

Guía metodológica para la implementación de la tecnología blockchain en el sector energético colombiano a partir de una revisión de la literatura.

Valentina Fuentes Diaz

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Industrial

Director

Néstor Fabián Santos Nova

Magister en Administración de Empresas

Codirector

Juan David Márquez González

Magister en Ingeniería Industrial

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Ingeniería Industrial

Bucaramanga

2024

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	9
1. Metodología .....	13
2.Revisión de literatura .....	17
2.1 Contextualización .....	17
2.2.Evolución .....	18
2.3.Integración en diferentes sectores .....	19
2.4.Sector energético.....	21
2.5.Caracterización de BCT en el sector energético mundial .....	24
2.6.Certificados de energía renovable (REC) .....	30
2.7.Contexto del sector energético colombiano .....	35
3.Guía de implementación .....	40
4.Conclusiones .....	42
5.Recomendaciones .....	44
6.Referencias bibliografías .....	45

**Lista de Tablas**

Tabla 1 Planteamiento metodológico de la revisión de literatura.....	13
Tabla 2 Criterios de inclusión y exclusión.....	14
Tabla 3 Planteamiento metodológico del desarrollo de la guía de implementación.....	16
Tabla 4 Aplicaciones de la BCT en diferentes áreas .....	20
Tabla 5 Contexto de BCT por país .....	25
Tabla 6 Desafíos de adoptar BCT en países en vía de desarrollo .....	29
Tabla 7 Proyectos de REC con blockchain.....	34
Tabla 8 Aplicación de la BCT en el sector energético colombiano.....	38

**Lista de Figuras**

Figura 1 Principio de funcionamiento de blockchain .....	18
Figura 2 Evolución del blockchain .....	19
Figura 3 Metodología para la implementación de la tecnología blockchain .....	40

### **Lista de Apéndices**

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS”

**Apéndice A.** Análisis bibliométrico

**Apéndice B.** Guía metodológica para la implementación de blockchain en el sector energético colombiano

### Glosario

**Blockchain:** diversos autores presentan una definición sobre blockchain o “cadena de bloques”, la describen como un libro mayor compartido e inmutable que facilita el registro de transacciones en una red descentralizada (Gillpatrick, Boža, et al., 2022). Se considera una tecnología que garantiza de manera segura la transacción entre dos partes o más, eliminando la necesidad de un tercero gracias a su naturaleza segura y privada (Pilkington, 2016).

**Certificados de energía renovable (REC):** los certificados de energía renovable (REC) o certificados verdes son una herramienta basada en el mercado y un mecanismo de seguimiento de la electricidad generada a partir de fuentes renovables a medida que fluye hacia la red eléctrica, por ende, permite etiquetar la cantidad de electricidad producida gracias a recursos de energías limpias certificando al titular (Zuo, 2022).

**Energías renovables:** las energías renovables o energías limpias son aquellas que son inagotables a escala humana y se producen de manera continua basadas en la utilización del sol, el agua, el viento, el calor del subsuelo, entre otros. Además, ayudan al problema de consumo al mismo tiempo que proponen un modelo energético sostenible donde se resalta la importancia de la protección del medio ambiente (Merino, 2007).

**Industria energética:** se entiende de forma global la industria energética como aquellas industrias relacionadas con la producción y venta de energía en donde las tecnologías y fuentes de energía trabajan de manera interconectada para generar procesos integrales y más eficientes. Esta industria se compone de: energía por medio de combustibles fósiles, energías renovables, energía nuclear y la energía eléctrica (Bargalló, 2021).

## Resumen

**Título:** Guía metodológica para la implementación de la tecnología blockchain en el sector energético colombiano a partir de una revisión de la literatura\*

**Autor:** Valentina Fuentes Diaz\*\*

**Palabras Clave:** Blockchain, Certificados verdes, Colombia, Energías renovables, REC, Sector energético, Seguridad informática, transición energética.

### Descripción:

El sector energético global está atravesando una transición de fuentes de energía basadas en combustibles fósiles a energías renovables (RES), un cambio impulsado por la implementación de tecnologías digitales que certifican y garantizan la producción de energía limpia, como la eólica, solar, hidroeléctrica y de biomasa. En este contexto, la tecnología blockchain se destaca como una estrategia crucial que responde a diversas necesidades. Este estudio se enfoca en realizar una revisión híbrida de la literatura, combinando una revisión sistemática con literatura gris, para analizar el uso de blockchain en el sector energético mundial. Se describe la tecnología en general, su aplicación en el sector energético, y se caracteriza su uso a nivel internacional. Además, se examina el estado de su integración en el sector energético colombiano, especialmente en la generación de certificados de energía renovable (REC). La investigación se organiza en cuatro áreas principales: (1) la aplicabilidad del blockchain en el sector energético, (2) el desarrollo y desafíos de su implementación a nivel mundial, (3) la idoneidad de los certificados de energía renovable soportados en esta tecnología, y (4) los desafíos y oportunidades de blockchain en el sector energético colombiano. El estudio concluye destacando la importancia de los certificados de energía renovable y cómo blockchain apoya la veracidad y confiabilidad en los procesos de emisión, distribución y transacción de energía, garantizando la transparencia en la producción y uso de energías limpias. Se señala que, a nivel internacional, esta tecnología es valiosa para el desarrollo de los países, permitiendo la automatización y eficiencia del mercado energético sin intermediarios. En Colombia, blockchain mejora la red eléctrica y facilita la migración hacia sistemas descentralizados de energía, liberando el mercado energético.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Ingeniería Industrial. Director: Néstor Fabián Santos Nova. Magister en Administración de Empresas. Codirector: Juan David Márquez González. Magister en Ingeniería Industrial.

## Abstract

**Title:** Methodological guide for the implementation of blockchain technology in the Colombian energy sector based on a literature review \*

**Author(s):** Valentina Fuentes Diaz\*\*

**Key Words:** Blockchain, Green certificates, Colombia, REC, Renewable energies, Energy sector, IT security, energy transition.

### Description:

The global energy sector is undergoing a transition from fossil fuel-based energy sources to renewable energy sources (RES), a change driven by the implementation of digital technologies that certify and guarantee the production of clean energy, such as wind, solar, hydroelectric and biomass. In this context, blockchain technology stands out as a crucial strategy that responds to diverse needs. This study focuses on conducting a hybrid literature review, combining a systematic review with grey literature, to analyze the use of blockchain in the global energy sector. The technology in general is described, as well as its application in the energy sector, and its use at an international level is characterized. In addition, the status of its integration in the Colombian energy sector is examined, especially in the generation of renewable energy certificates (REC). The research is organized into four main areas: (1) the applicability of blockchain in the energy sector, (2) the development and challenges of its implementation at a global level, (3) the suitability of renewable energy certificates supported by this technology, and (4) the challenges and opportunities of blockchain in the Colombian energy sector. The study concludes by highlighting the importance of renewable energy certificates and how blockchain supports the veracity and reliability of energy issuance, distribution and transaction processes, guaranteeing transparency in the production and use of clean energy. It is noted that, at an international level, this technology is valuable for the development of countries, allowing the automation and efficiency of the energy market without intermediaries. In Colombia, blockchain improves the electrical grid and facilitates migration towards decentralized energy systems, freeing up the energy market.

---

\* Degree Work

\*\*Faculty of Physico-mechanical Engineering. School of Industrial and Business Studies. Industrial Engineering. Director: Néstor Fabián Santos Nova. Master in Business Administration. Codirector: Juan David Márquez González. Master in Industrial Engineering.

## Introducción

La energía es uno de los factores que influyen al cambio climático y según las Naciones Unidas representa alrededor del 60% de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (Moran, 2024). Lo anterior, resulta en un reto asociado a implementar estrategias de intervención, seguimiento y gestión de recursos para permitir el acceso a fuentes de energía asequible, segura, sostenible y moderna impactando directamente en la promoción de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7 y 13) asociados con la transición y el desarrollo sostenible de las naciones (Birol, 2023).

Bajo este escenario, promover la transición oportuna establece múltiples aspectos críticos que suponen un reto como la incertidumbre asociada a las RES (por sus siglas en inglés, renewable energy sources), ya que están influenciadas por las condiciones climáticas, lo que a su vez dificulta el pronóstico y representa un obstáculo para la gestión de las operaciones de los sistemas eléctricos (Eid et al., 2016). Adicionalmente, la falta de recursos tecnológicos y la inestabilidad asociada a la red son factores determinantes para respaldar adecuadamente el suministro de energía, lo cual retrasa el proceso de información e intercambio energético, afectando una respuesta temprana en la relación de oferta-demanda (Juszczak & Shahzad, 2022a).

Los desarrollos de proyectos tecnológicos innovadores y actualizados representan los principales mecanismos para permitir una transición energética justa y segura, los cuales, por medio de enfoques orientados a la descarbonización del sector, mitigan las emisiones de gases de efecto invernadero promoviendo la producción energética de RES tales como hidroeléctrica, eólica y la solar fotovoltaica (International Energy Agency (IEA) et al., 2023). Para el desarrollo y crecimiento del sector en torno a la producción energética a partir de RES es fundamental implementar acciones dirigidas a avances en la energía distribuida o descentralizada. La

descentralización de los sistemas energéticos permite que la generación de energía provenga de múltiples fuentes, lo que impacta en la reducción de los costos asociados a la producción y el transporte (Nour, Chaves-Avila, & Sánchez-Miralles, 2022). En respuesta a las estrategias para el avance de la energía distribuida, blockchain se presenta como un componente esencial (International Energy Agency (IEA) et al., 2023). Esta tecnología tiene la capacidad de apoyar la transición energética gracias a sus características de transparencia, seguridad, inmutabilidad, integridad y descentralización (Decreto 0929 de 2023 Ministerio de minas y energía, n.d.). Además, garantiza transacciones seguras entre dos o más partes y elimina la necesidad de intermediarios (Mohammad Saif et al., 2022). Esta estrategia se encuentra en continuo desarrollo y ha sido ampliamente adoptada a nivel internacional debido a su capacidad de promover la energía 3D (Descarbonización, Descentralización y Digitalización), siendo principalmente impulsada por países desarrollados los cuales poseen infraestructura, innovación tecnológica, apoyo político y marcos regulatorios orientadas hacia la producción de energías limpias (Mohammad Saif et al., 2022). En este contexto y ante la apremiante necesidad de cambiar la forma de producción energética actual, los países en vía de desarrollo se encuentran elaborando planes y estableciendo programas que respalden dicha transición. Estos países están invirtiendo en investigaciones y desarrollos tecnológicos que integren soluciones basadas en estrategias digitales, lo cual tiene un impacto positivo en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Juszczak & Shahzad, 2022a).

Por su parte en Colombia actualmente la generación de energía proviene un 66% de recursos hídricos, un 31% de recursos como gas, carbón y otros, y un 3% de otras fuentes de energía renovable (Decreto 0929 de 2023 Ministerio de minas y energía, n.d.). Dada su ubicación geográfica, el país cuenta con múltiples fuentes hídricas, de generación de biomasa y energía

geotérmica proveniente del calor del subsuelo, sin embargo, su lento proceso de integración y generación de políticas que apoyen la introducción de recursos tecnológicos en el sector hacen que presente una urgente necesidad para soportar la transición energética y mejorar las condiciones técnicas de la red eléctrica nacional (Decreto 0929 de 2023 Ministerio de minas y energía, n.d.). Los recientes gobiernos están concentrando esfuerzos en la generación de políticas y estrategias que permitan sustituir la dependencia a las actividades extractivas de combustibles fósiles y acelerar una transición energética justa aprovechando los excedentes del petróleo y el carbón para contribuir a la financiación de nuevos sectores energéticos (Urrego et al., 2023). Por lo tanto, Colombia se suma a la iniciativa "Energías Renovables en Latinoamérica y El Caribe – RELAC", la cual, mediante una alianza entre 17 países, busca incrementar en un 70% la participación en las RES en el mercado energético latinoamericano para el año 2030, con la intervención en proyectos solares y centrales hidroeléctricas, de biomasa, eólicos, entre otros (Ministerio de Minas y Energía, n.d.).

Como consecuencia los esfuerzos de las entidades nacionales se encuentran direccionados en cinco ejes: (1) el aumento en la inversión en energías limpias y la descarbonización, (2) la sustitución progresiva de la demanda de combustibles fósiles, (3) la revisión y flexibilización de la regulación para acelerar la generación de energías renovables, (4) la reindustrialización de la economía y (5) el aumento en la eficiencia energética (Minenergía, 2023). Para avanzar en estos objetivos, es crucial respaldar el proceso con la adopción de tecnologías de la industria 4.0, un área en la que el país tiene un nivel de desarrollo insuficiente (Minenergía, 2023). Por esta razón el gobierno propone en el Plan Nacional de Desarrollo duplicar la inversión en ciencia, tecnología y conocimiento, enfocándose especialmente en tecnologías como blockchain para la cual plantea la

elaboración de una guía de referencia para la implementación de la tecnología en diferentes industrias del sector público (Minenergía, 2023).

Por lo tanto, y con el objetivo de contribuir a la base científica para el desarrollo de proyectos de implementación de la tecnología blockchain en la industria energética, este documento busca responder la pregunta de investigación ¿Cuáles son los desafíos de implementar la tecnología blockchain para apoyar la transición energética en Colombia?

El documento tiene la finalidad de realizar un estudio científico apoyado en una revisión de literatura que recopile y sintetice información relevante, clara y concisa, así como aspectos importantes en torno a principios, características y principales ventajas de la tecnología en el aseguramiento de la información y el soporte de transacciones seguras, además de estudiar su avance en el sector energético en los países desarrollados y en vía de desarrollo y su campo de acción en los REC (por sus siglas en inglés, Renewable Energy Certificates). Como resultado, el estudio busca proporcionar una guía metodológica que permita establecer una ruta para la adopción de la tecnología blockchain en el sector energético colombiano.

El documento en adelante se estructura de la siguiente manera: (2) métodos, segmento que presenta la metodología llevada a cabo, (3) Revisión de literatura correspondiente a los resultados provenientes de la sección 2, (4) contexto de la guía metodológica, (5) conclusiones y finalmente (6) recomendaciones.

## 1. Metodología

La investigación emplea una metodología híbrida basa en la guía PRISMA y H. Snyder (Snyder, 2019). Esta metodología es adecuada para el estudio porque combina herramientas de la revisión de literatura científica para la recolección de documentos en bases de datos como Scopus y Web of Science. Además, se complementa con literatura gris para contextualizar la situación actual del país en la adopción de la BCT en el sector energético. Esta tecnología se encuentra en desarrollo en el país, justificando así la necesidad de explorar tanto fuentes académicas establecidas como información menos convencional para obtener una visión integral que permita cumplir el propósito de la investigación. La metodología híbrida está compuesta por tres etapas que consisten en el diseño de la revisión de literatura, el desarrollo de la revisión de literatura y la síntesis y análisis de resultados, lo cual garantiza la obtención de información idónea. La primera fase consiste en el diseño de la revisión de literatura y aborda la pregunta de investigación, el enfoque de la revisión y la estrategia de búsqueda; la segunda fase presenta el desarrollo de la revisión donde se realiza la identificación y selección de los documentos y finalmente en la tercera fase se lleva a cabo la síntesis de resultados, la cual, condensa la información encontrada en los documentos, presentando una conclusión frente a la misma Tabla 1.

**Tabla 1**

*Planteamiento metodológico de la revisión de literatura*

Fases	Etapas
Fase 1: Diseño de la revisión de literatura	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Formulación de la pregunta de investigación</li> <li>2. Selección de las bases de datos</li> <li>3. Formulación de la ecuación de búsqueda</li> <li>4. Validación de la estrategia de búsqueda</li> </ol>

Fases	Etapas
Fase 2: Desarrollo de la revisión de literatura	1. Identificación de los estudios relevantes 2. Selección de los estudios relevantes
Fase 3: Síntesis y análisis de resultados	1. Reporte escrito de la revisión 2. Validación del reporte

Fuente. Autora

Con el objetivo de estructurar este estudio define la siguiente pregunta de investigación ¿Cuáles son los factores críticos para soportar la transición energética en Colombia, a partir de la tecnología blockchain?

Ahora bien, para la selección de la muestra de artículos asociados al tema central de investigación se seleccionan dos bases de datos Scopus y Web of Science debido al rigor científico, el proceso integral y revisado para la publicación de artículos y la cantidad de campos científicos que cubren ambas bases de datos [13]. Posteriormente, se realiza la identificación de los estudios relevante teniendo en cuenta criterios como el periodo de tiempo, el tipo de documento, el idioma, las temáticas específicas de conocimiento y las palabras clave, como se evidencia en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Criterios de inclusión y exclusión*

Criterio	Descripción
Ventana de tiempo	2018-2023
Idioma	Inglés, español
Tipo de documento	Artículos, Revistas, documentos de sesión y libros
Categorías de conocimiento	<i>Energy, Computer Science, Engineering, Mathematics, Social sciences, Decision Sciences, Business, Management and Accounting, Environmental Science, Economics, Econometrics and Finance, Materials Science, Physics and Astronomy.</i>

Criterio	Descripción
Temáticas	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se incluyen documentos asociados con <i>blockchain</i> y su evolución desde su origen.</li> <li>-Se incluyen documentos asociados a la aplicación, retos y oportunidades de las tecnologías, específicamente, <i>blockchain</i> en el sector energético.</li> <li>-Se incluyen documentos de casos aplicados de <i>blockchain</i> en los diferentes países en cualquier arista del sector energético</li> <li>-Se incluyen documentos que tengan por estudio palabras clave como <i>blockchain</i>, energía, certificados verdes, transición energética, energía distribuida, recursos de energía renovable.</li> <li>-Se incluyen artículos que tengas como objetivo de estudio temas como la transición energética, los certificados verdes, certificados de carbono o certificados de energía renovable.</li> </ul>

Fuente. Autora

Después de implementar los criterios de inclusión y exclusión, se examinan los títulos, resúmenes, conclusiones, investigaciones futuras de los documentos y referencias de los estudios con el objetivo de descartar aquellos artículos que por su contenido o metodología no se encuentran alineados al propósito de la investigación.

Como consecuencia se establece una ecuación de búsqueda compuesta por tres capas, la primera relaciona aspectos asociados con “blockchain, BCT, blockchain technology”; la segunda asocia conceptos como “energy, renewable energy, energy transition”; la tercera capa relaciona “renewable energy source, renewable energy certificate, REC”. Los principales campos utilizados para la búsqueda son títulos, abstract y palabras claves con el objetivo de delimitar los resultados de la investigación con estudios que contemplen mayor relación con el enfoque propuesto desde los apartados principales de búsqueda de la literatura. Con base en la declaración PRISMA, la cual expone el flujo de la información a través de las diferentes fases de una revisión sistemática, se hace la recuperación documentos, obteniendo inicialmente en Scopus 247 y 135 publicaciones en WOS. Posteriormente, al aplicar los criterios de inclusión y exclusión especificados y la estrategia

de bola de nieve hacia atrás (identificación de autores potenciales por medio de las referencias bibliográficas de los estudios seleccionados) se obtuvieron 59 documentos correspondientes a artículos, conferencias, revisiones y capítulos de libros.

Como parte de la validación para la estrategia de búsqueda se plantea el Apéndice A, este hace referencia al análisis bibliométrico, el cual permite evaluar cómo se ha logrado la generación de los documentos y la forma en que se han dado conocer los avances científicos para analizar el desarrollo de las áreas de estudio, los autores, las líneas de investigación, entre otros.

Por otra parte, para el desarrollo de la guía metodológica se plantean dos fases adicionales como se evidencia en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Planteamiento metodológico del desarrollo de la guía de implementación*

<b>Fases</b>	<b>Etapas</b>
Fase 4: Desarrollo de la guía metodológica	1. Diseño de la guía 2. Identificación de los módulos de flujo de información 3. Construcción de la guía
Fase 5: Revisión y ajuste de la guía metodológica	1. Revisión de la guía

Fuente. Autora

La cuarta fase describe el desarrollo de la guía metodológica. Inicialmente, se realiza el diseño de la guía identificando los requerimientos y antecedentes presentados en Colombia enfocados en blockchain, así como las etapas pertinentes considerando la estructura y el contenido necesario. Luego, se identifican los modelos de flujo de información relevante que debe compilar la guía, detallando el paso a paso y las actividades que debe comprender cada etapa. Finalmente, se condensa la información recuperada, teniendo en cuenta la información obtenida de la revisión de la literatura. Por último, en la quinta fase la guía propuesta es revisada y aprobada por el director

del proyecto de investigación debido a su conocimiento de la tecnología blockchain. Dado el alcance del proyecto, no se realiza una prueba de implementación en alguna organización del sector energético colombiano.

## **2. Revisión de literatura**

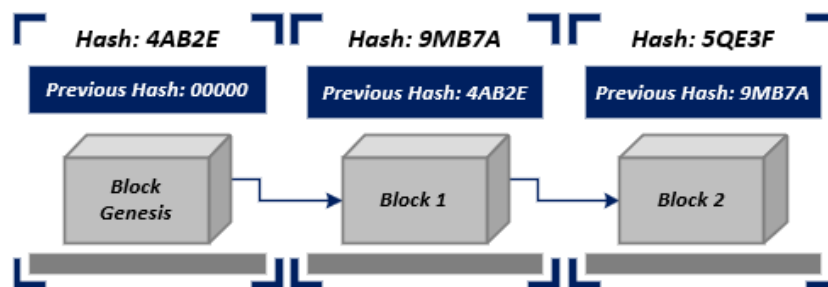
### **2.1 Contextualización**

Los BCT es una tecnología emergente presentada por Satoshi Nakamoto en 2008 como la tecnología detrás de la moneda digital Bitcoin que entró en operación durante la crisis financiera mundial de 2009. Esta tecnología refleja su principio de funcionamiento en una base de registros agrupados como “bloques” que luego se agregan a una cadena, uno tras otro, teniendo en cuenta la información que va a almacenarse, el valor único conocido como hash y el hash del bloque anterior, como se muestra en la Figura 1. Además, las transacciones se dan por consenso, es decir, la mayoría de los nodos pertenecientes a la cadena deben estar de acuerdo para que estas se lleven a cabo, por lo tanto, los registros únicamente puedan modificarse si más del 51% de los nodos están bajo el control de hackers (expertos en tecnologías de la computación e información), lo cual es un suceso poco probable (Puthal et al., 2018). Los mecanismos de consenso validan las transacciones y garantizan que no surjan divergencias (corrupciones), ya que guardan al menos una copia parcial de la información contenida en los bloques, por ende, entre más grande la cadena, esta será más descentralizada y segura frente a los diferentes ataques que pueda recibir (Mahjoub et al., 2022). Estos elementos permiten garantizar la seguridad, el orden y la coherencia, ya que cualquier cambio en la información de un bloque resulta en un cambio de su valor hash (Madaan et al., 2020). Lo anterior, según Karpunina et al., 2021, permite la descentralización del almacenamiento y el procesamiento de la información, la inmutabilidad comprobable de los datos, la transparencia de las operaciones, la irrevocabilidad de las transacciones, la posibilidad del

anonimato de los participantes, la falta de necesidad de confianza, el mantenimiento de la red por parte de los propios usuarios, la seguridad, la automatización, la programabilidad y la imposibilidad de limitar las operaciones del cliente.

### Figura 1

*Principio de funcionamiento de blockchain*



Nota. Información tomada de (Hamdi et al., 2023; Madaan et al., 2020).

## 2.2. Evolución

Desde su desarrollo, esta tecnología atravesó diferentes etapas; en sus inicios fue rechazada por su complejidad, después fue considerada una tecnología innovadora y a la fecha presenta una implementación masiva que ha escalado a diversas industrias. En la actualidad, ha presentado 4 diferentes etapas (Figura 2); Blockchain 1.0 concentrada en aplicaciones para soportar transacciones digitales de las monedas electrónicas; Blockchain 2.0 enfocada en registrar, confirmar y transferir contratos y propiedades, es decir, contratos inteligentes soportados por plataformas electrónicas con mayor seguridad y velocidad; Blockchain 3.0 aparece cuando la tecnología cambia su enfoque de la industria financiera e integra las aplicaciones descentralizadas (DApp) en otros campos como el gobierno, la salud, la ciencia, el IoT (por sus siglas en inglés, Internet of Things), la energía, entre otras y Blockchain 4.0 la cual se encuentra relacionada con

la Inteligencia Artificial (IA) y el análisis de datos con el fin optimizar los procesos para las aplicaciones inteligentes (Casino et al., 2019).

**Figura 2**

*Evolución del blockchain*



Nota. Información tomada de (Casino et al., 2019; Hamdi et al., 2023; Xu et al., 2019).

### 2.3. Integración en diferentes sectores

Desde 2018, como señala Akinradewo et al., 2023, gracias a características como seguridad, descentralización, inmutabilidad, trazabilidad, transparencia y confiabilidad, BCT presenta una amplia aplicabilidad en diferentes industrias, como se muestra en la Tabla 4. Su utilidad va más allá del área financiera en la que principalmente soporta la seguridad privada, el acceso a microcréditos, la banca en línea segura, entre otros. Siendo que actualmente ha sido introducido en otros campos como el gobierno donde responde a situaciones como la corrupción al crear una verdadera identidad digital, apoyar la seguridad de la votación electrónica y gestionar los registros; en las cadenas de suministro apoya la visibilidad de las transacciones en todos los eslabones, es decir, desde el proveedor hasta el consumidor final, además de las verificaciones del

origen, la propiedad y la transferencia segura de fondos; en la integración de otras tecnologías como IoT que conjuntamente permiten mejorar la seguridad de los dispositivos interconectados, mantener el anonimato y gestionar los dispositivos por medio de actualizaciones seguras; en el área de la salud donde apoya la gestión de la historia clínica electrónica, el intercambio de los datos médicos que permita el acceso de pacientes e insumos de forma segura por medio de la trazabilidad y en el sector energético donde permite potenciar la seguridad de las redes de energía, reducir los costos de las transacciones, facilitar el comercio de energía entre proveedores y consumidores, respaldar la calidad de la información en un sistema descentralizado y asistir la producción, gestión y distribución de la energía verde que soporta la transición energética (Gillpatrick, Boğa, et al., 2022).

**Tabla 4**

*Aplicaciones de la BCT en diferentes áreas*

Áreas	Aplicaciones de la tecnología blockchain
Finanzas	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Liquidación de activos financieros</li> <li>-Mercados de predicción y transacciones</li> <li>-Auditoría e intercambio de criptomonedas</li> <li>-Pagos y transacciones digitales</li> </ul>
Salud	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Gestión de la historia clínica electrónica (HCE)</li> <li>-Adjudicación automatizada de reclamos</li> <li>-Intercambio de datos médicos</li> <li>-Autenticidad de registros y pacientes en línea</li> <li>-Gestión de la atención medica publica</li> </ul>
Gobierno	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reducción de la corrupción en voto electrónico</li> <li>-Gestión de registros e identidades</li> <li>-Notarias virtuales</li> <li>-Gestión y registro de tierras</li> <li>-Identidad digital</li> </ul>
Cadenas de suministro	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Identificación de productos falsificados</li> <li>-Mantener los registros y rastrear los productos</li> <li>-Minimizar los costos de mensajería</li> <li>-Permitir transacciones sin intermediarios</li> <li>-Mejorar mecanismos de seguimiento y trazabilidad</li> </ul>

Áreas	Aplicaciones de la tecnología blockchain
Seguridad y privacidad	-Soluciones de <i>hardware</i> y <i>software</i> -Anonimato gracias al uso de identidad digital -Resistencia a la censura
Energía	-Comercio de energía -Control del mercado eléctrico -Esquemas de transacciones de energía entre pares -Habilitador para la descarbonización del sector -Certificados de energía renovables

Nota. Información tomada de (Casino et al., 2019; Gillpatrick, Boğa, et al., 2022; Madaan et al., 2020)

#### 2.4. Sector energético

Debido a la actual necesidad de migrar a energías renovables y consolidar un mercado de energía basado en fuentes limpias considerando el cambio climático y la variabilidad de las RES, el sector energético se encuentra atravesando una era de transformación. Esta transformación se encuentra principalmente soportada por nuevas tendencias tecnológicas de la industria 4.0 las cuales además de permitir un desarrollo y efecto significativo en el sector, permite acelerar el cumplimiento de las metas trazadas en los ODS planteados por la ONU para lograr un sector energético descarbonizado (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2022). En ese sentido, blockchain puede extenderse a un mayor número de usuarios para invertir y comercializar energía renovable ya que promete mejorar la eficiencia y transparencia del sector, reducir costos y facilitar la integración de fuentes de energía distribuida (Thomas et al., 2022). BCT junto a otras tecnologías puede aplicarse a diferentes casos de uso en las empresas de energía como en: la facturación y ventas, las criptomonedas, tokens e inversión, el comercio y suministro descentralizado de energía, las microrredes y los contratos inteligentes, la gestión de la seguridad y la identidad, la distribución de recursos, los certificados verdes y el comercio de car-bono, la gestión de la red y la transferencia de datos, los dispositivos inteligentes, la automatización y la movilidad eléctrica (Andoni et al., 2019).

A pesar del amplio uso de la tecnología en el sector, esta se encuentra expuesta a desafíos técnicos, económicos, sociales, ambientales e institucionales (Thukral, 2021); retos tales como el desarrollo de protocolos de gestión de redes escalables sensibles a los retrasos, a la seguridad y a la privacidad, el mejoramiento de las técnicas de gestión de consensos para las aplicaciones de energía inteligente, la sincronización y disponibilidad de bases de datos convencionales para la implementación de la gestión de datos fuera de la cadena, el desarrollo de plataformas de código abierto con tecnologías integra-das apropiadas para admitir múltiples aplicaciones de energía inteligente, entre otros (Ul Hassan et al., 2019). Así mismo Andoni et al., 2019, señala que la tecnología requiere de altos costos para su desarrollo y adaptación y presenta limitaciones para garantizar los requisitos legales de privacidad, almacenamiento y gestión de datos, la verificación en tiempo real del sistema, la resiliencia de la red mientras crece el volumen de fuentes de energía renovables y la transformación requerida por las estructuras existentes del mercado energético en un corto periodo de tiempo.

Esta situación plantea un panorama retador para dar cumplimiento a los objetivos trazados utilizando el modelo energético actual debido a la creciente demanda de electricidad la cual se espera se duplique para 2050 (Barceló et al., 2023). Por lo tanto, para resolver estos problemas es fundamental el apoyo de tecnologías de la industria 4.0 como la IA, el aprendizaje automático y el análisis predictivo, las cuales permiten predecir la demanda, producción y el consumo de energía, identificar los patrones de consumo y las transacciones de energía en tiempo real, hecho que responde a los vacíos del BCT (Andoni et al., 2019). Bajo este escenario, la transición se puede lograr con la implementación de tecnologías digitales y BCT el cual posee un rol importante al soportar una plataforma de operación segura y confiable, la conexión de dispositivos que generan electricidad (paneles solares, bombas de calor, etc.), incluidos dispositivos de almacenamiento

(diversos tipos de baterías), y la gestión del flujo de electricidad desde el productor hasta el consumidor final (Hua et al., 2022). Las regulaciones que rigen la electricidad en este momento no permiten el comercio de electricidad a través de la red informática en donde se gestiona la BCT, es decir, el modelo P2P (por sus siglas en inglés correspondientes a peer to peer), por ello, es necesario crear una microrred que permita a los pequeños consumidores vender el exceso de energía renovable, es decir, la introducción de los prosumidores al mercado energético (Barceló et al., 2023). Los Prosumidores son pequeños o medianos usuarios que producen y consumen energía, su generación eléctrica se basa en la utilización de energías renovables, como paneles solares, lo que les permita satisfacer sus necesidades eléctricas y vender el excedente a otros consumidores o enviarlo a la red principal (Hua et al., 2022). Al no tener acceso a fuentes como el petróleo y el carbón, se espera que reduzcan la generación basada en combustibles fósiles; sin embargo, se encuentran expuestos a varios desafíos como estructuras de mercados energéticos inadecuadas, infraestructuras de información de los sistemas energéticos que no pueden manejar los crecientes flujos de información, esquemas de precios de la energía y mecanismos de equilibrio que son independientes de los comportamientos del intercambio de energía (Hua et al., 2022).

Lo indicado soporta la necesidad de evolución de los mercados eléctricos debido a la alta infiltración de los recursos renovables, ya que los consumidores se están convirtiendo en prosumidores. Es así como en los modelos P2P, BCT permite que los consumidores accedan a las energías renovables a un precio razonable de sus vecinos y los productores vendan el exceso a un precio mejor, se reduzca el costo de la electricidad ya que no se transporta desde las centrales eléctricas y las transacciones sean públicas y no se puedan manipular (Gawusu et al., 2022). Por otro lado, Wang & Su, 2020, mencionan que gracias a la tecnología para los sistemas de energía se puede resolver la equidad de los incentivos, los costos regulatorios, la tarifa de transacción entre

nodos distribuidos, el problema de velocidad de los recursos, el problema del robo y fuga de electricidad, los problemas de confianza de oferta y demanda, garantizar la seguridad de los datos, planificar el suministro de energía y mejorar la eficiencia de la cadena de suministro.

Como señala Dehalwar et al., 2022, BCT se concibe como una tecnología prometedora que se utiliza ampliamente en los esquemas de comercio de energía sin intermediarios, y transforma la innovación de la generación y difusión de la información para tecnologías de energía eléctrica sostenible en el mundo, superando los desafíos como el peso de las transacciones, la posibilidad abierta del anonimato de sus participantes y la falta de estándares aprobados en la regulación; además de ello, la BCT contribuirá en redes de energía eléctrica distribuidas, para integrar tecnologías energéticas más limpias con mayor eficiencia, donde la ciberseguridad de la información se puede sustentar mediante certificados digitales que se intercambian entre el cliente y el servidor utilizando protocolos de seguridad para mejorar la autenticidad de los nodos de la cadena.

### **2.5. Caracterización de BCT en el sector energético mundial**

En el sector energético es necesario realizar cambios, los cuales deben apuntar al cumplimiento de los ODS, esta situación resulta indispensable ya que como se menciona anteriormente el sector energético en su mayoría depende de los combustibles fósiles, los cuales comprenden la mayoría de las emisiones de los gases de efecto invernadero a nivel mundial (Barinova et al., 2021). Actualmente, los centros de energía renovable compiten en costos con los combustibles fósiles convencionales; el uso de la energía aumenta con los ingresos en las economías emergentes y en desarrollo, el cual se ve afectado por el nivel de riqueza y el crecimiento de cada país (Croutzet & Dabbous, 2021). Lo anterior, soporta la necesidad de cambio en el sector en busca de modificar la estructura de la oferta de energía, sustentado en una transición

energética moderna caracterizada por la sustitución de combustibles fósiles por RES apoyadas por tecnologías digitales (Barinova et al., 2021). En este sentido, para la integración de tecnologías en el sector energético, la mayor diferencia entre un país desarrollado a uno en vía de desarrollo se da principalmente en el apoyo político en su marco regulatorio de la tecnología (Juszczak et al., 2022). En la Tabla 5 se muestra el contexto en diferentes países desarrollados y en vía de desarrollo en la integración de la tecnología blockchain en el sector energético (Wipo, 2022, 2023).

**Tabla 5**

*Contexto de BCT por país*

País	Contexto
<b>Desarrollados</b>	
<b>Finlandia</b> (Bosco et al., 2018; Di Silvestre et al., 2021)	Comercializa tecnologías de energía renovable, proponen un ambiente más emprendedor para recaudar tarifas de alimentación, certificados verdes u obtener permisos legales para iniciar las operaciones apoyados en BCT
<b>Alemania</b> (Bosco et al., 2018; Di Silvestre et al., 2021)	Implementación de proyectos de energías renovables e integración de los prosumidores en el mercado energético apoyado por el desarrollo tecnológico. Se está creando solución en blockchain para administrar la red eléctrica con medidores inteligentes para monitorear la producción y el consumo de energía.
<b>Dinamarca</b> (Di Silvestre et al., 2021)	Implementación de proyectos de energías renovables e integración de los prosumidores en el mercado energético apoyado por el desarrollo tecnológico.
<b>Países bajos</b> (Bosco et al., 2018; Di Silvestre et al., 2021)	Implementación de proyectos de energías renovables e integración de los prosumidores en el mercado energético apoyado por el desarrollo tecnológico. Se está creando solución en BCT para administrar la red eléctrica con medidores inteligentes para monitorear la producción y el consumo de energía.

<b>País</b>	<b>Contexto</b>
<b>EE. UU.</b> (Zhao et al., 2019)	Permite el desarrollo de BCT en el sector energético; pionero en el programa de ingeniería aplicada de energía BCT en el mundo con la microrred de Brooklyn comercializando el exceso de energía.
<b>Japón</b> (Ahl et al., 2020)	Artículo estudia las oportunidades tecnológicas, sociales, ambientales, institucionales y económicas de la integración de BCT en el sector energético.
<b>Italia</b> (Bosco et al., 2018)	Estudios aplicados al intercambio de energías renovables representados como tokens que pueden conservarse o ser usados para comprar energía equivalente.
<b>Subdesarrollados</b>	
<b>Polonia</b> (Juszczak et al., 2022)	Busca regulaciones más favorables de BCT para mejorar la seguridad energética, reducir el apoyo a la industria minera y disminuir la importación energética.
<b>Rumania</b> (Sima et al., 2022)	Por medio de incentivos gubernamentales y la exigencia de los consumidores se observa un aumento en RES tales como las turbinas eólicas e instalaciones fotovoltaicas. Además, la integración de BCT en las redes inteligentes y comunidades energéticas permitió gestionar los flujos de energía.
<b>Turquía</b> (Erol et al., 2021)	Uso de BCT para modelos comerciales innovadores en el ecosistema de energía solar fotovoltaica en busca de mejorar la economía circular.
<b>África</b> (Nwaiwu, 2021)	Regulación gubernamental para la transición energética que son sometidas a decisiones políticas, ausencia de participación de tecnologías como BCT para el intercambio de exceso de energía.
<b>Arabia Saudita</b> (Khubrani & Alam, 2023)	Pionero en la producción de energías fósiles que cuenta con una red de energía centralizada donde la implementación de tecnologías como BCT para la transición energética presentan barreras de entrada causados por desafíos legales, técnicos y económicos.

<b>País</b>	<b>Contexto</b>
<b>Egipto</b> (El-Zonkoly, 2021)	Las transacciones de BCT se encuentran limitadas al comercio de energía eléctrica de los centros de energía.
<b>Rusia</b> (Barinova et al., 2021)	La digitalización en el sector de energías renovables es limitada ocasionado por las ambiciones de industrias relacionadas en el almacenamiento de energía, transporte eléctrico entre otros.
<b>Brasil</b> (Lodetti et al., 2022; Singh & Solanki, 2022)	Desarrollan plataformas de monitoreo de consumo, generación y créditos utilizando BCT para crear una red descentralizada entre empresas. Además de modelos para el comercio verificado de energía renovable con compradores anónimos.

Fuente. Autora

De este modo, es evidente que los países desarrollados controlan el sector de las energías renovables soportado por BCT, habiendo superado la fase del establecimiento de políticas, son pioneros en programas de ingeniería aplicada a la energía BCT; además, integran a los prosumidores en el mercado energético, comercializan energía renovable y desarrollan proyectos de microrredes integrados a nivel local para aprovechar las propiedades de la tecnología (Bosco et al., 2018; Di Silvestre et al., 2021; Juszczak et al., 2022; Zhao et al., 2019). En contraste, los países en vía de desarrollo apenas están sumándose a esta iniciativa debido a los diferentes retos relacionados con la transición energética, como la infraestructura deficiente, las leyes inflexibles y las transacciones limitadas. Por ello, estos países se encuentran en la etapa inicial de la tecnología y están desarrollando proyectos piloto para su implementación en pequeñas comunidades, buscando regulaciones más favorables, la digitalización del sector y la integración en las redes

inteligentes que permitan gestionar los flujos de energía (Barinova et al., 2021; El-Zonkoly, 2021; Juszczyk et al., 2022; Nwaiwu, 2021; Sima et al., 2022).

Los países desarrollados dominan la investigación básica de la cadena de bloques energética bajo la consideración de que dominan la BCT más avanzada (Q. Wang & Su, 2020). Esto se debe a que dichos países cuentan con estabilidad política lo cual promueve las instalaciones de energía renovable a través de incentivos (Di Silvestre et al., 2021). Los estudios alrededor del mundo muestran que los países desarrollados tienen más recursos, tasas más altas de I+D, infraestructura modernizada (incluidas microrredes o medidores inteligentes) y un apoyo gubernamental más fuerte para las tecnologías de energía distribuida como lo es BCT (Juszczyk & Shahzad, 2022b). Bajo esta consideración, los empresarios del sector en estos países encuentran en la BCT beneficios para sus empresas como procesos sin necesidad de intermediarios, nuevas plataformas de energía P2P, especialmente en el mercado local, eficiencia, transparencia, automatización de procesos y la venta de electricidad orientada al cliente gracias a la reducción de la cadena de valor que permite llegar más rápido al consumidor final (Juszczyk & Shahzad, 2022b).

Por otro lado, los países en vía de desarrollo siguen siendo los más vulnerables debido a la falta de mercados regionales funcionales de electricidad, las elevadas pérdidas de la red eléctrica y su alta dependencia a la energía fósil; además, desafíos como los sistemas nacionales de apoyo inadecuados, un músculo financiero limitado para la inversión en energía y tecnología, los riesgos políticos y regulatorios para la inversión en infraestructura energética e incentivos inadecuados o inexistentes, obstaculizan la integración de las tecnologías como BCT en el sector energético (Levi-Oguike et al., 2019). En la Tabla 6 se describen los desafíos de adoptar la BCT en los países en vía de desarrollo. Por otra parte, Zhao et al., 2019, sugiere que para el desarrollo de blockchain de energía en estos países se requiere políticas de regulación flexibles, entornos de financiación

favorables, integración de diferentes tecnologías y cuerpo técnico e infraestructura. Además, Erol et al., 2021, menciona que algunos de los facilitadores más importantes de la futura implementación de BCT en el sector energético deben ser: La existencia de programas gubernamentales de incentivos efectivos, la existencia de nueva normativa, la interoperabilidad (capacidad de redes de energía descentralizadas para interconectarse entre sí sin intermediarios), el compromiso de los empresarios y el conocimiento y la experiencia.

**Tabla 6**

*Desafíos de adoptar BCT en países en vía de desarrollo*

<b>Desafío</b>	<b>Elementos</b>
Tecnológicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo y Escalabilidad</li> <li>-Seguridad y privacidad</li> <li>-Almacenamiento de datos</li> <li>-Vulnerabilidades del software</li> <li>-Amenaza de delitos cibernéticos</li> <li>-Ataques de enrutamiento</li> <li>-Consumo de energía</li> </ul>
Gobernanza	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Falta de regulaciones efectivas</li> <li>-Confianza insuficiente entre las partes interesadas</li> <li>-Falta de una junta reguladora activa, transparencia del código</li> <li>-Falta de rendición de cuentas y responsabilidad entre las partes interesadas</li> </ul>
Ambientales	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Preparación del ecosistema</li> <li>-Regulaciones respecto a la protección ambiental</li> <li>-Costo ambiental</li> <li>-Preocupaciones sobre la propiedad intelectual.</li> </ul>
Organizacionales	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Procesos de negocio</li> <li>-Mentalidad de status quo</li> <li>-Escasez de aplicaciones atractivas</li> <li>-Retorno de la inversión (ROI) incierto</li> </ul>

Desafío	Elementos
	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Falta de integración con el sistema heredado existente</li> <li>-Falta de un modelo de negocio disruptivo</li> <li>-Infraestructura inadecuada</li> <li>-Resistencia al cambio en la cultura organizacional</li> <li>-Falta de voluntad para adoptar blockchain.</li> </ul>
Conocimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Limitación del conocimiento</li> <li>-Credibilidad de blockchain</li> <li>-Falta de familiaridad con la tecnología</li> <li>-Falta de profesionales capacitados</li> <li>-Poco apoyo de la alta dirección</li> </ul>

Nota. Información tomada de (Mohammad Saif et al., 2022).

En la siguiente sección se aborda el tema de los certificados de energía renovable (REC), los cuales se involucran en el sector energético con el objetivo de apoyar la transición energética. Según autores como Ergün, 2024; Mould et al., 2022, estos certificados son una herramienta fundamental para realizar un seguimiento de la producción y el consumo de energía renovable, mejorando la transparencia del sistema al integrar la tecnología blockchain (Ergün, 2024). Por otra parte, los REC permiten crear un sistema que garantice que el origen de la energía consumida provenga de fuentes limpias (Mould et al., 2022), constituyéndose así en una herramienta importante para sustentar una transición energética confiable, justa y transparente hacia fuentes de energía renovables.

## 2.6. Certificados de energía renovable (REC)

Como se menciona en la sección anterior, el desarrollo de tecnologías como BCT, aprendizaje automático junto a herramientas como la teoría de juegos pueden abordar desafíos claves en el sector energético tales como la intermitencia de las fuentes renovables y el manejo de

datos que permite equilibrar la oferta y demanda en tiempo real (Ergün, 2024). La integración de IoT junto a BCT es fundamental, ya que se complementan entre sí dentro del espacio de la descentralización, el monito-reo en tiempo real y el intercambio de datos y la seguridad (Chen et al., 2021). En consecuencia, los estándares corporativos actuales requieren que las organizaciones cuantifiquen las emisiones adquiridas del consumo de electricidad, razón por la que han recurrido a las RES (Delardas & Giannos, 2022). Uno de los métodos para certificar la adquisición de energía renovable son las criptomonedas blockchain, por ejemplo, NRGcoin, el funcionamiento de esta se da cuando un prosumidor produce energía, la inyecta a la red y el medidor inteligente de su casa genera 1 NRGcoin por cada 1 kWh de energía renovable (Croutzet & Dabbous, 2021). Otro ejemplo es ElectricChain y SolarCoin, plataformas que cooperan para generar ingresos en Solarcoin (criptomoneda) para cada propietario de una planta eléctrica basada en fuentes de energía renovable (FER) (Vergura, 2020).

En muchos países, la estructura de generación, transmisión y distribución de energía hace imposible rastrear físicamente la fuente de energía hasta su consumo, esto se debe a que las fuentes se mezclan y distribuyen, por ello, surge la necesidad de una red como solución a la trazabilidad de los recursos energéticos (Marques et al., 2023). La certificación de energías renovables en muchos casos está regulada por parte de entidades privadas como en Canadá y Estados Unidos que, a pesar de contar con apoyo gubernamental, autoridades regionales y otras entidades, no son sujetos emisores de certificados (Yamaguchi et al., 2021). Los REC se utilizaron desde 2001 en países como Australia, Suecia, Italia, Alemania, Reino Unido e India con el fin de promover el crecimiento de las energías renovables en un régimen regulatorio y de políticas de apoyo (Yamaguchi et al., 2021). En la actualidad, el proceso de emisión de REC y el mecanismo de fijación de precios inflexible debe ser examinado por varios departamentos después de que la

empresa presente los materiales pertinentes, lo que genera un gran consumo de mano de obra y recursos (Gao et al., 2021), además, requiere de la intervención de un corredor que incurre en la tarifa de transacción sumado a los problemas de seguridad presentados en los registros de transacción (Kim et al., 2020). Esto hace que REC presenten inconsistencias en la definición del generador de energía renovable entre jurisdicciones, emisiones fraudulentas de certificados y la filtración de la privacidad [60].

Los RECs, certificados verdes o garantías de origen (GO) son un mecanismo de seguimiento de la electricidad generada a partir de fuentes renovables a medida que fluye hacia la red eléctrica (Zuo, 2022), los cuales fueron integrados al mercado energético con dos objetivos, (1) disminuir el costo del uso de electricidad renovable y (2) fundamentar el uso de electricidad renovable mientras se reduce la huella de carbono (D. Wang et al., 2021). Los RECs son una forma de rastrear y comercializar la producción de energía renovable, en el certificado debe estar disponible información como las condiciones, la cantidad, el tipo y la fuente geográfica de energía para todos los participantes de la red inteligente, además, utiliza recursos inteligentes como el IoT para lograr una comunicación efectiva en tiempo real y minimizar la pérdida de energía (Chen et al., 2021).

El uso de la BCT se plantea como una opción para mejorar el proceso de generación de REC ya que permite garantizar la confiabilidad de la fuente y reducir el tiempo que lleva autenticar y generar el certificado al no necesitar revisar toda la cadena (Yamaguchi et al., 2021). Con la integración de BCT en el proceso de emisión y transacción de REC los usuarios ahorran la tarifa de transacción, aumenta la seguridad y les permite a los vendedores maximizar las ganancias mediante la competencia de los compradores, minimizar la pérdida de comisiones por cargos de participación en el mercado y garantizar resultados comerciales seguros en el mercado

(Yamaguchi et al., 2021). Adicionalmente, BCT permite la tokenización y distribución de REC, esto puede promover la agilidad y transparencia de las transacciones y reducir la burocracia en los medios de pago (Marques et al., 2023). Por lo tanto, BCT tiene la capacidad de crear un mercado abierto de REC don-de los productores y consumidores de energía renovable interactúan directamente (Nour, Chaves-Avila, & Sanchez-Miralles, 2022), normalmente se usa la cadena de consorcio Ethereum y medidores inteligentes para lograr una trazabilidad precisa y una supervisión eficiente de los procesos de emisión y transacción de los certificados garantizando la autenticidad de los datos de transacción y reduciendo el riesgo de fraude (Ergün, 2024). Los certificados por medio de BCT rastrean el flujo contractual de energía para garantizar que no haya doble conteo a lo largo de la cadena de suministro (Mould et al., 2022). Por ello, un sistema de comercio REC basado en BCT permite, un proceso de verificación eficiente donde la producción de energía renovable y la liquidación de facturas de electricidad se pueden consultar en la cadena, la emisión automática de certificados eliminando la necesidad de verificación y ahorrando costo de mano de obra, un mecanismo de funcionamiento sin la intervención de ninguna institución, la solidez del sistema ya que mientras exista un nodo activo se puede restaurar los registros de transacciones, información completa y clara en la que cada fabricante tiene acceso al libro de transacciones y cada nodo puede ver el libro de contabilidad y la trazabilidad de los registros de transacciones gracias a la estructura de la cadena y la introducción de un mecanismo de incentivos en tokens (Zhang et al., 2020).

En la Tabla 7 muestra algunas de las investigaciones compuestas por proyectos que han surgido en el contexto de los REC donde se integra BCT como apoyo para dar mejores propiedades al sistema.

**Tabla 7***Proyectos de REC con blockchain*

<b>Contexto</b>	<b>Evento/ Localidad</b>
Propone una arquitectura basada en BCT Ethereum y contratos inteligentes para facilitar el comercio de RES entre los miembros de una pequeña comunidad	Conferencia Internacional IEEE 2023 sobre Tecnología Industrial (ICIT) (Sachdeva et al., 2023)
Propone una Aplicación Distribuida (DApp) que registra la propiedad y el consumo de energía generada a través de paneles solares y ofrece certificados de energía renovable	2021 7ma Conferencia Internacional sobre Sistemas de Energía Eléctrica (ICEES) (Lakshmi & Thiyagarajan, 2021)
Propone un método de transacción Compra Directa de Energía (DPP) que incorpora las características de reducción de picos de los usuarios y el sistema de REC en las transacciones en una plataforma BCT	58. <sup>a</sup> Conferencia Técnica de Sistemas de Energía Industrial y Comercial de IEEE (Ge et al., 2023)
Muestra un prototipo de proyecto basado en BCT para la emisión de garantías de origen y su seguimiento en la vida útil	2022 18. <sup>a</sup> Conferencia Internacional sobre el Mercado Energético Europeo (EEM) (Nofuentes et al., 2022)
Se propone un sistema REC con BCT y doble subasta CDA que permite a compradores y vendedores ajustar sus ofertas en tiempo real, lo que puede reflejar mejor la demanda del mercado y tiene una mayor eficiencia	2021 IEEE 20.a Conferencia Internacional sobre Confianza, Seguridad y Privacidad en Computación y Comunicaciones (TrustCom) (Gao et al., 2021)
Energy Web Foundation (Alemania, 2017) cada activo de energía recibe un certificado el cual se negocian posteriormente en un mercado basado en BCT	OCDE (Croutzet & Dabbous, 2021)
Destaca la importancia de las tecnologías financieras (“FinTech”) como un factor que influye en el uso de energía renovable	
Energy-Blockchain Lab e IBM utilizan Hyperledger Fabric en una plataforma que implementa una gestión de créditos de carbono	18th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'20) (Vergura, 2020)
CarbonX basada en Ethereum y propone una solución para el comercio de carbono P2P	

Contexto	Evento/ Localidad
Presentan GECKO el primer sistema totalmente descentralizado y sin permisos para emitir, recibir y verificar REC donde los operadores de Sistemas de Distribución (DSO) actúan como autoridad de certificación.	Austria (Knirsch et al., 2020)
Utilizan BCT en el proceso de emisión y comercialización de REC y la doble subasta continua (CDA) para facilitar la recopilación y revisión de datos de REC, mejorar la eficiencia de la emisión y la transparencia de la información, promover transacciones orientadas al mercado y lograr el ajuste flexible de la relación oferta-demanda y la personalización de precios	China (D. Wang et al., 2021)

Fuente. Autora

## 2.7. Contexto del sector energético colombiano

En Colombia, la generación de energía proviene en un 66% de recursos hídricos, un 31% de gas, carbón y otros, y un 3% de otras fuentes de energía renovable (Decreto 0929 de 2023 Ministerio de minas y energía, n.d.). Actualmente, la matriz energética primaria del país se basa en combustibles fósiles, con una alta dependencia económica del sector minero-energético y niveles bajos de generación de valor agregado y productividad. Estas condiciones requieren que el país realice los procesos de transición energética y reindustrialización de forma gradual y articulada, utilizando el conocimiento, la investigación y la innovación (Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación, 2023). Entre los actores principales del sector energético en el país se encuentran el Ministerio de Minas y Energía, junto a organismos de administración, control y vigilancia, y empresas como EPM, ISAGEN, Enel y Celsia, que se destacan por sus ingresos y generación de energía (Moreno Garzón, 2023).

El Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, titulado “Colombia Potencial Mundial de la Vida”, centra uno de sus ejes principales en la transición energética, utilizando los excedentes

financieros del carbón y del petróleo para avanzar hacia una economía verde. Con la acción conjunta de sectores, territorios y actores privados, se busca reducir en un 51% las emisiones de GEI para 2050 mediante la descarbonización de los sistemas productivos (Departamento Nacional de Planeación, 2023). Por ello, el país ha decidido participar activamente en iniciativas internacionales como el cumplimiento del “Acuerdo de París” y la “Alianza Más Allá del Petróleo y el Gas”, una alianza de actores internacionales que trabaja por la transición energética a través de fuentes renovables y la reducción gradual de la dependencia de los hidrocarburos (Minenergía, 2023).

Desde la aprobación de la Ley 1715 de 2014 por el Congreso de la República, se ha impulsado la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Esta ley tiene como finalidad establecer el marco legal y los instrumentos necesarios para promover el aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía y fomentar la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para la producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda, en el marco de la política energética nacional (Ley 1715 de 2014). Entre los avances en este proceso de transición energética se destacan la masificación de fuentes no convencionales de energía renovable como biomasa, solar, eólica, geotérmica y marina, la Estrategia Climática de largo plazo para cumplir con el Acuerdo de París y la formulación de la Política de Transición Energética, estructurada en cuatro estrategias: (1) seguridad y confiabilidad energética, (2) innovación y conocimiento, (3) competitividad y desarrollo económico del sector minero-energético y (4) un sistema energético con bajas emisiones de GEI (Barroso, 2023).

Teniendo en cuenta los objetivos del gobierno frente a la transición del sector energético, el uso de nuevas tecnologías como el blockchain se percibe como una oportunidad para

implementar políticas que promuevan la competitividad, la eficiencia en el uso de los recursos, la sostenibilidad y la confiabilidad del sistema. Desarrollos tecnológicos como el blockchain pueden contribuir a mejorar la eficiencia de la red eléctrica, facilitando una mejor distribución y consumo de energía, permitiendo que actores pasivos (clientes), se con-viertan en participantes activos y promoviendo la integración de nuevas opciones de energías limpias en el sistema (V. Bonilla Martínez & Pérez Ramírez, 2020).

En Colombia la incorporación de esta tecnología a la industria se encuentra en desarrollo, donde la contratación en entidades gubernamentales y la participación en licitaciones públicas, es uno de los mayores problemas que enfrenta la nación, ya que a pesar de contar con entes regulatorios se han presentado conflictos políticos que conducen a casos de corrupción (Ordoñez et al., 2019). A la fecha existe la regulación de BCT en el sector financiero y la Guía de Referencia para la adopción e implementación de proyectos con BCT para el estado colombiano, la cual demuestra el interés y la aplicabilidad en el sector público, específicamente en áreas educativas, financieras y de gobernanza (Osorio Cruz et al., 2022). Por lo tanto, se carece de información relacionada con los proyectos de BCT en el sector privado, lo que genera incertidumbre en las empresas debido al riesgo de incumplimiento por los desafíos legales en el proceso de desarrollo y adaptación de la tecnología. Sin embargo, de considerarse la protección de datos personales, la propiedad intelectual, la prevención del lavado de activos y financiación del terrorismo y las demás limitaciones mencionadas, se reforzaría la confianza y seguridad jurídica para el gobierno, permitiendo que el sector privado aumente la participación en proyectos que usen BCT en otros campos beneficiándose del alcance global y la transparencia que esta ofrece (Narváez et al., 2022).

Particularmente, en el ámbito energético el país cuenta con un sistema eléctrico interconectado que está cata-logado como infraestructura crítica lo cual ratifica la necesidad de

estar en un periodo de transición, por ello, la incorporación de nuevas tecnologías es un proceso novedoso (Mendoza Villamil & Diaz Ardila, 2019). BCT como desarrollo tecnológico e innovador presenta diferentes desafíos para su adopción como la interoperabilidad (capacidad de intercambiar datos de forma segura, comunicarse y trabajar conjuntamente) entre plataformas, la escalabilidad (asignación de recursos de cómputo, almacenamiento requerido por cada nodo para ejecutar el protocolo y capacidad del sistema para manejar un alto volumen de transacciones) y la falta de regulaciones asociadas a la seguridad y privacidad de datos, además la transformación del sector eléctrico y la digitalización y electrificación de la economía aumentan la vulnerabilidad del sector ante ataques cibernéticos (Valencia Rendón, 2021).

Por lo tanto, en Colombia aún son escasos los proyectos o plataformas desarrollados que hacen uso de esta tecnología en el sector energético, como lo muestra la Tabla 8.

**Tabla 8**

*Aplicación de la BCT en el sector energético colombiano*

<b>Proyecto</b>	<b>Participantes</b>	<b>Descripción</b>	<b>Uso blockchain</b>
EcoGox	Plantas y usuarios de energías renovables	Plataforma que emite certificados demostrando que utilizan energías limpias	Notario digital
NEU Energy	Usuarios y prosumidores de energías limpias	Comercializador de energía a partir de fuentes renovables y la generación de token para el intercambio de energía	Registro único para la verificación de la procedencia de cada kWh generado
UNERGY	Usuarios para proyectos de generación de energía con paneles solares	Empresa que realiza proyectos de generación de energía eléctrica limpia con paneles solares	Contratos inteligentes sobre la repartición de utilidades de los inversionistas
Ecoregistry	Prosumidores de energía	Plataforma para validación de bonos de emisión de carbono,	Contratos inteligentes

Proyecto	Participantes	Descripción	Uso blockchain
ElectroChain	Usuarios prosumidores de energía eléctrica	y Proyecto de intercambio de electricidad para la conciliación de pagos y el balance de contratos con los prosumidores de manera directa y en tiempo real.	opera como red privada o consorcio basados en Ethereum Contratos inteligentes para el intercambio de electricidad P2P

Nota. Información tomada de (Peña, 2021; Valencia Rendón, 2021)

Peña, 2021, señala que la integración de la BCT en el sector energético colombiano requiere de un ecosistema colaborativo que promueva la flexibilización de la participación en los intercambios del mercado de energía de los usuarios finales (consumidores y prosumidores) y la regulación de aspectos como la remuneración para el mantenimiento de las redes de transmisión y distribución que sirven como respaldo a los usuarios que estén comprando o generando su propia energía. Además, la creación de incentivos permite que los usuarios ayuden a descentralizar el sistema con el fin de gestionar el ahorro en la expansión de la generación energética y menores pérdidas en el sistema eléctrico. A pesar de los desafíos que presenta en el país, BCT por sus características y adaptabilidad permite mejorar la eficiencia de la red eléctrica al proporcionar una herramienta inmutable frente a los ciberataques, promover la participación de la demanda, facilitar la liberalización del mercado energético y ser una plataforma de consorcio compuesta donde los prosumidores y operadores de red interactúan garantizando la exclusión del proceso de los usuarios inactivos, resolviendo los problemas de escalabilidad sin perder las propiedades de encriptación, seguridad y registros descentralizados (Minenergía, 2023; Valencia Rendón, 2021). Lo anterior, es vital en la nación para soportar la transición a un sistema eléctrico descentralizado, flexible y

participativo enfocado en un funcionamiento más confiable debido a un menor riesgo de manipulación de la información (Minenergía, 2023).

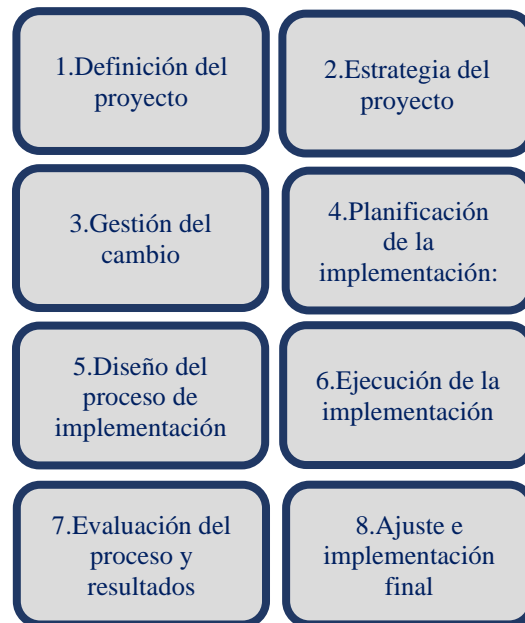
### **3. Guía de implementación**

La Guía metodológica para la implementación de la tecnología BCT en el sector energético colombiano tiene en cuenta los desafíos para la adopción de la tecnología tales como la necesidad de un marco regulatorio, la carencia de regulaciones para la seguridad y privacidad, la infraestructura inadecuada, la falta de innovación tecnológica por una inversión limitada, las leyes inflexibles y los sistemas de apoyo inadecuados, para proporcionar unos lineamientos para la integración de BCT en organizaciones del sector energético, tanto públicas como privadas. Su objetivo principal es optimizar procesos y sistemas a través de una plataforma de comercio de REC, promoviendo así la transición energética y certificando la procedencia de la energía consumida en Colombia.

Basada en el proyecto de maestría de Estrada Maya, 2021 y la guía de referencia para la adopción de BCT en Colombia se adapta al sector energético. La Figura 3 muestra los pasos de la metodología para la implementación de BCT, los cuales son descritos posteriormente.

#### **Figura 3**

*Metodología para la implementación de la tecnología blockchain*



Fuente. Autora

1. Definición del proyecto: Análisis de la situación actual y la definición de retos y oportunidades.

2. Estrategia del proyecto: Definición de objetivos, verificación de la viabilidad, propuesta de valor, apropiación de la tecnología y estructura de blockchain.

3. Gestión del cambio: Diagnóstico de factores ambientales y procesos organizacionales, definición de involucrados y plan de gestión del cambio.

4. Planificación de la implementación: Plan de trabajo, cronograma, recursos, costos, y prueba piloto en una plataforma de comercio de REC.

5. Diseño del proceso de implementación: Estrategias de capacitación, entrenamiento y comunicación.

6. Ejecución de la implementación: Difusión del plan, puesta en marcha de la prueba y la integración de blockchain en la plataforma de comercio REC.

7.Evaluación del proceso y resultados: Auditorías internas, análisis del proceso y resultados.

8.Ajuste e implementación final: Acciones correctivas y preventivas, propuesta final y puesta en marcha ajustada.

En conclusión, la guía es una herramienta integral para la implementación de BCT en el sector energético colombiano, con el objetivo de facilitar la transición energética y mejorar la eficiencia y transparencia del origen de las RES soportado en el comercio de energía renovable por los REC. Se diferencia de la guía metodológica presentada por el autor Estrada Maya, 2021, ya que esta guía se centra en la implementación en el sector energético colombiano, mientras que la de Estrada está orientada a los proyectos de construcción de edificaciones en Colombia.

La guía metodológica se encuentra en el Apéndice b.

#### **4. Conclusiones**

Blockchain es una tecnología innovadora que se encuentra en auge, gracias a sus características permite garantizar la seguridad, transparencia, anonimato, confianza, inmutabilidad y trazabilidad de la información sin necesidad de terceros.

La integración de tecnologías de la industria 4.0 como el internet de las cosas, la inteligencia artificial y BCT son herramientas que pueden apoyar la transición energética que requiere la industria hacia las RES. BCT promete mejorar la transparencia del sector, reducir los costos y facilitar la integración de fuentes de energía distribuida a la red eléctrica con ayuda de medidores y contratos inteligentes.

Blockchain es un habilitador para el crecimiento y desarrollo de los países. Los países desarrollados cuentan con estabilidad política, apoyos gubernamentales, proyectos de incentivos e infraestructura moderna que les permite un mejor desarrollo de BCT en el sector energético. Por

otro lado, los países en vía de desarrollo siguen siendo vulnerables por su dependencia a los combustibles fósiles y enfrentan múltiples desafíos para la introducción de la tecnología en el sector como marcos regulatorios inflexibles, riesgos políticos e infraestructura débil. El apoyo político es el factor más influyente y limitante para la implementación de BCT en el sector energético.

Por su parte, en Colombia la tecnología se encuentra en desarrollo, actualmente solo se cuenta con la Guía de Referencia para la adopción e implementación de proyectos con BCT para el Estado colombiano enfocado al sector público; la integración de BCT en el sector energético colombiano se enfrenta a desafíos como la necesidad de un marco regulatorio, la carencia de regulaciones para la seguridad y privacidad, la infraestructura inadecuada, la falta de innovación tecnológica por una inversión limitada, las leyes inflexibles y los sistemas de apoyo inadecuados, además requiere de un ecosistema colaborativo que promueva el intercambio de energía para todos los participantes del mercado energético. Aun así, por sus características la tecnología permitiría mejorar la red eléctrica colombiana al proporcionar una herramienta de encriptación segura que mitigue los intentos de ataque cibernético del sector, facilitar la liberación del mercado energético al ser una plataforma de comunicación entre prosumidores y operadores de la red y migrar a sistemas descentralizados que reduzcan las pérdidas eléctricas y los costos de electricidad.

En el campo de los REC, BCT permite mejorar el proceso de emisión, distribución y comercialización de los certificados. Blockchain certifica el origen de la producción de energía renovables, elimina la necesidad de verificación y mano de obra de intermediarios, permite la emisión automática de los certificados y un sistema de información sólida y transparente donde todos los participantes tienen acceso a los registros.

Teniendo en cuenta la revisión de literatura, se genera como resultado principal la Guía metodológica para la implementación de la tecnología blockchain en el sector energético colombiano. Esta herramienta proporciona lineamientos para la implementación de BCT en las organizaciones privadas del sector energético colombiano orientados a (1) optimizar los procesos y sistemas, (2) promover la transición energética con el uso de energías renovables, (3) asegurar la procedencia de la energía consumida en el país e (4) incrementar la seguridad y transparencia. En un contexto donde la energía es crucial para el desarrollo económico y la mitigación del cambio climático, la tecnología blockchain ofrece soluciones innovadoras para mejorar la eficiencia y seguridad del sector.

## **5. Recomendaciones**

Para futuras investigaciones se sugiere explorar la integración de la BCT en el sector energético en procesos alternativos de energía renovable como en la producción de hidrogeno verde, biogás y otros gases que se pueden producir de manera sostenible con la utilización de materiales de desecho para producir energía de formas más limpias, esto surge debido a limitaciones económicas y el alcance del proyecto. Por otra parte, se incita a evaluar la guía metodológica en un contexto empresarial para conocer su impacto en el sector energético.

## 6. Referencias bibliografías

- Ahl, A., Yarime, M., Goto, M., Chopra, S. S., Kumar, N. Manoj., Tanaka, K., & Sagawa, D. (2020). Exploring blockchain for the energy transition: Opportunities and challenges based on a case study in Japan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *117*, 109488. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109488>
- Akinradewo, O., Aigbavboa, C., Oke, A., & Edwards, D. (2023). A roadmap for present focus and future trends of blockchain technology in the built environment. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, *15*(2), 153–165. <https://doi.org/10.1080/20421338.2022.2046249>
- Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P., & Peacock, A. (2019). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *100*, 143–174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>
- Barceló, E., Dimić-Mišić, K., Imani, M., Spasojević Brkić, V., Hummel, M., & Gane, P. (2023). Regulatory Paradigm and Challenge for Blockchain Integration of Decentralized Systems: Example—Renewable Energy Grids. *Sustainability*, *15*(3), 2571. <https://doi.org/10.3390/su15032571>
- Bargalló, A. (2021, January 5). *Industria de la energía: ¿Qué debes saber sobre ella?*
- Barinova, V., Devyatova, A., & Lomov, D. (2021). The Role of Digitalization in the Global Energy Transition. *International Organisations Research Journal*, *16*(4), 125. <https://doi.org/10.17323/1996-7845-2021-04-06>
- Barroso, J. (2023). *Pasado, presente y futuro de la transición energética en Colombia: nuevo análisis de la FCDS - FCDS* -. <https://fcds.org.co/transicion-energetica-en-colombia->



- Croutzet, A., & Dabbous, A. (2021). Do FinTech trigger renewable energy use? Evidence from OECD countries. *Renewable Energy*, 179, 1608–1617. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.144>
- Decreto 0929 de 2023 Ministerio de minas y energía. (n.d.). ¿CÓMO SE DEFINE LA TARIFA DE ENERGÍA? Retrieved July 17, 2023, from [https://www.minenergia.gov.co/documents/10238/documento\\_abc\\_justicia\\_tarifaria.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/10238/documento_abc_justicia_tarifaria.pdf)
- Dehalwar, V., Kolhe, M. L., Deoli, S., & Jhariya, M. K. (2022). Blockchain-based trust management and authentication of devices in smart grid. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100481. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100481>
- Delardas, O., & Giannos, P. (2022). Towards Energy Transition: Use of Blockchain in Renewable Certificates to Support Sustainability Commitments. *Sustainability*, 15(1), 258. <https://doi.org/10.3390/su15010258>
- Departamento Nacional de Planeación. (2023). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-03-17-bases-plan-nacional-desarrollo-web.pdf>
- Di Silvestre, M. L., Ippolito, M. G., Sanseverino, E. R., Sciumè, G., & Vasile, A. (2021). Energy self-consumers and renewable energy communities in Italy: New actors of the electric power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111565. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111565>
- Eid, C., Codani, P., Perez, Y., Reneses, J., & Hakvoort, R. (2016). Managing electric flexibility from Distributed Energy Resources: A review of incentives for market design.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 237–247.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.008>
- El-Zonkoly, A. (2021). Feasibility of Blockchain-Based Energy Trading within Islanded Microgrids in Alexandria, Egypt. *Journal of Energy Engineering*, 147(3).  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000754](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000754)
- Ergün, S. (2024). Trading excess consumption certificates on the blockchain using the cooperative game theory. *Kybernetes*, 53(2), 645–668. <https://doi.org/10.1108/K-01-2023-0022>
- Erol, I., Peker, I., Ar, I. M., Turan, İ., & Searcy, C. (2021). Towards a circular economy: Investigating the critical success factors for a blockchain-based solar photovoltaic energy ecosystem in Turkey. *Energy for Sustainable Development*, 65, 130–143.  
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.10.004>
- Estrada Maya, S. (2021). *Análisis de la tecnología Blockchain para proponer su incorporación y uso en los proyectos de construcción de edificaciones en Colombia* [Universidad de los Andes].  
<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/7ae02769-6cb8-47d6-977f-ae45e6f677a9/content>
- Gao, M., Yu, X., Ren, L., Cai, H., Wang, Z., & Zhou, Y. (2021). A Renewable Energy Certificate Trading System Based on Blockchain. *2021 IEEE 20th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom)*, 1514–1518. <https://doi.org/10.1109/TrustCom53373.2021.00218>
- Gawusu, S., Zhang, X., Ahmed, A., Jamatutu, S. A., Miensah, E. D., Amadu, A. A., & Osei, F. A. J. (2022). Renewable energy sources from the perspective of blockchain

- integration: From theory to application. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102108. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102108>
- Ge, X., Yang, D., Lv, Y., Wang, F., Yu, J., Lu, J., Yang, Z., Tian, Y., & Ren, H. (2023). Blockchain and Green Certificates Based Market Structure and Transaction Mechanism of Direct Power-Purchase for Industrial Users. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(3), 2892–2903. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3246966>
- Gillpatrick, T., Boğa, S., & Aldanmaz, O. (2022). How Can Blockchain Contribute to Developing Country Economies? A Literature Review on Application Areas. In *ECONOMICS* (Vol. 10, Issue 1, pp. 105–128). Sciendo. <https://doi.org/10.2478/eoik-2022-0009>
- Gillpatrick, T., Boğa, S., & Aldanmaz, O. (2022). How Can Blockchain Contribute to Developing Country Economies? A Literature Review on Application Areas. *ECONOMICS*, 10(1), 105–128. <https://doi.org/10.2478/eoik-2022-0009>
- Hamdi, A., Fourati, L., & Ayed, S. (2023). Vulnerabilities and attacks assessments in blockchain 1.0, 2.0 and 3.0: tools, analysis and countermeasures. *International Journal of Information Security*. <https://doi.org/10.1007/s10207-023-00765-0>
- Hua, W., Chen, Y., Qadrdan, M., Jiang, J., Sun, H., & Wu, J. (2022). Applications of blockchain and artificial intelligence technologies for enabling prosumers in smart grids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112308>
- International Energy Agency (IEA), International Renewable Energy Agency (IRENA), United Nations Statistics Division (UNSD), World Bank, & World Health Organization (WHO). (2023). *TRACKING SDG7-THE ENERGY PROGRESS REPORT 2023. Cap 3.*

- [https://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/sdg7-report2023-full\\_report.pdf](https://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/sdg7-report2023-full_report.pdf)
- Juszczuk, O., Juszczuk, J., Juszczuk, S., & Takala, J. (2022). Barriers for Renewable Energy Technologies Diffusion: Empirical Evidence from Finland and Poland. *Energies*, *15*(2), 527. <https://doi.org/10.3390/en15020527>
- Juszczuk, O., & Shahzad, K. (2022a). Blockchain Technology for Renewable Energy: Principles, Applications and Prospects. *Energies*, *15*(13), 4603. <https://doi.org/10.3390/en15134603>
- Juszczuk, O., & Shahzad, K. (2022b). Blockchain Technology for Renewable Energy: Principles, Applications and Prospects. *Energies*, *15*(13), 4603. <https://doi.org/10.3390/en15134603>
- Karpunina, E. K., Mikhailov, A. M., Bondareva, N. A., Lyubimenko, O. A., & Fedotova, E. V. (2021). *Blockchain Technologies as a Reflection of Modern Reality: Diversity of Opportunities Versus Security Risks* (pp. 3–14). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-56433-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56433-9_1)
- Khubrani, M., & Alam, S. (2023). Blockchain-Based Microgrid for Safe and Reliable Power Generation and Distribution: A Case Study of Saudi Arabia. *Energies*, *16*(16), 5963. <https://doi.org/10.3390/en16165963>
- Kim, J., Park, H., Ho Lee, G., Kyun Choi, J., & Heo, Y. (2020). Seal-bid renewable energy certification trading in power system using blockchain technology. *2020 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 1752–1756. <https://doi.org/10.1109/ICTC49870.2020.9289395>

- Knirsch, F., Brunner, C., Unterweger, A., & Engel, D. (2020). Decentralized and permissionless green energy certificates with GECKO. *Energy Informatics*, 3(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s42162-020-0104-0>
- Lakshmi, G., & Thiyagarajan, G. (2021). Decentralized Energy To Power Rural Homes Through Smart Contracts And Carbon Credit. *2021 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, 280–283. <https://doi.org/10.1109/ICEES51510.2021.9383683>
- Levi-Oguike, J., Sandoval, D., & Ntagwirumugara, E. (2019). Blockchain Technology and Renewable Energy Access: A Case for sub-Saharan Africa. *2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/I2CT45611.2019.9033952>
- Ley 1715 de 2014 - Gestor Normativo. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.* (2014). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>
- Lodetti, P. Z., Cardoso, B. B., Luis Gustavo Ulhoa, O. B., Roncalio, L. B., Pinheiro, L. de P. A., Santos, O. D. S., M., M. A. I., & Joao, D. V. (2022). Blockchain-based Model for Trading Smart Contracts for Shared Energy Generation in Brazil. *2022 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICEET56468.2022.10007378>
- Madaan, L., Kumar, A., & Bhushan, B. (2020). Working principle, Application areas and Challenges for Blockchain Technology. *2020 IEEE 9th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)*, 254–259. <https://doi.org/10.1109/CSNT48778.2020.9115794>

- Mahjoub, Y. I., Hassoun, M., & Trentesaux, D. (2022). Blockchain adoption for SMEs: opportunities and challenges. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 1834–1839. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.665>
- Marques, N. L., Gomes, L. L., & Brandão, L. E. (2023). A blockchain-based model for token renewable energy certificate offers. *Revista Contabilidade & Finanças*, 34(91). <https://doi.org/10.1590/1808-057x20221582.en>
- Mendoza Villamil, P. J., & Diaz Ardila, A. (2019). *ATAQUES INFORMÁTICOS A LA INFRAESTRUCTURA CRÍTICA DEL SECTORELÉCTRICO COLOMBIANO [UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA]*. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/27757/%09pjmendozav.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Merino, L. (2007). *Energías renovables para todos*. <https://www.energias-renovables.com/>
- Minenergía. (2023). *Colombia nuevo amigo de la alianza internacional “Más Allá del Petróleo y el Gas-BOGA”*. <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/colombia-nuevo-amigo-de-la-alianza-internacional-m%C3%A1s-all%C3%A1-del-petr%C3%B3leo-y-el-gas-boga/>
- Minenergía. (2023, March 29). *La transición energética justa en Colombia seguirá avanzando de manera gradual*. Minenergía.Gov.Co. <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/la-transici%C3%B3n-energ%C3%A9tica-justa-en-colombia-seguir%C3%A1-avanzando-de-manera-gradual/>
- Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación. (2023). *POLÍTICAS DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN ORIENTADAS POR MISIONES – PIIOM MISIÓN TRANSICIÓN ENERGÉTICA*.

[https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/noticias/3.\\_documento\\_de\\_politica\\_transicion\\_energetica.pdf](https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/noticias/3._documento_de_politica_transicion_energetica.pdf)

Ministerio de Minas y Energía. (n.d.). *Fuentes No Convencionales de Energía Renovable - FNCER*. Retrieved August 30, 2023, from <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/fuentes-no-convencionales-de-energ%C3%ADa-renovable-fncer/>

Mohammad Saif, A. N., Islam, K. M. A., Haque, A., Akhter, H., Rahman, S. M. M., Jafrin, N., Rupa, R. A., & Mostafa, R. (2022). Blockchain Implementation Challenges in Developing Countries: An evidence-based systematic review and bibliometric analysis. *Technology Innovation Management Review*, 12(1/2). <https://doi.org/10.22215/timreview/1479>

Moran, M. (2024). *Energía - Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>

Moreno Garzón, C. (2023). *EPM, Isagen y Celsia, las empresas que lideran en la generación de energía según XM*. <https://www.larepublica.co/empresas/empresas-lideres-de-produccion-de-energia-3725424>

Mould, K., Silva, F., Knott, S. F., & O'Regan, B. (2022). A comparative analysis of biogas and hydrogen, and the impact of the certificates and blockchain new paradigms. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(93), 39303–39318. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.107>

Narváez, M. H., Carrasquilla-Díaz, L., De Luque-Pisciotti, A., Guarín, A., Barrios, T. A., & Gallego-Nicholls, J. F. (2022). Legal challenges for Blockchain implementation in

- Colombia. *Procedia Computer Science*, 210, 323–327.  
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.10.158>
- Nofuentes, A., Hernandez, J. J., & Pons, L. (2022). Blockchain-based Guarantees of Origin issuing platform. *2022 18th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/EEM54602.2022.9920988>
- Nour, M., Chaves-Avila, J. P., & Sánchez-Miralles, Á. (2022). Review of Blockchain Potential Applications in the Electricity Sector and Challenges for Large Scale Adoption. *IEEE Access*, 10, 47384–47418.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3171227>
- Nour, M., Chaves-Avila, J. P., & Sanchez-Miralles, A. (2022). Review of Blockchain Potential Applications in the Electricity Sector and Challenges for Large Scale Adoption. *IEEE Access*, 10, 47384–47418.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3171227>
- Nwaiwu, F. (2021). Digitalisation and sustainable energy transitions in Africa: assessing the impact of policy and regulatory environments on the energy sector in Nigeria and South Africa. *Energy, Sustainability and Society*, 11(1), 48. <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00325-1>
- Ordoñez, L. A. T., Niviayo, E. J. R., & Molano, J. I. R. (2019). *Approach to Blockchain and Smart Contract in Latin America: Application in Colombia* (pp. 500–510).  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-31019-6\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-030-31019-6_42)
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2022). *Objetivos y metas de Desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/#>

- Osorio Cruz, M. V., Caballero Martínez, J., & Velásquez, L. V. (2022). *Guía de Referencia para la adopción e implementación de proyectos con tecnología blockchain para el Estado colombiano*. [https://gobiernodigital.mintic.gov.co/692/articles-272783\\_recurso\\_1.pdf](https://gobiernodigital.mintic.gov.co/692/articles-272783_recurso_1.pdf)
- Peña, J. (2021). *La tecnología blockchain como una herramienta para mejorar la estructura y funcionamiento de los mercados eléctricos* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/80033/42162792.2021.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Pilkington, M. (2016). Blockchain technology: principles and applications. In *Research Handbook on Digital Transformations*. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781784717766.00019>
- Puthal, D., Malik, N., Mohanty, S. P., Kougianos, E., & Yang, C. (2018). The Blockchain as a Decentralized Security Framework [Future Directions]. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 7(2), 18–21. <https://doi.org/10.1109/MCE.2017.2776459>
- Sachdeva, S., Fatehaj, L., Tan, S., James, J., Ajayi, O., & Saadawi, T. (2023). A Blockchain based Framework for Secure and Decentralized Energy Trading in a Community. *2023 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICIT58465.2023.10143101>
- Sima, C. A., Popescu, C. L., Popescu, M. O., Roscia, M., Seritan, G., & Panait, C. (2022). Techno-economic assessment of university energy communities with on/off microgrid. *Renewable Energy*, 193, 538–553. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.047>
- Singh, S. P., & Solanki, B. S. (2022). A Trading Model on Block chain Smart Contracts for the Shared Energy in Brazil. *2022 Fourth International Conference on Emerging*

- Research in Electronics, Computer Science and Technology (ICERECT)*, 1–5.  
<https://doi.org/10.1109/ICERECT56837.2022.10059583>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339.  
<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Thomas, D., Kounelis, I., De Paola, A., Kotsakis, E., Fulli, G., & Fovino, I. N. (2022). Blockchain Applications and Roadblocks in the Energy Transition: Joint Research Centre Testing Campaigns and Policy Recommendations. *2022 Workshop on Blockchain for Renewables Integration (BLORIN)*, 19–24.  
<https://doi.org/10.1109/BLORIN54731.2022.10028364>
- Thukral, M. K. (2021). Emergence of blockchain-technology application in peer-to-peer electrical-energy trading: a review. *Clean Energy*, 5(1), 104–123.  
<https://doi.org/10.1093/ce/zkaa033>
- Ul Hassan, N., Yuen, C., & Niyato, D. (2019). Blockchain Technologies for Smart Energy Systems: Fundamentals, Challenges, and Solutions. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 13(4), 106–118. <https://doi.org/10.1109/MIE.2019.2940335>
- Urrego, G. P., Elena, F., Mina, M., Fernando, L., Chaves, V., Durán, Á. L., Bonilla González, R., Iván, N., Patiño, O., Mojica, J., Alfonso, G., Martínez, J., Inés, G., Ríos, R., Torres, I. V., Germán, D., Mendoza, U., Figueroa, A. V., Susana, M., ... Cortés, R. (2023). *Colombia, potencia mundial de la vida*.  
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-05-04-bases-plan-nacional-de-inversiones-2022-2026.pdf>

- Valencia, A. (2021). *Oportunidades en el uso de tecnología blockchain para el mercado de energía en Colombia* [Universidad Nacional de Colombia].  
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/80785/71211908.2021.pdf?sequence=4>
- Valencia Rendón, A. (2021). *Oportunidades en el uso de tecnología blockchain para el mercado de energía en Colombia* [Universidad Nacional de Colombia].  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80785>
- Vergura, S. (2020). Blockchain for the Energy Transition. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 18, 603–608. <https://doi.org/10.24084/repqj18.444>
- Wang, D., Xuan, J., Chen, Z., Li, D., & Shi, R. (2021). Renewable Energy Certificate Trading via Permissioned Blockchain. *Security and Communication Networks*, 2021, 1–11.  
<https://doi.org/10.1155/2021/6524594>
- Wang, Q., & Su, M. (2020). Integrating blockchain technology into the energy sector — from theory of blockchain to research and application of energy blockchain. *Computer Science Review*, 37, 100275. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100275>
- Wipo. (2022). *Global Innovation Index 2022, 15th Edition*.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.34667/tind.46596>
- Wipo. (2023). *Global Innovation Index 2023, 15th Edition*.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.34667/tind.46596>
- Xu, M., Chen, X., & Kou, G. (2019). A systematic review of blockchain. *Financial Innovation*, 5(1), 27. <https://doi.org/10.1186/s40854-019-0147-z>

- Yamaguchi, J. A. R., Santos, T. R., & Carvalho, A. P. de. (2021). Blockchain Technology in Renewable Energy Certificates in Brazil. *BAR - Brazilian Administration Review*, 18(spe). <https://doi.org/10.1590/1807-7692bar2021200069>
- Zhang, S., Xuan, J., Lyu, Z., & Fu, Y. (2020). Application Prospect of Blockchain in Renewable Energy Certificates. *Proceedings of the 4th International Conference on Computer Science and Application Engineering*, 1–5. <https://doi.org/10.1145/3424978.3425016>
- Zhao, Y., Peng, K., Xu, B., Liu, Y., Xiong, W., & Han, Y. (2019). Applied engineering programs of energy blockchain in US. *Energy Procedia*, 158, 2787–2793. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.039>
- Zuo, Y. (2022). Tokenizing Renewable Energy Certificates (RECs)—A Blockchain Approach for REC Issuance and Trading. *IEEE Access*, 10, 134477–134490. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3230937>