio del Medio Ambiente y el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Esta ley introduce el principio de desarrollo sostenible, obliga a realizar estudios de impacto ambiental para ciertos proyectos, y define la participación de las comunidades en la gestión ambiental.
Ley 697 de 2001	Declara el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) como un asunto de interés social y público. Esta ley busca asegurar el abastecimiento energético, la competitividad económica, la

Ley/Institución	Descripción
Ley 1715 de 2014	<p>protección al consumidor y la promoción de energías no convencionales de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales.</p> <p>Promueve el desarrollo y uso de fuentes no convencionales de energía renovable en Colombia, facilitando su integración al Sistema Interconectado Nacional (SIN) y reconociendo el autogenerador como actor clave en el modelo energético. Impulsa la eficiencia energética, la investigación tecnológica y la participación del sector privado en el crecimiento de una matriz energética más limpia y diversificada.</p>
Ley 2099 de 2021	<p>Ley de transición energética, tiene como objetivo modernizar el marco legal del sector energético para facilitar la incorporación de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), como la solar, eólica, geotérmica, biomasa e incluso el hidrógeno verde. Además, promueve la eficiencia energética, el almacenamiento de energía, la movilidad eléctrica y la participación del sector privado en estos procesos.</p>
Plan Energético Nacional (PEN)	<p>Es la hoja de ruta que guía el desarrollo del sector energético colombiano a largo plazo, definiendo escenarios futuros de oferta y demanda, la diversificación de fuentes energéticas, y el camino hacia una transición energética sostenible y segura, busca garantizar el suministro energético del país, promover el uso de energías renovables, la eficiencia energética, y reducir la dependencia de combustibles fósiles. Elaborado por la UPME, el PEN sirve como base para políticas públicas, inversiones y proyectos del gobierno y del sector privado en el ámbito energético.</p>
RETIE	<p>Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, establece los requisitos técnicos y de seguridad que deben cumplir las instalaciones eléctricas en todo el país. Su objetivo principal es proteger la vida humana, los animales y los bienes, garantizando que las instalaciones funcionen correctamente y de forma segura. Regula aspectos como materiales, puesta a tierra, protecciones eléctricas y normas de diseño.</p>

Ley/Institución	Descripción
RETILAP	Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público, regula los niveles y condiciones de iluminación en espacios públicos y privados, con el fin de garantizar el bienestar visual, la seguridad y la eficiencia energética. Este reglamento aplica a sistemas de alumbrado interior, exterior, público, comercial e industrial, y establece estándares sobre calidad de luz, eficiencia luminosa, mantenimiento, y diseño de sistemas de iluminación.

Nota. Normatividad colombiana para establecer la eficiencia energética en el sector industrial

Aplicaciones de la Ciencia de Datos y Analítica en Energía Eléctrica Renovable

Aguilar (2023) destaca que la ciencia de datos y la analítica se han erigido en herramientas esenciales para transformar el sector eléctrico, facilitando una gestión más eficiente, inteligente y sostenible de la energía. La capacidad de recopilar, procesar y analizar grandes volúmenes de datos provenientes de diversas fuentes, como sensores inteligentes, medidores avanzados, modelos meteorológicos y sistemas de control; ha revolucionado la toma de decisiones en la industria. Desde la predicción de la demanda eléctrica hasta el mantenimiento predictivo de equipos, el análisis avanzado de datos posibilita una toma de decisiones más precisa y oportuna. Estas tecnologías impulsan la integración eficiente de fuentes renovables no convencionales (FNCER), optimizan el funcionamiento de redes inteligentes, perfeccionan la detección de pérdidas técnicas y no técnicas, y fortalecen la ciberseguridad de infraestructuras críticas. En conjunto, la ciencia de datos capacita a las empresas del sector para adaptarse a los nuevos retos energéticos, reducir costos operativos, mejorar la confiabilidad del sistema y avanzar hacia una transición energética más limpia y digitalizada (Valencia, 2019). En un contexto global donde la transición hacia energías renovables y la digitalización son imperativos

ineludibles, las aplicaciones de ciencia de datos en la energía eléctrica son indispensables para afrontar los desafíos del presente y construir un futuro energético más resiliente.

Predicción de Demanda Eléctrica

La predicción precisa de la demanda eléctrica es primordial para la estabilidad y eficiencia de cualquier sistema energético, permitiendo optimizar la generación y distribución de energía. Gracias a la ciencia de datos, se utilizan modelos estadísticos avanzados y algoritmos de machine learning para prever cómo variará la demanda en horizontes temporales que van desde minutos para operación en tiempo real, hasta años, para planificación de infraestructura. Los datos de entrada abarcan historiales de consumo, factores climáticos (temperatura, humedad, irradiación solar, velocidad del viento), variables socioeconómicas (crecimiento poblacional, actividad industrial), hora del día, día de la semana, festivos y eventos especiales.

Entre las técnicas más empleadas se encuentran los modelos de series de tiempo clásicos como ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) y sus variantes (SARIMA para estacionalidad), así como modelos más modernos y robustos como Prophet, especialmente aptos para manejar estacionalidades múltiples y datos faltantes. Además, los modelos de aprendizaje profundo, como las redes neuronales recurrentes (RNNs) y sus arquitecturas especializadas como LSTM (Long Short-Term Memory) y GRU (Gated Recurrent Unit), han demostrado una superioridad notable en la captura de dependencias temporales complejas y patrones no lineales en datos de demanda eléctrica a gran escala. La evaluación rigurosa de estos modelos mediante métricas como el Error Cuadrático Medio (RMSE) o el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) asegura su fiabilidad. Al predecir la demanda con antelación, las empresas pueden ajustar proactivamente la generación de energía, equilibrar la carga de la red, evitar tanto la sobrecarga como los apagones, y minimizar los costos asociados con la producción innecesaria

de energía o la compra de energía costosa en el mercado spot (Rivera, 2024). Esta capacidad también permite planificar mejor las inversiones en infraestructura, la expansión de la red y el despliegue de nuevas fuentes de energía, manteniendo un suministro estable y eficiente.

Mantenimiento Predictivo

El mantenimiento predictivo es uno de los avances más significativos que ofrece la ciencia de datos al sector eléctrico, transformando el enfoque tradicional del mantenimiento reactivo o preventivo basado en tiempo. La implementación de sensores IoT (Internet de las Cosas) en equipos críticos como generadores (hidráulicos, térmicos, eólicos), transformadores, líneas de transmisión y turbinas, permite la recolección masiva y en tiempo real de datos operativos. Estos datos incluyen variables como temperatura, vibración, presión, corriente, voltaje, ruido acústico y parámetros de lubricación.

Mediante el análisis en tiempo real de estas variables y la aplicación de técnicas de aprendizaje automático supervisado y no supervisado, es posible detectar signos tempranos de fallas o desviaciones de comportamiento normal. Los algoritmos de clasificación (por ejemplo, Máquinas de Vectores de Soporte, Árboles de Decisión, Bosques Aleatorios, Gradient Boosting) se entrenan con datos históricos de fallas y condiciones operativas para predecir la probabilidad de un fallo. Complementariamente, los algoritmos de detección de anomalías (Isolation Forest, One-Class SVM, autoencoders con redes neuronales) identifican comportamientos inusuales que no corresponden a patrones conocidos. Los modelos de regresión se emplean para predecir la vida útil restante de los componentes, al predecir el momento óptimo en que un equipo podría fallar, las empresas pueden programar mantenimientos proactivos antes de que ocurran problemas graves. Este enfoque no solo reduce el tiempo de inactividad no planificado, que puede ser extremadamente costoso en términos de pérdida de ingresos y multa, sino que también

mejora la vida útil de los activos, optimiza la disponibilidad de la flota y reduce los costos operativos al evitar intervenciones innecesarias o fallas catastróficas (Rincón & Camargo, 2018). La integración de plataformas de Big Data y computación en la nube potencia esta capacidad al manejar los enormes volúmenes de datos generados por los sensores.

Gestión de Energías Renovables

Las energías renovables, particularmente la solar fotovoltaica y la eólica, presentan un desafío inherente debido a su intermitencia y dependencia de condiciones climáticas impredecibles. La ciencia de datos facilita la predicción con mayor precisión de la generación de energía renovable, lo cual es esencial para su integración estable en la red. Los modelos se alimentan de datos meteorológicos históricos y en tiempo real, junto con datos de rendimiento de las plantas (producción pasada, estado de los paneles o turbinas).

Para la predicción de la generación eólica y solar, se utilizan diversas técnicas de predicción avanzada. Esto incluye modelos de regresión lineal y no lineal para establecer relaciones entre variables meteorológicas y producción energética, así como modelos estocásticos que capturan la aleatoriedad inherente. Las redes neuronales profundas, como las redes neuronales convolucionales (CNN) para procesar imágenes satelitales del clima o las ya mencionadas LSTM para series de tiempo de vientos o irradiancia, son particularmente eficaces en la captura de patrones complejos y dinámicos. Los modelos híbridos que combinan pronósticos meteorológicos numéricos con modelos de aprendizaje automático y datos de sensores in-situ son comunes para mejorar la precisión. La cuantificación de la incertidumbre en estas predicciones mediante intervalos de confianza o métodos probabilísticos también es un área activa de investigación en ciencia de datos, permitiendo una gestión más robusta de la variabilidad. Al predecir con mayor fiabilidad la producción de FNCR, las empresas pueden

planificar la operación de las plantas convencionales, gestionar los sistemas de almacenamiento de energía y optimizar el despacho de energía en el mercado, evitando problemas de sobrecarga o subproducción y asegurando una distribución equilibrada con otras fuentes de energía (Aguilar, 2023). Así mismo, contribuye a reducir la dependencia de combustibles fósiles, impulsando la transición hacia un sistema energético más limpio y sostenible.

Operación de Redes Inteligentes (Smart Grids)

Las redes inteligentes (smart grids) representan una transformación paradigmática en la forma en que gestionamos la energía, pasando de una red unidireccional a un sistema bidireccional y altamente interconectado, empleando una vasta red de sensores inteligentes (smart meters, RTUs) y sistemas de comunicación avanzada. Hernández Callejo (2024) señala que estas redes recopilan y analizan datos en tiempo real sobre consumo, generación distribuida, transmisión y parámetros de calidad de energía.

La ciencia de datos es el motor de las smart grids, habilitando capacidades como el monitoreo en tiempo real, la analítica predictiva y la analítica prescriptiva. Los algoritmos de optimización (programación lineal, optimización no lineal, algoritmos genéticos o de enjambre) son esenciales para ajustar automáticamente la distribución de energía, optimizar el voltaje, balancear la carga de forma eficiente y gestionar el flujo de energía en ambas direcciones. Los modelos de aprendizaje automático permiten la detección rápida de fallas, la identificación de cuellos de botella y la gestión dinámica de la demanda, facilitando la integración de recursos energéticos distribuidos como paneles solares en tejados, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento. La segmentación de clientes y el análisis de patrones de consumo ayudan a implementar tarifas dinámicas que incentivan el uso eficiente de la energía. Las smart grids, potenciadas por la ciencia de datos, no solo mejoran la eficiencia operativa al minimizar las

pérdidas y optimizar el flujo, sino que también hacen que el sistema eléctrico sea más resiliente frente a imprevistos (como desastres naturales o ciberataques) y significativamente más flexible para acomodar la creciente penetración de las energías renovables.

Detección de Pérdidas y Fraudes

En el sector eléctrico, las pérdidas de energía se dividen en técnicas (ineficiencias naturales del sistema de transmisión y distribución) y no técnicas (fraudes, conexiones ilegales o errores administrativos en la facturación). Valencia (2019) menciona que la ciencia de datos desempeña un papel central en la detección y mitigación de estas pérdidas, especialmente las no técnicas, mediante el análisis de patrones de consumo de energía y el comportamiento de la red.

La metodología implica la recopilación de datos de medidores inteligentes, sistemas SCADA y bases de datos de clientes. Luego, se aplican algoritmos de Machine Learning para identificar anomalías y comportamientos fraudulentos. Esto incluye:

Algoritmos de clasificación supervisada: entrenados con datos históricos de fraudes confirmados para predecir nuevos casos (Árboles de Decisión, Bosques Aleatorios, Redes Neuronales, SVM).

Algoritmos de detección de anomalías: utilizados para identificar patrones de consumo que se desvían significativamente de la norma (Isolation Forest, One-Class SVM, K-Means, DBSCAN, Autoencoders). Estos algoritmos no requieren ejemplos previos de fraude.

Análisis de grafos: para identificar redes de conexiones ilegales o relaciones sospechosas entre clientes y ubicaciones.

Al identificar consumos anómalos o zonas con altas pérdidas no justificadas, las empresas distribuidoras pueden tomar medidas correctivas de manera más efectiva, como inspecciones dirigidas, desconexiones o campañas de concientización, esto no solo reduce el

impacto económico de estas pérdidas, que pueden ser sustanciales, sino que también mejora la fiabilidad del sistema al reducir la carga no controlada y promueve la equidad en la distribución de costos entre todos los usuarios.

Ciberseguridad Energética

Con el aumento de la digitalización y la interconexión en el sector eléctrico, las infraestructuras críticas, como las plantas de generación, subestaciones, centros de control y las redes de distribución inteligentes, se vuelven más vulnerables a ciberataques que podrían tener consecuencias devastadoras en la seguridad nacional y el suministro de energía. La ciencia de datos y la analítica viabilizan la implementación de sistemas avanzados de detección de intrusos (IDS) y análisis de comportamiento en las redes eléctricas.

Las técnicas de ciencia de datos empleadas incluyen:

Análisis de anomalías en flujos de red: Utilizando algoritmos de clustering o detección de valores atípicos sobre datos de tráfico de red (NetFlow, sFlow) para identificar comportamientos inusuales que podrían indicar una intrusión.

Modelos de detección basados en Inteligencia Artificial (IA): Redes neuronales (como CNN para análisis de logs o RNN para tráfico de red secuencial) y modelos de aprendizaje por refuerzo que aprenden a identificar patrones de ataque y a tomar decisiones de seguridad en tiempo real.

Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP): Para analizar grandes volúmenes de logs de sistemas y alertas, identificando amenazas ocultas o patrones de ataque complejos.

Análisis forense de datos: Para reconstruir eventos después de un incidente y comprender el alcance de un ataque.

Estos sistemas permiten identificar patrones sospechosos en el tráfico de datos, intentos de acceso no autorizado, o la manipulación de comandos operativos, alertando a las autoridades antes de que un ataque cause daño significativo. La integración de tecnologías emergentes como blockchain, que ofrece un registro inmutable y descentralizado de transacciones, ayuda a asegurar la integridad de los datos y las transacciones dentro de la infraestructura energética, protegiendo la estabilidad y seguridad del suministro eléctrico en diferentes ciudades y complejos industriales (Hernández Callejo, 2024).

Ciencia de Datos y Analítica en el Sector Energético Renovable Colombiano

En Colombia, el crecimiento acelerado del sector de energías renovables ha generado nuevas oportunidades para aplicar herramientas avanzadas de ciencia de datos y analítica, adaptadas a las particularidades del contexto nacional. La diversidad geográfica y climática del país, con su potencial hidroeléctrico, solar y eólico, requiere un enfoque detallado en la optimización y gestión de estas fuentes.

La integración de técnicas específicas de ciencia de datos maximiza el valor de las FNCER en el sistema interconectado nacional (SIN):

Aprendizaje automático para la predicción de la generación solar y eólica: Modelos basados en redes neuronales o Gradient Boosting para pronosticar la producción de plantas solares y parques eólicos, considerando la variabilidad del clima tropical, patrones de nubosidad y regímenes de viento. Esto facilita la operación del SIN y la planificación del despacho.

Modelación predictiva de la demanda eléctrica a nivel regional y subestación: Utilizando datos de consumo histórico, información socioeconómica y pronósticos meteorológicos localizados para anticipar la demanda en áreas específicas, contribuyendo a una mejor gestión de la carga y evitando sobrecargas en la infraestructura existente.

Minería de datos para identificar patrones de consumo y pérdidas no técnicas: Aplicando algoritmos de clustering y detección de anomalías para identificar perfiles de consumo atípicos que podrían indicar fraudes o ineficiencias, optimizando la recaudación y la fiabilidad de la red.

Optimización de la ubicación y el dimensionamiento de nuevos proyectos renovables: Utilizando modelos geoespaciales y algoritmos de optimización para identificar los sitios más adecuados para plantas solares o eólicas, considerando factores como el recurso disponible, la topografía, la conexión a la red y el impacto ambiental.

Análisis de impacto y escenarios de transición energética: Construcción de modelos de simulación y escenarios futuros que evalúen el impacto de diferentes políticas energéticas, inversiones en infraestructura y la penetración de renovables en la estabilidad económica y ambiental del país, (Rivera, 2024).

Estas tecnologías ofrecen un valor estratégico inmenso al permitir la toma de decisiones basadas en datos, esenciales para enfrentar los desafíos técnicos, económicos y ambientales del sector, la ciencia de datos se posiciona como un aliado indispensable en la transición energética de Colombia hacia un modelo más sostenible, inteligente y resiliente.

Metodología

La presente investigación se desarrolla a partir de la implementación de la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), centrada en la elaboración de una revisión sistemática con el objetivo de identificar, clasificar y analizar las principales técnicas en ciencia de datos aplicadas al estudio de la matriz energética renovable en Colombia. Esta metodología permite realizar una selección estructurada y transparente de la literatura científica, asegurando la trazabilidad y fiabilidad de los hallazgos.

La revisión sistemática se realiza con el propósito de analizar cómo las técnicas de ciencia de datos han contribuido al desarrollo, análisis e implementación de fuentes de energía renovable en Colombia, así como para identificar los principales desafíos técnicos y metodológicos que se presentan en este proceso. Esta revisión busca consolidar el conocimiento existente, resaltar las aplicaciones más relevantes y detectar vacíos en la literatura que puedan orientar futuras investigaciones o acciones estratégicas en el sector energético.

Para llevar a cabo la búsqueda de literatura, se define una “llave de búsqueda” o search string estructurada a partir de términos clave relacionados con ciencia de datos, energías renovables y el contexto colombiano. Dicha búsqueda se realiza en bases de datos académicas reconocidas como Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect y Google Scholar, garantizando la calidad y actualidad de las fuentes.

Los criterios de inclusión establecidos contemplan artículos publicados entre los años 2015 y 2025, redactados en español o inglés, con enfoque en el contexto colombiano o en entornos energéticos similares, y que presenten aplicaciones explícitas de técnicas de ciencia de datos (como machine learning, análisis predictivo, inteligencia artificial, minería de datos, entre otras) en el estudio o gestión de energías renovables (solar, eólica, hidroeléctrica, biomasa, etc.).

Se excluyen estudios que no aborden de manera directa la aplicación de ciencia de datos al sector energético renovable o que no aporten evidencia empírica.

El proceso PRISMA se estructura en las siguientes etapas: identificación de estudios, eliminación de duplicados, revisión de títulos y resúmenes, lectura completa de los textos seleccionados y aplicación de los criterios de elegibilidad. Los estudios que superan estas fases son incluidos para un análisis detallado, mediante la extracción de información relevante sobre las técnicas utilizadas, objetivos del estudio, tipo de energía renovable abordada, herramientas tecnológicas empleadas y principales hallazgos.

La aplicación de la metodología PRISMA permite realizar un análisis exhaustivo y sistemático de la literatura existente, lo cual facilita la identificación de tendencias, buenas prácticas y desafíos comunes en el uso de ciencia de datos dentro del contexto energético colombiano. De esta manera, se consolida una base de conocimiento que puede apoyar la formulación de estrategias orientadas a fortalecer la transición energética hacia fuentes sostenibles en el país.

Llave de Búsqueda

La metodología PRISMA establece la llave de búsqueda como el punto de partida esencial para la revisión sistemática, permitiendo filtrar de manera precisa la información disponible en bases de datos académicas, registros especializados y fuentes digitales. En esta investigación, la llave de búsqueda fue diseñada con base en términos clave relacionados con ciencia de datos, energías renovables y el contexto colombiano, con el objetivo de identificar estudios relevantes publicados entre 2015 y 2025. Dicha llave de búsqueda se relaciona en la tabla 3.

Tabla 3*Llave de Búsqueda*

Búsqueda inicial	
Bases de datos primarias	IEEE y SCOPUS
Bases de datos secundarios	Web of Science y Google Académico
Criterio de búsqueda	Renewable energies, Data Science, Machine learning, Colombia
Llaves de búsqueda	Renewable energies AND (Data Science OR Machine learning) AND Colombia

Nota. Llave de búsqueda utilizada dentro de la investigación de energías renovables y ciencia de datos.

Para iniciar el abordaje de la literatura relacionada con energías renovables en Colombia y su vínculo con la ciencia de datos, se realizó una búsqueda inicial en las bases de datos IEEE y Scopus, complementada con plataformas secundarias como Web of Science y Google Académico, como se detalla en la tabla 3. Se establecieron criterios de búsqueda coherentes para toda la investigación, considerando términos clave, títulos relevantes y enfoques alineados con el tema. Se utilizó la cadena de búsqueda (*“Renewable energies” AND (“Data Science” OR “Machine Learning”) AND “Colombia”*), con el fin de identificar estudios y artículos científicos pertinentes a los objetivos planteados. Esta estrategia permitió una selección más eficiente de fuentes, metodologías y análisis relevantes dentro del proceso de revisión sistemática.

Los resultados de la revisión sistemática arrojaron un total de 56 artículos científicos relevantes que abordan la aplicación de la ciencia de datos en el desarrollo y evaluación de soluciones energéticas basadas en fuentes renovables en Colombia. Estos estudios emplean una

amplia gama de metodologías, entre ellas técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, inteligencia artificial y modelos de optimización, con el objetivo de construir herramientas predictivas, evaluar la viabilidad de tecnologías limpias y apoyar la toma de decisiones para una transición energética sostenible, se identifican enfoques cualitativos y cuantitativos que analizan barreras regulatorias, aspectos económicos, sociales y tecnológicos, además de metodologías para refinar mapas de potencial energético o evaluar mercados locales. Esta diversidad de investigaciones evidencia un creciente interés por utilizar la ciencia de datos como una herramienta clave para modelar, planificar y optimizar el aprovechamiento de energías renovables en Colombia, lo cual se sintetiza en la Tabla 4.

Tabla 4

Resumen de Estudios sobre Ciencia de Datos y Energías Renovables en Colombia

Autor	Metodología	Resumen del contenido
Arévalo et al. (2017)	Algoritmo heurístico	Desarrolla y analiza modelos para estimar los costos de incertidumbre asociados con la integración de fuentes de energía renovable y vehículos eléctricos en los sistemas de generación.
Banguero et al. (2017)	Modelado predictivo	Evalúa la eficiencia de un sistema fotovoltaico integrado en el edificio (BIPV) de 20 kW instalado en Andagoya, Chocó, Colombia, durante su primer año de operación.
Ochoa et al. (2017)	Minado de datos, Análisis de series temporales	Presenta datos sobre la velocidad y dirección del viento medidos con una estación meteorológica ubicada en Puerto Bolívar, calculando histogramas de frecuencia y distribuciones de probabilidad.
	Algoritmo K-means,	Analiza el potencial fotovoltaico de cuatro ciudades colombianas (Bogotá, Cúcuta,

Autor	Metodología	Resumen del contenido
Ramírez Murillo et al. (2019)	Algoritmo Fuzzy C-means, Algoritmo PCA	Manizales y Pasto) mediante técnicas de agrupamiento y visualización de datos.
López et al. (2019)	Elicitación de expertos, Modelado financiero, Simulación de escenarios	Analiza el potencial del mercado de la energía solar fotovoltaica en Colombia mediante un enfoque cualitativo y cuantitativo, evaluando barreras y oportunidades para el despliegue de sistemas solares domésticos, modelando su rentabilidad bajo diferentes escenarios regulatorios y financieros.
Ramírez Murillo et al. (2019)	Modelado predictivo	Genera y facilita el acceso a datos de velocidad del viento y densidad de potencia eólica en ubicaciones estratégicas de la costa Caribe colombiana, mediante el procesamiento de bases de datos climáticas complejas.
Banguero et al. (2019)	Modelo de flujo de potencia óptimo (OPF)	Evalúa el rendimiento operativo del primer microgrid fotovoltaico instalado en Chocó, Colombia, mediante la aplicación de un modelo de flujo de potencia óptimo (OPF), optimizando el uso de la energía renovable.
Bastos Guerrero (2020)	Redes neuronales, Sistema de inferencia difusa	Analiza la variabilidad histórica de la radiación solar en Cúcuta usando estadística inferencial y modelar su comportamiento a través de técnicas de inteligencia artificial.
Ordoñez-Palacios et al. (2020)	Regresión logística, Algoritmos MLP Regressor, Algoritmo Random Forest, AdaBoost	Evalúa el desempeño de distintas técnicas de aprendizaje automático para la estimación de radiación solar a partir de datos meteorológicos disponibles en las ciudades de Cali, Villavicencio y Mocoa. implementa un modelo de regresión simbólica híbrida, basado en algoritmos genéticos y métodos de kernel, para predecir

Autor	Metodología	Resumen del contenido
Garrido-Atencia, (2020)	Algoritmo de regresión simbólica multigen, Métodos de kernel	<p>velocidades de viento promedio a partir de datos meteorológicos históricos,</p> <p>Evalúa la viabilidad y el rendimiento de una planta termo-solar híbrida en la costa caribe colombiana.</p>
Moreno-Gamboa et al. (2020)	Modelo DNI (Direct Normal Irradiance)	Analiza el impacto de la mega-sequía de 2015–2016 en la transición energética de Colombia.
Weng et al. (2020)	Análisis de series temporales	Evalúa el rendimiento energético de dos sistemas fotovoltaicos (monocristalino y policristalino) instalados en la ciudad de Manizales, Colombia.
Mulcué-Nieto et al. (2020)	Cálculo de la relación de rendimiento (PR)	<p>Predice el recurso solar diario mediante técnicas de Machine Learning para la proyección de generación de energía eléctrica en Colombia.</p> <p>Desarrolla una metodología automatizada para detectar cultivos con alto potencial de biomasa residual en Colombia.</p>
Alfonso-Ortiz et al.(2021)	Algoritmos de Naive-Bayes, Redes neuronales	<p>Desarrolla una metodología automatizada para detectar cultivos con alto potencial de biomasa residual en Colombia.</p> <p>Evalúa el potencial de generación de energía solar y eólica en el departamento de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.</p>
Macías (2021)	Regresión logística, Redes neuronales	Evalúa el potencial de generación de energía solar y eólica en el departamento de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.
Silvera et al. (2021)	Redes neuronales	Determina la viabilidad de la integración de sistemas fotovoltaicos en el sector residencial colombiano.
Granados et al. (2022)	Modelo de dinámica de sistemas	investiga las preferencias de los usuarios residenciales de electricidad en Colombia hacia los atributos de la energía en el contexto de un modelo de comercio de energía peer-to-peer
Cárdenas-Álvarez et al. (2022)	Experimento de elección discreta	investiga las preferencias de los usuarios residenciales de electricidad en Colombia hacia los atributos de la energía en el contexto de un modelo de comercio de energía peer-to-peer

Autor	Metodología	Resumen del contenido
Taticuán (2023)	(Discrete Choice Experiment, DCE) Regresión lineal, XGBoost	Determina el impacto de las obligaciones de compra de energía generada por fuentes renovables no convencionales en el mercado mayorista de electricidad de Colombia. Desarrolla un modelo predictivo del precio del kilovatio-hora en la bolsa eléctrica colombiana para estimar ingresos en proyectos de energía renovable a tres años.
Villarreal et al. (2023)	Regresión lineal, Modelo de vector autorregresivo (VAR)	Desarrolla un modelo de predicción basado en Redes neuronales LSTM para pronosticar la radiación generada por una planta fotovoltaica.
Herrera (2023)	Redes neuronales	Evalúa la viabilidad técnica y el rendimiento de un sistema híbrido de energía solar-eólica mediante técnicas avanzadas de análisis de datos.
Salazar-Caceres et al. (2023)	Algoritmo K-means, Bootstrapping	Evalúa cómo el crecimiento económico, la adopción de energías renovables, la innovación tecnológica, la globalización y la cobertura forestal impactan las emisiones de carbono en Colombia.
Raihan (2023)	Metodología DOLS	Analizar los desafíos, facilitadores y barreras en la difusión de microrredes de energía renovable descentralizada en comunidades indígenas rurales de Colombia
Granit (2023)	Microrredes	Identifica los municipios en Colombia donde la biomasa residual podría ser adecuada para la generación de energía de manera sostenible y renovable.
Calvo-Saad et al. (2023)	Análisis Multicriterio de Decisión (MCDM),	Evalúa y modela diferentes rutas de descarbonización para el sistema energético

Autor	Metodología	Resumen del contenido
Plazas-Niño et al. (2023)	Procesos de Jerarquía Analítica (AHP)	de Colombia entre 2021 y 2050, utilizando un enfoque de optimización abierta.
Ángel-Sanint et al. (2023)	Modelos de optimización del sistema energético	propone una metodología para refinar los mapas de potencial solar y eólico en Colombia, integrando la disponibilidad de recursos y las restricciones.
Younis et al. (2023)	Sistemas de Información Geográfica, Análisis espacial y temporal	Evalúa técnica, económica y ambientalmente la viabilidad de implementar sistemas de aprovechamiento energético del biogás generado en rellenos sanitarios (LFGtE) en varias ciudades colombianas.
Restrepo et al. (2023)	Modelos de optimización del sistema energético, Análisis espacial y temporal	Clasifica el hidrógeno en Colombia según su huella de carbono y fuente de producción.
Castillo et al. (2024)	Análisis del ciclo de vida (LCA)	Desarrollar una herramienta que permita determinar la viabilidad de la instalación de plantas de energía solar en Colombia
Rivera (2024)	Redes neuronales, Algoritmo Random Forest	Desarrolla un análisis de las centrales de generación del país utilizando la API de XM para extraer datos relevantes.
Ordoñez-Palacios et al. (2024)	Algoritmo PCA, Análisis de clustering jerárquico	Evalúa el desempeño de dos modelos fotovoltaicos en 10 regiones de Colombia.
Pincay-Lozada et al. (2024)	Algoritmo Random Forest	Desarrolla herramientas basadas en inteligencia artificial para sistematizar el mantenimiento y diagnóstico de módulos en sistemas fotovoltaicos.
Botero et al. (2024)	Minado de datos, Simulación de escenarios	Analiza la aplicación del paradigma de la innovación abierta (Open Innovation) en organizaciones que trabajan en la introducción de energías renovables en los mercados eléctricos, incorporando enfoques de Inteligencia Artificial.

Autor	Metodología	Resumen del contenido
Mejía-Fragoso et al. (2024)	Algoritmo PCA, Bat Algorithm (BA), Máquinas de Soporte Vectorial (SVM)	Desarrolla un modelo de Machine Learning para estimar el gradiente geotérmico en Colombia.
Malcolm et al. (2024)	Gradient-Boosted Regression Tree (GBRT)	Analiza los desafíos tecnológicos y las soluciones que contribuyen al logro de sistemas energéticos con cero emisiones netas
Román et al. (2024)	Redes neuronales	Identifica correlaciones entre la radiación solar y la velocidad del viento en los municipios del departamento de Antioquia, Colombia.
Román et al. (2024)	Redes neuronales, Algoritmo Random Forest, Máquinas de Soporte Vectorial	Desarrolla modelos que puedan prever con precisión la generación de energía solar analizando un conjunto de datos real de generación solar.
Torres-Madroñero et al. (2024)	Análisis de clustering jerárquico.	Diseña y dimensiona un sistema híbrido de generación de energía (HRES) compuesto por fuentes eólica y solar.
Cortés et al. (2024)	Algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas	Evalúa la viabilidad económica y la competitividad de la energía solar fotovoltaica en la región del Caribe colombiano
Esquivel et al. (2024)	Modelo matemático modular	Mide la pobreza energética multidimensional en los 32 departamentos de Colombia y su capital.
Cardona-Vasquez et al. (2024)	Método de ponderación anidado, Minado de datos	Estudia el impacto de la integración de fuentes no convencionales de energía renovable sobre la volatilidad del precio spot en el mercado eléctrico colombiano.

Autor	Metodología	Resumen del contenido
Plazas-Niño et al. (2024)	Modelo basado en VEC (Vector Error Correction)	Evalúa técnica y económicamente las rutas de producción, distribución y uso del hidrógeno de bajas emisiones en Colombia.
Velasquez-Jaramillo et al. (2024)	Modelos de optimización del sistema energético	Analiza la viabilidad de la producción de hidrógeno verde en Colombia mediante el estudio de combinaciones entre fuentes de energía renovable.
Distefano et al. (2024b)	Modelado matemático, Simulación de escenarios	Analiza el desempeño técnico y energético de sistemas de refrigeración por absorción activados por energía solar en la Costa Caribe de Colombia.
Miller et al. (2024)	Modelos de optimización del sistema energético, Cálculo del rendimiento energético (SCOP)	Desarrolla un modelo de planificación energética que permita la asignación óptima de sistemas de energía renovable e hidrógeno en una red de distribución eléctrica débil.
Espitia-Mesa et al. (2024)	Modelo de Mezclas Gaussianas, Formulación de modelos matemáticos complejos	Desarrollar y optimizar superficies fotovoltaicas curvas para aplicaciones de BIPV (Building Integrated Photovoltaics).
Ordoñez et al. (2024)	Algoritmos Genéticos (GA), Ray Tracing (Trazado de Rayos)	Diseña e implementa un dispositivo portátil y autónomo que permite medir y monitorear el rendimiento de los paneles fotovoltaicos. Evalúa cómo la implementación de Smart Grids puede optimizar la eficiencia energética y reducir las emisiones de CO ₂ en la industria del cemento en Colombia.
Ángel et al. (2024)	Experimentos y validación de modelos	
Manuel et al. (2025)	Regesión lineal, Microrredes	Compara la efectividad de las metodologías AHP y FAHP en cinco escenarios (SC1 a SC5) para evaluar alternativas considerando criterios técnicos y ambientales.

Autor	Metodología	Resumen del contenido
Escudero-Quintero et al. (2025)	Proceso Analítico Jerárquico, Proceso Analítico Jerárquico Difuso	Desarrolla y validar experimentalmente una plataforma de hardware para microredes de baja potencia
Osorio et al. (2025)	Microrredes, Algoritmos FPPT	Examina los factores de suministro e infraestructura que influyen en la transición energética en Colombia
Escudero-Quintero et al. (2025)	Dinámica de sistemas, Simulación de escenarios	Desarrolla una plataforma de hardware de microred de baja potencia basada en convertidores de potencia y controladores.
Pedraza-Corzo et al. (2025)	Microrredes	Desarrolla un modelo matemático para predecir el comportamiento de los sistemas de turbogeneración sumergibles.
Moreno-Rocha et al. (2025)	Métodos de Afinidad de Curvas	Identifica y prioriza tecnologías de generación de energía renovable en diferentes regiones de Colombia mediante métodos de toma de decisiones multicriterio.
	Análisis de clustering jerárquico, Proceso Analítico Jerárquico Difuso (FAHP)	

Nota. Artículos científicos empleando la llave de búsqueda mencionada, autores, metodología y resumen.

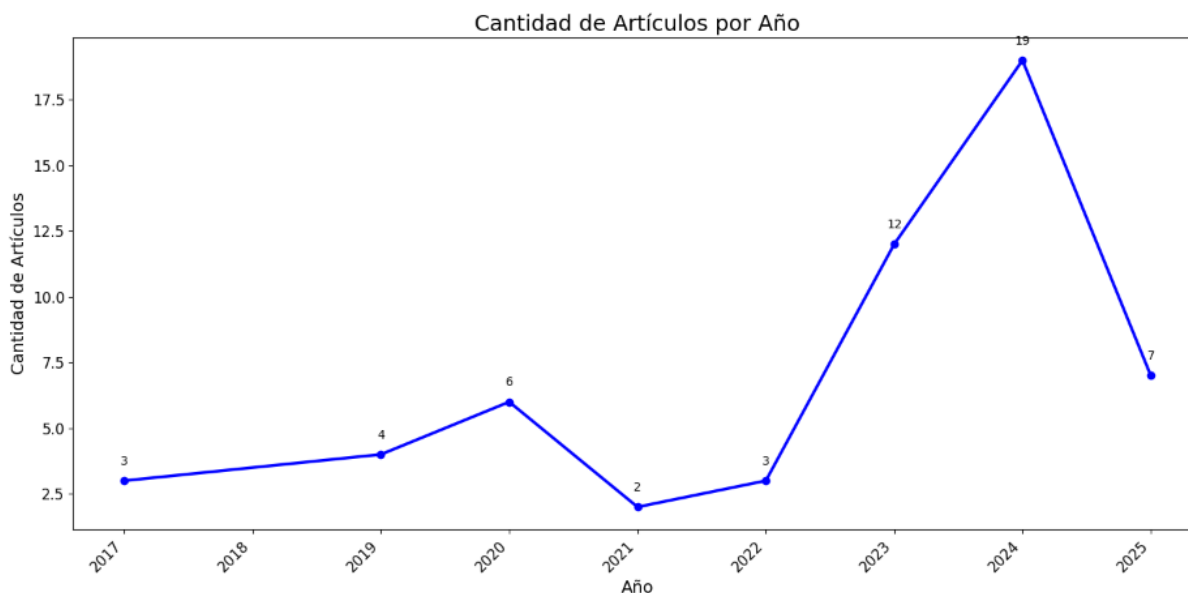
Resultados

Una vez revisados y analizados los distintos artículos científicos, se procede a realizar un estudio que permita identificar y clasificar el año de publicación, las metodologías o técnicas empleadas, la fuente de energía renovable abordada en cada caso y la relación existente entre estas variables. Para este análisis se utilizó Python como herramienta de apoyo, lo que permitió generar visualizaciones gráficas y explorar patrones de comportamiento, relaciones y posibles correlaciones entre las categorías analizadas, este enfoque facilita una comprensión más profunda de las tendencias investigativas, los enfoques metodológicos predominantes y las áreas de mayor desarrollo dentro del contexto colombiano.

Artículos Científicos por Año

En el período comprendido entre los años 2015 y 2025, los resultados de la revisión permitieron clasificar los artículos encontrados de la siguiente manera: en 2017 se identificaron 3 artículos, en 2019 un total de 4, en 2020 se registraron 6 artículos, en 2021 un total de 2, en 2022 se hallaron 2, en 2023 otros 12, en 2024 se observó un incremento significativo con 19 artículos, y finalmente, en 2025, se encontraron 7 artículos hasta la fecha. Esta distribución se presenta de forma visual en la Figura 17.

En el gráfico de líneas se destaca un notable aumento en la producción académica durante los últimos tres años, lo que evidencia el creciente interés en las energías renovables como una alternativa clave para la generación eléctrica. Este comportamiento refleja la prioridad que ha adquirido el tema en la agenda investigativa del país. Así mismo, se proyecta que esta tendencia continuará en ascenso durante 2025, debido a políticas que se impulsan desde el gobierno como meta a una producción de energías limpias para el año 2050.

Figura 17*Cantidad de Artículos Encontrados por Año*

Nota. Cantidad de artículos hallados por año desde el 2015. Autor, 2025.

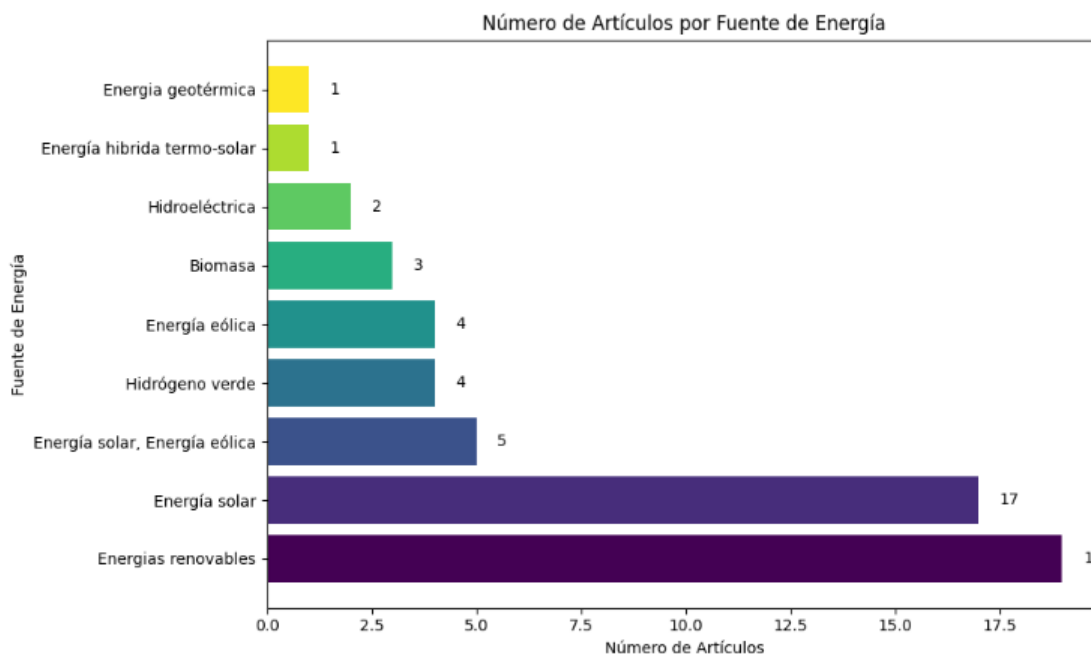
Fuente de Investigaciones de Artículos

En el análisis, se observa que los artículos científicos sobre energías renovables en Colombia adoptan diversas aproximaciones. Algunos estudios abordan las fuentes de energía renovable de manera general, explorando aspectos como políticas públicas, marcos regulatorios y potencial energético. Otros se centran en fuentes específicas, como la energía solar o eólica, analizando sus características particulares y aplicaciones. Además, existe una tendencia creciente hacia la investigación de sistemas híbridos que combinan dos o más fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, con el objetivo de mejorar la eficiencia y estabilidad del suministro energético. Esta diversidad en los enfoques refleja un panorama investigativo dinámico y en evolución, que busca adaptarse a las necesidades energéticas del país y aprovechar

sus recursos naturales de manera sostenible. El resumen de investigación por fuente de energía se describe en la Figura 18.

Figura 18

Artículos por Fuente de Energía



Nota. Este gráfico demuestra las fuentes de energía abordadas en las investigaciones. Autor, 2025.

Predominio General de "Energías Renovables" y "Energía Solar"

La fuente de energía de mayor impacto es "Energías renovables" con 19 artículos. Esto sugiere que una proporción significativa de los estudios aborda el tema de las energías renovables de manera general o integral, analizando políticas, marcos regulatorios, potencial general y comparando múltiples fuentes sin enfocarse en una sola.

Le sigue muy de cerca "Energía solar" con 17 artículos. Esto indica claramente que la energía solar es la fuente renovable específica que recibe mayor atención individualizada en la investigación analizada en Colombia. Este alto interés puede deberse a varios factores, como el

potencial solar del país, la disminución de costos de la tecnología fotovoltaica, o políticas de incentivo específicas.

Interés en Combinaciones y Otras Fuentes Específicas

"Energía solar, Energía eólica" (5 artículos): Muestra un interés en estudios que abordan la complementariedad o integración de estas dos fuentes, que son a menudo las más prominentes en la transición energética.

"Hidrógeno verde" (4 artículos) y "Energía eólica" (4 artículos): Estas dos categorías tienen una representación igual. El hidrógeno verde es una tecnología emergente con gran potencial para la descarbonización, y su presencia indica que la investigación en Colombia está comenzando a explorar esta área. La energía eólica, por su parte, sigue siendo un pilar importante.

"Biomasa" (3 artículos): La biomasa también figura en la agenda investigativa, lo cual es relevante para un país con un sector agrícola importante.

"Hidroeléctrica" (2 artículos): Aunque Colombia tiene una fuerte tradición hidroeléctrica, en el contexto de nuevas investigaciones sobre renovables (especialmente no convencionales), su menor número indica un enfoque investigativo más orientado hacia fuentes emergentes o menos explotadas en términos de innovación y ciencia de datos.

Menor Representación de Otras Fuentes

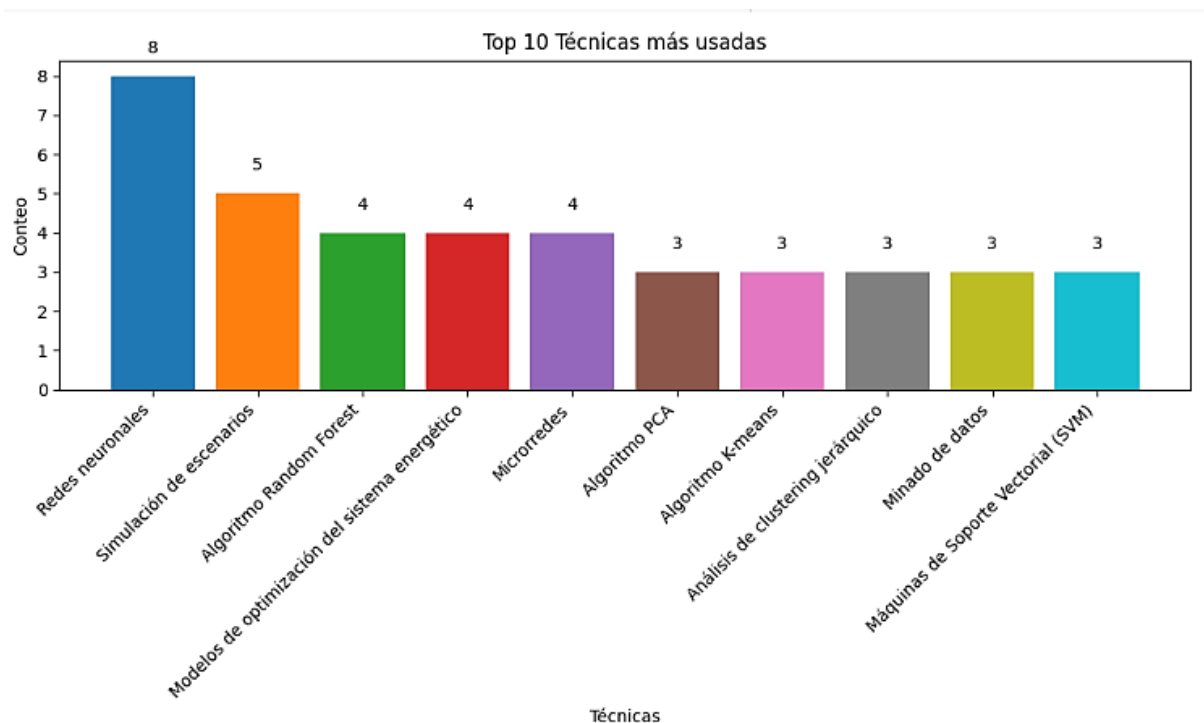
"Energía híbrida termo-solar" (1 artículo) y "Energía geotérmica" (1 artículo): Estas fuentes aparecen con una menor frecuencia, sugiriendo que son áreas de investigación menos exploradas o que presentan mayores desafíos (tecnológicos, económicos, geográficos) en el contexto colombiano actual.

Técnicas Empleadas en las Investigaciones

Los resultados arrojaron diversas técnicas en ciencia de datos y analítica empleados en cada una de las investigaciones, tales como se miran en la Tabla 4 para el análisis se emplearán las 10 primeras técnicas abordadas, este resumen se visualiza en la Figura 19.

Figura 19

Técnicas Empleadas en las Investigaciones



Nota. El gráfico muestra la frecuencia de uso de diferentes técnicas de ciencia de datos y analítica en los artículos investigados. Autor, 2025.

Liderazgo de las Redes Neuronales

Con un conteo de 8, las "Redes neuronales" son la técnica más utilizada. Esto es significativo porque las redes neuronales, una forma de aprendizaje automático (Machine Learning) e inteligencia artificial, son muy potentes para modelar relaciones complejas, realizar

pronósticos, de generación energética, demanda, precios, y así optimizar sistemas. Su prominencia sugiere que la investigación en energías renovables en Colombia está empleando métodos avanzados para abordar problemas complejos.

Importancia de la Simulación y Optimización

La "Simulación de escenarios" (5) ocupa el segundo lugar. Esta técnica es relevante en el sector energético para evaluar el impacto de diferentes variables, planificar inversiones y tomar decisiones bajo incertidumbre.

Los "Modelos de optimización del sistema energético" (4) también tienen una presencia destacada. La optimización mejora la eficiencia, reduce costos, gestiona el despacho de energía y planifica la expansión de la infraestructura de energías renovables.

Uso de Algoritmos de Aprendizaje Automático (Machine Learning)

"Algoritmo Random Forest" (4): Es un algoritmo de conjunto versátil utilizado para clasificación y regresión, conocido por su robustez y buen rendimiento.

"Algoritmo K-means" (3): Un algoritmo popular de clustering para agrupar datos no etiquetados, útil para identificar patrones o segmentar, por ejemplo, perfiles de consumo energético o zonas con potencial renovable similar.

"Análisis de clustering jerárquico" (3): Otra técnica de clustering que crea una jerarquía de clusters, ofreciendo una visión más detallada de las agrupaciones.

"Máquinas de Soporte Vectorial (SVM)" (conteo de 3): Son modelos supervisados eficaces tanto para clasificación como para regresión, especialmente útiles con datos de alta dimensionalidad.

La presencia de estas diversas técnicas de Machine Learning indica una aplicación sofisticada de la ciencia de datos para extraer conocimiento y realizar predicciones a partir de los datos energéticos.

Otras Técnicas Relevantes

"Microrredes" (4): su inclusión aquí sugiere que los artículos que analizan o diseñan microrredes utilizan diversas herramientas analíticas y de modelado. Las microrredes son clave para la resiliencia energética y la integración de renovables a nivel local.

"Algoritmo PCA" (Análisis de Componentes Principales) (3): Es una técnica de reducción de dimensionalidad muy utilizada para simplificar conjuntos de datos complejos manteniendo la mayor parte de la información, lo que puede ser útil antes de aplicar otros algoritmos.

"Minado de datos" (3): abarca el proceso de descubrir patrones y conocimiento útil en grandes conjuntos de datos. Su presencia indica un enfoque exploratorio y de descubrimiento en las investigaciones.

La investigación en energías renovables en Colombia ha avanzado significativamente, incorporando técnicas analíticas sofisticadas como redes neuronales, simulaciones y modelos de optimización para mejorar la predicción y eficiencia de los sistemas energéticos. La adopción de algoritmos de aprendizaje automático y el uso de herramientas como Random Forest, SVM, K-means y PCA reflejan una madurez en la aplicación de la ciencia de datos al sector. Además, las microrredes han ganado importancia como soluciones descentralizadas y resilientes, especialmente en zonas no interconectadas, permitiendo el acceso a energía limpia y asequible, y promoviendo el desarrollo sostenible en comunidades apartadas del país (Álvarez et al., 2024).

Este enfoque integral demuestra un compromiso creciente con la innovación tecnológica y la sostenibilidad en la transición energética de Colombia.

Nube de Palabras

La nube de palabras de la Figura 20 revela un enfoque centrado en técnicas avanzadas de análisis de datos y aprendizaje automático, en aplicaciones dentro del sector energético. Se destacan métodos como redes neuronales, algoritmos de Random Forest y SVM, junto con técnicas de optimización y simulación de escenarios. Además, se subraya la importancia de herramientas predictivas y el análisis de series temporales. La diversidad metodológica, que abarca desde el análisis de sensibilidad hasta modelos más especializados, refleja un campo que utiliza enfoques cuantitativos sofisticados para resolver problemas complejos, particularmente relacionados con la energía y la inteligencia artificial.

Figura 20

Nube de Palabras de Técnicas Empleadas en las Investigaciones



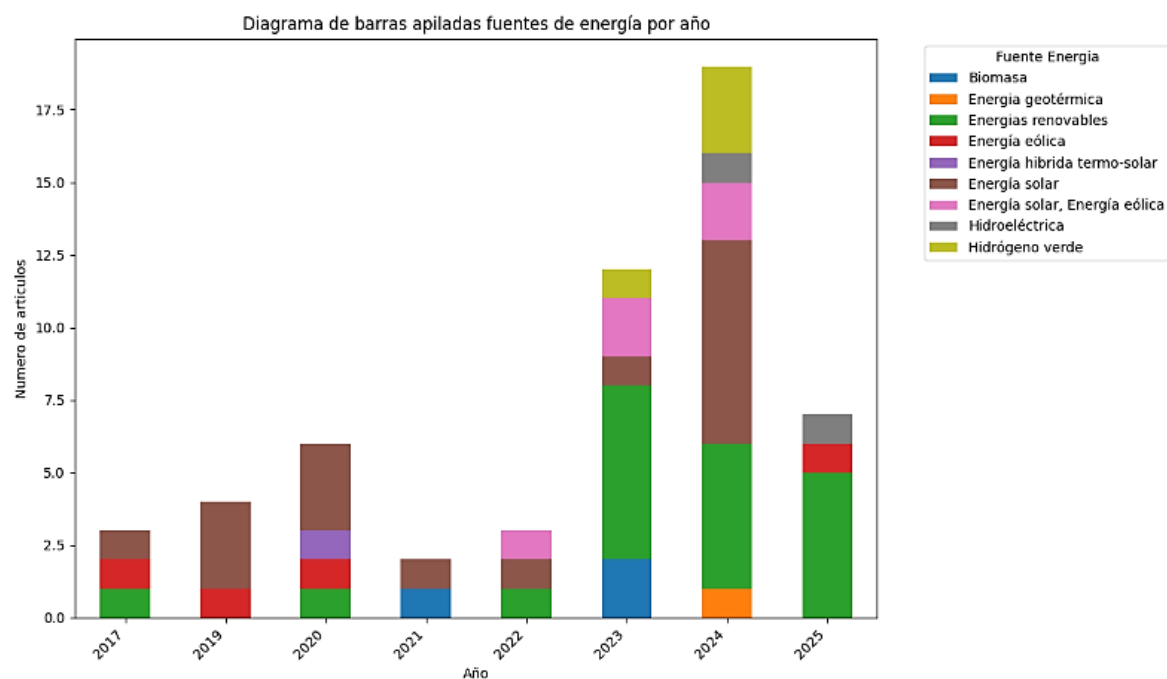
Nota. Nube de palabras que destaca las metodologías y enfoques analíticos predominantes en los artículos. Autor, 2025.

Diagrama de Barras Apiladas

Este diagrama, Figura 21, es empleado para comprender la evolución y la penetración relativa de la investigación en diferentes fuentes de energía renovable a lo largo del tiempo en Colombia, según el conjunto de artículos.

Figura 21

Diagrama de Barras por Fuente de Energía



Nota. Este gráfico, muestra la proporción de artículos que se dedican a cada fuente de energía específica, dentro de ese mismo año. Autor, 2025.

Observaciones Clave y Tendencias

La altura total de las barras aumenta significativamente con el tiempo, especialmente de 2022 a 2024, lo que confirma el aumento general en la producción académica que ya se había discutido anteriormente. El año 2024 es el pico de producción total.

La investigación muestra un dominio temprano y constante de la fuente de energía "Energías Renovables" entre 2017 y 2019, evidenciando un enfoque introductorio en el tema; aunque han surgido fuentes específicas, los estudios generales han mantenido un interés continuo. Sin embargo, desde 2019, la "Energía solar" ha emergido como la fuente dominante en términos de volumen de investigación, alcanzando su pico en 2023 y 2024, lo que resalta su relevancia en el sector. Simultáneamente, el "Hidrógeno verde" ha ganado notable tracción en 2023 y 2024, reflejando una creciente atención hacia esta tecnología emergente en el contexto de descarbonización global. También se pueden concluir las siguientes afirmaciones:

Evolución del Enfoque: La investigación ha evolucionado desde estudios más generales sobre energías renovables hacia un enfoque más profundo en fuentes específicas, destacándose la energía solar como la principal en los años más recientes.

Dinamismo Reciente: Los años 2023 y 2024 muestran la mayor diversificación y volumen, con un fuerte impulso en energía solar, la combinación solar-eólica y el hidrógeno verde. Esto refleja una maduración y especialización del campo de investigación.

Reflejo de Prioridades y Potencial: La distribución de la investigación por fuente probablemente refleja una combinación del potencial de recursos en Colombia (alto potencial solar), avances tecnológicos, políticas de incentivo y la agenda global de transición energética (auge del hidrógeno verde).

Áreas Emergentes y Consolidadas: El gráfico permite identificar áreas consolidadas (solar), emergentes con fuerte crecimiento (hidrógeno verde, solar-eólica combinada) y otras con interés más esporádico o de nicho (geotérmica, biomasa).

Heapmap Fuentes de Energía por Técnicas Empleadas

Una vez realizado el mapa de calor (Heatmap), entre las variables Fuente_Energía y técnicas, ver Figura 22, se obtienen los siguientes resultados, aclarando que solo se analizan las 10 primeras debido a la gran variedad de técnicas que emplean las diferentes investigaciones.

Adaptación de Técnicas a Fuentes: Existe una clara adaptación de las técnicas de ciencia de datos a las problemáticas y características de cada fuente de energía. No se usan las mismas herramientas para todo.

Redes Neuronales Versátiles: Las redes neuronales aparecen como una técnica transversal importante para varias fuentes (Biomasa, Solar, Solar-Eólica combinada, y en menor medida para Renovables en general), probablemente por su capacidad para modelar sistemas complejos y hacer predicciones.

Importancia de la Simulación y Optimización: Para fuentes emergentes o con alta variabilidad/incertidumbre (Eólica, Hidrógeno Verde, y Renovables en general), la simulación de escenarios y los modelos de optimización son la base de estos.

Técnicas de Clustering para Hidroeléctrica: El uso particular de técnicas de clustering para la hidroeléctrica es una observación interesante que merecería una exploración más profunda sobre qué aspectos específicos se están analizando.

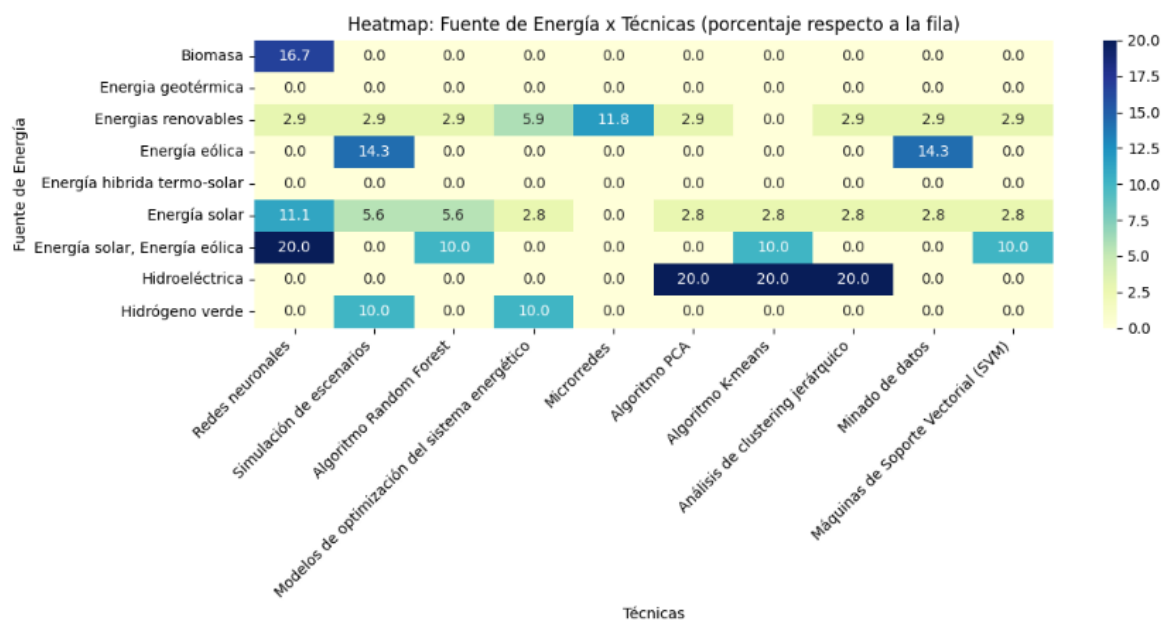
Microrredes en Estudios Generales: La técnica o concepto de "Microrredes" destaca en los estudios más generales de "Energías renovables", lo que subraya la importancia de la integración descentralizada.

Brechas o Áreas de Oportunidad: Las fuentes como Geotérmica o Híbrida Termo-Solar muestran poca o ninguna aplicación de estas técnicas top 10, lo que podría ser una brecha o

simplemente reflejar un bajo volumen de investigación de estas herramientas analíticas específicas.

Figura 22

Heatmap Fuente de Energía por Técnicas



Nota. Este mapa de calor refleja la relación entre el tipo de Energía de las investigaciones por las técnicas empleadas. Autor, 2025.

Prueba Chi Cuadrado de Independencia

Se realiza para determinar si existe una relación estadísticamente significativa entre las variables "Fuente de Energía" y las "10 primeras Técnicas" de ciencia de datos utilizadas en los artículos de la investigación. Obteniendo los siguientes valores como resultado:

Chi-cuadrado: 55.078

Valor p: 0.905

Grados de libertad: 80

Se concluye que no hay evidencia de una relación estadísticamente significativa entre la Fuente de Energía y las 10 primeras Técnicas utilizadas, dado que el valor p (0.905) es mucho mayor que 0.05, no se puede rechazar la hipótesis nula. Esto significa que, desde un punto de vista estadístico y basándose en esta prueba, las diferencias que se observaron en el heatmap anterior (donde veíamos que ciertas técnicas parecían más frecuentes para ciertas fuentes de energía) podrían deberse al azar o a las fluctuaciones muestrales, en lugar de una asociación sistemática y generalizable entre el tipo de fuente de energía y la elección de una técnica de ciencia de datos específica. Algunas Razones para la No Significancia, podrían interpretarse con el tamaño de Muestra Pequeño en Algunas Celdas, la prueba de Chi-cuadrado puede ser menos potente (es decir, menos capaz de detectar una relación real) si muchas celdas en la tabla cruzada tienen frecuencias esperadas bajas (generalmente, se recomienda que no más del 20% de las celdas tengan una frecuencia esperada menor a 5, y ninguna menor a 1). Con 80 grados de libertad, al tener una tabla bastante grande, y al ser el número total de artículos no muy alto, se presenta este problema. La naturaleza Exploratoria Real, no existe una especialización o estandarización fuerte de qué técnica usar para qué fuente, además de mencionar la gran cantidad de técnicas que se emplean en las investigaciones.

Conclusiones

La investigación ha permitido describir detalladamente la ruta de la energía eléctrica en Colombia, identificando las etapas de generación, transmisión, distribución y comercialización, así como los actores y elementos clave en cada fase, proporcionando una comprensión integral del sistema energético nacional.

Se ha investigado la configuración de la matriz energética colombiana, con un énfasis particular en la evolución y participación de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) durante la última década. Los resultados indican un crecimiento en la incorporación de estas fuentes, aunque la dependencia de fuentes convencionales, especialmente la hidráulica, sigue siendo predominante. La energía solar es la fuente renovable no convencional con mayor atención en la investigación reciente.

La evaluación del potencial de la ciencia de datos ha demostrado ser fundamental en la planificación, monitoreo y optimización de la generación eléctrica a partir de fuentes renovables. Técnicas como el modelado predictivo, el aprendizaje automático y la inteligencia artificial son indispensables para gestionar la intermitencia de fuentes como la solar y la eólica, y para mejorar la eficiencia operativa.

El análisis estadístico de la aplicación de la ciencia de datos en energías renovables en Colombia, basado en la revisión sistemática de 56 artículos científicos publicados entre 2015 y 2025, revela un incremento notable en la producción académica en los últimos tres años (2022-2024). Las redes neuronales, la simulación de escenarios y los modelos de optimización energética son las técnicas más empleadas, reflejando un enfoque hacia la predicción, planificación y eficiencia.

A pesar del avance y la diversificación en la investigación de energías renovables y la aplicación de ciencia de datos, la prueba Chi-cuadrado de independencia no mostró una relación estadísticamente significativa entre la elección de una técnica de ciencia de datos específica y una fuente de energía particular en los estudios analizados. Esto podría sugerir que la elección de técnicas aún es exploratoria o que el tamaño de la muestra en algunas combinaciones es limitado.

La ciencia de datos se posiciona como un aliado estratégico indispensable para la transición energética en Colombia, facilitando la integración de FNCER, optimizando la gestión de la red eléctrica y contribuyendo a la construcción de un sistema energético más resiliente, sostenible y alineado con los compromisos climáticos y de desarrollo sostenible del país.

Recomendaciones

Fomentar la Investigación Aplicada y Estandarización de Técnicas: Promover estudios que no solo exploren nuevas técnicas de ciencia de datos, sino que también busquen validar y estandarizar la aplicación de las técnicas existentes (como redes neuronales y modelos de optimización) para fuentes de energía renovable específicas en el contexto colombiano. Esto ayudaría a consolidar metodologías robustas y replicables.

Fortalecer la Adopción de Ciencia de Datos en el Sector Energético: Impulsar la colaboración entre la academia, el sector privado y las entidades gubernamentales (como UPME, CREG, XM) para acelerar la implementación de soluciones basadas en ciencia de datos en la operación y planificación real del sistema energético. Esto incluye la creación de plataformas de datos abiertos y el desarrollo de capital humano especializado.

Diversificar el Enfoque en Fuentes Renovables Emergentes: Si bien la energía solar y eólica son importantes, se recomienda incentivar la investigación y aplicación de ciencia de datos en otras fuentes con potencial en Colombia, como la geotérmica y el hidrógeno verde, para diversificar aún más la matriz energética y aprovechar todos los recursos disponibles.

Complementar los análisis técnicos con investigaciones que evalúen el impacto socioeconómico de la integración de energías renovables mediante ciencia de datos, así como los ajustes regulatorios necesarios para facilitar la adopción de estas tecnologías y modelos predictivos en el mercado eléctrico colombiano.

Promover la Gestión Integral de Datos Energéticos: Establecer mecanismos para la recolección, gestión y análisis de grandes volúmenes de datos (Big Data) del sector energético. Esto permitiría aplicar técnicas de ciencia de datos de manera más efectiva para el

mantenimiento predictivo de infraestructuras, la predicción precisa de la demanda y generación, y la optimización de redes inteligentes.

Continuar el Monitoreo de Tendencias Investigativas: Dada la rápida evolución del campo, es importante seguir analizando las tendencias en la aplicación de ciencia de datos a las energías renovables para identificar oportunamente nuevas herramientas, enfoques y áreas de oportunidad que puedan ser relevantes para Colombia.

Referencias Bibliográficas

- Álvarez, E. D., Idárraga, J. C., Márquez, A., Muñoz, M. D., Martínez, Y., Tonguino, A. P., Carvajal, S. X., & López García, D. (2024). *Electrificación rural sostenible a partir de potenciales energéticos locales: una mirada a las zonas no interconectadas colombianas*.
- Arias, D., Gavela, P., & Riofrio, J. (2022). Estado del Arte: Incentivos y Estrategias para la Penetración de Energía Renovable. *Revista Técnica Energía*, 18(2), 91-103.
<https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v18.n2.2022.494>
- Bordons, C., Torres, F. G., & Valverde, L. (2015). Gestión óptima de la energía en microrredes con generación renovable. *Revista iberoamericana de automática e informática industrial*, 12(2), 117-132.
- Cardona, B. L., & Cifuentes, J. I. (2016). *Energía y conceptos aplicados*.
<http://www.repositorio.usac.edu.gt/4481/>
- Castillo, L. F. M. (2024). *Contratos de energía eléctrica en Colombia: análisis de su evolución y desafíos en la regulación*. Regulación minero-energética de Colombia en los últimos 25 años: evolución, retos y perspectivas, 313.
- Davies, L., & Saygin, D. (2023). Energía renovable distribuida en Colombia. OECD *Environment Working Papers*.
- De Kuyper, J. C. V. (2014). *Fuentes de energía renovables y no renovables. Aplicaciones*.
<https://doaj.org/article/71b527b5427c40e28b1a89b3eb2011e9>
- Galeano, D. A. (2023). La Energía Nuclear en el Sector Eléctrico Colombiano: Una Alternativa Técnica y Sostenible. *Revista ION*, 36(3). <https://doi.org/10.18273/revion.v36n3-2023001>

- Di Pietro, S. (2022). Procesos de la transición urbana a sistemas autónomos descentralizados de energía renovable. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 37(3), 807-837.
<https://doi.org/10.24201/edu.v37i3.2073>
- Iván, V., Melitón, E., José, M., & Agustina, O. (2015). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 16(3), 471-478. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.012>
- Levicán, C. (2023). Inteligencia Artificial El ítem perdido de la transición energética. *Revista Energías Renovables*, 8(45). <https://doi.org/10.59730/rer.v8n45a1>
- Martínez, J. M. R., & Lora, E. E. S. (Eds.). (2015). *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*.
- Mujal-Rosas, R. M. (2014). Protección de sistemas eléctricos de potencia. En *Iniciativa Digital Politécnica eBooks*. <https://doi.org/10.5821/ebook-9788476539736>
- Noguera-Salas, O., Pinto-García, R. A., & Villarreal-Padilla, J. E. (2018). La eficiencia de los nuevos materiales fotosensibles usados en la fabricación de paneles solares. *ITECKNE Innovación E Investigación En Ingeniería*, 15(1), 7.
<https://doi.org/10.15332/iteckne.v15i1.1959>
- Ordoñez-Palacios, L. E., León-Vargas, D. A., Bucheli, V., & Ordoñez-Eraso, H. A. (2020). Predicción de radiación solar en sistemas fotovoltaicos utilizando técnicas de aprendizaje automático. *Revista Facultad de Ingeniería*, 29(54), e11751.
<https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.11751>
- Paniagua, R. C., & Duarte Pérez, A. (2021). Generación eléctrica en Colombia y su transición hacia Fuentes Renovables No Convencionales. *Corficolombiana*.
<https://investigaciones.corficolombiana.com>

- Paredes, E. D. O., Quintero, S. X. C., & Agudelo, J. P. (2019). Solar Radiation Prediction Using Machine Learning Techniques: A review. *IEEE Latin America Transactions*, 17(04), 684-697. <https://doi.org/10.1109/tla.2019.8891934>
- Peña, D. G. (2019). *Optimización del diseño de panel solar pv/t para edificación*. Doctoral dissertation, Universidad de Burgos.
- Pérez Londoño, S. M., & López Quintero, J. G. (2018). *Transformadores eléctricos*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Planas, Oriol. (2022). ¿Cómo funciona una central nuclear de fisión? <https://energia-nuclear.net/centrales-nucleares/como-funciona-una-central-nuclear>
- Ramírez, C. A. Y. (2023). Metodología basada en ciencia de datos para el desarrollo de pronóstico de la generación de energía de una planta solar fotovoltaica. *INGENIUS*, 30, 19-28. <https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.02>
- Rincón, S. M., & Camargo, A. K. V. (2018). Energías renovables un futuro óptimo para Colombia. *Punto de vista*, 9(13). <https://doi.org/10.15765/pdv.v9i13.1120>
- Romero Lozano L. (2017). *Gestión del montaje de parques eólicos*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Valero, A., Calvo, G., & Valero, A. (2021). *Thanatia: límites materiales de la transición energética*.

Apéndices

Apéndice A

Base de Datos Artículos Relacionados con Ciencia de Datos y Energías Renovables

Se puede consultar la base de datos en el siguiente enlace:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1jdY5IQW_80xzePIPj5So1NERZnRAHGjq/edit?usp=sharing&ouid=112815149161029851849&rtpof=true&sd=true