
Challenges and opportunities of technology implementation in energy communities for the provision of electricity service

Challenges and opportunities of technology implementation in energy communities for the provision of electricity service

Serie documentos de trabajo 2026

N. 2

Edición digital

Marzo de 2026

© 2026 Valor Público, centro de estudios e incidencia.

Universidad EAFIT

valorpublico@eafit.edu.co

Autores

John García-Rendón

Felipe Idrobo Mejía

Mariana Restrepo Lopez

Diagramación

Karen Daniela Hernández Castellanos

Foto

Daniele La Rosa Messina en Unsplash

Serie documentos de trabajo de Valor Público EAFIT

El centro de estudios e incidencia Valor Público, de la Universidad EAFIT, es un escenario para la comprensión y la transformación de problemas que requieren de la intervención colectiva y la decisión compartida: los asuntos públicos. Sus documentos de trabajo dan a conocer los resultados de los proyectos de investigación. Esta serie reúne trabajos de sus cuatro iniciativas de investigación y acción: Gobierno y democracia, Seguridad y justicia, Equidad y desarrollo social, Desarrollo económico e Innovación social.

Challenges and opportunities of technology implementation in energy communities for the provision of electricity service

John Garcia Rendon ^a
Felipe Idrobo Mejía ^b
Mariana Restrepo Lopez ^c

Abstract

Facing the challenge of transforming the current energy landscape towards a more sustainable one that helps to reduce greenhouse gases, the energy transition has been considered as the main strategy for reducing CO2 emissions, in which energy communities have begun to play a key role, especially in Europe. Therefore, this paper, through a literature review in the markets that have advanced the most in the implementation of energy communities and interviews with experts in the Colombian electricity market, aims to conduct a qualitative analysis to identify the challenges and opportunities in the implementation of smart contracts to incorporate energy communities in the Colombian energy market. Although opportunities derived from energy communities are evident, such as i) environmental, with the reduction of CO2 emissions, ii) economic, related to obtaining additional income from the sale of surplus energy produced to the system and participating in the demand response mechanism; iii) social, such as mitigating energy poverty and improving the health conditions of households that cook with firewood. However, there are challenges for the implementation of blockchain and smart contracts and one of the main barriers, under the current government, is institutional, increasing legal uncertainty, which has led to a deterioration of incentives and uncertainty for domestic and foreign investors.

Key words: Blockchain, smart contracts, energy communities, distributed energy resource, Non-Conventional Renewable Energy, prosumers, sustainability.

JEL Classification: D47, L23, L81

^a Research OMEGA (Observatory of Markets and Enterprises: Guidelines and Applications). School of Finances, Economics and Governance, Universidad EAFIT. Carrera 49 - 7 Sur 50. PhD in Economics, email: jgarcia@eafit.edu.co [<http://orcid.org/0000-0002-1269-2548>]. *Corresponding author

^b School of Finances, Economics and Governance, Universidad EAFIT, email: fidrobom@eafit.edu.co

^c School of Finances, Economics and Governance, Universidad EAFIT, email: mrestrepo7@eafit.edu.co

Resumen

Ante el reto de transformar el sistema energético actual hacia uno más sostenible que ayude a la disminución de gases de efecto invernadero, la transición energética ha sido considerada como la principal estrategia para la reducción de emisiones de CO₂, en la cual las comunidades energéticas han empezado a jugar un papel fundamental, sobre todo en Europa. Por tanto, este paper, por medio de una revisión de literatura en los mercados que más han avanzado sobre el tema y entrevistas a expertos en el mercado eléctrico colombiano, tiene como objetivo realizar un análisis cualitativo que permita identificar los retos y oportunidades en la implementación de contratos inteligentes para incorporar comunidades energéticas en el mercado energético colombiano. Si bien se evidencian oportunidades derivadas de las comunidades energéticas como i) ambientales con la disminución de emisiones de CO₂, ii) económicas, relacionadas con la obtención de ingresos adicionales por la venta de excedente de energía producida al sistema y por participar del mecanismo de respuesta de la demanda; además de la posibilidad de disminuir el gasto en energía derivado del autoconsumo y hacer transacciones Peer to Peer y, iii) sociales, como la mitigación de la pobreza energética y mejorar las condiciones de salud de hogares que cocinan con leña. También existen retos para la implementación de contratos inteligentes y una de las principales barreras, con el actual gobierno es la institucional, aumentado la inseguridad jurídica, lo cual ha conllevado a un deterioro de los incentivos e incertidumbre para los inversionistas, nacionales y extranjeros.

1. Introducción

La crisis climática es reconocida a nivel global, por medio de acuerdos internacionales, la cual busca dirigir a la humanidad hacia metas de avance ecológico y desarrollo sostenible para mantener la temperatura en el umbral pactado en el Acuerdo de París, 1.5 °C sobre los niveles preindustriales a mediados de siglo (IPCC, 2022). De manera similar, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible reconoce la inminente necesidad de abordar la emergencia climática, asegurando el acceso universal a energía limpia para lograr la sostenibilidad en ciudades y comunidades (Tarpani et al, 2022). De acuerdo con información de IRENA (2020) y López y Garcia (2022) las energías renovables pudieran proveer el 90% de la reducción de las emisiones CO₂, surgiendo la necesidad de una transformación significativa de la estructura de producción, gestión y consumo de energía.

Actualmente, la transición energética es tendencia mundial pero cada economía se encuentra en una etapa distinta del proceso. En Europa la generación a partir de la unión de agentes, quienes invierten colectivamente en equipos para la producción de energía a pequeña escala existe desde 1980. Sin embargo, han sido ignorados y solo recientemente

se ha identificado que dicha alianza, junto con la implementación de tecnologías del sector 4.0, puede ser el medio idóneo para la integración de un sinnúmero de fuentes dispersas de energía limpia a la red y así impulsar los procesos de descarbonización. Se estima que para 2030 las comunidades energéticas lideradas por ciudadanos producirían el 17% de la energía eólica y el 21% de la energía solar de la UE (Energiewende Team, 2021).

Para el caso colombiano, tanto los inversionistas como los hacedores de la política siguen comprometidos con la implementación de proyectos basados en energías limpias. Tradicionalmente, la generación de energía con fuente hídrica se ha situado por encima del 80%, un 82 % en promedio del total entre 2017 y 2019 (Correa et al. 2021) y el mismo porcentaje en agosto de 2025 (XM, 2025). Aunque esto proporciona que la matriz sea limpia, también la hace vulnerable ante fenómenos como El Niño o sequías (XM, 2022; Hernández et al., 2023). Por esto, es recomendable llevar a cabo una diversificación y aprovechar eficientemente la complementariedad con la energía solar por medio de la descentralización de la generación de energía en Colombia para aumentar la resiliencia energética.

Adicional a lo anterior, en el momento la red eléctrica nacional no tiene una cobertura plena; se estima que hay 404.000 familias en el país que carecen de acceso a energía eléctrica, concentrados principalmente en municipios vulnerables como Vichada, La Guajira, Chocó, Guainía, Putumayo y Amazonas (Morales, 2022). Esta situación es preocupante, especialmente para La Guajira, dado que este departamento tiene el mayor potencial de generación solar y eólica en el país (Figuroa & Duarte, 2022; MME, 2022).

Por tanto, el acercamiento a estas comunidades, mediante la instalación de fuentes de energía renovables no convencionales y la capacitación de su uso, tendría una mejora considerable en las condiciones de vida de los habitantes. Si se logra que la implementación de tecnologías renovables sea complementada con la creación de un sistema de transacciones que posea cualidades inmutables, transparentes y eficientes, sería una solución innovadora para mejorar aún más la calidad de vida y el bienestar social. No solo es el hecho de tener acceso a fuentes de energía limpia, sino también brindar la posibilidad de obtener beneficios económicos a partir de la venta de excedentes de energía a la red.

La contribución de esta investigación es aportar elementos para el desarrollo de contratos inteligentes en la implementación de comunidades energéticas en el mercado eléctrico colombiano, cuya figura surge a partir de la Ley 2294 de 2023 (Congreso de la República, 2023). Estas CE serán reguladas bajo la figura de Recursos Energéticos Distribuidos (DER, por sus siglas en inglés) de acuerdo con la resolución 40283 del Ministerio de Minas y Energía, MME (2022). Por tanto, el objetivo de este trabajo es examinar los retos y desafíos para la implementación de contratos inteligentes en comunidades energéticas en el mercado eléctrico colombiano. Pero aún queda bastante camino por recorrer para poderse

implementar de manera eficiente, ya que no existe un mercado distribuido, ni transacciones de energía con la arquitectura técnica y la complementariedad con el sistema de despacho económico que permita señales eficientes en la formación del precio minorista.

Esta investigación después de la introducción, en la sección 2 presenta la metodología utilizada para alcanzar los propósitos establecidos. En la sección 3 se establece el marco teórico y conceptual, el cual, a su vez, se divide en conceptos claves, una revisión de experiencias internacionales con el uso de blockchain junto a comunidades energéticas y los desafíos y oportunidades que se han presentado. Termina con un análisis del mercado eléctrico colombiano en temas del marco regulatorio y el caso de éxito de la primera comunidad energética solar en el país. La sección 4 presenta los resultados obtenidos de las entrevistas realizadas y la literatura revisada, en donde se destacan cuatro barreras importantes: regulatorias, económicas-financieras, técnicas y sociales y, finalmente se hace alusión a las oportunidades presentes en el mercado para implementar las comunidades energéticas y contratos inteligentes.

2. Metodología

La metodología utilizada se divide en tres componentes: inicialmente, se realizó una revisión de literatura de casos de estudio con información de comunidades activas en los mercados eléctricos de Norte América, la Unión Europea, Oceanía y Asia para examinar la viabilidad de la implementación de tecnología blockchain y contratos inteligentes a las comunidades energéticas y qué desafíos y oportunidades estuvieron presentes en los mercados para la consolidación de estas comunidades. Después, se llevaron a cabo entrevistas con expertos del mercado eléctrico para obtener su percepción sobre las barreras y oportunidades de la implementación de comunidades energéticas en el mercado eléctrico colombiano. Finalmente, se tomó como referencia el caso de estudio de la única comunidad solar activa en Colombia, La Estrecha, para poder contrastar sus diferencias en la implementación con respecto a los casos internacionales.

Para la revisión de la literatura se utilizaron publicaciones académicas indexadas, artículos de revistas y documentos técnicos publicados por instituciones con investigaciones enfocadas en los posibles usos del blockchain en el mercado eléctrico. Para ello, se buscó en bases de datos académicas relevantes como: SCOPUS, Science Direct y EBSCOhost y en organizaciones especializadas como el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, por sus siglas en inglés). También se realizó una búsqueda de información en bases de datos de la Universidad EAFIT y Google Scholar.

A partir de la investigación se dividieron las fuentes de casos internacionales en dos: revisiones de literatura y artículos técnicos (pruebas de concepto, estudios de viabilidad y artículos de investigación). La primera categoría fue de utilidad para identificar: las experiencias y tendencias en implementación del blockchain en mercados eléctricos internacionales, las barreras y desafíos comunes en la implementación, brechas de estudio presentes y las oportunidades que se han identificado en la integración de comunidades energéticas con tecnología blockchain en países extranjeros. La segunda categoría fue de utilidad para contrastar si los beneficios de la adopción del blockchain mencionados por las revisiones se reflejan en los resultados de las simulaciones y así dimensionar mejor el impacto de la implementación de Blockchain y contratos inteligentes en la gestión de comunidades energéticas.

Tabla 1. Número de entrevistas con empresas

Entrevistado	Empresa	Cargo
Entrevistados 1 a 4	ISA – XM	Técnicos
Entrevistado 5	Erco Energía	Comercial
Entrevistado 6	NEU Energy	Gerencia
Entrevistado 7	Solcor Colombia	Comercial
Entrevistado 8	JCAG Ingeniero Consultor SAS	Gerencia

Nota: Con algunos empresarios se tuvo más de una entrevista

Para la investigación cualitativa se llevó a cabo una recolección de información a través de entrevistas bajo consentimiento informado. Se eligió una muestra de personas para cubrir la necesidad de contar con puntos de vista tanto del área técnica, comercial y gerencial, como muestra la tabla 1.

A todos los entrevistados se les hicieron preguntas generales sobre su percepción del mercado eléctrico colombiano y posible conocimiento sobre las comunidades energéticas y/o blockchain. Posteriormente se pasó a la parte específica enfocada en el campo de acción de cada experto; el personal de NEU, ISA-XM y JCAG validaron conceptos como: viabilidad de las comunidades desde una parte técnica, el estado de la implementación del blockchain en el sector eléctrico y eventuales barreras sobre usos de tecnologías. Por su parte, la entrevista con Solcor brindó información desde las barreras de entrada al mercado eléctrico colombiano y la de Erco Energía apoyo a la revisión del caso de estudio de La Estrecha, la primera comunidad solar de Colombia que se estableció en El Salvador (barrio de Medellín), al ser una de las empresas líderes del proyecto.

La codificación de las entrevistas permitió el hallazgo de patrones de respuesta respecto a la viabilidad de las comunidades energéticas. Se pasó a realizar una triangulación metodológica para contrastar: la información de la literatura internacional, las perspectivas de los expertos inmersos en el mercado eléctrico colombiano y el caso de estudio colombiano, siendo posible así la identificación de las oportunidades y las barreras, las cuales se dividieron en regulatorias, económicas-financieras, técnicas y sociales, y así responder a nuestro objetivo y pregunta de investigación.

3. Marco teórico y revisión de literatura

El mercado eléctrico se caracteriza por tener un activo (la energía) difícil de almacenar por lo menos en un mercado centralizado, aunque en uno distribuido ya se están utilizando los sistemas de almacenamiento de energía con baterías (Gutierrez et al., 2023). No obstante, debe contar con una cadena de suministro ágil y eficaz para su consumo eficiente. A su vez la demanda de este bien es complicado de modelar debido a que es afectado por factores cómo: desempeño económico, condiciones climáticas y comportamiento del consumidor (Sumper, 2019).

Con la transición energética para lograr el objetivo de descarbonización, muchos países han empezado a trabajar en la implementación de fuentes de generación de energía limpia. Sin embargo, han dejado de lado un factor importante: con estas nuevas tecnologías tienen la necesidad de una reestructuración para la descentralización del mercado. En 2020 el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, por sus siglas en inglés) aprobó el proyecto de involucramiento de tecnología blockchain a nivel de comunidades (Rahimi et al., 2021) evidenciando que, si no hay acompañamiento de tecnologías 4.0 para hacer la red más eficiente, la migración a las fuentes de generación limpia será ineficiente. A continuación, se presentan los principales conceptos relacionados con el tema objeto de estudio.

3.1 Aspectos conceptuales

Dado el avance en la descentralización del sistema de energía por medio de los recursos energéticos distribuidos, el consumidor tradicional está tomando un papel más activo, permitiéndole generar su propia electricidad, y consecuentemente disminuir la demanda de energía de la red; este nuevo agente es denominado prosumidor (Westphall & Martina, 2022; Zapata, Kubli & Ulli-Ber, 2019). Así, una comunidad de prosumidores o comunidad energética es un grupo de hogares que se organizan conjuntamente para consumir energía de un sistema de generación descentralizado (Zapata, Kubli & Ulli-Ber, 2019; Cuenca et al., 2021).

Las Comunidades Energéticas constituyen una colaboración en la cual se produce y comparte energía proveniente de diversas fuentes renovables, como la solar fotovoltaica y eólica, con el propósito de generar y administrar de manera autónoma energía limpia a tarifas asequibles (Cuenca et al., 2021). Estas comunidades abarcan desde pequeñas instalaciones de plantas solares hasta microrredes de mayor envergadura, parques eólicos, sistemas de calefacción urbana, plantas de energía virtuales, e intercambios directos entre individuos y organizaciones regionales o nacionales. Muchas de estas iniciativas operan como cooperativas desde una perspectiva legal (Gobierno de España, 2023). Para el año 2022, se conocían aproximadamente 4.000 comunidades energéticas en Europa, siendo Alemania, Dinamarca, Reino Unido y Países Bajos pioneros. Además, en Estados Unidos y Australia, ya se encuentran marcos regulatorios bien establecidos para este tipo de comunidades, lo que demuestra el notable crecimiento que están tomando estas alternativas en el mundo (Koltunov et al., 2023).

El Blockchain es una tecnología de cadena de bloques o libro de registro distribuido, utilizado actualmente por empresas de suministro energético, instituciones financieras, startups y desarrolladores tecnológicos para conectar un gran número de nodos anónimos sin necesidad de un agente de control central. Esencialmente es un libro de contabilidad de consenso descentralizado gestionado por múltiples mantenedores (llamados mineros o validadores), sin depender de un servidor centralizado. Prometen sistemas transparentes, seguros y a prueba de manipulaciones que pueden permitir soluciones empresariales novedosas, especialmente cuando se combinan con contratos inteligentes -Smart Contracts. Dichos contratos son esencialmente protocolos informáticos para garantizar transacciones confiables sin la intervención de terceros, los cuales están diseñados para la ejecución automática de términos contractuales pactados con antelación (Andoni et al., 2018; Leeuwen et al., 2020; Guo et al., 2021; & Westphall & Martina, 2022).

Su estructura funciona muy similar a la de un contrato estandarizado. Estos son acuerdos predefinidos que automatizan la ejecución de transacciones a partir del cumplimiento de ciertas condiciones y términos contractuales, cuando se cumplen criterios establecidos. La diferencia entre los contratos estandarizados y los contratos inteligentes radica, en que a pesar de que ambos ayudan a agilizar procesos, los *smart contracts* están programados, haciendo así el proceso más ágil y transparente. Por tanto, es posible definir reglas con antelación para que se ejecute automáticamente cuando se cumplan las condiciones especificadas. Esta capacidad de ejecución automática y autónoma, sin necesidad de intermediarios, ni terceros, es lo que hace que los contratos inteligentes sean una herramienta poderosa para estructurar variedad de acuerdos, incluyendo las subastas.

Energía transactiva (*transactive energy*) es definida como el uso de tecnologías avanzadas de comunicación y control, entre las que se encuentra el blockchain, que permiten el monitoreo, intercambio y comercio de recursos energéticos distribuidos (DER); su objetivo

es crear un sistema energético más eficiente, confiable y sostenible, permitiendo así la integración de DER y consumidores con mayor participación, reduciendo las pérdidas de energía en la red. La energía transactiva integrada con el internet de las cosas (IoT) proporciona seguridad y eficiencia al sistema de transacción y distribución de energía (Yi et al., 2021; Nour et al., 2023). A nivel internacional los DER han incentivado que consumidores tradicionales migren a redes inteligentes con la capacidad no solo para auto consumir, sino también generar el excedente de energía para su venta (Ponce et al., 2021; Hassan et al., 2021; Gupta et al., 2022; Patiño y Garcia, 2023)

3.2. Revisión de literatura en mercados eléctricos internacionales

En todos los artículos se halla un objetivo común: explorar la adopción de blockchain como impulsor de eficiencia en el mercado eléctrico. Estudios como el de Wang et al. (2022), Nykyri et al. (2022), Gayo–Abeleira et al. (2022), Moniruzzaman et al. (2023), Lei et al. (2022) y Umar et al. (2022) utilizaron plataformas blockchain para desarrollar sus propuestas y no se quedaron únicamente en el desarrollo conceptual. Todos los estudios que analizan la implementación de blockchain, realizan una conceptualización de cómo funcionaría la plataforma blockchain y su eventual adopción junto con contratos inteligentes.

Por otro lado, todos los artículos tienen diferentes aplicaciones a las comunidades energéticas. Se puede abordar para la eficiencia de consumo por medio del establecimiento de contratos inteligentes para la distribución equitativa de energía producida por un panel a los habitantes de un edificio residencial (Nykyri et al., 2022). También el blockchain con un contrato inteligente puede ser implementado para que el consumidor final pueda, además de comercializar energía, gestionar de manera eficiente su consumo (Leeuwen et al., 2020). Finalmente, el uso más común fue el de comercialización, esta función considera la plataforma para comercio a pequeña escala (Wang et al., 2023; Lei et al., 2022; Dong et al., 2022) o incluso sistemas a escala más grandes, que incluya comercio entre comunidades (Gayo-Abeleira et al., 2022). Los contratos inteligentes no son necesarios para establecer la red blockchain de gestión o comercio, sin embargo, son una herramienta valiosa para automatizar procesos.

Los artículos más completos incluyen el análisis del mercado propuesto por los autores a través de la negociación entre pares, con el uso de teoría de juegos es posible modelar el comercio de energía como juegos no cooperativos. Cada agente se considera como un agente racional y egoísta que tiene el objetivo de maximizar sus beneficios a partir de la toma de decisión sobre cuánta energía produce y cuánta consume. A través de este tipo de análisis es posible hallar las estrategias óptimas para cada jugador, lo que demuestra la posibilidad de tener un mercado eléctrico eficiente y justo (Mehdinejad, Shayanfar & Mohammadi-Ivantloo, 2021; Moniruzzaman, Yassine & Benlamri, 2023).

A partir de las revisiones de literatura pudo establecer temas comunes que están presentes en todos los estudios, como se muestra en la tabla 2. Inicialmente se encuentra que todos los autores concuerdan que la implementación del blockchain trae consigo transparencia al sistema, debido a que la plataforma permite a los participantes tener información de datos sobre producción, consumo y comercialización de energía en tiempo real. A su vez, la información ayuda al incremento en eficiencia del mercado, ya que con su disponibilidad es posible la automatización de procesos a través de contratos inteligentes, logrando una reducción de costos de transacción y transmisión. Finalmente, un factor innovador del blockchain se centra en su naturaleza inmutable, es por esto que brinda seguridad a los agentes gracias a los algoritmos criptográficos que asegura transacciones y crea nodos de información que de ser alterados es fácilmente detectarlos por su *hashcode* (Representación alfanumérica única y fija generada a partir de los datos contenidos en un bloque de la cadena) (Borkovcová et al., 2022; Hassan et al., 2021; Honari et al., 2023).

Asimismo, otro tema en el que se centran todos los autores es la existencia de barreras tecnológicas. A pesar de los avances, aún persisten retos de escalabilidad: existen plataformas blockchain sin la arquitectura suficiente para soportar un proceso grande o que sus algoritmos de consenso tienen alto consumo energético, volviéndolas inviables. También discuten problemas de integración con relación a que debe haber una estandarización o interoperabilidad entre plataformas y la seguridad, que también es un reto al momento de escalar el sistema (Andoni et al., 2018; Capper et al., 2022; Honari et al., 2023; Stübs et al., 2019).

A su vez se resalta la importancia de las tres D (3 D'S): descarbonización, digitalización y descentralización. De acuerdo con las características del mercado, se requiere la necesidad de una cadena de suministro eficiente. Por esto, entre mayor sea la digitalización para que haya mayor acceso a la información de los agentes, se puede mejorar el control de la distribución de energía gracias al análisis detallado que puede brindar la mezcla de modelos autónomos y programables con equipos que reporten datos periódicamente de forma sistémica (Soto et al., 2020; Wu et al., 2022).

Por consiguiente, para que la transición energética sea una realidad de forma eficiente y asegurar la confiabilidad en la prestación del servicio, hay que hacer inversiones sustanciales en equipos para su integración con equipos IoT puedan evitar problemas de compatibilidad entre tecnologías (Hassan et al., 2021; Yi et al., 2021), resaltando que los gobiernos y hacedores de política son los llamados a impulsar estos cambios a través de políticas claras que incentiven la financiación y la viabilidad de estos proyectos. Además de proveer a los agentes una regulación flexible con mecanismos de mercado que se ajusten a las necesidades de las nuevas tecnologías. Dudjak et al. (2021) y Shi et al. (2022) señalan la necesidad de una coordinación entre todos los agentes involucrados en el proceso, en el que los entes

gubernamentales deben coordinarse con los empresarios, sin dejar por fuera los consumidores y así tener aceptación por parte de comunidades dispuestas a organizarse para la adopción de tecnologías de la información.

Tabla 2: Aspectos comunes encontrados en la revisión de literatura.

AUTORES	Barreras regulatorias	Barreras técnicas	Barrera económicas y financieras	Necesidad de coordinación entre	Transparencia, eficiencia y seguridad	Empoderamiento	3 D'S	Fuentes y repositorios académicos
Andoni et al. (2018)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Borkovcová, Černá & Sokolová (2021)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Capper et al. (2021)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Dudjak et al. (2021)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hassan et al. (2021)		✓	✓	✓	✓			✓
Honari et al. (2023)		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Soto et al. (2021)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Wu et al. (2022)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Gupta et al. (2022)		✓		✓	✓	✓	✓	✓
Ko & Praga (2021)		✓		✓	✓		✓	
Shi et al. (2022)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Westphal & Martina (2022)		✓	✓	✓		✓	✓	✓
Guo et al. (2021)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Nota: 3 D'S: Pilares de la transición energética: descarbonización, digitalización y descentralización.

Fuente: Elaboración a partir de la revisión de literatura

Por otro lado, se destaca que la adopción de las tecnologías mencionadas en el sector eléctrico trae consigo la oportunidad de brindar información y datos más confiables a los hacedores de políticas de competencia, ya que provee registros transparentes, a prueba de manipulaciones y de fraude, con mayor exactitud y confiabilidad. Además, de mejorar la red eléctrica por medio de modelos de optimización de gestión energética, utilizando eficientemente la autogeneración (Andoni et al., 2019; Guo et al., 2021; Honari et al., 2023).

Reconociendo la necesidad y capacidad tecnológica para transformar el sistema energético, en el que aún predominan características de un mercado centralizado, las comunidades

energéticas se han convertido en una alternativa potencial para avanzar hacia un mercado más distribuido y descentralizado (Minghui & MacGill, 2018). Autores como Zapata et al. (2019), Tarpani et al. (2022), Ramirez-Tovar et al. (2023), destacan que las razones más importantes para que los prosumidores participen en este tipo de comunidades, están relacionadas con consideraciones económicas, sociales y ambientales. El primer factor está enfocado en la posibilidad de disminuir el gasto total en energía a través del autoconsumo y la oportunidad de obtener ingresos extra por la venta de excedentes de energía producidos. Esto facilita el comercio de energía entre iguales (P2P), al mismo tiempo que fortalece los modelos de autoconsumo comunitario, proporcionando una plataforma para el intercambio local de energía (Sousa et al., 2019; Aminlou et al., 2024).

Entre los aspectos sociales del establecimiento de comunidades energéticas se encuentra la mejora en el acceso a la energía y la mitigación de la pobreza energética, ya que la implementación de DER en áreas alejadas que no tienen acceso a energía permite su integración a la red de energía nacional. Por su parte, en lo ambiental, la energía generada en las comunidades energéticas es de fuentes renovables, lo que ha demostrado que cumplen un papel importante en la disminución de emisiones de CO₂.

La Unión Europea es una de las regiones que más ha avanzado en la implementación de comunidades energéticas. Se han concientizado y dedicado a buscar nuevas alternativas y adoptar cambios regulatorios supranacionales que permitan cumplir con las metas de transición energética. Esto va más allá de la liberalización de los sistemas de energía, por medio de la tecnología Blockchain, considerado como un recurso idóneo en los mercados de energía, ya que ayuda a incentivar la adopción de DER (Ponce et al., 2020; Energiewende Team, 2021; Parlamento Europeo, 2024).

La tabla 3 presenta los desafíos y oportunidades que se han presentado en los últimos años en la implementación de comunidades energéticas en diferentes países europeos.

Puede notarse que los avances en el desarrollo de comunidades energéticas en la Unión Europea no son homogéneos y, es por esto por lo que muchos autores dividen los países en líderes y rezagados. Estas diferencias son justificadas, en gran medida, por los marcos regulatorios nacionales. En las economías más avanzadas se ha impulsado desde hace varios años este tipo de estrategias para adoptar otras fuentes de energía, lo que ha permitido adecuar los sistemas de red a nuevas tecnologías, ampliar la información disponible para los ciudadanos sobre los beneficios sociales y económicos de las CE y la creación de programas del gobierno para apoyar económicamente estos proyectos. Zapata et al. (2019) enfatizan que el éxito de las comunidades de prosumidores depende no sólo del compromiso local, sino también del apoyo de actores claves establecidos y de un marco regulatorio favorable.

Tabla 3: Desafíos y oportunidades de la adopción de Comunidades Energéticas en diferentes países europeos.

País	Desafíos	Oportunidades
Dinamarca	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción del apoyo financiero público. • Intereses comerciales por encima de las iniciativas lideradas por los ciudadanos • Deterioro de la opinión pública sobre estos proyectos 	<ul style="list-style-type: none"> • Adopción temprana de un régimen favorable para las energías renovables con ayuda del sistema de tarifas de alimentación (FIT) • Abundancia de recursos eólicos
Alemania	<ul style="list-style-type: none"> • Deterioro de la participación pública en estos proyectos • Cambios en el sistema regulatorio • Falta de confianza de los ciudadanos 	<ul style="list-style-type: none"> • Motivación financiera de los ciudadanos para participar en proyectos de energías renovables • Participación de las autoridades locales/municipales en la producción y distribución de energía
Países Bajos		<ul style="list-style-type: none"> • Marco regulatorio nacional favorable • Adopción de tecnologías avanzadas • Incentivos económicos por parte del gobierno • Conciencia pública sobre los beneficios de estos proyectos
España	<ul style="list-style-type: none"> • El marco regulatorio nacional no es lo suficientemente favorable • Intereses comerciales por encima de las iniciativas lideradas por los ciudadanos 	<ul style="list-style-type: none"> • Adopción temprana del sistema FIT para apoyar las energías renovables. • Apoyo de la ONG Amigos de la Tierra en la construcción de una granja solar
Austria	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de medios financieros 	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo reciente de legislaciones para facilitar la participación de las comunidades energéticas en el país
Irlanda	<ul style="list-style-type: none"> • El marco regulatorio nacional no es lo suficientemente favorable • Pocas tecnologías 	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo reciente de legislaciones para facilitar la participación de las comunidades energéticas en el país
Italia	<ul style="list-style-type: none"> • Marco regulatorio deficiente para incentivar, defender y desarrollar las CE en el país • Retrasos en la adopción de nuevas tecnologías en el sistema • Bajo conocimiento público sobre estas alternativas 	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo reciente de directrices y herramientas preliminares para mejorar la evaluación y el desarrollo de las CE.

Nota: CE: Comunidades Energéticas

Fuente: Elaboración a partir de Tarpani et al. (2022) y Fernández (2021).

3.3. Mercado eléctrico colombiano

Colombia presenta ventajas para la producción de energía renovable, convencional y no convencional (solar y eólica y microcentrales), gracias a la variedad de recursos renovables que posee, inicialmente la topografía y el régimen de lluvias del país garantizan un recurso hídrico abundante, haciendo de la generación hidroeléctrica una fuente de energía renovable. Por otro lado, se tiene un gran potencial para la producción de energía solar, especialmente en la región Caribe, los valles interandinos y los Llanos Orientales. Además, el país cuenta en la región Caribe y la costa del Pacífico con vientos constantes y fuertes, siendo idóneos para que se desarrollen proyectos a gran escala, asimismo, en las otras regiones a pesar de que no se tengan vientos fuertes y constantes es posible la implementación de proyectos para micro generación distribuida o dispersa (Ministerio de Minas y Energía, 2021; Corficolombiana, 2022). A pesar de estos avances y las características de Colombia, aún persiste la dependencia del recurso hídrico y, por tanto, de fenómenos de El Niño fuerte.

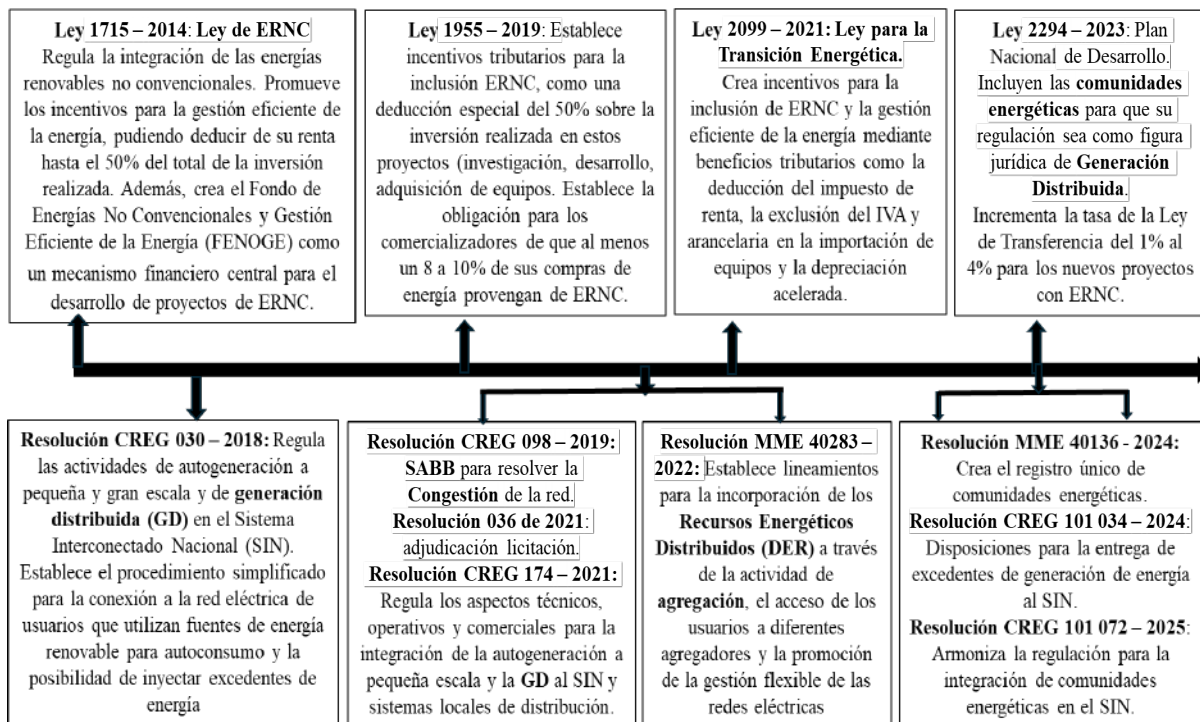
3.3.1. Marco Regulatorio

En los últimos años una de las principales barreras en el proceso de transición energética en Colombia ha sido el resquebrajamiento institucional en general. No obstante, vale la pena resaltar el avance que se ha tenido, por lo menos, en el tema regulatorio para el establecimiento de CE en Colombia. Esto puede evidenciarse a partir de las Resoluciones MME 40136 de 2024, la cual creó el Registro Único de Comunidades Energéticas (RUCE), y CREG 101 072 de 2025, que armonizó la regulación para la integración de las CE al Sistema Energético Nacional. La Figura 1 presenta un resumen de las principales normas establecidas por el Congreso de la República, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) y el Ministerio de Minas y Energía (MME) para promover el uso de ERNC, la autogeneración de energía a pequeña escala y que permiten el surgimiento de CE en el mercado eléctrico colombiano.

El punto de partida más relevante lo constituye la Ley 1715 del 2014, ya que establece la regulación para la integración de ERNC en el sistema energético colombiano, pero, además introduce por primera vez el concepto de generación distribuida y le confiere a la CREG la facultad para determinar la forma de remuneración para los excedentes entregados por los agentes autogeneradores a pequeña escala que utilizan estas fuentes de energía, norma que en 2021 es actualizada por la ley 2099, sobre transición energética, que mantiene, modifica y establece la vigencia de los incentivos tributarios y arancelarios fundamentales que se crearon en la Ley 1715 para el uso de energía renovables no convencionales en el país.

Otro concepto para destacar de la Ley 1715 es la de autogeneración definido como: Aquella actividad realizada por personas naturales o jurídicas que producen energía eléctrica principalmente, para atender sus propias necesidades. En el evento en que se generen excedentes de energía eléctrica a partir de tal actividad, estos podrán entregarse a la red, en los términos que establezca la Comisión de Regulación de Energía y Gas para tal fin (CREG, 2014).

Figura 1: Avances institucionales para la integración de ERNC y CE en Colombia



Fuente: Elaboración propia a partir de normas del Congreso de la República, la CREG y el MME (2014 - 2025)

Por otro lado, antes de la Resolución 030 2018 se había establecido que los prosumidores solo podían generar energía equivalente al 20% del total de su factura de electricidad, siendo obligados a desechar el resto por medio de disipación. Ahora, bajo este cambio en la estructura de remuneración por concepto de excedentes, nace la distinción entre autogeneración a pequeña escala (hasta 1000 kW) y a gran escala, dando además la libertad al prosumidor de vender sus excedentes al operador de red. También, hace cambios al concepto de generación distribuida permitiendo que la energía generada sea remunerada según los beneficios que brinde el sistema de distribución a la cual se está conectada, y definiéndola nuevamente como “persona jurídica que genera energía eléctrica cerca de los centros de consumo, y está conectado al Sistema de Distribución Local y con potencia instalada menor o igual a 100kW” (CREG, 2018).

Por su parte, la Ley 2294 del 2023 (Congreso de la República, 2023), incluyó las comunidades energéticas para que estas sean reguladas como figura jurídica de Generación Distribuida. Además, el Decreto reglamentario del art 235 del PND las define como:

“Formas de asociatividad entre usuarios y/o potenciales usuarios de servicios energéticos, constituidas por personas naturales o jurídicas que cooperan entre sí a través de un negocio jurídico para la generación, comercialización y/o uso eficiente de la energía a través del uso de Fuentes No Convencionales de Energía Renovables, FNCER, y recursos energéticos distribuidos (pág. 3)”.

Los objetivos planteados en este decreto, para estas comunidades son:

- Mejorar el acceso al servicio de energía eléctrica
- Aumentar la eficiencia energética
- Democratizar el sector a partir de la participación de los usuarios
- Descentralizar la generación y distribución de la energía
- Descarbonizar la economía
- Promover el desarrollo sostenible local
- Aumentar la confiabilidad en el sistema
- Ofrecer condiciones económicas asequibles al servicio de energía para las comunidades.

3.3.2. Caso de estudio

En 2020 nace un proyecto pensado por Transactive Energy Colombia y apoyado por EPM, ERCO, NEU y la Universidad EIA, para llevar a cabo una comunidad solar en el barrio La Estrecha en Medellín con el objetivo de involucrar a ciudadanos de ingresos bajos y medios que no tenían acceso a los recursos energéticos renovables (Cárdenas et al., 2023).

La comunidad entró en funcionamiento en marzo del 2023 y sigue en operación como prueba piloto. Este proyecto está compuesto por 24 casas, las cuales fueron conectadas a 2 paneles solares. Su forma de operar consiste en inyectar el 100% de la electricidad generada a la red y ERCO Generación se encarga de venderla a EPM a precio de bolsa. Dado las regulaciones existentes y además de facilitar procesos administrativos y contables, se optó por utilizar tokens (Nuggets) para hacer el descuento de la energía generada en la factura del cobro del servicio de electricidad que le llega a cada uno de los hogares involucrados en el proyecto (Entrevistado 5). Hasta la fecha no se ha logrado una reducción en la factura mayor al 10%, debido a la cantidad de participantes y las fuentes de generación limitadas.

4. Resultados

A partir de la revisión de literatura, las principales barreras para la generación distribuida y la incorporación de comunidades energéticas en los principales mercados pueden clasificarse en cuatro: barreras institucionales y regulatorias, barreras económicas y financieras, barreras técnicas y barreras sociales, como resume la figura 2. Las instituciones definidas como las reglas de juego en una sociedad o, más formalmente, las limitaciones ideadas por el hombre que dan forma a la interacción humana (North, 1991). Son esenciales, en este caso, para el buen funcionamiento de la industria energética. Por tanto, los cambios disruptivos en los mercados de energía deben ser coherentes con el diseño y la adopción de los aspectos institucionales para ayudar a la incorporación de los recursos energéticos distribuidos y las comunidades energéticas en igualdad de condiciones y, a su vez, lograr el cumplimiento de la política energética (Tarpani et al., 2022; Zapata et al., 2019; Burger y Luke, 2017; Colmenar et al., 2016). Los casos en mercados como Alemania, Australia y Estados Unidos han mostrado la necesidad de rediseños institucionales con políticas complementarias para la implementación de DER y CE (López y García, 2022; 2019; Da Silva et al., 2019).

Figura 2. Principales barreras para la generación distribuida y la incorporación de comunidades energéticas



Fuente: adaptado de Patiño y Garcia (2023).

Respecto a las barreras económicas y financieras, a pesar de la caída abrupta de los costos nivelados (LCOE) para las fuentes de generación con energías renovables no convencionales, sobre todo la Solar Fotovoltaica, la cual pasó de 0.445 USD/kWh constantes de 2022 en 2010 a 0.49 USD/kWh en 2022. Esto hizo que en 2022 esta energía fuera un

29% inferior a la opción más barata basada en combustibles fósiles (IRENA, 2023). Y en 2020 fue considerada en promedio por la International Energy Agency como el recurso de generación de electricidad más barato, en promedio a nivel mundial (IEA, 2020). No obstante, los costos de inversión han sido una barrera tecnológica significativa para la adopción de ERNC, además del aumento de los costos de operación y mantenimiento y los de transacción para la conexión de red (Garlet et al., 2019; Horváth y Szabó, 2018).

Asimismo, a pesar de los esfuerzos que están haciendo los Policymakers en varias economías para establecer distintos mecanismos técnicos, regulatorios y de mercado que permitan la incorporación de los DER; la estructura tarifaria para remunerar los operadores de red distribuidos ha sido una barrera importante para la implementación de DER y Comunidades energéticas. Por tanto, se perciben retos en el diseño de mecanismos que permitan la remuneración eficiente de estos para evitar la espiral de la muerte, debido a la presencia de prosumidores y comunidades energéticas por medio de DER (Chen et al., 2023) y el problema del dinero faltante que hace inviable nuevos modelos de negocios (Fridgen et al., 2020; Simshauser, 2019).

Otra de las principales barreras para la implementación de DER y CE son las técnicas. No solo se requiere la arquitectura técnica y la modernización de la red para inyectar los sobrantes a la red, sino un sistema de despacho económico para garantizar una red confiable, eficiente y robusta en un entorno cambiante e incierto (NARUC, 2018). Desde el componente técnico, una de las principales limitantes para el funcionamiento de los DER es el acceso a la conexión de red (Singh And Parida, 2018). Así como la infraestructura necesaria para la instalación óptima y eficiente de paneles fotovoltaicos, lo cual implica tener las capacidades estructurales y de carga adecuada en los edificios y casas (Abdmouleh et al., 2017; Zhang et al., 2015).

Además, con el fin de lograr una eficiencia de los DER es necesario contar con un “sistema distribuido” o por lo menos la complementariedad con el centralizado utilizado tradicionalmente, que ayude a realizar transacciones minoristas de energía entre los proveedores de DER y prosumidores peer-to-peer, a través del Operador del Sistema de Distribución – DSO. Por tanto, este debe contar, principalmente, con la presencia de tecnologías complementarias como Infraestructura en Medición Avanzada (AMI, por sus siglas en inglés), programas de respuesta de la demanda (Viana et al., 2018), el Internet de las cosas (IoT), blockchain (Hassan et al., 2021; Yi et al., 2021) y sistemas de almacenamiento de energía (Gutiérrez et al., 2023).

Específicamente en el mercado eléctrico colombiano las barreras para la adopción de los DER y las CE no son diferentes a las encontradas a partir de la revisión de literatura en los principales mercados energéticos internacionales en economías industrializadas, con un agravante en lo que respecta a las barreras institucionales, las cuales han aumentado a

partir del cambio de gobierno en 2022, debido a la mayor incertidumbre y riesgo regulatorio que ha causado el actual presidente, como se puede evidenciar a continuación.

4.1. Barreras institucionales y regulatorias

A partir del análisis de los casos internacionales se puede concluir que la barrera institucional es la más significativa para la adopción de comunidades energéticas a la red eléctrica a través de tecnologías de la industria 4.0. Inicialmente se revisaron el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 y Plan Energético Nacional 2020-2050, de los cuales es imperativo resaltar la vaga información que contienen respecto a la hoja de ruta que deben seguir los agentes para adoptar las comunidades energéticas en el país. Hablan únicamente de la necesidad de inclinarse a un desarrollo bajo en carbono del sector energético a través del uso de fuentes no convencionales de energía y resaltan el desarrollo de comunidades como una alternativa para lograr esta transformación energética, pero solo consideran el discurso y se quedan cortos en información sobre los medios y los mecanismos específicos para llevar a cabo su adopción e implementación.

A partir de la ley 1715 de 2014 se puede establecer un primer esfuerzo gubernamental para fomentar la implementación de fuentes de generación limpia. Sin embargo, anterior a la resolución 030 del 2018 a los usuarios se les permitía usar sus fuentes para autoconsumo, pero con un tope máximo de generación del 30% de su consumo total y la energía restante debía ser disipada a través de resistencias (desperdiciarla). Solo hace 5 años les permitió a los usuarios la posibilidad de vender la energía que producían de excedente a la red, estableciendo la figura de autogenerador a pequeña escala que cuenta con una capacidad máxima de 100 Kv.

Esto implica que, al sobrepasar este monto, a los generadores distribuidos no se les reconoce la tarifa fija de compraventa de energía, sino que deben venderla a precio de bolsa, esto termina desincentivando a los agentes porque quedan muy expuestos a la volatilidad del mercado y deben venderla a precios muy bajos que no alcanzan a ser el 50% de su precio. Si se compara la cuota máxima de los autogeneradores a pequeña escala de Colombia, con respecto otros países de Latinoamérica, es evidente que es muy baja. Esto hace que sea menos atractivo para los inversionistas invertir en iniciativas, pues si desean hacer proyectos mayores a 100 Kv no podrán hacerlo de manera sencilla (Entrevista 7).

Para el caso de estudio de la comunidad solar de La Estrecha, si bien ha sido exitosa, se hace evidente que si la cuota de los autogeneradores a pequeña escala fuese mayor se podría fomentar la adopción de este tipo de proyectos. La entrevistada 5 enfatiza que la demora para ponerla en funcionamiento se debió en gran medida a la regulación, ya que al ser una prueba piloto no se tenía ninguna normativa que guiara el proyecto. Adicionalmente, se encontraron con retos como bajo conocimiento sobre generación distribuida y la necesidad

de tener una empresa que representara esta planta solar, porque sobrepasaba la cuota de autogeneración a pequeña escala, lo que generó demoras cercanas a los dos años.

Otra preocupación frente a las regulaciones es que se ha tenido un retroceso en lo que el anterior gobierno estaba desarrollando para incentivar la inversión en ERNC, llevando a que haya desincentivos para tecnificar el sector. Primero, se evidencia en el nuevo Plan Nacional de Desarrollo la aprobación de un impuesto del 6% a las nuevas plantas de energía. También un impuesto del 4% a las plantas de energía (solares y eólicas) en operación por concepto de venta de energía proveniente de fuentes renovables no convencionales.

Por otro lado, hay empresas que están realizando el cambio de comercializador energético de usuarios en el sector residencial y cambiando los medidores análogos antiguos por medidores digitales inteligentes, los cuales contabilizan de una manera más exacta la energía reactiva generada. Esta tecnificación lleva a que se pueda tener control con respecto al consumo reactivo, lo que ha generado descontento con los consumidores, ya que por la adopción de nuevas tecnologías están teniendo que asumir un costo extra que usuarios no tecnificados no tienen que pagar. Aunque se discutió la problemática en el Concepto 6975 de 2020 emitido por la CREG, no se ha solucionado en la actualidad.

Lo anterior evidencia una demora considerable en la evolución del marco regulatorio del mercado eléctrico colombiano, lo que ha llevado a que sean las mismas empresas las que busquen alternativas para apegarse a la transición energética y tecnificación del sector, pero con el constante desafío derivado de la legislación. Termina siendo decepcionante que los nuevos proyectos están naciendo desde iniciativas privadas y además de la inexistencia de apoyo gubernamental hay legislaciones que incrementan la dificultad para su implementación.

4.2. Barreras económicas-financieras

Para la adecuada implementación de comunidades energéticas en el país es necesario llevar a cabo una modernización y expansión de la red eléctrica si se desea utilizar dicho modelo de generación distribuida para interconectar comunidades aledañas y gestionar la energía de manera más eficiente. Sin embargo, más allá de que el gobierno provea incentivos y ayudas económicas a los proyectos, debe crear un ambiente de confianza y estabilidad. En la actualidad el ambiente del mercado se encuentra con nerviosismo ante el panorama político en general, el cual deja en evidencia la alta incertidumbre e inestabilidad de sus políticas causando que empresas inversionista como EDF Renewables decidan sacar sus capitales del país.

Desde el punto de vista del prosumidor a pequeña escala, otro de los factores que destacan los expertos que impiden una mayor participación de estos agentes en el mercado eléctrico son los deficientes métodos de financiamiento y los altos costos que desincentivan la adopción de nuevas tecnologías necesarias para apoyar la transición energética y las nuevas alternativas de generación distribuida. Si bien, cada vez es mayor la conciencia frente al uso de energías renovables, ese *consumidor consciente* al que se refieren los expertos tiene sus niveles de resistencia al cambio porque no es capaz de asumir todos los costos que conllevan instalar paneles solares junto con medidores inteligentes de energía y demás tecnologías necesarias para garantizar eficiencia en los proyectos.

4.3. Barreras técnicas

A partir de la literatura se establece la posible existencia de problemas de escalabilidad, seguridad y la eficiencia de la red blockchain seleccionada. Sin embargo, a partir de la elección de la plataforma indicada se puede evitar alguna de estas problemáticas. Actualmente la implementación del blockchain en redes eléctricas está suficientemente desarrollada para gestionar de manera eficiente la energía y los pagos de una comunidad, tanto a nivel nacional como internacional hay muchas iniciativas que utilizan esta tecnología.

“[...] la tecnología blockchain no tiene una única presentación ni forma de implementarla, existen muchas opciones entonces hay un reto de interoperabilidad y estandarización para el manejo de los datos [...]” (Entrevistado 3).

4.3.2. Infraestructura

Para la implementación de las comunidades una de las prácticas más comunes es llevar a cabo la instalación de celdas fotovoltaicas en los techos de las casas. Sin embargo, las comunidades energéticas se plantean como solución para los sectores más vulnerables de la población, pero la disponibilidad de una infraestructura idónea representa un reto. Según el entrevistado 5:

“Las casas no necesariamente cumplen con los requerimientos estructurales y hay techos de todo tipo; lo primero fue buscar el espacio que tuviera los requerimientos estructurales para poner los paneles [...] La intervención de los techos puede generar goteras o daños en las tejas y eso puede generar inconformidad en la comunidad”

Siendo así evidente la necesidad de fomentar el desarrollo multidimensional para construir viviendas con mejor infraestructura, de manera organizada y planificada para que en un futuro se pueda, por medio de estas comunidades energéticas, tener control sobre el desarrollo de las áreas dispersas.

4.4. Barreras sociales

Actualmente se encuentra a nivel nacional un consumidor un poco más informado y consciente de la necesidad de responsabilizarse por su consumo, que se ve atraído por el modelo de autoconsumo que puede implementar a partir de la instalación de fuentes de generación no convencional. Sin embargo, se reconoce que el consumidor no es completamente consciente del cambio por conceptos erróneos que mantiene a partir de la desinformación sobre las nuevas alternativas disponibles para la transición energética, convirtiéndose la educación en una oportunidad de mejora para la implementación de CE.

Autores como Tarpani et al. (2022) abren la discusión con cinco pautas importantes en las que se deben enfocar los países menos avanzados y aquellos que estén en proceso de implementación, como es el caso de Colombia, para impulsar el desarrollo de estas comunidades, estas son:

- Definir la legislación requerida, las pautas y estrategias de implementación adecuadas lo antes posible.
- Minimizar las limitaciones en los sistemas de redes nacionales y así poder desarrollar redes inteligentes para aumentar la cuota de energía que se puede generar, autoconsumir e inyectar los excedentes a la red a partir de energía renovable no convencional.
- Garantizar viabilidad de los proyectos con el establecimiento de incentivos financieros que ayuden a la recuperación de las inversiones, simultáneamente al establecimiento de tarifas eléctricas asequibles.
- Formulación de políticas para impulsar aún más las CE como un enfoque innovador para la sostenibilidad.
- Aumentar la conciencia de las personas y el compromiso social con ayudas de campañas de información adecuada centrada en los beneficios de la CE para el individuo, el medio ambiente y el bienestar social.

Finalmente, a partir de estudios de la perspectiva de poblaciones que van a adaptarse a estos nuevos sistemas, junto con la experiencia del entrevistado 5, gracias al acompañamiento brindado a la comunidad de La Estrecha, se pueden destacar aspectos para que el proyecto sea aceptado y la comunidad desee estar involucrada. Partiendo de la claridad y veracidad de la información recibida, también de la capacidad de generar bienestar para la comunidad y la claridad del mecanismo de participación para evitar conflictos, asegurando que los participantes serán escuchados e involucrados activamente en el proyecto.

Conclusiones e implicaciones de política

A partir de las ventajas comparativas que tiene Colombia con relación a recursos naturales para la generación de energías, convencional (hidráulica) y no convencionales (solar y eólica), es posible concluir que la implementación de tecnología blockchain con el fin de integrar comunidades energéticas a la red eléctrica trae consigo beneficios. En primera instancia, permite estructurar sistemas y procesos a prueba de alteraciones con más seguridad y transparencia. Además, brinda la posibilidad de incluir a la red principal fuentes dispersas que ayudan a la descentralización de la generación, volviendo así la matriz energética mucho más estable ante choques exógenos, como los factores climáticos. También, fomenta la eficiencia para la gestión de energía a través de la captación y procesamiento de datos utilizados en la automatización de procesos y transacciones. Asimismo, la descentralización de producción de energía impulsa el cuidado del medio ambiente, ya que con generación distribuida a menor escala es posible implementar proyectos que no necesiten de mucha manipulación del ecosistema y, por tanto, hay un menor impacto ambiental en ellos.

Además, la tecnología blockchain respalda el potencial de las comunidades energéticas, no solo para generar energía más limpia y descentralizada, sino también para fomentar el desarrollo multidimensional para las poblaciones vulnerables al proveer el servicio básico de energía acompañado de la posibilidad de beneficiarse por la gestión eficiente de la misma. Estas iniciativas brindan un enfoque participativo, que no solo asegura un acceso más asequible a servicios energéticos esenciales, sino que también promueve la autonomía y la solidaridad comunitaria. La gestión eficiente de la energía se convierte en un catalizador para el desarrollo integral de poblaciones vulnerables, ofreciendo oportunidades tanto para la sostenibilidad ambiental como para la mejora de la calidad de vida de los miembros de estas comunidades.

Ahora bien, se halla un consenso sobre la necesidad de solucionar las barreras, especialmente de carácter regulatorio, las cuales, a partir de la revisión de literatura, casos aplicados y entrevistas es la que aporta el mayor rezago a la posibilidad de implementar las comunidades energéticas. Inicialmente se le recomienda al Gobierno Nacional brindar al mercado la atención que necesita, se identifican señales de improvisación y falta de compromiso a partir de sus acciones, como medidas regulatorias que desincentivan la innovación e implementación de nuevas tecnologías, además de contar con medidas rígidas y restrictivas con respecto a otros países latinoamericanos.

Vale la pena resaltar que, en consenso con expertos, Colombia cuenta con la tecnología suficiente para llevar a cabo la adopción de comunidades energéticas. Si se logra superar las barreras regulatorias por medio de reglamentaciones claras, flexibles y que fomenten la innovación, todo esto coordinado con servidores públicos con conocimiento técnico y

comprometidos con impulsar el sector, sería un país idóneo para la inversión en proyectos de generación de energía limpia y, a su vez, aportaría en el proceso de descarbonización. No obstante, una de las principales barreras que presentan la implementación de DER y comunidades energéticas, en los procesos de transición energética, son las institucionales. Para el caso colombiano, vale la pena resaltar el resquebrajamiento de estas con el actual Gobierno, lo cual ha provocado un deterioro de los incentivos e incertidumbre para los inversionistas, nacionales y extranjeros, aumentando la inseguridad jurídica.

Esto ha deteriorado el ambiente para el surgimiento de nuevos modelos de negocios y la realización de las inversiones requeridas en el proceso de transición energética, lo cual ha aumentado la brecha entre la capacidad que debe instalarse en el mediano y largo plazo con el fin de lograr la confiabilidad en la prestación del servicio. Esto puede evidenciarse en el retraso de los proyectos de infraestructura del sector, ya que la tasa real de entrada de nueva capacidad de generación, en los últimos cinco años, no ha superado el 28% de lo que se tenía previsto. Asimismo, de los 123 proyectos registrados del Sistema de Transmisión Nacional (STN) y del Sistema de Transmisión Regional (STR) hasta 2024, 68 (55%) tienen un retraso respecto con su fecha prevista de entrada en operación (XM -CND, 2025). Mientras que la demanda ha venido creciendo aproximadamente en el 4%. Esto puede llevar a un desabastecimiento del sistema, si no se implementan mecanismos que den señales claras, por ejemplo, la disminución del riesgo y la incertidumbre regulatoria, que permitan las inversiones necesarias para abastecer la demanda.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Proyecto de Investigación “Estudio prospectivo de la energía eólica en Colombia utilizando una herramienta de Sistema de Información Geográfica (SIG) multicriterio”, código 111828, financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) y la Agencia Nacional de Hidrocarburos del Gobierno de Colombia a través de la convocatoria «N.º 951-2024, Fortalecimiento del conocimiento geocientífico y tecnológico de fuentes de energía no convencionales y captura, almacenamiento y uso de CO₂», con el contrato n.º 062-2025.

Referencias

- Abdmouleh, Z., Gastli, A., Ben, L., Haouari, M. & Al, N. (2017). Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources. *Renewable Energy*, 113, 266–280. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.087>
- Alqahtani, B. & Patiño, D. (2019). Combined effects of policies to increase energy efficiency and distributed solar generation: A case study of the Carolinas. *Energy Policy*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110936>
- Aminlou, A., Mohammadi-Ivatloo, B., Zare, K., Razzaghi, R., Anvari-Moghaddam, A. (2024). Activating demand side flexibility market in a fully decentralized P2P transactive energy trading framework using ADMM algorithm. *Sustainable Cities and Society*, 100, 105021. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105021>
- 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>
- Borkovcová, A, Cerná, M & Sokolová, M. (2022). Blockchain in the Energy Sector Systematic Review. *Sustainability*, 14, 14793. <https://doi.org/10.3390/su142214793>
- Burger, S. & Luke, M. (2017). Business models for distributed energy resources: A review and empirical analysis. *Energy Policy*, 109, 230–248. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.07.007>
- Capper, T., Gorbacheva, A., Mustafa, M. A., Bahloul, M., Marc, J., Chitchyan, R., Andoni, M., Robu, V., Montakhabi, M., Scott, I. J., Francis, C., Mbavarira, T., Manuel, J., & Kiesling, L. (2022). Peer-to-peer, community self-consumption, and transactive energy: A systematic literature review of local energy market models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112403. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112403>
- Cárdenas, J.P., George, J., Giraldo, J., Estrada, J.A., España, J.M., Ortega, S., & Duque, C. (2022). *Rethinking energy communities for a just transition: A critical view on La Estrecha Solar Community in Medellín, Colombia* [Reporte]. [Comunidad Energetica La Estrecha.pdf](#)

- Chen, Y., Li, Y., Chen, Q., Wang, X., Li, T., & Tan, C. (2023). Energy trading scheme based on consortium blockchain and game theory. *Computers standards and interfaces*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2022.103699>
- Chen Y, Tanaka M, Takashima R, (2023). Death spiral, transmission charges, and prosumers in the electricity market, *Applied Energy*, 332, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120488>
- Colmenar, A., Reino, C., Borge, D. & Collado, E. (2016). Distributed generation: A review of factors that can contribute most to achieve a scenario of dg units embedded in the new distribution networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1130–1148. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.023>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2018a). Resolución 030 de 2018. Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional. <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/83b41035c-2c4474f05258243005a1191?OpenDocument>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2018b). Resolución 038 de 2018. Por la cual se regula la actividad de autogeneración en las zonas no interconectadas y se dictan algunas disposiciones sobre la generación distribuida en las zonas no interconectadas. <https://app.vlex.com/#vid/716634677>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2019). Resolución 060 de 2019. Por la cual se hacen modificaciones y adiciones transitorias al reglamento de operación para permitir la conexión y operación de plantas solares fotovoltaicas y eólicas en el SIN y se dictan otras disposiciones. [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/ca640edbe4b7b5100525842d0053745d/\\$FILE/Creg060-2019.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/ca640edbe4b7b5100525842d0053745d/$FILE/Creg060-2019.pdf)
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2021). Resolución 174 de 2021. Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional. https://www.creg.gov.co/sites/default/files/creg174-2021_compressed.pdf
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2025). Resolución 101 072 de 2025. Por la cual se armoniza la regulación para la integración de las comunidades energéticas al Sistema Energético Nacional. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/originales/Resolución_CREG_101_072_2025/Resolución_CREG_101_072_2025.pdf

- Congreso de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. [http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/LEY 1715 DEL 13 DE MAYO DE 2014.pdf](http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/LEY_1715_DEL_13_DE_MAYO_DE_2014.pdf)
- Congreso de Colombia. (2019). Ley 1955 de 2019. Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022. *Diario Oficial No. 50.964*. http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1955_2019.html
- Congreso de Colombia. (2021). Ley 2099 de 2021. Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones. <https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY%202099%20DEL%2010%20DE%20JULIO%20DE%202021.pdf>
- Congreso de Colombia. (2023). Ley 2294 del 2023. Por el cual se expide el plan nacional de desarrollo 2022- 2026 “Colombia potencia mundial de la vida”. https://www.fun-cionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=209510
- Correa, M., García, J., & Pérez, A. (2021). Strategic behaviors and transfer of wholesale costs to retail prices in the electricity market: evidence from Colombia. *Energy Economics*, 99, 105276. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105276>
- Cuenca, J., Jamil, E., Hayes, B. (2021). State of the art in Energy Communities and sharing economy concepts in the electricity sector. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 57(6), 5737–5746. <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3114135>.
- Da Silva, P., Dantas, G., Pereira, G., Câmara, L. & De Castro, N. (2019). Photovoltaic distributed generation – An international review on diffusion, support policies, and electricity sector regulatory adaptation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.028>
- Dong, J., Song, G., Liu, S., Yin, H., Zheng, H., Li, Y. (2022). Decentralized peer-to-peer energy trading strategy in energy blockchain environment: A game-theoretic approach. *Applied energy*, 325. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119852>
- Figueroa, A.C., & Duarte, A. (2022). *Actualidad del sector energético colombiano y vulnerabilidad al cambio climático* [Informe]. Corficolombiana. <https://investigaciones.corficolombiana.com/documents/38211/0/Informe%20Sectorial%20Sector%20Electrico%2015072022ff.pdf/f3ae4acf-aa95-0c15-a066-6cb36966fe3c>

- Fernandez, R. (2021) Community renewable energy projects: The future of the sustainable energy transition? *The International Spectator*, 56(3), 87-104. DOI: 10.1080/03932729.2021.1959755
- Fridgen, G., Halbrugge, S., Olenberger, C. Y Weibelzahl, M. (2020). The insurance effect of renewable distributed energy resources against uncertain electricity price developments. *Energy Economics*, 91, 104887. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104887>
- Garlet, T., Ribeiro, J., De Souza, F. & Siluk, J. (2019). Paths and barriers to the diffusion of distributed generation of photovoltaic energy in southern Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.013>
- Gayo-Abeleira, M., Santos, C., Rodriguez Sanchez, J., Martín, P., Jimenez, J. A., & Santiso, E. (2022). Aperiodic two-layer energy management system for community microgrids based on blockchain strategy. *Applied Energy*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119847>
- Gobierno de España. (2023, abril 27). *Conoce las Comunidades Energéticas*. Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. <https://planderecuperacion.gob.es/noticias/conoce-que-son-comunidades-energeticas-perte-erha-prtr>
- Guo, Y., Wan, Z., & Cheng, X. (2022). When blockchain meets smart grids: A Comprehensive Survey. *High-Confidence Computing*, 2(2) 100059. <https://doi.org/10.1016/j.hcc.2022.100059>
- Gupta, N., Prusty, B. R., Alrumayh, O., & Almutairi, A. (2022). The Role of Transactive Energy in the Future Energy Industry: a critical Review. *Energies*, 15, 8047. <https://doi.org/10.3390/en15218047>
- Gutierrez, A., Leon, R. & Garcia, J. (2023). Energy storage for the provision of a secondary frequency control service: Evidence in the Colombian market. *The Electricity Journal*. 36, 107329. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2023.107329>
- Hassan. M. U., Husain, M., & Chen, J. (2021). Optimizing Blockchain Based Smart Grid Auctions: A Green Revolution. [Swinburne University of Technology]. 2102.02583.pdf
- Horváth, D. y Szabó, R. (2018). Evolution of photovoltaic business models: Overcoming the main barriers of distributed energy deployment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 623–635. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.101>

- IPCC. (2022). *Resumen para responsables de políticas: escenarios de emisiones* [Informe]. Grupo de trabajo III del IPCC. [sres-sp-1.pdf](#)
- International Energy Agency. IEA. (2020). World energy Outlook 2020. Part of World energy Outlook. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). *Power System Organisational Structures for the Renewable Energy Era*. <https://www.irena.org/publications/2020/Jan/IRENA-Power-system-structures>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). Renewable power generation costs in 2022. <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>
- Koltunov, M., Pezzutto, S., Bisello, A., Lettner, G., Hiesl, A., van Sark, W., Louwen, A., & Wilczynski, E. (2023). Mapping of Energy Communities in Europe: Status Quo and Review of Existing Classifications. *Sustainability*, 15, 8201. <https://doi.org/10.3390/su15108201>
- Lei, Y., Ma, C., Mirza, N. Ren, Y., & Wati, S., & Chen, X. (2022). A renewable energy microgrids trading management platform based on permissioned blockchain. *Energy Economics*, 115, 106375. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106375>
- Lennon, B., Dunphy, N. P., & Sanvicente, E. (2019). Community acceptability and the energy transition: a citizens perspective. *Energy, Sustainability and Society*, 9(35). <https://doi.org/10.1186/s13705-019-0218-z>
- Leeuwen, G. Van, Alskaf, T., Gibescu, M., & Sark, W. Van. (2020). An integrated blockchain-based energy management platform with bilateral trading for microgrid communities. *Applied Energy*, 263, 114613. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114613>
- Ley 143 de 1994. [CREG]. Resolución 011 de 2015. Por la cual se regula el programa de respuesta de la demanda para el mercado diario en condición crítica. Mayo 28 de 2015. No. 49525
- Ley 143 de 1994. [CREG]. Resolución 029 de 2016. Por la cual se define un esquema de tarifas diferenciales para establecer los costos de prestación del servicio de energía eléctrica a usuarios regulados en el SIN para promover el ahorro voluntario de energía. Marzo 7 de 2016.

Ley 142 de 1994. [CREG]. Resolución 101 019 de 2022. Por la cual se modifica y compila la regulación del anillo de seguridad del cargo por confiabilidad denominado demanda desconectable voluntaria. Agosto 31 del 2022

López, D., & García, J. (2022). Opportunities and challenges of mainstreaming distributed energy resources towards the transition to more efficient and resilient energy markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112018>

Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Potencial energético subnacional y oportunidades de descarbonización en usos de energía final* [Informe]. Equipo Editorial. https://www.minenergia.gov.co/documents/10443/4._Potencial_energético_subnacional_y_oportunidades_de_descarbonización_en_uso_zlqm9dM.pdf

Ministerio de Minas y Energía. (2022). Resolución 40283 de 2022. Por la cual se establecen lineamientos para la incorporación de los recursos energéticos distribuidos. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_minminas_40283_2022.htm

Ministerio de Minas y Energía. (2024). Resolución 40136 de 2024. *Por la cual se crea el registro único de comunidades energéticas (ruce)*. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_minminas_40136_2024.htm

Moniruzzaman, M., Yassine, A., & Benlamri, R. (2023). International Journal of Electrical Power and Energy Systems Blockchain and cooperative game theory for peer-to-peer energy trading in smart grids. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 151, 109111. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109111>

Morales, D. (2022, agosto 11). En el país 404.000 familias aún no cuentan con electricidad. Portafolio. <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/en-el-pais-404-000-familias-aun-no-cuentan-con-electricidad-569482>

Mehdinejad, M., Shayanfar, H., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2022). Decentralized blockchain-based peer-to-peer energy-backed token trading for active prosumers. *Energy*, 244, 122713. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122713>

North, D. (1991). Institutions. *Journal of Economic Perspectives*, 5(1), 97–112.

Nour, M., Chaves-Ávila, J.P., Troncia, M., Ali, A., & Sánchez, A. (2023). Impacts of Community Energy Trading on Low Voltage Distribution Networks, *IEEE*, 11. [Impacts_of_Community_Energy_Trading_on_Low_Voltage_Distribution_Networks.pdf](#)

- Nykyri, M., Karkkainen, T. J, Levikari, S., Honkapuro, S., Analla, S., & Silveintoinen, P. (2022). Blockchain-based balance settlement ledger for energy communities in open electricity markets. *Energy*, 253, 124180. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124180>
- Parlamento Europeo (2024). Por el que se modifican los Reglamentos (UE) 2019/942 y (UE) 2019/943 en relación con la mejora de la configuración del mercado de la electricidad de la Unión. https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/electricity-market-design_en
- Patiño, D. & Garcia, J. (2023). Mecanismos de mercado para una transición energética resiliente en Colombia. Primera edición Bogotá. Universidad Nacional de Colombia, ISBN digital: 978-958-505-292-5. *Energética 2030:1–218*. <https://sites.google.com/view/johnja/book>
- Ponce, P., Oliveira, C., Álvarez, V. & Río-Rama, M. (2020). The Liberalization of the Internal Energy Market in the European Union: Evidence of Its Influence on Reducing Environmental Pollution. *Energies*, 13, 6116. [energies-13-06116 \(1\).pdf](https://doi.org/10.3390/energies13066116)
- Singh, A. & Parida, S. (2018). A review on distributed generation allocation and planning in deregulated electricity market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 4132–4141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.060>
- Shi, Z., Grosso, P. & Zhao, Z. (2022). Integration of Blockchain and Auction Models: A Survey, Some Applications, and Challenges. *IEEE*. 2110.12534.pdf
- Simshauser P, (2019). Missing money, missing policy and resource adequacy in Australia's National Electricity Market, *Utilities Policy*, 60, <https://doi.org/10.1016/j.jup.2019.100936>
- Sousa, T. et al. (2019). Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 2019, 367–378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.036>
- Sumper, A. (2019). *Micro and Local Power Markets*. (John Wiley & Sons Ltd). Wiley
- Tarpani, E., Piselli, C., Fabiani, C., Pigliatile, I., Kingma, E.J., Pioppi, B., & Pisello, A.L. (2022). Energy Communities Implementation in the European Union: Case Studies from Pioneer and Laggard Countries. *Sustainability*, 14, 12528. <https://doi.org/10.3390/su141912528>

- The National Association of Regulatory Utility Commissioners - NARUC. (2018). Evolution of the distribution system & the potential for distribution-level markets: A rimer for state utility regulator. <https://www.naruc.org/default/assets/File/201801%20Evolution%20of%20the%20Distribution%20System.pdf>
- Umar, A., Kumar, D., & Ghose, T. (2022). Blockchain-based decentralized energy intra-trading with battery storage flexibility in a community microgrid system Point of Common Coupling Network Administrator or Network Provider Peak to Peak Average Ratio Supply to Demand Ratio. *Applied Energy*, 322, 119544. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119544>
- Viana, M., Junior, G. y Udaeta, M. (2018). Analysis of demand response and photovoltaic distributed generation as resources for power utility planning. *Applied Energy*, 217, 456–466. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.153>
- Wang, X., Liu, Y., Ma, R., Su, Y., & Ma, T. (2023). International Journal of Electrical Power and Energy Systems Blockchain enabled smart community for bilateral energy transaction. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 148, 108997. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.108997>
- Westphall, J., & Martina, J.E. (2022). Blockchain Privacy and Scalability in a Decentralized Validated Energy Trading Context with Hyperledger Fabric. *Sensors*, 22, 4585. <https://doi.org/10.3390/s22124585>
- Wu, Y., Wu, Y., Cimne, H., Vasquez, J.C., & Guerrero, J.M. (2022). Towards collective energy Community: Potential roles of microgrid and blockchain to go beyond P2P energy trading. *Applied Energy*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119003>
- XM. (2022, julio 7). *En el segundo trimestre de 2022 ingresaron tres proyectos de generación solar al SIN, aportando 15.29 MW al Sistema*. XM <https://www.xm.com.co/noticias/5037-en-el-segundo-trimestre-de-2022-ingresaron-tres-proyectos-de-generacion-solar-al-sin>.
- XM (2025). Informe de XM sobre las variables del mercado de energía en agosto de 2025. XM. <https://www.xm.com.co/noticias/8184-informe-de-xm-sobre-las-variables-del-mercado-de-energia-en-agosto-de-2025>
- XM - CND. (2025). Propuestas del Centro Nacional de Despacho sobre riesgos operativos del SIN. Documento XM-CND-014, 1-99. <https://www.xm.com.co/operacion/informe-riesgos-operativos>

- Yi, H., Lin, W., Huang, X., Cai, X., Chi, R., & Nie, Z. (2021). Energy trading IoT system based on blockchain. *Swarm and Evolutionary Computation*, 64, 100891. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2021.100891>
- Zapata, J., Kubli, M., & Ulli-Ber, S. (2019). Prosumer communities as strategic allies for electric utilities: Exploring future decentralization trends in Switzerland. *Energy Research & Social Science*, 57, 101219. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101219>
- Zhang, C., Yang, T., & Wang, Y. (2021). Sustainable Energy, Grids and Networks Peer-to-Peer energy trading in a microgrid based on iterative double auction and blockchain. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 27, 100524. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100524>
- Zhang, F., Deng, H., Margolis, R. y Su, J. (2015). Analysis of distributed-generation photovoltaic deployment, installation time and cost, market barriers, and policies in China. *Energy Policy*, 81, 43–55. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.02.010>



UNIVERSIDAD
EAFIT

Valor Público
Centro de estudios e incidencia

VIGILADA | MINEDUCACIÓN