TecnoLógicas

Implementación de contratos inteligentes para el comercio energético P2P: una prueba de concepto basada en Blockchain

Implementation of Smart Contracts for Peer-to-Peer Energy Trading: A *Blockchain* Based Proof of Concept

Edinson Benavides[1]; Germán Obando[1]; Andrés Pantoja[1]

[1]Universidad de Nariño, Pasto – Colombia

Correspondencia: erbenavides@udenar.edu.co

Recibido: 09 Septiembre 2025 **Aceptado:** 07 Septiembre 2026 **Disponible:** 11 Septiembre 2026

Cómo citar / How to cite
E. Benavides, G. Obando, and A. Pantoja, "Implementación de contratos inteligentes para el comercio energético P2P: una prueba de concepto basada en Blockchain" *TecnoLógicas*, vol. 29, no. 67, e3643, 2026.
https://doi.org/10.22430/22565337.3643

Resumen

La tecnología *Blockchain* está emergiendo como una herramienta clave para el comercio de energía peer-to-peer (P2P) al ofrecer un sistema descentralizado, transparente y seguro para el registro y validación de transacciones. Su naturaleza distribuida permite superar desafíos relacionados con la confianza, la seguridad de la información y la eliminación de intermediarios en los mercados energéticos. No obstante, debido a la reciente adopción de *Blockchain*, aún son limitados los estudios que orienten su implementación práctica en este tipo de mercados. Este trabajo tuvo como objetivo presentar una guía técnica para el despliegue de una red *Blockchain* que facilite el registro seguro de transacciones en escenarios de comercio energético P2P. La metodología propuesta se basó en el análisis e identificación de herramientas disponibles para el desarrollo de la red, considerando factores técnicos como escalabilidad, velocidad de transacción y tipo de red (pública, privada o permisionada). A partir de estos criterios, se seleccionó la plataforma más adecuada y se desarrolló una prueba piloto en la red Polygon Amoy. Como resultado, la prueba piloto realizada permitió evaluar la viabilidad técnica inicial del sistema y se complementó con una guía práctica que facilita la replicación y el despliegue de contratos inteligentes. Asimismo, se documentó el proceso de verificación de los bloques generados, incluyendo información crítica como precios, cantidades de energía comercializada y operaciones no ejecutadas. En conclusión, los resultados demuestran la viabilidad funcional a nivel piloto y sientan bases metodológicas para futuras implementaciones de *Blockchain* orientadas al comercio P2P en microrredes y sistemas de distribución activa.

Palabras clave

Contratos inteligentes, comercio entre pares, mercados eléctricos, prosumidores energéticos, red Blockchain.

Abstract

Blockchain technology is emerging as a key enabler for peer-to-peer (P2P) energy trading by providing a decentralized, transparent, and secure framework for recording and validating transactions. Its distributed nature helps to address challenges related to trust, information security, and the elimination of intermediaries in energy markets. However, due to the relatively recent adoption of Blockchain technology, studies providing practical guidance for its implementation in this type of market remain limited. The objective of this work was to present a technical guideline for the deployment of a Blockchain network capable of supporting the secure recording of transactions in P2P energy trading scenarios. The proposed methodology was based on the analysis and identification of available tools for network development, considering technical factors such as scalability, transaction speed, and network type (public, private, or permissioned). Based on these criteria, the most suitable platform was selected, and a pilot implementation was developed on the Polygon Amoy network. The pilot study enabled an initial assessment of the system's technical feasibility and was complemented by a practical guide to facilitate the replication and deployment of smart contracts. Furthermore, the verification process of the generated blocks was documented, including critical information such as prices, traded energy quantities, and unexecuted transactions. In conclusion, the results demonstrate the functional feasibility of the proposed approach at a pilot level and provide a methodological foundation for future Blockchain implementations aimed at P2P energy trading in microgrids and active distribution systems.

Keywords

Smart contracts, p2p trading, electricity markets, energy prosumers., blockchain network.

1. INTRODUCCIÓN

La implementación de recursos energéticos distribuidos (DERs) ha cambiado la forma tradicional de comercializar energía. Los DERs permiten el surgimiento del comercio peer-to-peer (P2P) y nuevos agentes, denominados prosumidores, que pueden suplir su demanda con su capacidad instalada y compartir excedentes en el mercado. Por lo anterior, el operador de red deja de ser el actor principal de los procesos transaccionales [1], [2], [3]. Las investigaciones relacionadas con el comercio energético P2P, los avances de la tecnología y en el Internet de las Cosas (IoT) han permitido ampliar la implementación de estos sistemas, contribuyendo a la descentralización de las transacciones de energía [4].

Pese a que el IoT ha posibilitado la conexión de los prosumidores y ofrece oportunidades para el manejo de datos, aún enfrenta problemas técnicos y de seguridad. Lo anterior, sumado a la creciente cantidad de usuarios e información sensible compartida en las transacciones, puede aumentar la desconfianza de los participantes de la red [4], [5]. Por lo tanto, surge la necesidad de implementar un sistema de transacción de datos con altos estándares de seguridad y un sistema de gestión energética con niveles adecuados de privacidad, incentivando de esta forma la participación de los prosumidores en el comercio de energía P2P [6].

En este contexto, Blockchain se presenta como una alternativa para abordar los problemas de seguridad. Cabe anotar que esta tecnología ha revolucionado múltiples sectores, desde las finanzas hasta la gestión de datos, ofreciendo un sistema descentralizado, transparente y seguro para el registro y validación de transacciones. Blockchain es una herramienta de contabilidad descentralizada que permite el mantenimiento seguro y transparente de registros de transacciones a través de una red de computadoras [7]. Es por esto por lo que Blockchain se está consolidando como una herramienta clave para la implementación del comercio energético P2P [8].

Desde una perspectiva técnica, Blockchain organiza la información en bloques que se enlazan de forma secuencial, conformando una cadena inmutable. Cada bloque contiene un conjunto de transacciones, un sello de tiempo y un valor hash que lo identifica de manera única [2]. El hash del bloque anterior se incluye en el bloque actual, asegurando la integridad y continuidad de la cadena. Así, cualquier alteración en la información modificaría el hash y rompería el enlace con los bloques siguientes. Este mecanismo criptográfico garantiza que los registros almacenados sean inmutables y verificables, lo que otorga a Blockchain su carácter confiable y resistente a manipulaciones [2].

Sobre esta base tecnológica, Blockchain no solo ofrece seguridad y descentralización, sino que también facilita la automatización de procesos mediante contratos inteligentes, aspecto especialmente relevante en escenarios de comercio energético P2P. Estos contratos permiten ejecutar acuerdos de manera autónoma, reduciendo costos operativos y eliminando la necesidad de intermediarios en la validación de transacciones. De esta forma, se habilita un entorno más eficiente y confiable, en el que los prosumidores pueden intercambiar energía de manera directa y segura [9], [10].

En cuanto a las aplicaciones Blockchain empleadas en mercados energéticos P2P, su implementación requiere una arquitectura de sistema multicapa que integre infraestructura física, plataformas de intercambio y mecanismos de consenso distribuido. En este tipo de arquitecturas, cada punto de producción y consumo se concibe como un nodo de la red eléctrica, equipado con un medidor inteligente que comparte datos con una plataforma central de comercialización [11]. Asimismo, la literatura reporta principalmente dos enfoques: redes públicas basadas en Ethereum y redes privadas o consorciadas basadas en Hyperledger Fabric. Ethereum destaca por su soporte nativo de contratos inteligentes y su amplia adopción, lo que ha facilitado su uso en plataformas P2P que gestionan simultáneamente transacciones financieras y energéticas [12]. Sin embargo, esta plataforma presenta limitaciones en escalabilidad y costos de transacción que pueden afectar su desempeño en redes con gran número de participantes [13]. Hyperledger Fabric, en cambio, ofrece mayor control de acceso, privacidad configurable y un mecanismo de consenso más eficiente computacionalmente, lo que lo hace adecuado para entornos con requisitos estrictos de confidencialidad [14], [13]. Estas diferencias han sido documentadas en estudios comparativos que analizan el rendimiento de ambas plataformas en escenarios de transacciones de alta frecuencia, concluyendo que la elección de la arquitectura debe responder a los requisitos específicos del caso de uso [15].

En el contexto específico de los mercados energéticos P2P, la elección de la arquitectura Blockchain tiene implicaciones directas sobre la eficiencia y viabilidad del sistema. Los autores en [16] señalan que la arquitectura seleccionada condiciona aspectos como la latencia en la liquidación de transacciones y la capacidad de la red para escalar con el número de prosumidores. Trabajos como [17] y [18] demuestran que Hyperledger Fabric permite gestionar estrategias de respuesta a la demanda y contratos inteligentes en tiempo real con menor overhead computacional, mientras que propuestas basadas en Ethereum [12] priorizan la transparencia y la interoperabilidad con otros ecosistemas descentralizados. A pesar de estos avances, la revisión presentada en [15] evidencia que no existe consenso sobre cuál arquitectura es más adecuada para mercados energéticos P2P, y que en gran parte de la literatura la elección de la plataforma no se justifica de manera sistemática frente a las alternativas disponibles, lo que representa una brecha que este trabajo busca contribuir a cerrar.

Desde el punto de vista de los mecanismos de transacción, los trabajos previos han explorado diversas estrategias para estructurar el intercambio energético sobre redes Blockchain. Los autores en [19] propusieron estrategias completamente descentralizadas para sistemas residenciales, mientras que en [8] combinaron subastas iterativas dobles con Blockchain para la operación de microrredes. Trabajos como [20] y [21] han abordado el balance de carga y la gestión de pujas en mercados híbridos descentralizados, y en [9] se presenta una revisión exhaustiva que destaca tanto las ventajas de Blockchain para mejorar la seguridad y la confianza en las transacciones energéticas, como la importancia de contar con marcos regulatorios adecuados para su adopción. Asimismo, en [10] y [12] se resalta que la ausencia de intermediarios es precisamente el atributo que otorga mayor confianza a las transacciones P2P sobre Blockchain.

A pesar de los avances descritos, la implementación de Blockchain en el sector energético sigue siendo limitada. La mayoría de las propuestas se desarrollan de forma aislada, sin especificar con claridad las herramientas empleadas para construir la red Blockchain ni justificar su elección frente a las alternativas disponibles [4], [22]. Dado que esta tecnología se encuentra aún en una etapa temprana de desarrollo, tampoco existe un esquema estandarizado dentro de los marcos regulatorios e institucionales que oriente su

implementación práctica. Esta falta de sistematización dificulta la replicabilidad de los resultados y la transferencia de conocimiento entre investigaciones.

Este trabajo tuvo como objetivo presentar una guía para la implementación de la tecnología Blockchain, orientada a la realización de transacciones confiables en mercados de energía P2P. La principal contribución consiste en el análisis de las herramientas empleadas en la implementación de redes *Blockchain*, identificando aquellas que poseen las características más adecuadas para este tipo de transacciones. Asimismo, se desarrolla una prueba piloto con el fin de validar la implementación y el funcionamiento de la red *Blockchain* propuesta.

2. METODOLOGÍA

2.1 Caso de estudio

Esta sección describe el caso de estudio sobre el que se plantea el diseño de un esquema para la implementación de Blockchain. Si bien se trata de un caso de estudio, su elección responde a la necesidad de contar con un escenario controlado que facilite la comprensión de los elementos fundamentales de la propuesta. A través de este caso, es posible ilustrar de manera clara y didáctica las principales características de un mercado energético P2P. Asimismo, permite comprender el funcionamiento de las herramientas necesarias para integrar Blockchain a dicho mercado, así como el despliegue concreto del esquema propuesto.

En un mercado P2P un agente puede vender o comprar energía. La Figura 1 muestra el esquema de interacción entre dos agentes, donde uno opera como vendedor y el otro como comprador. En primer lugar, el vendedor debe disponer de un medidor inteligente que envía información al administrador sobre la potencia inyectada a la red (la potencia que efectivamente el agente vende), la cual es validada y registrada en el contrato inteligente. Asimismo, el vendedor utiliza el contrato inteligente para establecer el precio de la energía. Posteriormente, el comprador usa el contrato para establecer la cantidad de energía que desea adquirir y también para depositar el dinero que usará para realizar la transacción.

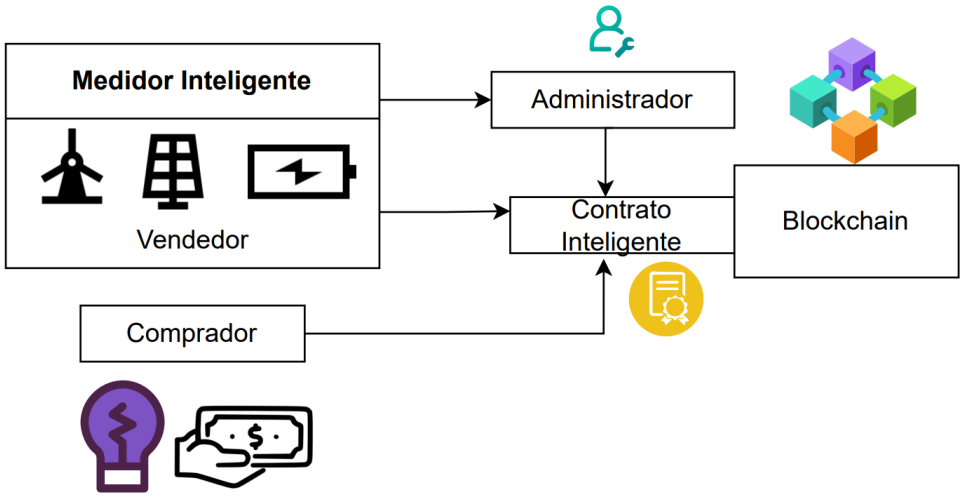


Figura 1. Esquema de interacción entre participantes de una transacción. Fuente: elaboración propia.

Para ilustrar mejor el caso de estudio propuesto, la Figura 2 muestra la secuencia cronológica de acciones que se llevan a cabo hasta finalizar la transacción de energía. Nótese que la secuencia comienza con el registro de los agentes en el contrato inteligente, realizado por el administrador. A continuación, el medidor inteligente envía la información sobre la

potencia inyectada a la red de suministro, y el administrador registra estos datos en el contrato. Posteriormente, el vendedor establece en el contrato el precio de venta por unidad de energía. Luego, el comprador especifica la cantidad de potencia que desea adquirir y deposita el dinero necesario en el contrato, asegurándose de que sea suficiente para cubrir la compra. Finalmente, el contrato inteligente valida que se cumplan todos los requisitos y transfiere el dinero correspondiente al vendedor, completando la transacción.

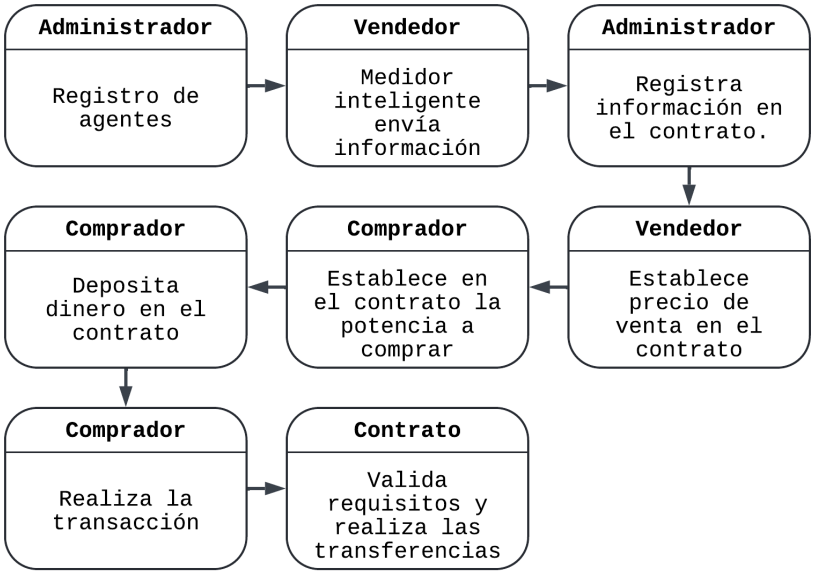


Figura 2. Secuencia cronológica del mercado P2P. Fuente: elaboración propia.

2.2 Selección de la plataforma

En la búsqueda de plataformas que ofrezcan servicios basados en *Blockchain*, se identificó un estudio que compara diferentes características de 19 plataformas [14]. De entre las plataformas analizadas, sobresalen *Ethereum* e *Hyperledger*, puesto que comparten características que son deseables para el caso de estudio planteado: tiempo de transacción corto, la modificabilidad del algoritmo de consenso, el uso de criptomonedas y la tolerancia a fallas bizantinas. De hecho, estudios previos sobre *Blockchain* aplicado al comercio de energía P2P destacan que tanto *Ethereum* como *Hyperledger*, han sido ampliamente utilizadas en este contexto [16]. La Tabla 1 ilustra las referencias consultadas sobre las diferentes plataformas.

Tabla 1. Plataformas utilizadas para implementar la tecnología *Blockchain*. Fuente: elaboración propia.

Plataforma	Artículos
Hyperledger	[17], [19], [16], [23], [24]
Ethereum	[3], [20], [21], [24], [25]
Helium	[26]
Multichain	[24]

Las principales diferencias entre *Ethereum* e *Hyperledger* son su velocidad y escalabilidad. *Hyperledger* es un *framework* privado y permisionado, lo que significa que solo entidades autorizadas pueden participar en la red. Tiene una mayor velocidad para realizar transacciones, pero presenta dificultades en la escalabilidad debido a su naturaleza privada. Por su parte, *Ethereum* es una plataforma de Blockchain pública y descentralizada, conocida principalmente por ser pionera en la ejecución de contratos inteligentes. Esta es más escalable,

ya que puede vincular fácilmente un nuevo nodo (punto equivalente a un agente en la red Blockchain) a la red. La Tabla 2 resume algunas características clave en el proceso de selección de plataformas [13], [19], [16], [23].

Tabla 2. Comparación de características entre *Ethereum* e *Hyperledger*. Fuente: elaboración propia.

Característica	Ethereum	Hyperledger
Tiempo de Transacción (tT)	~12 s	<1s
Transacciones por Segundo (Ts)	15	>3500
Contrato Inteligente (SC)	Sí	Sí
Criptomoneda (Cpt)	Obligatoria	No obligatoria

Cabe resaltar que, aunque *Ethereum* tiene un mayor retardo en las transacciones, cuenta con cadenas de bloque paralelas (*sidechains*) que son mucho más rápidas e incluso igualan la velocidad de *Hyperledger*. Además, el uso de una sidechain como *Polygon* permite alcanzar velocidades de transacción comparables a las de redes privadas, mientras se mantiene la interoperabilidad y el ecosistema de la red pública de *Ethereum* que favorece el comercio de energía P2P y la gestión de redes energéticas distribuidas. En consecuencia, *Ethereum* es la plataforma elegida.

2.3 Selección de herramientas

Posterior a la selección de *Ethereum* como la base de la arquitectura, se identifican tres problemas clave. En primer lugar, su *token* (ETH) es costoso; en segundo lugar, el despliegue de contratos inteligentes es complejo; y, en tercer lugar, la necesidad de controlar las transacciones automática y adecuadamente. Estos tres problemas se solucionan usando las herramientas que se describen a continuación.

2.3.1 Polygon

Es una herramienta construida sobre *Ethereum*. Es una *sidechain* que se seleccionó debido a que tiene un token significativamente menos costoso que el token ETH. Además de su bajo costo, la elección de *Polygon* se basa en su sostenibilidad ambiental. De hecho, el consumo marginal de electricidad por transacción en Polygon es de 0.608776 Ws [27], [28].

2.3.2 Hardhat

Hardhat es una plataforma de desarrollo Blockchain diseñada para simplificar la creación, prueba y despliegue de contratos inteligentes. *Hardhat*, en particular, ofrece un entorno local de Blockchain permitiendo ejecutar pruebas automatizadas y simular flujos de trabajo. Se puede hacer uso de la biblioteca *ethers.js*, que facilita la interacción directa con contratos inteligentes [15].

Una de las principales razones para seleccionar *Hardhat* es su capacidad de simplificar el proceso de despliegue de contratos inteligentes en una red *Blockchain*. Con *Hardhat* se compila (en bytecode) el código de los contratos inteligentes escritos en *Solidity* y con *Hardhat Deploy*, se crea una transacción que inicializa el estado del contrato en la *Blockchain*. Además, proporciona información durante el proceso de despliegue reduciendo el margen de error [29].

2.3.3 Web3

Es un conjunto de tecnologías y bibliotecas diseñadas para facilitar la interacción directa y fluida con la Blockchain. Web3 ofrece una interfaz de programación de aplicaciones (API) que permite a los desarrolladores conectarse con *Ethereum* tanto de forma remota como local [18].

Esta herramienta ofrece a los usuarios un mayor control y autonomía sobre sus datos, tokens, y propiedades, en lugar de depender de organizaciones centralizadas. En cuanto a herramientas para la interacción con Web3, Python se usa frecuentemente debido a su versatilidad y soporte de bibliotecas como Web3.py, facilitando la comunicación, transacciones e interacciones con redes *Blockchain* mediante código *Python* [30].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se implementó un contrato inteligente para la gestión de transacciones de energía en un mercado P2P, cuyo proceso lógico se encuentra descrito en la Figura 2. Para su desarrollo e interacción se emplearon las herramientas Hardhat v2.22.6, Python 3.12.4 y Web3.py v6.20.1. A continuación, se detalla el procedimiento seguido para la implementación del contrato inteligente, así como las pruebas realizadas con el fin de verificar el cumplimiento del proceso lógico dentro del mercado P2P.

3.1 Programación y compilación del contrato inteligente

Con las herramientas seleccionadas se elaboró la metodología mostrada en la Figura 3. Esta ilustra el proceso de implementación de un contrato inteligente en la red de pruebas *Polygon Amoy*, la cual se seleccionó por su capacidad para procesar transacciones con bajas tarifas y alta velocidad en comparación con la red principal de Ethereum, características documentadas en su whitepaper oficial [31]. El diagrama presenta la secuencia y la relación de los procesos, así como las herramientas utilizadas en cada etapa. En primera instancia, el contrato inteligente se programó en el lenguaje *Solidity*. Posteriormente, se compiló el contrato y se obtuvo la Interfaz Binaria de Aplicación (ABI), seguida de su despliegue correspondiente. Para estas fases iniciales se empleó la herramienta Hardhat, un entorno consolidado en la industria que facilita la compilación y prueba de contratos inteligentes [32]. En una tercera etapa, se utilizó Alchemy, una herramienta de *Web3*, para facilitar el despliegue en *Polygon*. Una vez desplegado el contrato inteligente, fue posible compartir la ABI y la dirección del contrato con los agentes del mercado P2P. Finalmente, cualquier agente que dispusiera de la ABI y la dirección pudo interactuar con el contrato inteligente y firmar transacciones. Para la automatización de estos procesos se empleó la biblioteca *Web3* de *Python*, ampliamente documentada para la integración de clientes con nodos *Ethereum* [33].

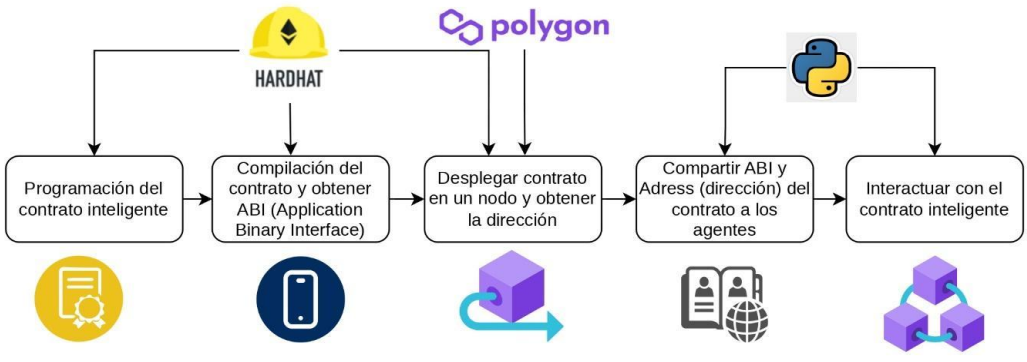


Figura 3. Proceso para implementar un contrato inteligente. Fuente: elaboración propia.

Antes de usar Hardhat para la programación de contratos inteligentes en Ethereum, se recomienda iniciar con Remix IDE. Esta interfaz proporciona un entorno de prueba que permite experimentar con la lógica de los contratos y adquirir un aprendizaje interactivo. Una vez consolidado este conocimiento, Hardhat se convierte en una herramienta clave para el

desarrollo de aplicaciones descentralizadas, al facilitar la programación, prueba y despliegue de contratos inteligentes.

En este proceso de desarrollo, resulta fundamental estructurar los contratos siguiendo los principios de la programación orientada a objetos, lo que permite organizar su diseño mediante un diagrama de clases. La Figura 4 presenta dicho diagrama, donde se ilustra la estructura necesaria para programar el contrato y gestionar las transacciones en el mercado P2P, mientras que la Tabla 3 detalla las funciones que deben implementarse en el contrato.

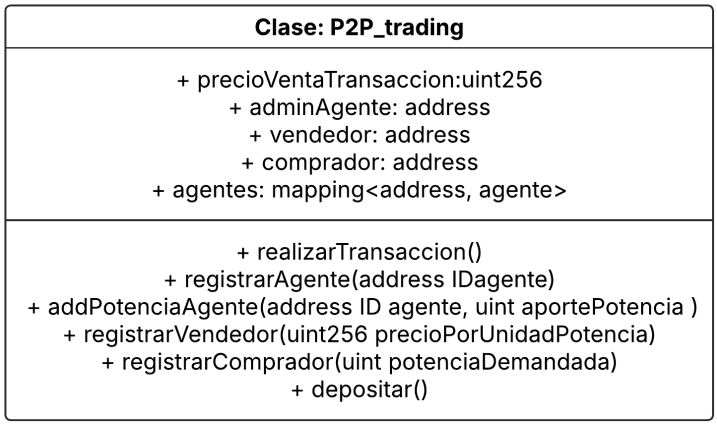


Figura 4. Diagrama de clase del contrato inteligente en un contexto transaccional P2P
Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Descripción de las funciones en el contrato inteligente. Fuente: elaboración propia.

realizarTransaccion	Ejecuta la transacción entre el comprador y el vendedor, finalizan la compra. La función comprueba que el vendedor tenga a su disposición la potencia de energía necesaria para la transacción y que el comprador tenga fondos suficientes para pagar la cantidad de potencia demandada.
registrarAgentes	Permite registrar agentes de confianza a la red de comercio energético. Esta función solo puede ser ejecutada por el administrador.
addPotenciaAgente	Agrega la potencia disponible de un agente para la venta. La potencia agregada es la información que envía el medidor inteligente. Esta función solo puede ser ejecutada por el administrador.
registrarVendedor	El agente se registra como vendedor. Al realizar la petición debe establecer su precio de venta por unidad de potencia. Se puede ejecutar por cualquier agente registrado.
registrarComprador	El agente se registra como comprador. Al realizar la petición debe enviar la cantidad de potencia que necesita. Se puede ejecutar por cualquier agente registrado.
depositar	Un agente registrado deposita saldo al realizar compras de energía. Para realizar una transacción se valida la disposición de dicho saldo. Se puede ejecutar por cualquier agente registrado.

Las funciones del contrato inteligente intervienen en la secuencia de pasos del funcionamiento del mercado P2P, secuencia mostrada en la Figura 2. En primer lugar, el administrador usa la función registrarAgente con el parámetro de la dirección del agente (llave pública) para registrar a cada agente que participará en las transacciones. El contrato verifica que quien hace esta petición de registro es el administrador a través del atributo adminAgente y agrega los registros al listado (*mapping*) de agentes. Luego de obtener la información de potencia del medidor inteligente, el administrador utiliza la función addPotenciaAgente con los parámetros de la dirección del vendedor y la potencia inyectada para registrarla en el

contrato. A continuación, el vendedor se registra como un vendedor con la función registrarVendedor, enviando como parámetro el precio de venta. Paralelamente el comprador usa la función registrarComprador, donde el parámetro de entrada es la potencia a comprar. Con la función de depositar, el comprador deposita dinero en el contrato inteligente. El comprador realiza la compra usando la función realizarTransaccion, donde el contrato inteligente entra a realizar las validaciones y finaliza la transacción.

3.2 Prueba piloto

Para realizar la prueba, primero se desplegó el contrato inteligente en la red de prueba de *Polygon*, utilizando *Hardhat*. Durante el proceso de despliegue se obtiene la dirección del contrato inteligente. La Tabla 4 muestra parte de la información registrada al desplegar el contrato inteligente. Cabe señalar que la información que contiene un bloque se puede consultar en [34] con el *hash* correspondiente de la transacción.

Tabla 4. Información resumida del bloque creado al desplegar el contrato inteligente
Fuente: elaboración propia.

Transaction Hash:	0x6f3688cfcafdb0958592df1dc88747ba384576060b18b4fc58c7e418a78d6920
Status:	Success
From:	0x3AF7E73d63dc07e6c6cd6eddD054132ABd943cbD
To:	[0x0e13f4a05098019602d3474aa27571c7eeddb01f Created]
Value:	0 POL ($0.00)

La información asociada a una transacción en Blockchain incluye varios campos relevantes. *Transaction Hash* es un identificador único de la transacción, *Status* muestra el estado que puede ser exitoso o fallido, *From* muestra la dirección del usuario que realizó la petición de la transacción. El campo To muestra hacia quien iba la petición, que, en el caso de la Tabla 4, muestra la dirección del contrato, y además especifica que fue creado. En *Value* se muestra el dinero enviado en la transacción. Toda la información descrita se almacena en un bloque de la red Blockchain.

Una vez desplegado el contrato inteligente, se ejecutaron varias transacciones con el fin de verificar su funcionamiento. Todas ellas se realizaron utilizando la librería *Web3* de *Python*, proceso en el que es necesario utilizar tanto la clave pública como la privada de la billetera del usuario. Al consultar en [34] la dirección del contrato inteligente, se muestra el registro de las transacciones ejecutadas, donde se observa que tres fueron rechazadas por no cumplir con los requisitos necesarios para ser procesadas. La primera transacción rechazada, cuya información se resume en la Tabla 5, corresponde a un intento de depósito por parte de un agente no registrado por el administrador. La segunda transacción fue rechazada porque el vendedor no contaba con la potencia requerida. La información de esta transacción fallida se presenta en la Tabla 6. Finalmente, como se muestra en la Tabla 7, la tercera transacción fue rechazada porque la finalización de la compra solo puede ser realizada por el comprador.

Por otra parte, la información del bloque generado cuando la transacción entre el vendedor y el comprador se ejecuta con éxito se presenta en la Tabla 8. En ella se observa que, en el campo *To*, el contrato inteligente realiza una transferencia, lo que indica que el pago fue efectuado al vendedor. Cabe señalar que el valor transaccionado es relativamente bajo, lo cual se debe a las limitaciones de fondos disponibles en la red de pruebas. No obstante, la lógica propuesta para realizar transacciones en un mercado de energía P2P puede implementarse de manera independiente al monto involucrado en cada operación.

Tabla 5. Información de transacción fallida de la finalización de la compra. Fuente: elaboración propia.

Transaction Hash:	0x91f9879dd3f7be20d9b35154c9a8d8b2f2fefa8cfabbbe0b1e4f37b998ed42c1
Status:	Fail with error 'El agente debe estar registrado'
From:	0xa5cD859fa6838B73D76af941eA600A8572280e62
To:	0x0e13F4a05098019602D3474aa27571c7eeDDb01FWarning! Error encountered during contract execution [execution reverted]
Value:	0.000000000000001 POL ($0.00) - [CANCELLED]

Tabla 6. Información de transacción fallida por falta de potencia por el vendedor Fuente: elaboración propia.

Transaction Hash:	0x8dd8ce4f411cb57a4f1707df9a433c6d286ee6e7752d2fcea17da0b814709ec6
Status:	Fail with error 'Vendedor no tiene la suficiente potencia'
From:	0xa5cD859fa6838B73D76af941eA600A8572280e62
To:	0x0e13F4a05098019602D3474aa27571c7eeDDb01FWarning! Error encountered during contract execution [execution reverted]
Value:	0 POL ($0.00)

Tabla 7. Información de transacción fallida de la finalización de la compra. Fuente: elaboración propia.

Transaction Hash:	0xa3e293d12537b31a728cbebc0edec5f240f627d2cb857bf87f1b2e1c37aa0f34
Status:	Fail with error 'El comprador debe finalizar la transacción'
From:	0x3AF7E73d63dc07e6c6cd6eddD054132ABd943cbD
To:	0x0e13F4a05098019602D3474aa27571c7eeDDb01F Warning! Error encountered during contract execution [execution reverted]
Value:	0 POL

Tabla 8. Información de la transacción realizada al finalizar la compra. Fuente: elaboración propia.

Transaction Hash:	0x5fbd3b5951159e2fc6a548223099bb19d9bea64c79318e14159a40cdb228ba54
Status:	Success
From:	0xa5cD859fa6838B73D76af941eA600A8572280e62
To:	0x0e13F4a05098019602D3474aa27571c7eeDDb01F Transfer 0.000000000000001 POL From 0x0e13F4a0...7eeDDb01F To 0x4EDC4006...f1AB6e481
Value:	0 POL ($0.00)

El caso de estudio propuesto e implementado (Figura 1) cumple con las reglas fundamentales de un mercado de energía entre pares, en el cual, en un instante determinado, un agente asume el rol de vendedor mientras otro actúa como comprador. Asimismo, la prueba piloto demuestra que el contrato inteligente programado puede emplearse de manera efectiva para ejecutar transacciones de energía. No obstante, la implementación realizada aún presenta aspectos por mejorar, ya que todas las peticiones fueron gestionadas desde el *backend*. En este sentido, el desarrollo de una plataforma con interfaz gráfica se plantea como una línea de trabajo futuro.

3.3 Análisis de desempeño

Se analizaron los tiempos de confirmación y los costos asociados a las transacciones ejecutadas por el contrato inteligente. En cuanto al desempeño temporal, al operar sobre la sidechain *Polygon*, el sistema se beneficia de un tiempo promedio de generación de bloques cercano a los 2 segundos [35]. Esta característica permite que las órdenes de compra y venta de energía sean validadas en intervalos muy cortos, proporcionando la capacidad de respuesta requerida en mercados energéticos P2P. Por otra parte, los costos operacionales se evaluaron mediante las métricas Gas Usage (gas consumido) y Transaction Fee (comisión por transacción), obtenidas directamente de los registros de la red de pruebas Amoy [34]. La Tabla 9 presenta el consumo asociado a los costos de las principales operaciones implementadas en el contrato inteligente.

Tabla 9. Costos operacionales. Fuente: elaboración propia.

Operación	Gas Usage	Transaction Fee (POL)
Despliegue del contrato inteligente	1788650	0.09005
Transacción de compra exitosa	75917	0.00379
Transacción fallida por falta de potencia	62700	0.00313
Transacción de compra fallida	23752	0.00118

El Gas Usage refleja el costo computacional de cada operación ejecutada en la red *Polygon*. El despliegue del contrato inteligente consume 1788650 unidades de gas, lo cual es esperado dado que esta operación implica la escritura inicial de toda la lógica del contrato en la cadena de bloques y se ejecuta una única vez. En contraste, una transacción de compra exitosa consume únicamente 75917 unidades, es decir, aproximadamente 23.6 veces menos gas que el despliegue, lo que evidencia la eficiencia del contrato en la ejecución de su función principal. Resulta también relevante analizar las transacciones fallidas: una transacción rechazada por falta de potencia disponible consume 62700 unidades de gas, mientras que una transacción de compra fallida por otras condiciones consume tan solo 23752 unidades. El hecho de que las transacciones fallidas consuman gas, aunque en menor proporción que las exitosas, es inherente al funcionamiento de la EVM (Ethereum Virtual Machine), dado que los nodos validadores ejecutan parcialmente la lógica del contrato antes de detectar el incumplimiento de una condición, consumiendo recursos computacionales en dicho proceso. No obstante, el bajo consumo relativo de las operaciones fallidas indica que el contrato implementa validaciones tempranas y eficientes, minimizando el desperdicio de gas ante condiciones no satisfechas.

El precio de un POL es variable; sin embargo, para la fecha en que se realizaron las transacciones puede estimarse en aproximadamente $0.31 USD, equivalente a cerca de 1240 COP, asumiendo un precio promedio del gas de la red de 50 Gwei durante las pruebas. Con base en los resultados presentados en la Tabla 9, es posible estimar los costos operacionales de las transacciones en pesos colombianos. La operación de mayor costo corresponde al despliegue del contrato inteligente, con un valor aproximado de $111.7 COP, ejecutada una única vez durante la puesta en marcha del sistema. Por su parte, cada transacción exitosa de compra tiene un costo cercano a $4.7 COP, mientras que las transacciones fallidas oscilan entre $3.9 COP y $1.5 COP según el tipo de fallo, lo que confirma que incluso los escenarios de error generan un impacto económico marginal. Estos costos reducidos permiten ejecutar un gran número de transacciones sin generar un impacto económico significativo en la operación del sistema, resultado que coincide con lo reportado en [35], donde el costo por transacción no supera los $0.01 USD. Esta característica representa una ventaja importante para aplicaciones que requieren el registro frecuente de información en la Blockchain, ya que permite almacenar datos de manera continua sin

incrementar significativamente los costos operacionales. En este contexto, surgen oportunidades para integrar la tecnología Blockchain en procesos de optimización distribuida, donde es necesario registrar de forma periódica variables de estado, resultados intermedios o acuerdos alcanzados entre los participantes, como se muestra en [36], que integra Blockchain en procesos de optimización distribuida.

3.4 Discusión

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en cuanto a la programación, prueba piloto y análisis de desempeño, en esta sección se contrastan indicadores reportados en la literatura reciente a manera de validación. Inicialmente, respecto a los tiempos de operación, los trabajos en [17], [18] sostienen que su mecanismo de consenso permisionado permite alcanzar latencias con Hyperledger Fabric inferiores a un segundo y reducir el overhead computacional, lo que representa una ventaja frente a redes públicas como Ethereum. Así, la selección de la plataforma puede respaldarse en los resultados de estudios previos. Además, los tiempos de confirmación cercanos a los 2 segundos reportados en [35] para la sidechain *Polygon* empleada en este trabajo, reflejan una diferencia notable respecto a otras arquitecturas. No obstante, esta brecha de latencia tiene una relevancia operativa limitada cuando se considera la escala temporal propia de la liquidación de mercados energéticos, cuyos intervalos de despacho son considerablemente mayores. En consecuencia, la menor latencia registrada para Hyperledger Fabric [17], [18] no se traduce necesariamente en una ventaja funcional para este tipo de aplicación. Por el contrario, el carácter permisionado de esta tecnología, que requiere la autorización previa de los participantes, puede constituir una limitación para escenarios en los que se busca facilitar la incorporación dinámica de nuevos prosumidores.

En relación con los costos de operación, los resultados obtenidos son consistentes con lo hallado en [35] y refuerzan la idea de que el costo de transacción puede dejar de ser un factor limitante mediante el uso de soluciones de segunda capa. Estos resultados difieren de las restricciones señaladas en [13] y de las implementaciones sobre Ethereum descritas en [12], en las cuales las tarifas de red son identificadas como un obstáculo para el comercio energético P2P. Tal diferencia no invalida las conclusiones de estos desarrollos, sino que permite delimitar su contexto de aplicación. En particular, los costos elevados observados en [12], [13] están asociados principalmente a la operación sobre la capa base de Ethereum y no necesariamente con el ecosistema Ethereum en su conjunto. Por tanto, reducir la elección tecnológica basándose solo en el contraste entre el costo de Ethereum y la eficiencia de Hyperledger Fabric resulta insuficiente frente al estado actual del ecosistema. Los resultados sugieren, en cambio, que la selección de una plataforma para mercados energéticos P2P debería considerar no solo las características de su capa de consenso, sino también las soluciones de escalamiento disponibles y sus implicaciones operativas.

Un aspecto en el que este trabajo se diferencia de la literatura consultada corresponde al tratamiento de las transacciones no ejecutadas. Las propuestas presentadas en [19], [20], [21] reportan el desempeño de sus esquemas principalmente bajo condiciones de operación satisfactorias, sin analizar de manera explícita el comportamiento del sistema cuando las condiciones requeridas para completar una operación no se cumplen. Los resultados de la Tabla 9 muestran que las operaciones rechazadas consumen entre 23752 y 62700 unidades de gas, equivalentes aproximadamente al 31 %–82 % del consumo asociado a una transacción exitosa. Por tanto, en escenarios con una elevada proporción de ofertas incompatibles, el procesamiento de operaciones posteriormente rechazadas puede representar un costo económico no despreciable. Este resultado pone de manifiesto que el costo asociado a las transacciones fallidas debe incorporarse en la evaluación de mecanismos de comercio energético basados en contratos inteligentes. En particular, el comportamiento de la EVM frente a operaciones que no culminan satisfactoriamente constituye un criterio de diseño que no ha sido considerado de manera explícita en los trabajos revisados. Esto sugiere la

conveniencia de incorporar mecanismos de validación o filtrado previo que permitan reducir la ejecución innecesaria de transacciones que previsiblemente serán rechazadas.

Finalmente, en lo referente al mecanismo de comercio entre agentes, el esquema implementado en este trabajo es más simple que las propuestas de [8], [20] y [26], las cuales incorporan subastas dobles iterativas, estrategias de balance de carga o mecanismos fundamentados en teoría de juegos. Si bien estos enfoques ofrecen mecanismos de negociación más sofisticados, los estudios citados validan principalmente su funcionamiento mediante simulaciones y no detallan con el mismo nivel de profundidad los requerimientos asociados con su implementación sobre una infraestructura Blockchain. En este contexto, la propuesta presentada no pretende competir directamente con dichos mecanismos en términos de sofisticación algorítmica, sino aportar una alternativa orientada a evaluar la factibilidad de su implementación sobre una infraestructura operativa.

3.5 Limitaciones y trabajo futuro

A pesar de las ventajas descritas, las herramientas seleccionadas y la prueba piloto implementada presentan limitaciones técnicas que deben considerarse antes de su despliegue a gran escala. Desde la perspectiva de la infraestructura, aunque *Polygon* contribuye a reducir los costos de transacción y mitiga algunos problemas de escalabilidad asociados con Ethereum, su arquitectura basada en sidechains implica un menor grado de descentralización y una dependencia de proveedores externos de servicios RPC, como Alchemy, para la interacción con la red. Esta dependencia puede introducir puntos únicos de fallo que afectan la disponibilidad del sistema.

Por otra parte, aunque Hardhat constituye una herramienta eficaz para el desarrollo, prueba y simulación de contratos inteligentes, su ejecución en un entorno local controlado puede no reproducir completamente las condiciones de operación de una red pública, incluyendo escenarios de congestión, latencias elevadas o posibles vulnerabilidades presentes en entornos productivos. Asimismo, el uso de Web3.py para automatizar transacciones desde el backend requiere la gestión de claves privadas por parte de la aplicación, lo que representa un riesgo de seguridad significativo si no se implementan mecanismos robustos de gestión de identidades, almacenamiento seguro de credenciales o integración con billeteras digitales.

Adicionalmente, la prueba piloto desarrollada constituye una validación funcional en un entorno controlado. Si bien los resultados obtenidos demuestran la viabilidad técnica del esquema propuesto, esta aproximación no considera las restricciones físicas y operativas propias de sistemas energéticos reales, ni los posibles cuellos de botella computacionales y de comunicación que podrían surgir al coordinar simultáneamente un gran número de prosumidores. En consecuencia, la transición hacia escenarios de aplicación reales requerirá la evolución de la plataforma hacia aplicaciones descentralizadas (DApps) con mecanismos seguros de interacción para el usuario final, así como la validación integral del sistema mediante plataformas de cosimulación que permitan representar de forma conjunta las dinámicas energéticas y de comunicaciones en tiempo real. Esta evolución a futuro permitirá realizar una evaluación cuantitativa más exhaustiva del desempeño del sistema mediante métricas asociadas a escalabilidad, latencia, consumo de recursos computacionales, costos de transacción y confiabilidad operativa.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra la viabilidad de implementar contratos inteligentes para el comercio energético P2P mediante herramientas de código abierto y tecnologías Blockchain ampliamente disponibles. A diferencia de numerosos estudios que presentan arquitecturas conceptuales o infraestructuras complejas sin describir de manera detallada su

implementación práctica, la propuesta presentada ofrece una guía metodológica para el diseño, despliegue e interacción con contratos inteligentes orientados a mercados energéticos descentralizados. De esta manera, se facilita la comprensión tanto de los componentes tecnológicos involucrados como de la lógica operativa requerida para ejecutar transacciones energéticas en Blockchain.

Los resultados obtenidos evidencian que la integración de herramientas como *Solidity, Hardhat, Polygon* y *Web3.py* permite construir una infraestructura funcional para la gestión de intercambios energéticos entre prosumidores. Aunque la implementación se valida mediante un caso de estudio de comercio energético P2P, la metodología propuesta puede adaptarse a otros escenarios que requieran la automatización de procesos mediante contratos inteligentes. En este sentido, el trabajo puede constituir un referente metodológico para la adopción de tecnologías Blockchain y el desarrollo de aplicaciones descentralizadas en distintos sectores.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto BPIN 2021000100499, con el apoyo de CTel - SGR y Minciencias, Colombia.

6. REFERENCIAS

[1] E. A. Soto *et al.,* "Peer-to-peer energy trading: A review of the literature," *Appl. Energy*, vol. 283, p. 116268, Feb. 2021. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116268

[2] S. Suthar *et al.,* "Peer-to-peer energy trading in smart grid: Frameworks, implementation methodologies, and demonstration projects," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 214, no. Part A, p. 108907, Jan. 2023. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108907

[3] M. Moniruzzaman *et al.,* "Blockchain and cooperative game theory for peer-to-peer energy trading in smart grids," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 151, p. 109111, Sep. 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109111

[4] Y. Wu *et al.,* "Digitalization and decentralization driving transactive energy internet: Key technologies and infrastructures," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 126, no. Part A, p. 106593, Mar. 2021. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106593

[5] M. Choobineh *et al.,* "Game-theoretic peer-to-peer solar energy trading on Blockchain-based transaction infrastructure," *e-Prime – Adv. Electr. Eng. Electr. Energy*, vol. 5, p. 100192, Sep. 2023. https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100192

[6] W. Tushar *et al.,* "Peer-to-peer trading in electricity networks: An overview," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 4, pp. 3185-3200, Jul. 2020. https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2969657

[7] M. Soori *et al.,* "AI-powered Blockchain technology in industry 4.0, a review," *J. Econ. Technol.*, vol. 1, pp. 222-241, Nov. 2023. https://doi.org/10.1016/j.ject.2024.01.001

[8] C. Zhang *et al.,* "Peer-to-peer energy trading in a microgrid based on iterative double auction and Blockchain," *Sustain. Energy Grids Netw.*, vol. 27, p. 100524, Sep. 2021. https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100524

[9] T. Sivaram, and B. Saravanan, "Recent developments and challenges using blockchain techniques for peer-to-peer energy trading: A review," *Results Eng.*, vol. 24, p. 103666, Dec. 2024. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103666

[10] W. Sarapan *et al.,* "Optimal peer-to-peer energy trading by applying Blockchain to islanded microgrid considering V2G," in 2022 *19th Int. Conf. Electr. Engin./Electron. Comput. Telecommun. Inf. Technol.* (ECTI-CON), Prachuap Khiri Khan, Thailand, 2022, pp. 1-4. https://doi.org/10.1109/ECTI-CON54298.2022.9795559

[11] M. Casquiço *et al.,* "Blockchain and Internet of Things for Electrical Energy Decentralization: A Review and System Architecture," *Energies*, vol. 14, no. 23, p. 8043, Dec. 2021. https://doi.org/10.3390/en14238043

[12] A. Iskakova *et al.,* "Ethereum Blockchain-Based Peer-To-Peer Energy Trading Platform," in *2020 IEEE Int. Conf. Power Energy (PECon)*, Penang, Malaysia, 2020, pp. 327-331.

https://doi.org/10.1109/PECon48942.2020.9314591
[13] D. D. Kwadzode, "Performance comparison of blockchain platforms for modeling financial transactions: A case study of Ethereum and Hyperledger Fabric," *Int. J. Finance Econ. Bus. (IJFEB)*, vol. 4, no. 1, pp. 50-58, Mar. 2025. https://doi.org/10.56225/ijfeb.v4i1.423
[14] J. N. Rodríguez Loor, "Estudio comparativo de las plataformas de Blockchain y sus diferentes escenarios de uso," Tesis de Maestría, Universidad de las Américas, Quito, Ecuador, 2020. https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/13089
[15] O. O. Egunjobi *et al.,* "A systematic review of Blockchain for energy applications," *e-Prime – Adv. Electr. Eng. Electr. Energy*, vol. 9, p. 100751, Sep. 2024. https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100751
[16] B. S. Lee *et al.,* "Blockchain architectures for P2P energy trading between neighbors," in *2019 Int. Conf. Info. Commun. Technol. Convergence (ICTC)*, Jeju, Korea (South), 2019, pp. 1013-1017. https://doi.org/10.1109/ICTC46691.2019.8939856
[17] M. Zhang *et al.,* "Demand–response games for peer-to-peer energy trading with the Hyperledger Blockchain," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, vol. 52, no. 1, pp. 19-31, Jan. 2022. https://doi.org/10.1109/TSMC.2021.3111135
[18] N. Saeed *et al.,* "Decentralized peer-to-peer energy trading in microgrids: Leveraging Blockchain technology and smart contracts," *Energy Rep.*, vol. 12, pp. 1753-1764, Dec. 2024. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.07.053
[19] T. Alskaif *et al.,* "Blockchain-Based Fully Peer-To-Peer Energy Trading Strategies for Residential Energy Systems," *IEEE Trans. Industr. Informat.*, vol. 18, pp. 231-241, Jan. 2022. https://doi.org/10.1109/TII.2021.3077008
[20] R. Khalid *et al.,* "A Blockchain-based load balancing in decentralized hybrid P2P energy trading market in smart grid," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 47047-47062, Mar. 2020. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979051
[21] M. J. Thompson *et al.,* "Blockchain-based peer-to-peer energy trading method," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 8, no. 5, pp. 1318-1326, Sep. 2022. https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2021.00010
[22] S. Cantillo-Luna *et al.,* "Blockchain for distributed energy resources management and integration," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 68598-68617, Jun. 2022. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3184704
[23] Z. Liu *et al.,* "Research on distributed energy network transaction model based on Blockchain," in *2021 Int. Conf. Comput. Blockchain Financial Develop. (CBFD)*, Nanjing, China, 2021, pp. 311-314. https://doi.org/10.1109/CBFD52659.2021.00069
[24] M. Kumar *et al.,* "Blockchain based optimized energy trading for e-mobility using quantum reinforcement learning," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 4, pp. 5167-5180, Apr. 2023. https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3225524
[25] L. Wang *et al.*, "Adaptive bidding strategy for real-time energy management in multienergy market enhanced by Blockchain," *Appl. Energy*, vol. 279, p. 115866, Dec. 2020. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115866
[26] O. Laayati *et al.,* "A game theory approach (VCG-PSO) for optimal P2P energy trading in Blockchain-enabled microgrids," in *IEEE EUROCON 2023 - 20th Int. Conf. Smart Technol.*, Torino, Italy, 2023, pp. 210-215. https://doi.org/10.1109/EUROCON56442.2023.10198908
[27] J. M. Groza *et al.,* "Using a ledger to facilitate autonomous peer-to-peer virtual net metering of solar photovoltaic distributed generation," *Sol. Energy Adv.*, vol. 4, p. 100064, 2024. https://doi.org/10.1016/j.seja.2024.100064
[28] N. Ashraf *et al.,* "Making tradable white certificates trustworthy, anonymous, and efficient using Blockchains," *Energy Rep.*, vol. 10, pp. 4574-4581, Nov. 2023. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.11.015
[29] Y. Madhwal *et al.,* "Blockchain enhanced hydrogen fuel production and distribution for sustainable energy management," *Blockchain: Res. Appl.*, vol. 5, no. 4, p. 100229, Dec. 2024. https://doi.org/10.1016/j.bcra.2024.100229
[30] G. Divya, and P. Supraja, "Bids and asks: Blockchain-based peer-to-peer trading platform," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 119, no. Part A, p. 109516, Oct. 2024. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109516
[31] Polygon Technology, "One open stack to move money globally, in seconds," Polygon Wiki, 2026. Accessed: Jun. 8, 2026. [Online]. Available: https://wiki.polygon.technology/
[32] Nomic Foundation, "Getting started with Hardhat 3," Hardhat, 2026. Accessed: Jun. 8, 2026. [Online]. Available: https://hardhat.org/docs.
[33] Web3.js Foundation, "Web3.js - Ethereum JavaScript API," Web3.js Docs, 2026. Accessed: Jun. 8, 2026. [Online]. Available: https://docs.web3js.org/
[34] PolygonScan, "Polygon PoS Chain Amoy Testnet Explorer," PolygonScan, 2026. Accessed: Jun. 8, 2026. [Online]. Available: https://amoy.polygonscan.com/

[35] R. Debnath *et al.,* "Dynamical Stability Analysis of Grid-Following and Grid-Forming Inverters with Blockchain Integration for Enhanced Performance in Modernized Nested Microgrids," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 165769-165794, Sep. 2025. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3610430

[36] E. Benavides *et al.,* "Optimal Energy Dispatch Integrating Replicator Dynamics and Blockchain," in *2025 IEEE 7th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, Pereira, Colombia, 2025, pp. 1-6. https://doi.org/10.1109/CCAC64704.2025.11259352

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses con respecto a la publicación de este trabajo.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Edinson Benavides: revisión del estado del arte e implementación de la metodología para el despliegue y puesta en marcha de los contratos inteligentes.

Andrés Pantoja y Germán Obando: revisión y edición de todo el contenido del artículo, así como soporte técnico en el desarrollo metodológico del artículo.

DECLARACIÓN IA

Durante la realización de esta investigación, los autores utilizaron herramientas de IA para apoyar el proceso de escritura, especialmente en tareas relacionadas con la corrección ortográfica, gramatical y de estilo. Luego de emplear estas herramientas, los autores revisaron y editaron cuidadosamente el contenido según fue necesario y asumen total responsabilidad por el contenido de la publicación.