

IMPULSANDO COMUNIDADES ENERGÉTICAS EN COLOMBIA: RETOS Y OPORTUNIDADES PARA UNA TRANSICIÓN ENERGÉTICA DESCENTRALIZADA

DRIVING THE DEVELOPMENT OF ENERGY COMMUNITIES IN COLOMBIA: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR A DECENTRALIZED ENERGY TRANSITION

ESTÍMULO AO DESENVOLVIMENTO DE COMUNIDADES ENERGÉTICAS NA COLÔMBIA: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA UMA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DESCENTRALIZADA

María Fernanda Medina-Reyes

Magíster en Seguridad de las TIC
 Docente de planta de la Escuela de Transformación Digital
 Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-1895-0859>
mmedina@utb.edu.co

Juan Gabriel Fajardo-Cuadro

Doctor en Ciencias Técnicas
 Docente de planta de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura
 Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-5675-7796>
jfajardo@utb.edu.co

Juan Carlos Martínez-Santos

Doctor en Computer Engineering
 Docente de planta de la Escuela de Transformación Digital
 Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-2755-0718>
jcmartinezs@utb.edu.co



ABSTRACT

Energy communities represent a transformative paradigm for democratizing access to renewable energy, decentralizing power systems, and fostering economic sustainability. This study analyzes their global development, with an emphasis on developing countries such as Colombia. The research employs a systematic literature review in Scopus and a keyword co-occurrence analysis to identify trends; in addition, Colombian regulatory documents were examined to contextualize the findings. The discussion addresses distributed generation, peer-to-peer (P2P) energy trading, and regulatory frameworks that drive local energy transitions. Although the opportunities are significant in Colombia, challenges persist in infrastructure, regulation, and social acceptance, particularly in the Caribbean region. The article proposes context-specific strategies from international experiences to overcome these barriers and consolidate decentralized energy systems that accelerate the country's energy transition and sustainable development.

Keywords

electricity, energy policy, energy resources

RESUMEN

Las comunidades energéticas representan un paradigma transformador para democratizar el acceso a energías renovables, descentralizar los sistemas energéticos y fomentar la sostenibilidad económica. Este estudio analiza su desarrollo global, con énfasis en países en vías de desarrollo como Colombia. La investigación utiliza una revisión sistemática en Scopus y un análisis de co-ocurrencia de palabras clave para identificar tendencias; además, se revisaron documentos regulatorios colombianos para contextualizar los hallazgos. Se abordan la generación distribuida, el comercio entre pares (P2P) y los marcos regulatorios que impulsan transiciones energéticas locales. En Colombia, aunque las oportunidades son significativas, persisten retos de infraestructura, regulación y aceptación social, especialmente en el Caribe. Este artículo propone estrategias adaptadas basadas en experiencias internacionales para superar dichas barreras y consolidar sistemas descentralizados que aceleren la transición energética y el desarrollo sostenible del país.

Palabras clave

energía eléctrica, política energética, recursos energéticos

RESUMO

As comunidades energéticas representam um paradigma transformador para democratizar o acesso à energia renovável, descentralizar os sistemas energéticos e promover a sustentabilidade econômica. Este estudo analisa seu desenvolvimento global, com ênfase em países em desenvolvimento, como a Colômbia. A pesquisa emprega uma revisão sistemática da literatura no Scopus e uma análise de coocorrência de palavras-chave para identificar tendências. Além disso, documentos regulatórios colombianos foram examinados para contextualizar os resultados. A discussão aborda a geração distribuída, o comércio de energia ponto a ponto (P2P) e os marcos regulatórios que impulsionam as transições energéticas locais. Embora as oportunidades sejam significativas na Colômbia, persistem desafios em infraestrutura, regulamentação e aceitação social, particularmente na região do Caribe. O artigo propõe estratégias específicas para o contexto, a partir de experiências internacionais, para superar essas barreiras e consolidar sistemas energéticos descentralizados que acelerem a transição energética e o desenvolvimento sustentável do país.

Palavras-chave:

energia elétrica, política energética, recursos energéticos

INTRODUCCIÓN

En el contexto global de transición energética, las fuentes de energía limpia han surgido como una solución fundamental a los desafíos asociados con el cambio climático, la seguridad energética y el desarrollo sustentable. Estas fuentes, caracterizadas por un impacto medioambiental mínimo, tienen como objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover sistemas energéticos más resistentes y descentralizados. Según Andoni et al. (2019), blockchain y otras tecnologías avanzadas están transformando los modelos energéticos tradicionales al permitir la gestión descentralizada y el comercio de energía entre pares (P2P). Mollah et al. (2021) destacan que las redes inteligentes habilitadas para blockchain abordan las preocupaciones de seguridad en las transacciones y facilitan la integración de recursos renovables en sistemas descentralizados. La integración de los recursos energéticos distribuidos (DER, en inglés) ha catalizado aún más la adopción de energías renovables y la creación de comunidades energéticas, fomentando la participación de los prosumidores en los mercados energéticos locales (Morstyn et al., 2019). Estas innovaciones contribuyen no solo a la sustentabilidad ambiental, sino también a la cohesión social y al desarrollo económico local (Siano et al., 2019), marcando un camino claro hacia la transición energética global.

La transición hacia la sustentabilidad requiere no solo fuentes renovables, sino también tecnologías avanzadas que optimicen el uso de los recursos. En este contexto, la energía P2P se ha convertido en un mecanismo clave, que permite transacciones directas entre prosumidores y consumidores dentro de las comunidades energéticas. Este enfoque democratiza el acceso y facilita un mercado energético descentralizado y flexible (Wang et al., 2019). Los sistemas P2P reducen los costos de energía y promueven el uso eficiente de las energías renovables. Por ejemplo, Zia et al. (2020) muestran cómo las transacciones locales facilitan la integración renovable en microrredes, mientras que Siano et al. (2019) demuestran cómo la tecnología de contabilidad distribuida (DLT, en inglés) permite transacciones de energía seguras a través de contratos inteligentes, optimizando el equilibrio entre la oferta y la demanda. Mollah et al. (2021) advierten que la descentralización es fundamental para las futuras redes inteligentes, integrando blockchain para superar las barreras técnicas.

Sin embargo, la adopción de estos sistemas presenta desafíos normativos y técnicos, especialmente en regiones donde aún dominan las estructuras centralizadas. Andoni et al. (2019) y Soto et al. (2021) enfatizan la necesidad de claridad normativa e infraestructura robusta para implementar modelos P2P en regiones emergentes de manera efectiva.

Las comunidades energéticas desempeñan un papel crucial en esta transición, sirviendo como catalizadores de tecnologías renovables y mecanismos de gobernanza autónomos. Unen a prosumidores y consumidores en mercados dinámicos, aprovechando tecnologías como blockchain para garantizar transacciones seguras y transparentes (Gu et al., 2023; Wang et al., 2019). La implementación europea ha demostrado que estas iniciativas pueden mejorar la resiliencia energética

y reducir las emisiones de carbono, donde la integración de contratos inteligentes permite la automatización de procesos, mejorando el desempeño económico y ambiental (Andoni et al., 2019; Mollah et al., 2021). Mollah et al. (2021) argumentan que combinar blockchain y redes inteligentes es clave para administrar las crecientes transacciones de energía de manera eficiente.

A pesar de estos beneficios, las comunidades energéticas aún enfrentan barreras normativas, técnicas y de infraestructura en los países en vías de desarrollo. Esto subraya la necesidad de realizar más investigaciones para diseñar modelos adaptativos que reflejen las condiciones locales y garanticen la viabilidad a largo plazo (Gu et al., 2023; Siano et al., 2019).

OBJETIVOS DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y CONTRIBUCIÓN AL ÁREA

En el contexto colombiano, las comunidades energéticas representan un enfoque estratégico para abordar desafíos persistentes como la pobreza energética, el suministro de electricidad poco confiable y las barreras normativas. El marco legislativo actual, impulsado por el Ministerio de Minas y Energía y la Comisión de Regulación de Energía y Gas (Comisión de Regulación de Energía y Gas -República de Colombia, 2011; Ministerio de Minas y Energía -República de Colombia, 2023b), permite el establecimiento de autogeneradores colectivos (AGRC) y generadores colectivos distribuidos (GDC), fomentando la adopción de fuentes de energía renovables no convencionales (ERNCC), incluidas la solar, eólica y la biomasa. Estas regulaciones, junto con incentivos específicos para proyectos en la región del Caribe, ofrecen un potencial importante para mejorar el acceso a la energía en áreas afectadas por tarifas altas e infraestructura limitada.

A nivel mundial, las tecnologías avanzadas como blockchain y los contratos inteligentes han transformado los mercados energéticos, permitiendo transacciones seguras y transparentes entre prosumidores y consumidores. Estudios realizados por Andoni et al. (2019) y Siano et al. (2019) han demostrado cómo el comercio P2P democratiza el acceso a la energía renovable, reduce las emisiones de carbono y mejora la gobernanza local. Estas experiencias internacionales entregan información valiosa para Colombia, particularmente en lo que respecta a la integración de plataformas digitales que mejoran la gestión energética y fomentan la participación comunitaria.

El objetivo de esta revisión bibliográfica es analizar cómo las comunidades energéticas, apoyadas en innovaciones tecnológicas y marcos normativos adaptativos, pueden contribuir a una transición energética descentralizada en Colombia.

METODOLOGÍA

Este estudio se basa en la identificación de tendencias clave y patrones emergentes relacionados con las comunidades energéticas y su integración con tecnologías avanzadas como blockchain y contratos inteligentes. La base de datos

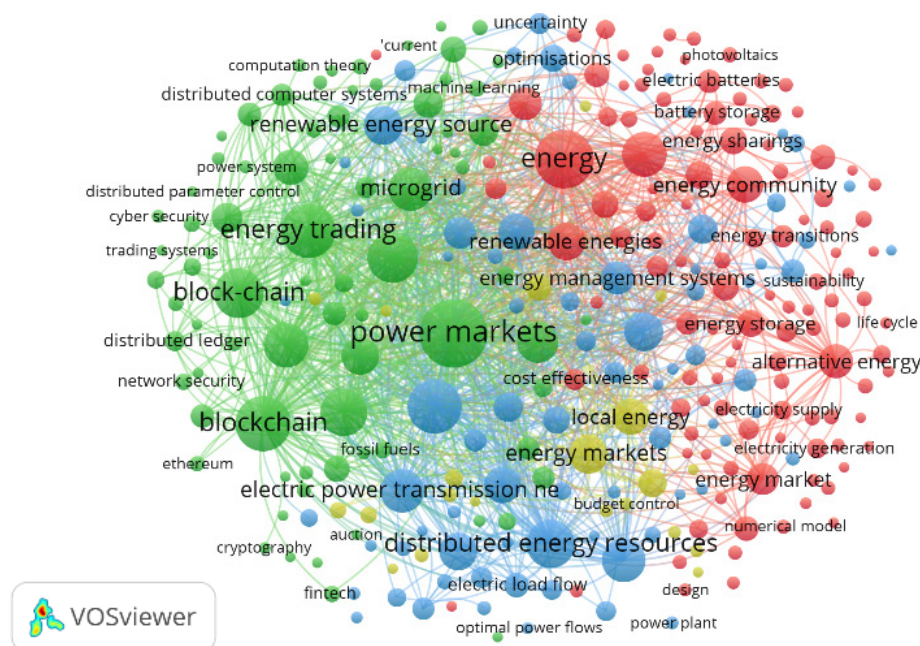


Figura 1. Mapa de concurrencia de palabras clave en el ámbito de las comunidades energéticas y tecnologías asociadas.
Fuente: Preparado por los autores.

Scopus se utilizó para garantizar un análisis riguroso y representativo, ya que incluye literatura revisada por pares de revistas de alto impacto (Codina, 2005). Los términos de búsqueda incluyeron “comunidades energéticas”, “blockchain”, “contratos inteligentes” y “mercados de energía distribuidos”.

El análisis tuvo varias etapas:

1. Tamizaje inicial y delimitación temporal. Se evaluaron títulos y resúmenes para identificar estudios alineados con el enfoque de investigación. Los artículos debían incluir al menos uno de los términos predefinidos en el título, resumen o palabras clave, utilizando el operador booleano “OR” (O, en español). El marco de tiempo extendido a partir de un trabajo seminal (Andoni et al., 2019) al año completo más reciente (2025), arrojó 1.232 documentos.
2. Aplicación de criterios de exclusión. Se excluyeron los documentos que no estaban en inglés, o que no estaban clasificados como artículos o revisiones científicas. También se eliminaron publicaciones no relacionadas con ingeniería, energía o informática, reduciendo el conjunto de datos a 609 documentos.
3. Análisis de concurrencia de palabras clave. Para explorar la estructura conceptual de la literatura, utilizamos VOSviewer para identificar relaciones entre términos frecuentes y descubrir grupos temáticos.
4. Clasificación temática y priorización. Los estudios restantes se clasificaron en cuatro categorías temáticas clave para respaldar un análisis más centrado y organizado: (i) implementación de tecnologías digitales en comunidades energéticas (25 documentos), (ii) barreras normativas y políticas (25), (iii) modelos de gobernanza comunitaria (25), y (iv) casos específicos de integración de energías renovables (25). Dentro de

cada categoría, se identificaron los estudios más relevantes, priorizando aquellos con mayor número de citas como indicador de impacto académico.

5. Selección final y análisis en profundidad. Se seleccionó un subconjunto final de 13 artículos científicos para una revisión detallada. La selección se basó en su alineación temática, rigor metodológico e influencia académica. Esta etapa final proporcionó una base sólida para el análisis crítico de las contribuciones más significativas en el área.

Además, el estudio incorporó perspectivas normativas e institucionales para mejorar la relevancia contextual. Una característica distintiva fue la inclusión de documentos normativos clave (Ministerio de Minas y Energía - República de Colombia, 2023a) e informes (Comisión de Regulación de Energía y Gas - República de Colombia, 2011), lo que ayudó a situar las tendencias internacionales dentro del contexto colombiano, especialmente en la región del Caribe, conocida por su alto potencial en fuentes de energía renovables no convencionales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANÁLISIS DE CONCURRENCIA DE PALABRAS CLAVE

Este análisis descubre la estructura conceptual de la literatura al identificar grupos de términos concurrentes con frecuencia, revelando así relaciones temáticas clave entre los artículos seleccionados. La Figura 1 presenta un mapa de concurrencia, donde los nodos y enlaces resaltan las relaciones temáticas entre conceptos clave.

El análisis de concurrencia de palabras clave identificó tres grupos temáticos principales que reflejan áreas de investigación predominantes en comunidades energéticas y tecnologías avanzadas: transición energética y comunidades energéticas, blockchain y tecnologías digitales, y gestión y eficiencia energética. A continuación se muestra una síntesis de los hallazgos reunidos por grupo, destacando los conceptos principales y su contexto dentro del campo.

- **Transición energética y comunidades energéticas (rojo):** Este grupo se centra en la investigación sobre la creación de modelos sustentables de generación y almacenamiento de energía. Enfatiza la integración de fuentes renovables, la participación activa de las comunidades energéticas y la importancia de los mercados descentralizados de energía. La fuerte conexión entre "intercambio de energía" y "comunidad energética" destaca el papel crucial de los prosumidores y las iniciativas locales en la transición energética. Los conceptos principales son "Comunidad energética", "Energía alternativa", "Almacenamiento de energía", "Transiciones energéticas" y "Uso compartido de energía".
- **Blockchain y tecnologías digitales (verde):** Este grupo refleja el creciente interés en implementar tecnologías avanzadas como blockchain y contratos inteligentes. Estas herramientas permiten el comercio descentralizado de energía, facilitan las transacciones P2P y garantizan la seguridad, transparencia y eficiencia de los mercados energéticos locales. Los vínculos entre "blockchain" y "contratos inteligentes" subrayan su importante papel como facilitadores clave en el desarrollo de sistemas energéticos modernos y descentralizados. Los conceptos principales son "Blockchain", "Libro de contabilidad distribuido", "Comercio entre pares", "Comercio de energía" y "Contratos inteligentes".
- **Gestión y Eficiencia Energética (azul):** Este grupo refleja el creciente interés en implementar tecnologías avanzadas. Estas herramientas permiten el comercio descentralizado de energía, facilitan las transacciones P2P y garantizan la seguridad, transparencia y eficiencia de los mercados energéticos locales. Los vínculos entre "blockchain" y "contratos inteligentes" subrayan su importante papel como facilitadores clave en el desarrollo de sistemas energéticos modernos y descentralizados. Los conceptos principales incluyen "Fuente de energía renovable", "Microrred", "Recursos energéticos distribuidos" y "Eficiencia energética".

DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS COMUNIDADES ENERGÉTICAS

Las comunidades energéticas son un modelo transformador para avanzar en sistemas energéticos sustentables y descentralizados. Involucran a ciudadanos, empresas y organizaciones locales que colaboran en la producción, consumo y comercialización de energía renovable. Basadas en los principios de sostenibilidad, empoderamiento local y gobernanza descentralizada, estas comunidades promueven la gestión energética inclusiva y participativa (Soto et al., 2021).

Una característica clave de las comunidades energéticas es su capacidad para operar de forma autónoma dentro de los mercados locales, utilizando tecnologías como blockchain y contratos inteligentes para permitir el comercio de energía entre pares seguro y transparente (Mollah et al., 2021; Wang et al., 2019). Muchos también implementan microrredes para optimizar los recursos energéticos distribuidos y mejorar la resiliencia a los riesgos ambientales y normativos (Zia et al., 2020).

A nivel internacional, las comunidades energéticas han ayudado a abordar la pobreza energética y los déficits de infraestructura. En Europa, la Directiva de Energías Renovables de 2019 ha alentado a las comunidades de energías renovables a mejorar la participación ciudadana y la adopción de energías renovables (Gjorgievski et al., 2021). En América Latina, particularmente en áreas rurales y desatendidas, las microrredes comunitarias ofrecen electricidad confiable y sustentable que respalda el desarrollo social y económico (Soto et al., 2021).

EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE COMUNIDADES ENERGÉTICAS

La noción de comunidades energéticas ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, convirtiéndose en un factor clave en el cambio hacia sistemas energéticos más sostenibles y descentralizados. Estas comunidades, que reúnen a prosumidores, administradores locales y otras partes interesadas, tienen como objetivo democratizar la producción, el consumo y el comercio de energía mediante la implementación de tecnologías avanzadas como blockchain y contratos inteligentes. Este modelo promueve la sustentabilidad ambiental, fortalece la cohesión social y fomenta el desarrollo económico local (Gu et al., 2023; Stefan et al., 2020). Las comunidades energéticas aprovechan las fuentes de energía renovables no convencionales (ERNC), como la solar y la eólica, para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y aumentar la resiliencia a los desafíos climáticos y normativos. (Zia et al., 2020).

A nivel mundial, las comunidades energéticas han demostrado ser herramientas prácticas para abordar los problemas de acceso a la energía y la pobreza energética. En contextos locales, como la región caribeña de Colombia, presentan una oportunidad para transformar los sistemas energéticos y promover la equidad social. Su desarrollo, impulsado por los avances tecnológicos y los marcos normativos, permite la participación ciudadana en los mercados energéticos. Sin embargo, su implementación varía según las condiciones socioeconómicas y climáticas de cada región, lo que subraya la importancia de un enfoque adaptativo para garantizar el éxito. Dichos enfoques adaptativos deben ser sensibles al contexto, integrando la gobernanza participativa, la colaboración institucional y la selección de tecnología apropiada basada en la capacidad local. Los modelos exitosos deben considerar no solo la viabilidad técnica, sino también la aceptación cultural, la asequibilidad y la propiedad comunitaria a largo plazo para garantizar que las comunidades energéticas sean inclusivas, resilientes y sustentables.

PARTES INTERESADAS CLAVE: PROSUMIDORES, ADMINISTRADORES LOCALES Y PARTICIPANTES DEL MERCADO

Las partes interesadas clave en las Comunidades energéticas incluyen prosumidores, administradores locales y participantes del mercado, cada uno de los cuales desempeña un papel fundamental para garantizar el funcionamiento y la sustentabilidad de estos sistemas.

- Prosumidores: individuos o entidades que producen y consumen energía. Según Wang et al. (2019), la participación de los prosumidores a través de plataformas descentralizadas, como las basadas en blockchain, facilita transacciones energéticas confiables y fomenta la adopción de tecnologías de energía renovable (Ariza et al., 2020).
- Administradores locales: coordinan las actividades de la comunidad, incluidas la planificación energética y la mediación entre los miembros. Su papel es crucial para implementar modelos de gobernanza participativa y garantizar el cumplimiento de los estándares normativos. Como Stefan et al. (2020) destacan, este papel es especialmente significativo en entornos locales donde las necesidades y los recursos energéticos varían ampliamente.
- Participantes del mercado: este grupo incluye a operadores de sistemas, desarrolladores de tecnología y otros actores que brindan infraestructura y servicios críticos. Facilitan la integración de tecnologías avanzadas, como contratos inteligentes y sistemas de monitoreo en tiempo real, para mejorar la eficiencia operativa y la transparencia dentro del sistema energético (Mollah et al., 2021).

La Figura 2 ilustra un modelo conceptual de comercio de energía P2P en comunidades energéticas. Destaca las principales interacciones entre los actores clave: consumidores, prosumidores y la empresa de servicios básicos, todos coordinados por un administrador de intercambio de energía.

Estos actores pueden comerciar energía entre ellos o con los consumidores, gestionando tanto la generación como el consumo. La empresa de servicios básicos brinda respaldo al sistema, ofreciendo precios de compra y de exportación de energía para equilibrar los excedentes o la escasez en la producción de energía comunitaria. El administrador de intercambio de energía supervisa las transacciones de energía entre los participantes, asegurando el cumplimiento eficiente de las necesidades energéticas, a la vez que mantiene la transparencia y seguridad en los flujos de energía y los acuerdos financieros. La Figura 2 resalta los flujos de energía (representados por flechas), así como las transacciones de comercio de energía (etiquetadas como "comercio"). Subraya el importante papel de los prosumidores en el fomento de un modelo descentralizado de generación y consumo de energía.

TECNOLOGÍAS HABILITADORAS PARA COMUNIDADES ENERGÉTICAS

El desarrollo de comunidades energéticas, impulsado por tecnologías avanzadas, facilita la descentralización de los sistemas energéticos y optimiza la gestión de los recursos. Las herramientas líderes utilizadas son blockchain y contratos inteligentes, que permiten transacciones de energía seguras

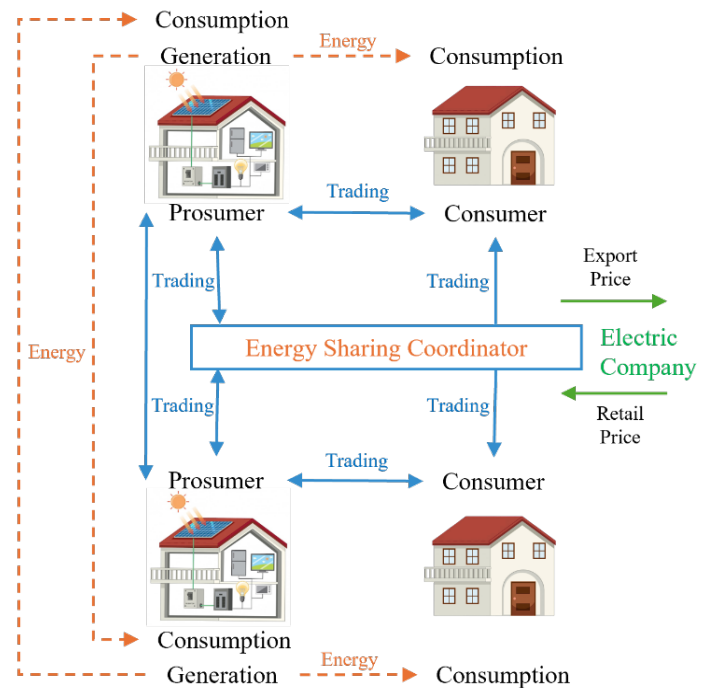


Figura 2. Modelo conceptual del comercio de energía P2P en comunidades energéticas. Fuente: Adaptado de Soto et al. (2021).

y transparentes, al tiempo que eliminan intermediarios y reducen los costos operativos (Andoni et al., 2019; Gu et al., 2023; Zia et al., 2020). Estas tecnologías permiten a los prosumidores y otros participantes del mercado participar activamente en modelos descentralizados, automatizando procesos críticos como la liquidación de transacciones y la gestión de activos energéticos (Wang et al., 2019).

La energía transactiva es otro facilitador clave, que integra mecanismos económicos y de control para equilibrar la oferta y la demanda en tiempo real dentro de las microrredes y los mercados energéticos locales (Siano et al., 2019; Zia et al., 2020). Dichos sistemas aprovechan las tecnologías digitales y de comunicación para gestionar los recursos energéticos distribuidos (DER, en inglés), fomentando la participación de los prosumidores en los mercados P2P. Ejemplos exitosos de esto incluyen iniciativas como Power Ledger y PROSUME, que demuestran el potencial transformador de estos modelos en los mercados locales e internacionales (Gjorgievski et al., 2021). Del mismo modo, tecnologías como el internet de las cosas (IoT, en inglés) y la digitalización mejoran la conectividad entre dispositivos inteligentes en hogares y empresas. Los medidores inteligentes y las plataformas de análisis en tiempo real optimizan la generación y el consumo de energía, mejorando la eficiencia energética y promoviendo la adopción de energías renovables. (Miglani et al., 2020; Mollah et al., 2021).

Finalmente, los casos en Europa, Australia y América Latina muestran cómo estas tecnologías remodelan los mercados energéticos. Los proyectos piloto han demostrado su capacidad para integrar energías renovables, reducir emisiones y promover la cohesión social en las comunidades energéticas (Gjorgievski et al., 2021; Gu et al., 2023; Stefan et al., 2020).

BLOCKCHAIN Y CONTRATOS INTELIGENTES: LA BASE DE LA DESCENTRALIZACIÓN ENERGÉTICA

La tecnología blockchain y los contratos inteligentes han surgido como elementos fundamentales para transformar y descentralizar los sistemas energéticos modernos. Blockchain proporciona una infraestructura distribuida, segura y transparente para registrar transacciones de energía, eliminando efectivamente intermediarios y reduciendo los costos operativos. Por otro lado, los contratos inteligentes son herramientas digitales que ejecutan transacciones de energía de forma automática, reduciendo la necesidad de intermediarios y minimizando errores. (Kumari et al., 2022; Mollah et al., 2021).

En el contexto energético, estas tecnologías facilitan la implementación de mercados P2P, donde los prosumidores pueden intercambiar directamente excedentes de energía renovable con otros usuarios. Esto promueve la participación de la comunidad local e impulsa la sostenibilidad económica y ambiental. Ejemplos como el proyecto Brooklyn Microgrid en los Estados Unidos y Power Ledger en Australia demuestran el impacto transformador de blockchain al permitir la gestión descentralizada de los recursos energéticos (Gjorgievski et al., 2021; Sousa et al., 2019). Blockchain también aborda desafíos críticos como la ciberseguridad mediante el empleo de mecanismos criptográficos avanzados, para proteger los datos de los usuarios y garantizar la integridad de las transacciones.

La Figura 3 ilustra la arquitectura de un sistema de gestión de energía descentralizado que comprende medidores inteligentes, líneas de comunicación de datos e infraestructura de energía. Cada hogar, incluidos consumidores y prosumidores, está equipado con un medidor inteligente que monitorea el consumo o la generación de energía en tiempo real. Estos medidores están interconectados a través de redes digitales seguras con una plataforma de administración central, potencialmente respaldada por blockchain y contratos inteligentes, y se comunican con la infraestructura del operador del sistema de distribución (DSO, en inglés). El sistema permite el comercio de energía entre pares, a la vez que mantiene la coordinación con el DSO para garantizar la estabilidad de la red y la confiabilidad del sistema. Los flujos de energía están representados por líneas discontinuas naranjas, mientras que los flujos de datos se muestran como líneas azules continuas. Esta configuración integrada admite transacciones automatizadas, equilibrio de carga eficiente y mayor resiliencia a las fluctuaciones locales en la demanda o el suministro. La figura destaca cómo la infraestructura física y los actores institucionales están conectados a través de herramientas digitales para activar mercados energéticos descentralizados seguros y dinámicos.

ENERGÍA TRANSACTIVA Y COMERCIO P2P QUE REDEFINEN LOS MERCADOS LOCALES

La energía transactiva y el comercio P2P están remodelando los mercados energéticos al permitir intercambios directos entre consumidores y prosumidores,

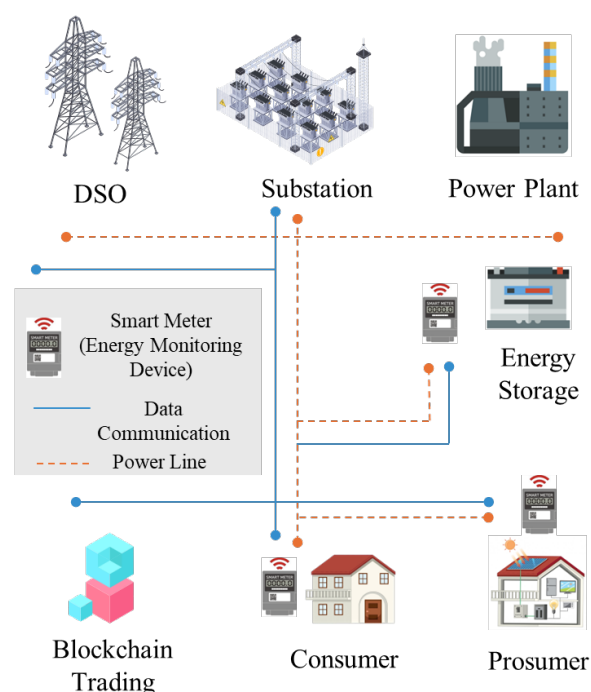


Figura 3. Concepto de un sistema de comercio de energía. Fuente: Preparado por los autores.

eliminando intermediarios tradicionales y fomentando la descentralización de los sistemas energéticos. Estos modelos aprovechan tecnologías como blockchain y plataformas digitales, lo que permite un comercio eficiente y transparente de energía renovable en tiempo real (Soto et al., 2021). Transactive energy se basa en algoritmos avanzados para equilibrar dinámicamente la oferta y la demanda en microrredes locales. Estas herramientas optimizan el flujo de energía, minimizan las pérdidas y respaldan la integración de fuentes renovables como la solar y la eólica. Además, los controladores transactivos ajustan automáticamente el consumo del usuario en función de las señales económicas, lo que mejora la sostenibilidad del sistema (Siano et al., 2019).

El comercio P2P, a su vez, permite a los prosumidores maximizar el uso de sus recursos de energía renovable y obtener beneficios financieros al vender el exceso de energía directamente a otros usuarios. Los estudios en Colombia enfatizan el potencial del comercio P2P para empoderar a los usuarios finales y aumentar su participación en el mercado energético. Por ejemplo, la "Iniciativa de energía transactiva para Colombia" ha identificado estructuras de preferencia de los usuarios para diseñar modelos de negocio que integren este tipo de transacciones (Cárdenas-Álvarez et al., 2022). Sin embargo, estos modelos enfrentan importantes desafíos normativos y tecnológicos. En Colombia, la ausencia de marcos legales específicos para regular las transacciones energéticas descentralizadas constituye un obstáculo para su implementación generalizada. Asimismo, los costos iniciales de infraestructura, como medidores inteligentes y plataformas digitales, limitan la adopción, particularmente en áreas rurales y subdesarrolladas (González-Dumar et al., 2024).

En resumen, la energía transactiva y el comercio P2P ofrecen una oportunidad única para descentralizar los mercados energéticos y empoderar a los consumidores. No obstante, para aprovechar plenamente su potencial, las políticas adaptativas y las alianzas estratégicas son fundamentales para superar las barreras tecnológicas y normativas, especialmente en contextos emergentes como Colombia (Zia et al., 2020).

CASOS DE USO Y EXPERIENCIAS INTERNACIONALES

La selección de países desarrollados con contextos muy diferentes a Colombia, como Alemania, Dinamarca, Japón o Australia, permite destacar aportes específicos en diferentes sistemas energéticos descentralizados, brindando ideas valiosas para la transición energética de Colombia como modelos a seguir.

En Europa, Alemania está a la vanguardia de la gobernanza de las energías renovables y las iniciativas impulsadas por los ciudadanos. Su política *Energiewende* aboga por modelos energéticos colaborativos que involucren a todas las partes interesadas. Al usar la tecnología blockchain, Alemania está mejorando la transparencia y reduciendo los costos operativos, estableciendo un punto de referencia para la gobernanza participativa y la adaptación normativa (Mollah et al., 2021). Por otro lado, Dinamarca sobresale en la innovación energética impulsada por el mercado, particularmente a través de plataformas de negociación entre pares (P2P). Estas plataformas permiten a los prosumidores intercambiar excedentes de energía, optimizando la dinámica de la oferta y la demanda y asegurando la estabilidad de la red. El éxito de Dinamarca proporciona un modelo replicable para la integración de sistemas distribuidos de energía renovable en Colombia (Wang et al., 2019).

Un ejemplo del continente asiático es Japón. Este país ha tenido éxito en la implementación de microrredes que integran almacenamiento solar y distribuido. Estos sistemas aseguran la continuidad de la energía durante emergencias, mitigando las vulnerabilidades inherentes a las redes centralizadas. Este enfoque es particularmente instructivo para las regiones propensas a desastres (como Colombia), destacando la necesidad de una infraestructura energética robusta y adaptable (Siano et al., 2019).

Finalmente, las plataformas de comercio de energía P2P de Australia, ejemplificadas por iniciativas como Power Ledger, permiten transacciones directas entre prosumidores. Este modelo promueve mercados energéticos inclusivos y sustentables, al tiempo que reduce la dependencia de las redes centralizadas. La experiencia del país se alinea con el objetivo de Colombia de empoderar a las comunidades energéticas locales a través de soluciones descentralizadas (Wang et al., 2019).

Al sintetizar el marco de gobernanza de Alemania, las innovaciones de mercado de Dinamarca, las estrategias de resiliencia de Japón y los sistemas P2P de Australia, Colombia puede formular un plan integral de transición energética. Este enfoque podría abordar los desafíos normativos, de infraestructura y socioeconómicos del país

y abrir la puerta a un futuro energético descentralizado y sustentable. Las experiencias internacionales han destacado la eficacia de combinar tecnologías avanzadas, incluidas blockchain y contratos inteligentes, con modelos cooperativos y regulaciones inclusivas. Estas experiencias también subrayan el papel transformador de las tecnologías emergentes para optimizar la gestión de los recursos y generar confianza entre las partes interesadas del mercado. Por ejemplo, el uso de blockchain en Europa ha mejorado la trazabilidad y la seguridad de las transacciones energéticas, reforzando la participación de los prosumidores a través del comercio entre pares (Tkachuk et al., 2023).

CONCLUSIONES

El desarrollo de comunidades energéticas, incluida Colombia, se ha convertido en una estrategia fundamental para promover sistemas energéticos sustentables y descentralizados en todo el mundo. Este modelo democratiza el acceso a la energía, reduce las emisiones de carbono y promueve la sustentabilidad socioeconómica mediante la integración de tecnologías emergentes y marcos normativos adaptativos.

En Colombia, las comunidades energéticas ofrecen una oportunidad estratégica para abordar desafíos de larga data, como la pobreza energética y la electrificación limitada en regiones rurales y no interconectadas. La región del Caribe tiene un potencial significativo para la generación distribuida debido a sus abundantes recursos renovables (Ministerio de Minas y Energía - República de Colombia, 2024).

Sin embargo, el país enfrenta barreras normativas, técnicas y sociales. Aunque la Ley 2099 de 2021 y la Resolución 701 de 2024 de CREG establecen las bases para la creación de comunidades energéticas, se necesita mayor claridad normativa, así como mecanismos de financiamiento para incentivar la participación de prosumidores a pequeña escala (Ministerio de Minas y Energía-República de Colombia, 2023b). Los proyectos piloto en el Departamento de Bolívar han demostrado la viabilidad de tales iniciativas, destacando la importancia de adaptar los modelos internacionales a las realidades locales (Departamento Nacional de Planeación - República de Colombia, 2023; Molina et al., 2022). Con base en esto, consideramos que las principales estrategias para lograr una transición energética sostenible en Colombia serían las siguientes:

- Fortalecimiento del marco regulatorio: diseñar regulaciones inclusivas que incentiven la inversión privada y reduzcan las barreras para la adopción de tecnologías emergentes.
- Fomento de acciones educativas y de concientización comunitaria: implementar programas educativos para sensibilizar a las comunidades locales sobre los beneficios de la energía renovable y la gestión descentralizada.
- Desarrollo de asociaciones público-privadas: fomentar la colaboración entre universidades, empresas

de tecnología y gobiernos locales para acelerar la adopción de soluciones innovadoras. Las universidades pueden desempeñar un papel crucial en la investigación, el desarrollo y la capacitación técnica, asegurando que las comunidades tengan las herramientas y el conocimiento necesarios para administrar sus recursos energéticos.

- Invertir en infraestructura y tecnología: priorizar el despliegue de medidores inteligentes, sistemas de almacenamiento y plataformas digitales para facilitar el comercio P2P y la gestión eficiente de los recursos energéticos.

La transición hacia comunidades energéticas en Colombia demanda un enfoque integral que combine tecnología, regulación y participación ciudadana. Las universidades están llamadas a encabezar iniciativas de capacitación técnica y participación pública, tendiendo puentes entre el desarrollo tecnológico y las necesidades locales. Su participación en el diseño de proyectos piloto, junto con la cooperación con los sectores privado y gubernamental, será fundamental para garantizar la viabilidad y escalabilidad de estas iniciativas.

En resumen, las comunidades energéticas son impulsoras del cambio tecnológico y herramientas esenciales para fortalecer la cohesión social y cultivar una cultura de sustentabilidad. Su implementación práctica requiere un compromiso sostenido de todos los sectores, asegurando que los beneficios de la transición energética sean accesibles para toda la población colombiana. La acción oportuna y decisiva sigue siendo esencial para empoderar a las comunidades, fortalecer las capacidades institucionales y tecnológicas e impulsar la transición hacia un futuro energético descentralizado e inclusivo, que garantice la sustentabilidad y la equidad social a largo plazo.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

CRedit

Conceptualización, M. F. M. R. y J. G. F. C.; Curación De Datos, M. F. M. R.; Análisis Formal, M. F. M. R.; Adquisición De Financiación, M. F. M. R.; Investigación, M. F. M. R.; Metodología, M. F. M. R.; Administración De Proyectos, M. F. M. R. y J. C. M. S.; Recursos, M. F. M. R.; Software, M. F. M. R.; Supervisión, M. F. M. R. & J. C. M. S.; Validación, M. F. M. R. & J. G. F. C.; Visualización, M. F. M. R. & J. G. F. C.; Escritura - revisión y edición, M. F. M. R., J. C. M. S. & J. G. F. C.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Convocatoria 933 "Formación en doctorados nacionales con enfoque territorial, étnico y de género en el marco de la política de misión-2023" del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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>

Ariza, H., Martínez-Santos, J. C., Payares, E. D., Medina, M. F., Domínguez-Jiménez, J. A., & Campillo, J. (2020, October 13-16). A blockchain solution for operational parameters monitoring platform for DC microgrids [Paper presentation]. 2020 IEEE ANDESCON Conference, Quito, Ecuador, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON50619.2020.9272035>

Cárdenas-Álvarez, J. P., España, J. M., & Ortega, S. (2022). What is the value of peer-to-peer energy trading? A discrete choice experiment with residential electricity users in Colombia. *Energy Research & Social Science*, 91, 102737. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102737>

Codina, L. (2005). Scopus: el mayor navegador científico de la web. *El Profesional de la Información*, 14(1), 44-49. <https://www.epn.edu.ec/wp-content/uploads/2017/03/Scopus-el-mayor-navegador.pdf>

Comisión de Regulación de Energía y Gas – República de Colombia. (2011). *El Mercado Eléctrico Colombiano*. <https://creg.gov.co/publicaciones/8206/como-funciona-el-mercado-electrico-de-colombia/>

Departamento Nacional de Planeación – República de Colombia. (2023). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026. Potencia mundial de la vida*. <https://www.dnp.gov.co/plan-nacional-desarrollo/pnd-2022-2026>

Gjorgievski, V. Z., Cundeva, S., & Georghiou, G. E. (2021). Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: A review. *Renewable Energy*, 169, 1138–1156. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.078>

González-Dumar, A., Arango-Aramburo, S., & Correa-Posada, C. M. (2024). Quantifying power system flexibility for the energy transition in Colombia. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 155, 109614. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109614>

Gu, B., Mao, C., Wang, D., Liu, B., Fan, H., Fang, R., & Sang, Z. (2023). A data-driven stochastic energy sharing optimization and implementation for community energy storage and PV prosumers. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 34, 101061. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101051>

Kumari, A., Sukhramwala, U. C., Tanwar, S., Raboaca, M. S., Alqahtani, F., Tolba, A., Sharma, R., Aschilean, I., & Mihaltnan, T. C. (2022). Blockchain-Based Peer-to-Peer Transactive Energy Management Scheme for Smart Grid System. *Sensors*, 22(13), 4826. <https://doi.org/10.3390/s22134826>

Miglani, A., Kumar, N., Chamola, V., & Zeadally, S. (2020). Blockchain for Internet of Energy management: Review, solutions, and challenges. *Computer Communications*, 151, 395–418. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.01.014>

Ministerio de Minas y Energía – República de Colombia. (2023a). *ABC de Comunidades Energéticas*. <https://www.minenergia.gov.co/documents/11069/ABC-ComunidadesEnergeticas-2023.pdf>

Ministerio de Minas y Energía – República de Colombia. (2023b). *Decreto 2236 de 2023*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=227230>

Ministerio de Minas y Energía – República de Colombia. (2024). *Comisión de Regulación de Energía y Gas, Proyecto de Resolución N°.701 068 de 2024*. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/originales/Proyecto_Resoluci%C3%B3n_CREG_701_068_2024/Proyecto_Resoluci%C3%B3n_CREG_701_068_2024.pdf

Molina, J. D., Buitrago, L. F., Téllez, S. M. G., Giraldo, S. Y., & Uribe, J. A. (2022). Technological Architecture Design for Energy Communities: The Colombian Case. *2022 IEEE PES Generation, Transmission and Distribution Conference and Exposition – Latin America (IEEE PES GTD Latin America)*, La Paz, Bolivia, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IEEEPESGTDLatinAmeri53482.2022.10038297>

Mollah, M. B., Zhao, J., Niyato, D., Lam, K. Y., Zhang, X., Ghias, A. M. Y. M., Koh, L. H., & Yang, L. (2021). Blockchain for Future Smart Grid: A Comprehensive Survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(1), 18–43. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2993601>

Morstyn, T., Teytelboym, A., & McCulloch, M. D. (2019). Designing decentralized markets for distribution system flexibility. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(3), 1–12. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2886244>

Siano, P., De Marco, G., Rolan, A., & Loia, V. (2019). A Survey and Evaluation of the Potentials of Distributed Ledger Technology for Peer-to-Peer Transactive Energy Exchanges in Local Energy Markets. *IEEE Systems Journal*, 13(3), 3454–3466. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2903172>

Soto, E. A., Bosman, L. B., Wollega, E., & Leon-Salas, W. D. (2021). Peer-to-peer energy trading: A review of the literature. *Applied Energy*, 283, 116268. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116268>

Sousa, T., Soares, T., Pinson, P., Moret, F., Baroche, T., & Sorin, E. (2019). Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 367–378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.036>

Stefan, M., Zehetbauer, P., Cejka, S., Zeilinger, F., & Taljan, G. (2020). Blockchain-based self-consumption optimisation and energy trading in renewable energy communities. *CIREN 2020 Berlin Workshop, 2020(1)*, 371–374. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2021.0061>

Tkachuk, R. V., Ilie, D., Robert, R., Kebande, V., & Tutschku, K. (2023). Towards efficient privacy and trust in decentralized blockchain-based peer-to-peer renewable energy marketplace. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 35, 101146. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101146>

Wang, S., Taha, A. F., Wang, J., Kvaternik, K., & Hahn, A. (2019). Energy Crowdsourcing and Peer-to-Peer Energy Trading in Blockchain-Enabled Smart Grids. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 49(8), 1612–1623. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2916565>

Zia, M. F., Benbouzid, M., Elbouchikhi, E., Mueen, S. M., Techato, K., & Guerrero, J. M. (2020). Microgrid Transactive Energy: Review, Architectures, Distributed Ledger Technologies, and Market Analysis. *IEEE Access*, 8, 19410–19432. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968402>