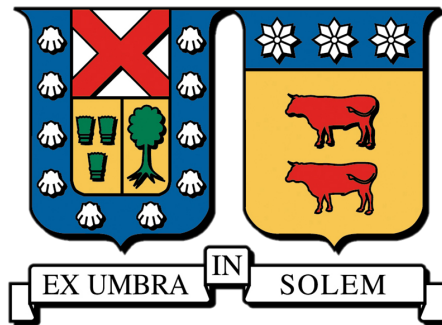


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
VALPARAÍSO - CHILE



**“IOT PLATFORM FOR LOCAL ENERGY EXCHANGE
BETWEEN ELECTRIC VEHICLES IN INTELLIGENT
PARKING LOTS”**

BRIAN JOHANN MONTERO PONCE

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
TELEMÁTICO**

PROFESOR GUÍA:
PROFESOR CORREFERENTE:

PHD. MOHAMED ABDELHAMID
PHD. PATRICIO OLIVARES

ABRIL - 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: "IoT platform for local energy exchange between electric vehicles in intelligent parking lots"

Nombre del candidato(a): Brian Johann Montero Ponce

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Telemática

Campus: Casa Central Departamento: Electrónica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mohamed Abdelhamid, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 26/11/2025 Firma: M. Abdelhamid

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 26/11/2025 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

A quienes me enseñaron que el conocimiento es el camino hacia la libertad y que los límites solo existen en nuestra mente. Dedico este trabajo a ustedes, faroles que iluminan el cielo y el camino a recorrer.

Agradecimientos

En este momento culminante de mi formación académica, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas y entidades que hicieron posible la realización de esta tesis.

En primer lugar, agradezco al profesor Mohamed, por su guía, paciencia y dedicación durante este proyecto. Sus orientaciones no solo enriquecieron mi trabajo, sino también mi forma de comprender y abordar los desafíos del conocimiento.

Agradezco también a la Universidad Técnica Federico Santa María por proporcionarme los recursos y el espacio para desarrollar esta investigación, así como al personal administrativo y académico de la carrera Ingeniería Civil Telemática que me brindó su apoyo en los momentos necesarios.

A mis amigos y compañeros, quienes con sus ideas, críticas constructivas y apoyo moral hicieron más llevadero este arduo camino, les extiendo mi gratitud.

Especialmente, a mi familia: a mi madre, por su amor incondicional y sacrificio; a mi compañera de vida, por ser mi inspiración y fortaleza en los momentos más difíciles; y a mi padre, por su ejemplo silencioso y constante. Su confianza en mí ha sido el motor que me impulsó a superar cada obstáculo.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Este logro no solo es mío, sino también de ustedes.

Resumen

El presente trabajo aborda el diseño e implementación de una plataforma basada en blockchain para la gestión y comercio de energía en estacionamientos inteligentes, denominada EVel Park. Esta solución busca resolver los desafíos asociados a la adopción masiva de vehículos eléctricos mediante la integración de tecnologías avanzadas como blockchain e IoT. La red blockchain, desplegada utilizando Hyperledger Besu, garantiza la trazabilidad, transparencia y seguridad de las transacciones energéticas. Además, los contratos inteligentes automatizan las reglas de negocio, permitiendo la compra y venta de energía entre vehículos eléctricos de manera eficiente y segura. La integración de MetaMask como herramienta de gestión de identidades asegura la autenticación y la facilidad de uso. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad técnica de esta solución y su potencial para contribuir a la transición hacia una movilidad más sostenible en entornos urbanos, optimizando el uso de recursos energéticos y promoviendo la participación activa de los prosumidores en el mercado energético.

Abstract

This work presents the design and implementation of a blockchain-based platform for energy management and trading in intelligent parking lots, known as EVEL Park. This solution addresses the challenges associated with the massive adoption of electric vehicles by integrating advanced technologies such as blockchain and IoT. The blockchain network, deployed using Hyperledger Besu, ensures the traceability, transparency, and security of energy transactions. Moreover, smart contracts automate business rules, enabling the efficient and secure purchase and sale of energy between electric vehicles. The integration of MetaMask as an identity management tool ensures authentication and user-friendliness. The results demonstrate the technical feasibility of this solution and its potential to contribute to the transition towards more sustainable mobility in urban environments, optimizing energy resource use and promoting the active participation of prosumers in the energy market.

Nota sobre la terminología: Debido a la naturaleza técnica del proyecto y el uso predominante de estándares internacionales, muchos conceptos clave se presentan en su forma original en inglés, acompañados por su sigla correspondiente.

Glosario

- **Blockchain (Cadena de Bloques):** Tecnología de registro distribuido y seguro que funciona como una base de datos descentralizada. En lugar de ser controlada por una entidad central, la información se almacena en bloques enlazados criptográficamente y distribuidos en múltiples nodos (computadoras). Esto permite la trazabilidad, transparencia y seguridad en las transacciones energéticas en la plataforma EVEL Park, ya que cada transacción queda registrada de forma inmutable y verificable por todos los participantes .
- **DApp (Aplicación Descentralizada):** Aplicación informática que funciona sobre una red blockchain, sin un servidor centralizado, y cuyo código backend se ejecuta mediante contratos inteligentes. Las DApps permiten la interacción directa y segura entre usuarios y la red, garantizando la transparencia, la trazabilidad y la inmutabilidad de las transacciones. En el contexto de EVEL Park, la DApp actúa como la interfaz principal para que los usuarios gestionen sus identidades, consulten sus transacciones energéticas, compren o vendan energía, y participen activamente en el marketplace energético descentralizado .
- **EV (Vehículo Eléctrico):** Vehículo que utiliza energía eléctrica para su funcionamiento, en lugar de combustibles fósiles. Los EVs pueden ser tanto consumidores de energía (cuando se cargan) como prosumidores (cuando pueden devolver energía a la red, si están equipados con tecnología *Vehicle-to-Grid - V2G*) .
- **EVCS (Estación de Carga para Vehículos Eléctricos):** Infraestructura que permite la carga de vehículos eléctricos. Las EVCS pueden ser tanto públicas (en estacionamientos, centros comerciales, etc.) como privadas (en hogares o empresas). En EVEL

Park, las EVCS juegan un papel fundamental en el sistema de comercio energético, ya que permiten a los EVs tanto consumir como vender energía a la red .

- **Hyperledger Besu:** Implementación de código abierto de blockchain desarrollada por Hyperledger, un proyecto de la Fundación Linux. Besu es compatible con la *Ethereum Virtual Machine (EVM)* y se utiliza en el proyecto EVEL Park para gestionar las transacciones de energía de manera segura, eficiente y escalable. Permite crear redes blockchain privadas o permissioned, donde solo los participantes autorizados pueden acceder y realizar transacciones .
- **IBFT (Istanbul Byzantine Fault Tolerance):** Algoritmo de consenso utilizado en la red blockchain de Hyperledger Besu para garantizar la seguridad y confiabilidad de las transacciones en EVEL Park. IBFT permite que la red funcione correctamente incluso si algunos nodos participantes fallan o actúan de forma maliciosa .
- **IoT (Internet de las Cosas):** Red de dispositivos interconectados (sensores, medidores, estaciones de carga, etc.) que permiten la comunicación y gestión de datos en tiempo real en la plataforma de comercio energético EVEL Park. Los dispositivos IoT recopilan información sobre el consumo, la generación y el estado de la red, lo que permite optimizar la gestión de la energía y facilitar las transacciones .
- **Marketplace (Mercado):** Plataforma virtual descentralizada donde los usuarios de EVEL Park pueden comprar y vender energía de manera segura y transparente utilizando la tecnología blockchain. El marketplace permite la interacción directa entre los participantes, la fijación de precios dinámicos y la gestión eficiente de la energía .
- **MetaMask:** Billetera digital y extensión de navegador que permite a los usuarios interactuar con la red blockchain de Ethereum y otras redes compatibles, como la utilizada en EVEL Park. MetaMask gestiona las identidades y claves privadas de los usuarios, lo que les permite autenticarse y realizar transacciones de forma segura en la plataforma .
- **P2P (Peer-to-Peer):** Modelo descentralizado en el que las transacciones energéticas se

realizan directamente entre los usuarios (pares) sin necesidad de intermediarios centralizados. En EVel Park, el modelo P2P permite a los EVs y prosumidores intercambiar energía de manera directa y transparente, lo que reduce costos y aumenta la eficiencia .

- **PLLC (Parking Lot Local Center - Centro de Gestión Local en Estacionamientos):**

Centro de gestión ubicado en estacionamientos inteligentes que facilita la intermediación de transacciones energéticas entre vehículos eléctricos y la red en EVel Park. Los PLLCs pueden gestionar la carga de los EVs, optimizar el uso de la energía disponible y conectar a los EVs con los prosumidores o la red para la compra y venta de energía .

- **Prosumidor:** Usuario que no solo consume energía, sino que también la genera y la vende en la plataforma de comercio energético EVel Park. Los prosumidores pueden ser hogares con paneles solares, empresas con generadores eólicos, o incluso vehículos eléctricos con capacidad V2G .

- **Smart Contract (Contrato Inteligente):** Programa auto ejecutable almacenado en la blockchain que automatiza las reglas de negocio en el intercambio de energía entre vehículos eléctricos (EVs) en EVel Park. Los smart contracts se ejecutan automáticamente cuando se cumplen ciertas condiciones predefinidas, eliminando la necesidad de intermediarios y agilizando las transacciones .

Índice general

Glosario	V
1 Introducción	1
1.1 Contexto	1
1.2 Problema por resolver	2
1.3 Acercamiento a la solución	2
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo General	5
1.4.2 Objetivos Específicos	5
1.5 Estructura general del documento	6
2 Estado del Arte	7
2.1 Actualidad en Chile	7
2.2 Blockchain aplicado a problemas de transacción energética	10
3 Arquitectura Propuesta para EVEL Park	34
3.1 Arquitectura del sistema	34
3.1.1 Arquitectura por capas del sistema	35
3.1.2 Diagrama de Arquitectura general del sistema	38

3.1.3	Diagrama de secuencia	40
3.2	Requisitos del Sistema	43
3.2.1	Requisitos Funcionales	43
3.2.2	Requisitos No Funcionales	44
3.2.3	Requisitos de Ambiente	44
3.3	Software de Desarrollo	46
3.3.1	Entorno de Desarrollo Integrado (IDE):	46
3.3.2	Control de Versiones:	46
3.3.3	Lenguajes de Programación y Frameworks:	46
3.3.4	Herramientas de Desarrollo Adicionales:	47
4	Diseño de Arquitectura del Sistema	48
4.1	Diagrama de Flujo	48
4.2	Diagrama de Arquitectura red Blockchain Privada	50
4.3	Diagrama de Transacciones en el Marketplace	52
4.4	Enumeración de Módulos	53
4.5	Matriz de Requisitos Funcionales y Módulos	54
4.6	Diseño Modular Propuesto	54
4.6.1	Módulo Red Blockchain	54
4.6.2	Módulo Smart Contract	55
4.6.3	Módulo Identificación	56
4.7	Gestión de Riesgos	58
4.7.1	Supuestos	58
4.7.2	Dependencias	58

4.7.3	Restricciones	59
4.7.4	Riesgos	59
5	Implementación y Evaluación del Sistema	61
5.1	Validación	61
5.2	Verificación	62
5.3	Casos de Prueba Críticos	63
5.4	Resultados del Sistema Implementado	64
5.5	Validación del Sistema	72
5.6	Visualización del Prototipo en Funcionamiento	84
6	Conclusiones y Proyección del Sistema EVEL Park	109
6.1	Conclusiones	109
6.2	Trabajos Futuros	110
	Anexos	113
	Anexo 1 - Contrato Inteligente para Subastas Energéticas	113
	Anexo 2 — Módulo AutoBid del Administrador	119

Índice de figuras

1.1	De izquierda a derecha: Transacción directa entre EVs. Venta de energía desde un EV hacia una EVCS. Compra de energía desde una EVCS hacia un EV	4
2.1	Meta al año 2050 en Chile. Disponible en [5].	8
2.2	Cantidad de Vehículos Eléctricos y Estaciones de carga en Chile. Disponible en [3].	8
2.3	Avances hasta Abril del 2023. Disponible en [4].	9
2.4	Esquema de la plataforma de comercio de energía basada en blockchain para vehículos eléctricos en estacionamientos inteligentes. Disponible en [7].	11
2.5	Modelo del sistema transaccional propuesto. Disponible en [8].	12
2.6	Un EVSPL (EV Parking Lot with Renewable Energy Sources Infrastructure) inteligente en el contexto de una microred. Disponible en [9].	13
2.7	Estacionamiento inteligente propuesto. Disponible en [10].	14
2.8	El framework propuesto en el estudio. Disponible en [11].	15
2.9	Proposed P2P energy trading system architecture. Disponible en [12]. . . .	16
2.10	Arquitectura del sistema propuesto. Disponible en [13].	17
2.11	Comercio energético P2P de vehículos eléctricos. Disponible en [14]. . . .	18
2.12	El diagrama esquemático del sistema de puntos de carga. Disponible en [15].	19

2.13	Arquitectura de red de comercio de energía P2P basada en HLF: Comunicación de los hogares con la organización HLF (IBM Hyperledger Fabric). Disponible en [16].	20
2.14	Escenario conceptual de la plataforma inteligente de comercio de energía. Disponible en [17].	21
2.15	Framework de distribución de energía P2P basado en la comunidad con blockchain y teoría de juegos cooperativos. Disponible en [18].	22
2.16	Imagen ilustrativa del uso de la plataforma propuesta. Disponible en [19]. .	23
2.17	Esquema propuesto para el sistema de carga e intercambio de baterías. Disponible en [20].	24
2.18	Modelo de sistema propuesto. Disponible en [21].	25
2.19	Modelo propuesto de un sistema de recarga para vehículos eléctricos basado en blockchain. Disponible en [22].	26
2.20	Visión general del sistema de comercio de energía P2P. Disponible en [23].	27
2.21	Resumen del estudio. Disponible en [24].	28
2.22	Arquitectura P2P-ET basada en Blockchain. Disponible en [25].	29
2.23	Estructura general de un sistema de distribución SG 2.0. Disponible en [26].	30
2.24	Configuración experimental. Disponible en [27].	31
2.25	Panorama general de Blockchain y EVs. Disponible en [28].	32
3.1	Arquitectura General EVel Park	37
3.2	Diagrama de Arquitectura EVel Park	38
3.3	Diagrama de secuencia para un BEV.	41
3.4	Diagrama de secuencia para un SEV.	42
4.1	Diagrama de flujo de la plataforma de comercio de energía propuesta.VIN: Número de identificación del vehículo.	49

4.2	Diagrama Arquitectura red Blockchain y sus interacciones con componentes externos	51
4.3	Flujo de transacciones en el Marketplace de energía para vehículos eléctricos	52
5.1	Visualización de la red Blockchain ejecutándose en Ubuntu mediante WSL2	64
5.2	Contenedores Docker en ejecución correspondientes a los nodos de la red	65
5.3	Estado de la red Blockchain mostrado por Quorum Explorer: nodos activos, bloques generados y conexiones entre pares	66
5.4	Despliegue del contrato inteligente en la red privada mediante Remix IDE	67
5.5	Visualización de las funciones del contrato EnergyAuction desplegado en Remix IDE. Se pueden observar las funciones públicas disponibles para crear subastas, realizar ofertas, cerrar procesos, y consultar el estado del sistema.	68
5.6	Interacción de un usuario con una subasta de venta activa mediante la DApp. A la izquierda, MetaMask solicita confirmación para realizar una puja en una subasta. A la derecha, la interfaz muestra los detalles de la subasta, incluyendo energía ofertada, tipo de cargador, precio sugerido y mejor oferta actual.	69
5.7	Interfaz de la DApp sin conexión a una wallet. Para acceder a funcionalidades como crear o ver subastas, es obligatorio conectar una cuenta válida mediante MetaMask.	71
5.8	Confirmación visual de la creación de una subasta de venta desde la DApp.	73
5.9	Puja exitosa realizada por un proveedor en una subasta de compra.	74
5.10	Error al intentar ofertar una cantidad superior al saldo disponible.	75
5.11	Historial de subastas desde la perspectiva del creador.	76
5.12	Vista del dashboard exclusivo disponible solo para la cuenta administradora. Se observa el resumen de actividad energética y acceso a configuración. .	80

5.13 Configuración del rango de precios aceptado en el módulo de puja automática. Dependiendo del tipo de subasta, el sistema analiza el precio mínimo o máximo definido y, si está dentro del rango permitido, genera una oferta automática que debe ser posteriormente confirmada en MetaMask	81
5.14 Estrategias disponibles para el módulo de puja automática. Actualmente solo la opción de “Rango de precio aceptado” se encuentra operativa. . . .	82
5.15 Formulario de creación de subasta de venta. El usuario ha completado los parámetros requeridos (energía a vender, tipo de cargador, horario disponible, duración estimada y precio por kWh) y está confirmando la transacción en MetaMask.	84
5.16 Confirmación visual posterior a la creación de una subasta de venta. El sistema notifica que la subasta fue creada exitosamente y la muestra en la lista de subastas activas del usuario.	85
5.17 Un usuario realiza una puja válida en una subasta de venta y confirma la transacción en MetaMask.	85
5.18 Confirmación de una puja exitosa en una subasta de venta. El sistema registra la puja y actualiza la mejor oferta.	86
5.19 Visualización desde la perspectiva de un usuario que perdió una subasta. El sistema notifica que su oferta fue superada.	86
5.20 El creador de la subasta decide cerrarla manualmente luego de recibir ofertas válidas. Se requiere confirmación en MetaMask.	87
5.21 Cierre de subasta por parte del postor ganador utilizando la opción de cerrar como usuario final al expirar la subasta.	87
5.22 Subasta expirada sin recibir ofertas. El creador puede cerrarla de forma manual.	88
5.23 Historial del creador de una subasta que finalizó exitosamente con una oferta ganadora.	88

5.24	Historial del creador de una subasta que finalizó sin recibir pujas.	89
5.25	Historial de subastas desde la perspectiva de un usuario que ganó una subasta.	89
5.26	Historial de un usuario que participó en una subasta pero fue superado por otra oferta.	90
5.27	Formulario de creación de subasta de compra. El usuario ha completado los parámetros requeridos (energía requerida, tipo de cargador, duración estimada, horario y precio máximo por kWh) y está confirmando la transacción en MetaMask.	91
5.28	Confirmación de la creación de una subasta de compra. El sistema notifica que la subasta fue creada exitosamente y la presenta como activa en la sección “Tus subastas”.	92
5.29	Vista posterior a una puja exitosa realizada por un proveedor en una subasta de compra. Se muestra la mejor oferta actual y el botón de cierre disponible para el creador.	92
5.30	Cierre manual de la subasta por parte del proveedor ganador, tras haber realizado la mejor oferta dentro del tiempo establecido.	93
5.31	Vista del historial del creador de una subasta de compra que expiró sin recibir ninguna oferta.	93
5.32	Historial del creador en una subasta que cerró sin actividad de postores. .	94
5.33	Historial del usuario que ganó una subasta de compra. El sistema refleja el éxito y muestra detalles de la oferta realizada.	94
5.34	Vista de subasta activa en la que un ofertante fue superado por una mejor oferta. Se indica claramente que ya ha ofertado, pero fue superado.	95
5.35	Historial del usuario que perdió la subasta. Se indica que su oferta fue superada y que no resultó adjudicado.	96
5.36	Venta energética: Detalle de transacciones registradas en MetaMask asociadas a subastas ganadas.	97

5.37	Vista desde la cuenta del proveedor que ganó la subasta. Se observa el mensaje de subasta ganada y la actividad registrada en MetaMask, confirmando la interacción con el contrato y la ejecución de la transacción con un monto de 20 ETH.	97
5.38	Vista desde la cuenta del creador de la subasta. Se muestra la subasta como cerrada y finalizada con ofertas activas, junto con la actividad en MetaMask que confirma la transferencia de 20 ETH recibida por la ejecución del cierre.	98
5.39	Error al intentar publicar una subasta de venta con una cantidad de energía superior al nivel actual de la batería.	99
5.40	Error al intentar crear una subasta de compra cuyo costo excede los fondos disponibles en la cuenta.	100
5.41	Advertencia al intentar crear una subasta sin completar todos los campos requeridos.	101
5.42	Error al intentar realizar una puja en una subasta de compra con un valor mayor al precio máximo definido.	102
5.43	Error al intentar realizar una puja que supera el saldo disponible en la cuenta conectada.	102
5.44	Error al realizar una puja en una subasta de venta con un valor inferior al precio mínimo establecido.	103
5.45	Vista inicial del administrador tras conectarse. Se muestran las secciones principales disponibles en la plataforma.	104
5.46	Sección con todas las subastas visualizadas desde la cuenta administradora. Incluye tipo, estado, valores y si hubo participación automática.	105
5.47	Confirmación de una puja automática generada por el sistema tras detectar una subasta dentro del rango. Se requiere validación del administrador en MetaMask.	106

5.48	Historial completo de la cuenta administradora, incluyendo subastas exitosas y fallidas, y detalle de participación automática.	107
5.49	Configuración de espacio físico en el estacionamiento. El administrador puede asignar subastas activas a espacios específicos y definir horarios. . .	108

Índice de cuadros

2.1	Comparación de los diferentes acercamientos en el estado del arte	33
4.1	Módulos de la arquitectura del sistema	53
4.2	Matriz de requisitos funcionales y módulos	54
4.3	Descripción del Módulo Red Blockchain	55
4.4	Descripción del Módulo Smart Contract	56
4.5	Descripción del Módulo Gestión de Identidades	57
4.6	Riesgos del sistema	60

Capítulo 1

Introducción

1.1 Contexto

En el contexto actual de crisis climática, la búsqueda de alternativas sostenibles para la movilidad se vuelve cada vez más urgente, la transición hacia una movilidad sostenible con *vehículos eléctricos (Electric Vehicles, EVs)* es clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y combatir el cambio climático. Sin embargo, esta adopción masiva presenta desafíos como la gestión eficiente de la energía y la infraestructura de carga. La infraestructura actual no está preparada para la creciente demanda energética, lo que podría generar sobrecargas en la red eléctrica.

Este proyecto propone el diseño e implementación de una plataforma de comercio de energía basada en blockchain para EVs en *estacionamientos inteligentes (Smart Parking Lots, PLs)*. Los PLs no solo ofrecen servicios de aparcamiento, sino también de carga o descarga para EVs, permitiendo a los propietarios cargar sus vehículos a un precio bajo y vender energía durante las horas punta a un precio más alto.

Estos puntos de carga gestionados permiten balancear la demanda energética localmente, evitando concentraciones de consumo en la red y facilitando una integración más estable de los EV en la infraestructura eléctrica existente.

1.2 Problema por resolver

El principal problema radica en la falta de una infraestructura adecuada para gestionar la carga y descarga de energía de los EVs en general. Esta carencia, en un escenario futuro donde la cantidad de EVs será significativamente mayor, dificultará el intercambio eficiente de energía renovable, limitará el uso de fuentes limpias y aumentará el riesgo de sobrecarga en la red eléctrica.

Además, muchos usuarios están comenzando a adoptar un rol más activo como prosumidores de energía [1], es decir, no solo consumen sino también generan energía. Sin un sistema que gestione adecuadamente esta dinámica, se dificulta alcanzar una mayor eficiencia energética y una verdadera transición hacia fuentes renovables.

Frente a esta situación, surge la necesidad de desarrollar mecanismos que faciliten el intercambio de energía entre vehículos eléctricos en puntos de carga distribuidos en entornos urbanos. Una de las estrategias consideradas es el uso de infraestructura localizada, como los estacionamientos, que podrían convertirse en espacios clave para gestionar de forma más eficiente el flujo energético entre usuarios.

En respuesta a esta problemática, surge la necesidad específica planteada por nuestro cliente: *¿Cómo desarrollar un mercado para el comercio local de energía entre vehículos eléctricos en un estacionamiento inteligente?*

Este trabajo tiene como objetivo diseñar una solución que permita habilitar ese mercado energético local en espacios de uso cotidiano, promoviendo la participación activa de los usuarios, el equilibrio de la red eléctrica y una transición más sustentable hacia nuevas formas de movilidad.

1.3 Acercamiento a la solución

En el ámbito energético, gran parte de los clientes desempeñan únicamente el rol de consumidores, ya que son pocos los que participan en la generación de energía. Esto ha dado

lugar a un modelo basado en la distribución y suministro centralizado. Sin embargo, el crecimiento en el uso de fuentes de energía renovable ha impulsado un aumento en el número de proveedores. Gracias a esta transformación, los usuarios finales no solo consuman energía, sino que también pueden generarla, convirtiéndose en *prosumidores* (o prosumers).

Este fenómeno es evidente en los hogares equipados con tecnología bidireccional, que les permite tanto consumir como inyectar energía a la red, principalmente a partir de fuentes renovables como paneles fotovoltaico. Esto no solo contribuye a la reducción de costos energéticos, sino que también ayuda a mitigar la saturación de la red eléctrica en momentos de alta demanda.

No obstante, el modelo de prosumidores no ha sido ampliamente adoptado en el ámbito de los EVs en Chile, donde la posibilidad de transacciones energéticas entre vehículos o con infraestructura local siguen siendo limitadas.

Dado el crecimiento en el número de EVs y la creciente demanda por soluciones de energía sostenibles, surge la necesidad de un mercado local para el comercio de energía entre EVs. Sin embargo, implementar un sistema de intercambio directo entre vehículos eléctricos plantea desafíos técnicos y de seguridad. Por ejemplo, un modelo de intercambio basado únicamente en cables de conexión bidireccionales, que verifique tanto el flujo de energía como el pago correspondiente, resulta inviable y complejo para el usuario.

Ante esta problemática, una alternativa es establecer un *Centro Local del Estacionamiento (Parking Lots Local Center, PLLC)* que actúe como intermediario en las transacciones de energía. Este PLLC es responsable de gestionar las conexiones y transacciones energéticas entre los EVs y la infraestructura del estacionamiento. La funcionalidad de este sistema incluiría:

- **Intermediación de Transacciones:** Cuando un usuario desea vender energía almacenada en su vehículo eléctrico, puede listar una oferta de venta a través de una aplicación, estableciendo un precio preferido. A su vez, el PLLC actuaría como intermediario, comprando la energía del vehículo a través de una *estación de carga (EV Charging Station, EVCS)* y almacenándola en baterías del PL.

- **Compra de Energía:** De manera similar, un usuario que desee adquirir energía puede explorar las ofertas de venta disponibles en la aplicación y seleccionar la que mejor se ajuste a sus necesidades. Una vez realizada la compra, el usuario puede acudir al estacionamiento, donde el PLLC gestionará la entrega de energía a través de la EVCS designada.



Figura 1.1: De izquierda a derecha: Transacción directa entre EVs. Venta de energía desde un EV hacia una EVCS. Compra de energía desde una EVCS hacia un EV

Esta estructura permite que el sistema sea escalable y facilita la participación activa de los prosumidores en el mercado energético local, a la vez que asegura un control adecuado sobre las transacciones mediante un intermediario, ya que la trazabilidad de las transacciones energéticas es crucial. Por ejemplo, un usuario podría querer verificar si su vehículo estuvo realmente cargándose o descargándose durante un periodo específico, y tecnologías como blockchain permitirían asegurar que estos datos sean verificables, transparentes y seguros. Al establecer este mercado para el comercio de energía en el contexto de un estacionamiento inteligente, se optimiza el uso de recursos energéticos en entornos urbanos y se promueve la adopción de energías renovables de manera eficiente y segura.

Se piensa que en un futuro este sistema sea aplicable a estacionamientos en entornos como: un campus universitario, departamentos, centros comerciales, e incluso a nivel de hogares.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Diseñar, desarrollar e implementar un sistema para el comercio de energía local basada en blockchain, que permita la compra y venta eficiente de energía entre EVs en aparcamientos, promoviendo la adopción de energías renovables y una gestión más participativa.

1.4.2 Objetivos Específicos

- **OE1.** Investigar y analizar las necesidades y desafíos específicos de EV, intercambio energético y mercados disponibles en el estado del arte, y seleccionar la mejor alternativa en torno a las necesidades del proyecto.
- **OE2.** Diseñar la arquitectura y desarrollar un sistema para el comercio de energía local basado en blockchain entre los EVs y PLLC.
- **OE3.** Diseñar escenarios de prueba en el Marketplace mediante la generación de datos simulados, para verificar el comportamiento y la estabilidad del sistema.
- **OE4.** Diseñar y desarrollar una plataforma móvil que integre el marketplace con los usuarios finales.
- **OE5.** Evaluar el impacto del sistema de trading, la gestión participativa de la energía y los beneficios económicos.

1.5 Estructura general del documento

El presente documento está estructurado en capítulos, cada uno de los cuales aborda diferentes aspectos clave del proyecto. A continuación, se describe el contenido de cada capítulo:

Capítulo 1: Incluye el contexto, problema a resolver, acercamiento a la solución, objetivos y estructura general del documento.

Capítulo 2: Analiza la actualidad en Chile sobre la electromovilidad y la aplicación de blockchain en problemas de transacción energética.

Capítulo 3: Presenta la arquitectura del sistema, los diagramas de capas, diagramas de arquitectura y flujo de transacciones.

Capítulo 4: Describe los módulos del sistema, sus requisitos funcionales y no funcionales, así como las herramientas de desarrollo.

Capítulo 5: Detalla el proceso de validación y verificación del sistema, los resultados obtenidos tras su implementación, y la visualización del prototipo en funcionamiento.

Capítulo 6: Resume los hallazgos, conclusiones y proyecciones del sistema EVel Park, incluyendo posibles mejoras e implementaciones futuras.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1 Actualidad en Chile

En el contexto actual de crisis climática, la búsqueda de alternativas sostenibles para la movilidad se vuelve cada vez más urgente. En este escenario, Chile ha tomado un rol protagónico en el desarrollo de la electromovilidad en la región, estableciendo metas ambiciosas para la descarbonización de su parque vehicular y la promoción de tecnologías limpias. Chile ha experimentado un crecimiento constante en la adopción de vehículos eléctricos. En 2022, la penetración de esta tecnología en el parque vehicular alcanzó el 0,15%, una cifra que refleja un avance significativo en comparación con años anteriores [2].

El gobierno chileno ha jugado un papel fundamental en este impulso, estableciendo políticas públicas orientadas a fomentar la electromovilidad. Entre las principales medidas destacan la exención del IVA para la compra de vehículos eléctricos, la entrega de subsidios estatales y la implementación de planes de electrificación del transporte público [3]. Se busca que para el 2035 solo se vendan vehículos eléctricos en el país, y que para el 2050 el 40% del parque vehicular privado sea eléctrico [4].



Figura 2.1: Meta al año 2050 en Chile. Disponible en [5].

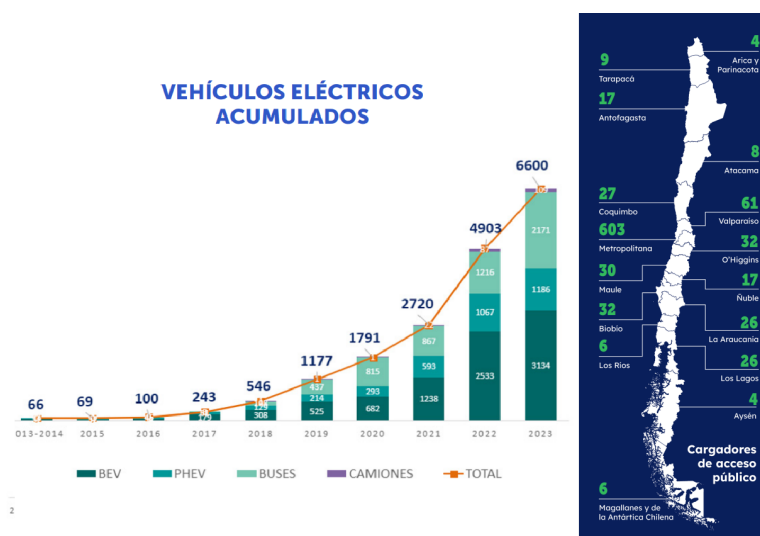


Figura 2.2: Cantidad de Vehículos Eléctricos y Estaciones de carga en Chile. Disponible en [3].

El desarrollo de una infraestructura de carga robusta y accesible es un aspecto crucial para la adopción masiva de la electromovilidad. En este sentido, Chile ha realizado avances considerables, con una red de cargadores en constante expansión [3]. Sin embargo, persisten brechas importantes en la cobertura de esta infraestructura, especialmente en zonas rurales y ciudades de menor tamaño, donde la infraestructura de carga aún es limitada.

Chile continúa sus esfuerzos para consolidarse como un referente en electromovilidad. Entre los proyectos más destacados se encuentra el Plan de Electromovilidad Pública, que busca incorporar buses, taxis y otros vehículos eléctricos al transporte público [3].

A pesar de los avances realizados, la electromovilidad en Chile aún enfrenta algunos desafíos importantes. El alto costo de los vehículos eléctricos, la limitada disponibilidad de cargadores y la necesidad de una mayor conciencia sobre los beneficios de esta tecnología son algunos de los obstáculos que deben superarse [6].

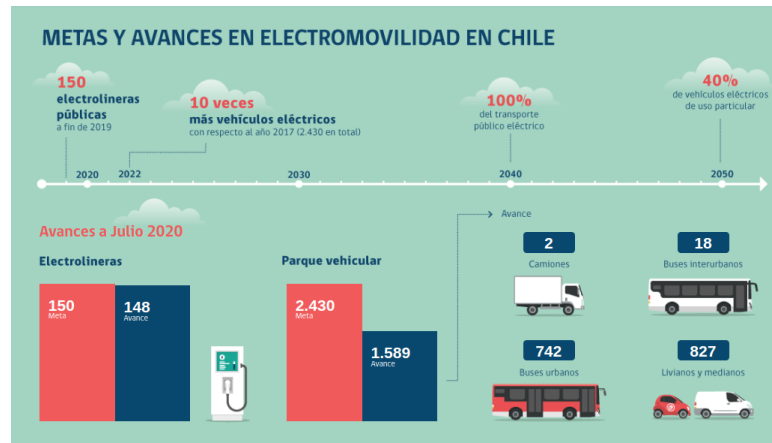


Figura 2.3: Avances hasta Abril del 2023. Disponible en [4].

En ese marco, diversos estudios han abordado estas problemáticas desde enfoques innovadores que integran tecnologías como blockchain, IoT, inteligencia artificial y modelos de comercio energético P2P. A continuación, se presenta una revisión de dichas propuestas, con el objetivo de identificar sus principales características, fortalezas, limitaciones y la forma en que nutren el desarrollo de EVel Park.

2.2 Blockchain aplicado a problemas de transacción energética

Esta sección tiene como objetivo revisar el panorama actual de desarrollos tecnológicos relacionados con la gestión de energía mediante blockchain en entornos vinculados a la movilidad eléctrica. Se abordan iniciativas y soluciones implementadas en distintos contextos, que permiten entender el estado del arte y reconocer oportunidades, limitaciones y aprendizajes relevantes para el diseño de plataformas de intercambio energético. A continuación, se revisan diversos estudios y propuestas relevantes que sirven como marco de referencia y contexto para el desarrollo del presente proyecto.

Aplicaciones en Estacionamientos Inteligentes

El artículo [7] propone una plataforma de comercio de energía basada en blockchain para vehículos eléctricos en estacionamientos inteligentes de campus universitarios. La arquitectura del sistema consta de dos capas: la física, que incluye componentes como estaciones de carga y transformadores, y la cibernética, que facilita las transacciones de energía entre los participantes. La plataforma, implementada en Hyperledger Fabric, define participantes, activos, transacciones y contratos inteligentes, y considera escenarios de compra y venta de energía entre vehículos eléctricos y el controlador local del estacionamiento. Los resultados demuestran que la plataforma proporciona beneficios económicos a los participantes y contribuye al equilibrio de la demanda energética del campus.

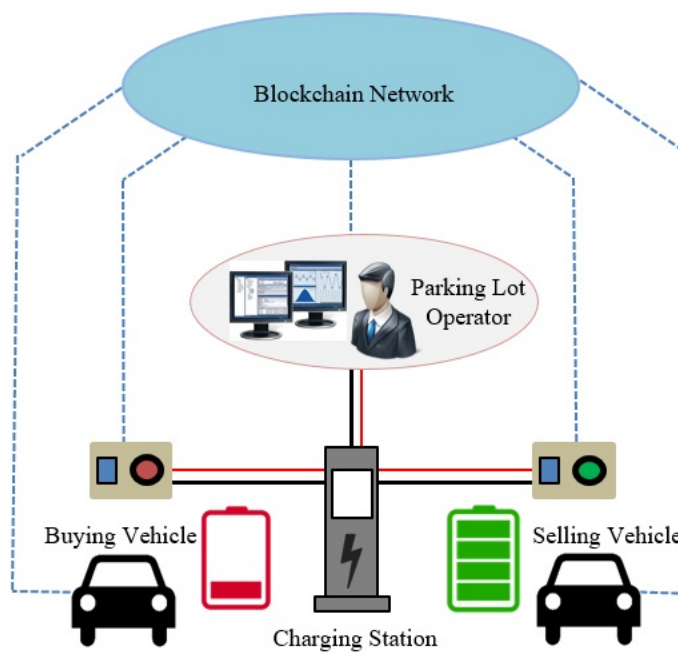


Figura 2.4: Esquema de la plataforma de comercio de energía basada en blockchain para vehículos eléctricos en estacionamientos inteligentes. Disponible en [7].

El artículo [8] propone un sistema de gestión de energía transaccional para estacionamientos de EVs alimentados por energía solar, con el objetivo de aliviar la ansiedad por la autonomía entre los usuarios de EVs y reducir los costos de carga. El sistema emplea un novedoso mecanismo de comercio que tiene en cuenta la ansiedad por la autonomía y parámetros prácticos como la distancia de conducción, la predicción de la generación fotovoltaica, la degradación de la batería y los precios de la electricidad. Al permitir que los EVs en el lugar de trabajo intercambien energía entre sí, el sistema logra una reducción del 3 al 10% en los costos de carga en comparación con los sistemas convencionales de *Vehicle-to-Grid (V2G)*, y las estaciones de carga públicas también contribuyen a los ahorros de costos. Los resultados de la simulación demuestran la viabilidad y la eficacia de la estrategia propuesta para minimizar los costos y promover el uso de energía sostenible, al tiempo que se abordan las preocupaciones de los usuarios de EVs sobre quedarse sin carga.

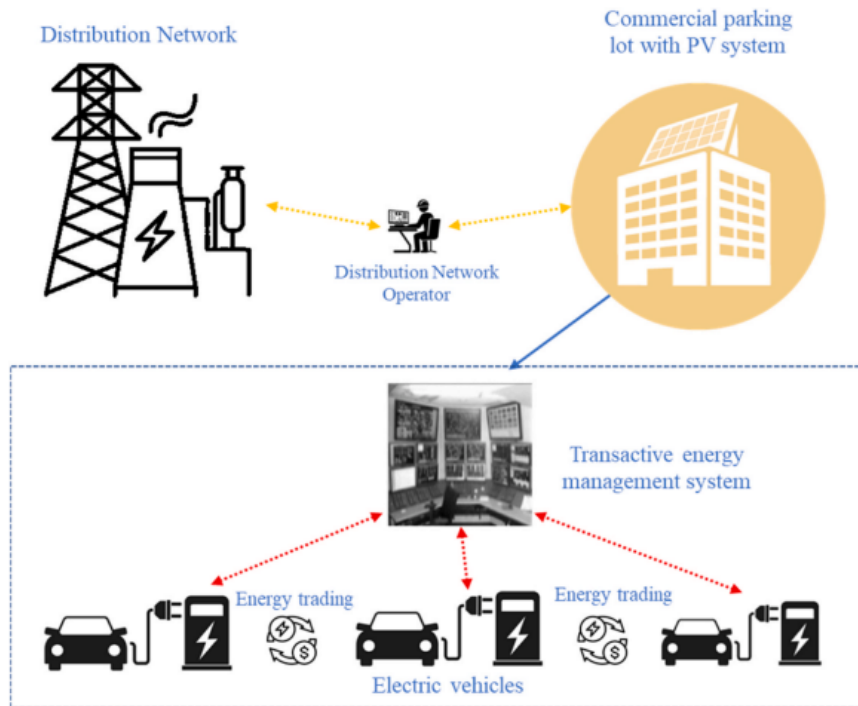


Figura 2.5: Modelo del sistema transaccional propuesto. Disponible en [8].

El artículo en [9] exploran la integración de estacionamientos con *paneles fotovoltaicos (PV)* en los techos para apoyar la carga de EV, impulsado por la necesidad de una economía descarbonizada y la reducción de la contaminación del aire en las ciudades. Destaca el potencial de los sistemas solares fotovoltaicos para mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico, especialmente porque los EVs permanecen estacionados la mayor parte del tiempo y pueden ser gestionados para apoyar la red. El estudio abarca las tecnologías de PV, los EVs, las baterías y sus aplicaciones en estacionamientos solares, enfatizando cómo este enfoque puede gestionar el estado de carga de los EVs, acelerar la descarbonización y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. También aborda los desafíos de la integración de la energía fotovoltaica y los EVs, como la estabilidad de la energía y la fiabilidad de la red, sugiriendo que la combinación de la generación fotovoltaica con la carga de los EVs puede mitigar estos problemas. El estudio revisa la investigación relevante y tiene como objetivo proporcionar una comprensión exhaustiva de las tecnologías y los avances en los estacionamientos solares para EVs, a fin de facilitar la transición hacia la movilidad limpia.

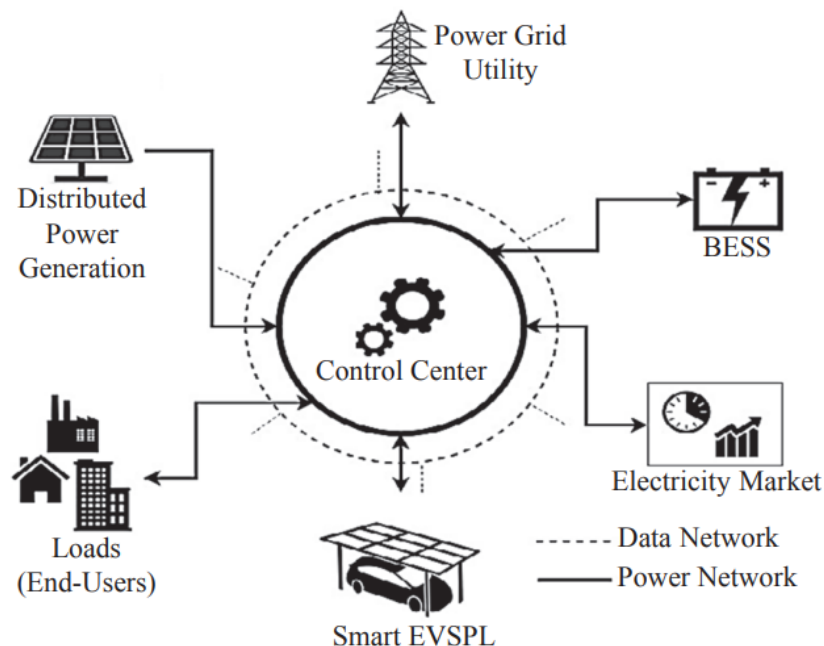


Figura 2.6: Un EVSPL (EV Parking Lot with Renewable Energy Sources Infrastructure) inteligente en el contexto de una microrred. Disponible en [9].

El artículo [10] presenta un sistema de gestión óptima para la carga y descarga de EVs en un estacionamiento inteligente, considerando los comportamientos aleatorios de los propietarios de los vehículos. El objetivo principal es maximizar las ganancias del estacionamiento y minimizar los costos para los propietarios de EVs, teniendo en cuenta factores como el tiempo de llegada y salida, el estado de carga inicial y final, la capacidad de la batería y la tasa de carga horaria demandada. Se definen un sistema de incentivos y penalizaciones para optimizar el funcionamiento del estacionamiento y la satisfacción del cliente, así como una tarifa de entrada inicial para todos los vehículos. El sistema busca recompensar a los vehículos que no pueden completar su carga debido a las penalizaciones pagadas por los vehículos infractores. Los resultados de la simulación validan la eficacia del método propuesto para la gestión de EVs, demostrando su capacidad para reducir los costos de los propietarios y suavizar la curva de carga durante las horas pico.

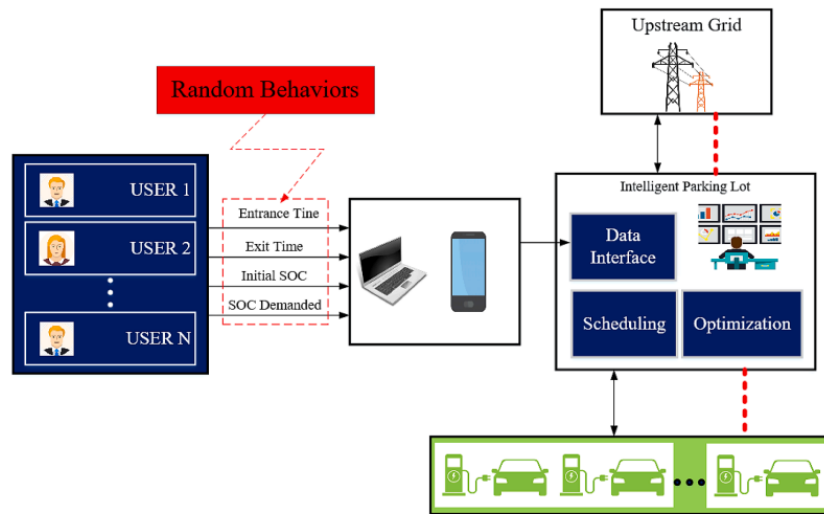


Figura 2.7: Estacionamiento inteligente propuesto. Disponible en [10].

El artículo [11] aborda el creciente problema del desequilibrio en la red eléctrica causado por la expansión de los estacionamientos de EVs. Propone un marco de trabajo en dos etapas para la planificación inteligente de la carga en *estacionamientos comerciales (CPLs)*. En la primera etapa, se consideran parámetros técnicos (batería, carga/descarga) y de transporte (distancia diaria, horarios de llegada/salida) para calcular la rentabilidad de la carga/descarga para los usuarios de EVs y los propietarios del CPL. En la segunda etapa, se evalúa el impacto del CPL en los índices de desequilibrio en una red de distribución desequilibrada estándar IEEE. Los resultados muestran un aumento del 23% en las ganancias promedio para los usuarios de EV en comparación con el costo de carga, y una mejora del 30% en el desequilibrio de la red al conectar el CPL a cargas comerciales activas, sin modificar la estructura de la red. En resumen, el estudio busca equilibrar los intereses de los usuarios de EVs, los propietarios de CPLs y los operadores de la red, mitigando el desequilibrio de la red mediante una planificación inteligente de la carga en CPLs.

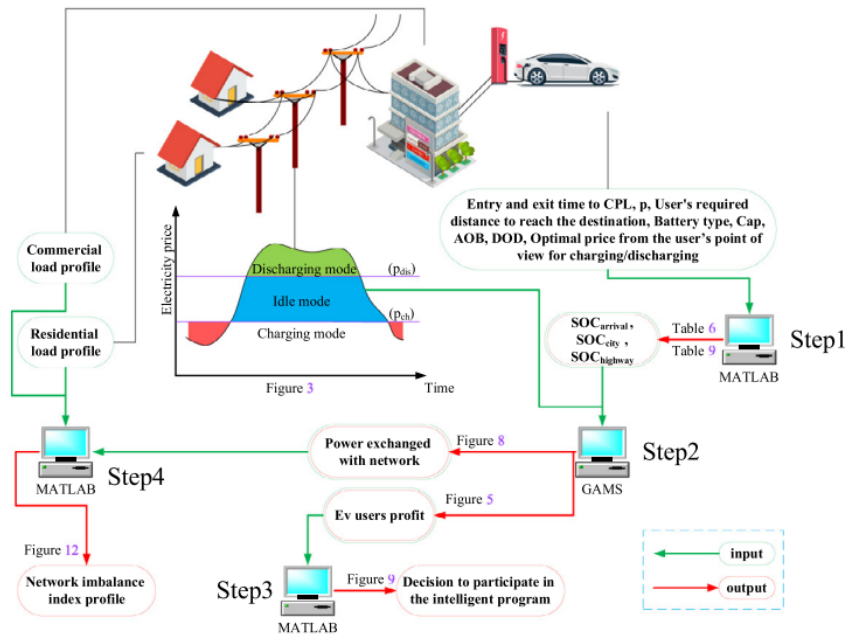


Figura 2.8: El framework propuesto en el estudio. Disponible en [11].

Sistemas P2P para Comercio de Energía entre EVs

El artículo [12] presenta el diseño e implementación de un sistema de comercio de energía **P2P (peer-to-peer)** para una comunidad remota sin acceso a la electricidad. Utilizando tecnologías de bajo costo y código abierto, como Raspberry Pi 4 Model B para el servidor principal y microcontroladores ESP32 para servidores **IoT (Internet of Things)**, el sistema permite a los residentes aprovechar recursos energéticos distribuidos. La plataforma emplea la blockchain de Ethereum para desplegar contratos inteligentes que registran de manera segura y descentralizada todas las transacciones de energía entre los participantes. La interfaz de usuario, desarrollada con la biblioteca React.JS, facilita las actividades de comercio de energía, mientras que los dispositivos de campo conectados a los ESP32 permiten la adquisición, monitoreo y transferencia de datos energéticos en tiempo real. El sistema opera en una red Wi-Fi local con autenticación y claves privadas, asegurando la confidencialidad de los datos. Los resultados muestran que es una solución efectiva y económica para gestionar energía en comunidades aisladas, fomentando la generación distribuida y mejorando su calidad de vida.

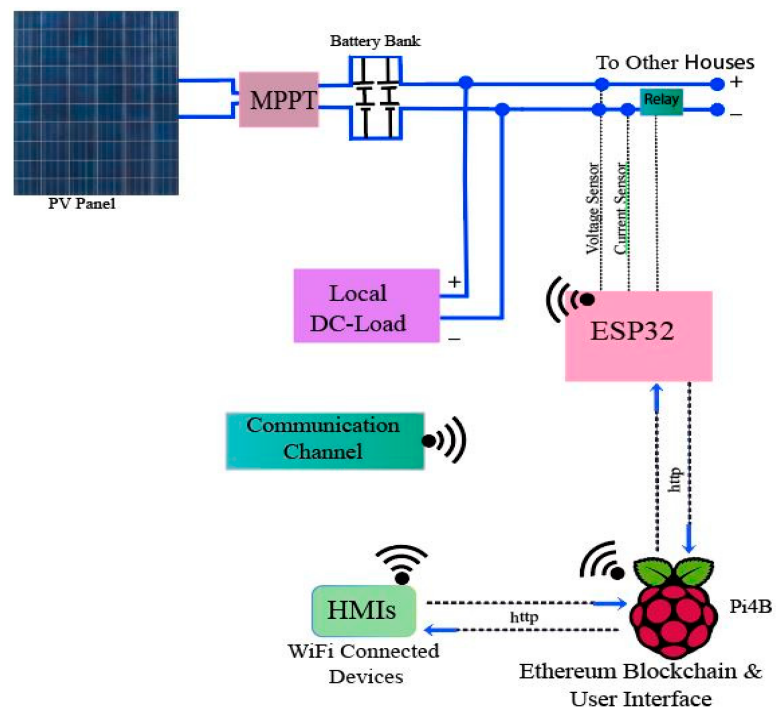


Figura 2.9: Proposed P2P energy trading system architecture. Disponible en [12].

El artículo [13] propone un sistema de pago e intercambio de energía para EV que utiliza la tecnología blockchain para permitir un intercambio de energía P2P seguro y transparente. El sistema busca abordar problemas como la disponibilidad limitada de estaciones de carga públicas, los altos costos de las instalaciones privadas y la variabilidad de los precios de la electricidad, permitiendo a los propietarios de EVs intercambiar el excedente de energía entre sí. Incorporando contratos inteligentes y un mecanismo de precios dinámicos, el sistema automatiza el proceso de intercambio e incentiva la estabilización de la energía durante las horas de máximo consumo. Los autores sugieren que este sistema puede minimizar los costos de carga, disminuir la demanda máxima de la red y fomentar la utilización de fuentes de energía renovables, contribuyendo en última instancia a una infraestructura de carga de EVs más sostenible y eficiente.

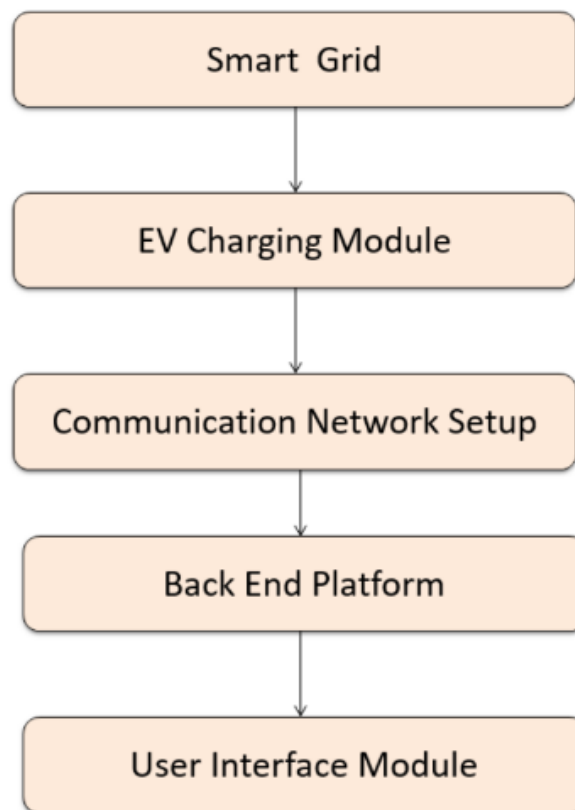


Figura 2.10: Arquitectura del sistema propuesto. Disponible en [13].

El artículo [14] presenta un nuevo sistema de pago e intercambio de energía para EVs que utiliza la tecnología blockchain para permitir transacciones seguras y transparentes entre pares (P2P). El sistema busca abordar las limitaciones de la infraestructura de carga actual, los altos costos y la variabilidad en los precios de la electricidad, facilitando que los propietarios de EVs intercambien energía excedente entre sí. A través de la implementación de contratos inteligentes, se automatiza el proceso de intercambio y carga, mientras que un mecanismo de precios dinámico incentiva la estabilidad energética durante las horas de mayor demanda. La arquitectura propuesta incluye componentes clave como los EV, *sistemas de gestión de baterías (BMS)*, *sistemas de gestión de energía (EMS)*, fuentes de energía renovables y la red eléctrica, trabajando en conjunto para minimizar los costos de carga, reducir la demanda máxima en la red y promover la adopción de energías renovables.

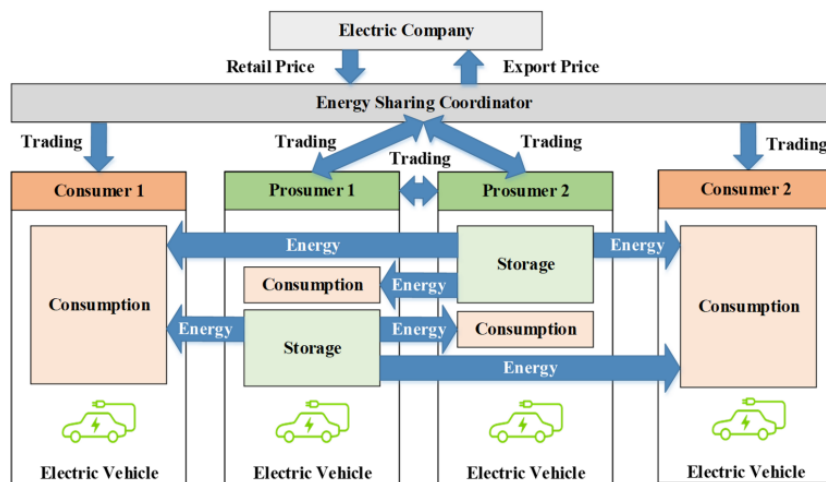


Figura 2.11: Comercio energético P2P de vehículos eléctricos. Disponible en [14].

El artículo [15] propone un sistema de puntos de carga privados P2P respaldado por la tecnología blockchain para abordar los problemas de carga, inconvenientes que dificultan la promoción de EVs en áreas urbanas. El sistema registra los datos de recarga de los vehículos eléctricos de forma inmutable en la cadena de bloques, lo que garantiza la transparencia y la confianza entre los usuarios. Se utiliza un *Multi-Agent-Based (MAB)* para evaluar el rendimiento del sistema, teniendo en cuenta los comportamientos de los diferentes participantes. Los experimentos numéricos validan el sistema utilizando datos reales del círculo empresarial Lujiazui de Shanghai, revelando las relaciones comerciales internas entre los demandantes de carga y los proveedores de puntos de carga. La investigación tiene como objetivo proporcionar un marco novedoso para el uso compartido de puntos de recarga de EVs en redes blockchain, verificado mediante simulación computacional.

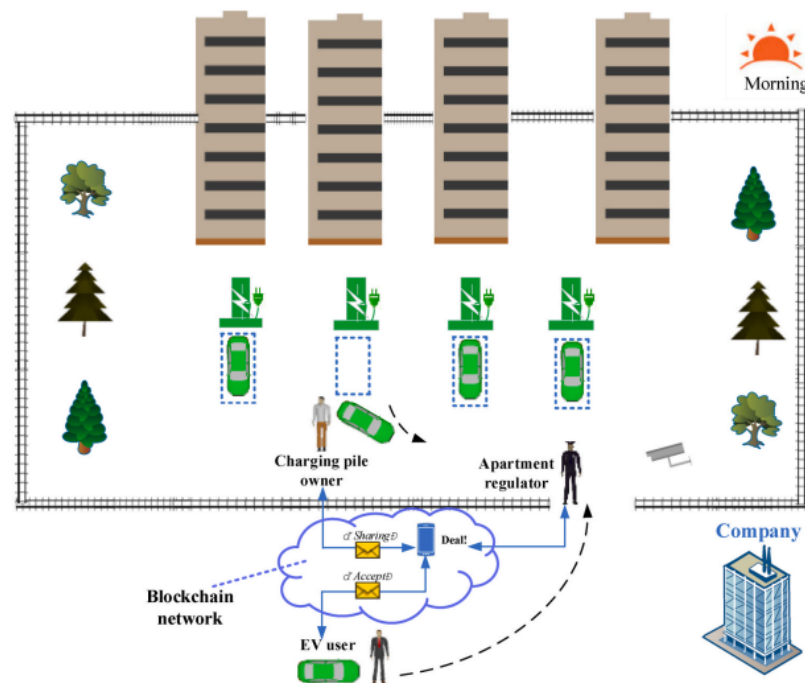


Figura 2.12: El diagrama esquemático del sistema de puntos de carga. Disponible en [15].

El artículo [16] presenta dos estrategias para definir preferencias de comercio bilateral en mercados de energía local P2P: una basada en el emparejamiento entre oferta y demanda, y otra según la distancia entre participantes en la red. Se evalúa el impacto de las preferencias comerciales bilaterales en el precio y la cantidad de energía comercializada para las dos estrategias. Se desarrolla un mercado de energía P2P totalmente descentralizado, operando en un entorno de planificación anticipada (day-ahead), e implementado sobre una plataforma digital basada en blockchain y contratos inteligentes. Las simulaciones se realizan con datos reales de un barrio residencial en los Países Bajos, considerando diversas fuentes de energía distribuida. Los resultados muestran que, en ambas estrategias, el costo de la adquisición de energía y la interacción con la red de todos los participantes en el comercio P2P se reducen en comparación con un escenario de referencia. Se determina que la cantidad total de energía intercambiada es mayor cuando las preferencias de comercio se basan en la distancia, lo que también podría considerarse como un indicador de la eficiencia energética en la red al fomentar el comercio P2P entre hogares cercanos. Sin embargo, los precios de comercio P2P en esta estrategia resultan ser más bajos. Además, se analiza el impacto de la calefacción eléctrica en los hogares, encontrando un efecto limitado sobre los precios y una leve reducción en el volumen de intercambio energético.

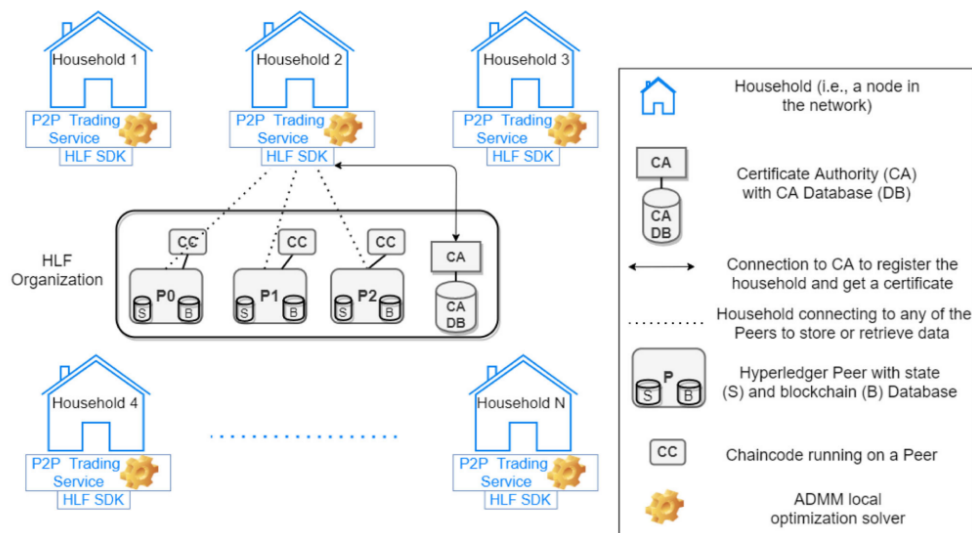


Figura 2.13: Arquitectura de red de comercio de energía P2P basada en HLF: Comunicación de los hogares con la organización HLF (IBM Hyperledger Fabric). Disponible en [16].

El artículo [17] propone una plataforma de comercio de energía predictiva basada en blockchain para proporcionar soporte en tiempo real, control anticipado y programación de la generación de **recursos energéticos distribuidos (DER)** en redes inteligentes. La plataforma consta de dos módulos: un módulo de comercio de energía basado en blockchain y un módulo de análisis predictivo habilitado por contratos inteligentes. El módulo blockchain permite el monitoreo en tiempo real del consumo de energía, el control sencillo del comercio de energía, un modelo de recompensas y registros inmutables de las transacciones. El módulo de análisis predictivo, basado en datos históricos de consumo, predice el consumo a corto plazo. Se utilizan datos reales de la provincia de Jeju en Corea del Sur para las simulaciones, con el objetivo de lograr un flujo de energía óptimo y un crowdsourcing energético entre consumidores y prosumidores. Para evaluar el modelo predictivo, se utilizan medidas estadísticas como el error cuadrático medio y la raíz del error cuadrático medio en modelos de aprendizaje automático, como las redes neuronales recurrentes. También se evalúa la eficacia de la plataforma blockchain en términos de latencia, rendimiento y utilización de recursos, se muestra que el modelo propuesto es eficaz para el crowdsourcing energético entre prosumidores y consumidores.

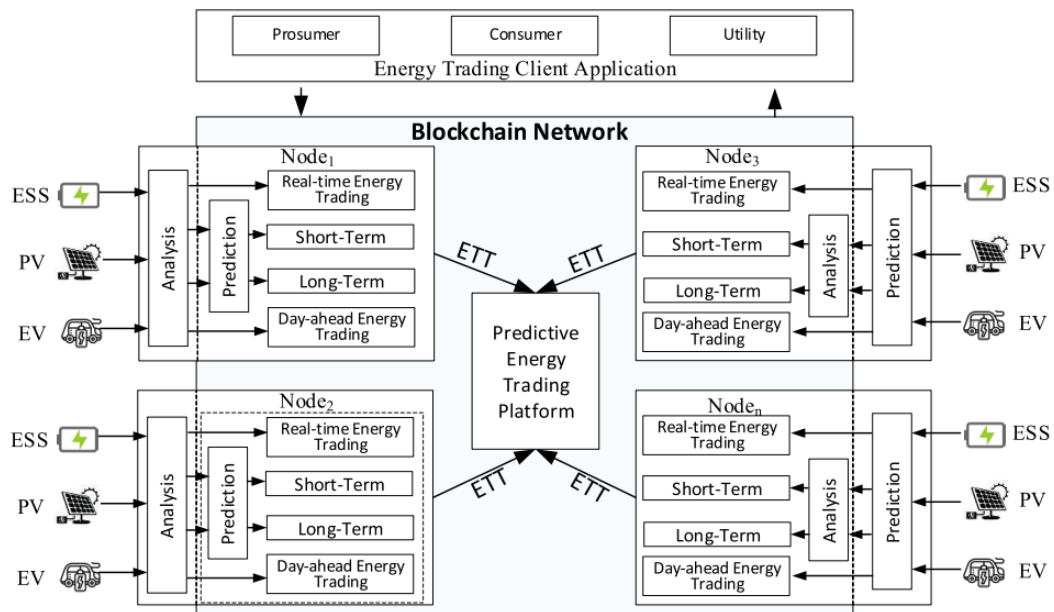


Figura 2.14: Escenario conceptual de la plataforma inteligente de comercio de energía. Disponible en [17].

El artículo [18] propone un nuevo sistema que combina la teoría de juegos cooperativos y la tecnología blockchain para fomentar el comercio seguro y rentable de energía renovable entre participantes en redes inteligentes. El sistema permite a los usuarios almacenar créditos de energía renovable como activos en la blockchain e intercambiarlos con otros. Se desarrolla una versión modificada de ***Proof of Energy Generation (PoEG)*** que incluye la pérdida en la línea de distribución como mecanismo de consenso. También se propone un algoritmo de formación de coaliciones basado en PoEG y técnicas de optimización para determinar la coalición ganadora como mineros de bloques. El sistema se valida mediante análisis teóricos y simulaciones utilizando un sistema estándar IEEE de 14 buses y un conjunto de datos reales (Ausgrid). Los resultados de las pruebas muestran que el sistema propuesto mejora los beneficios económicos de los prosumidores en un 6,5% en términos de ahorro de energía en comparación con el modelo de referencia.

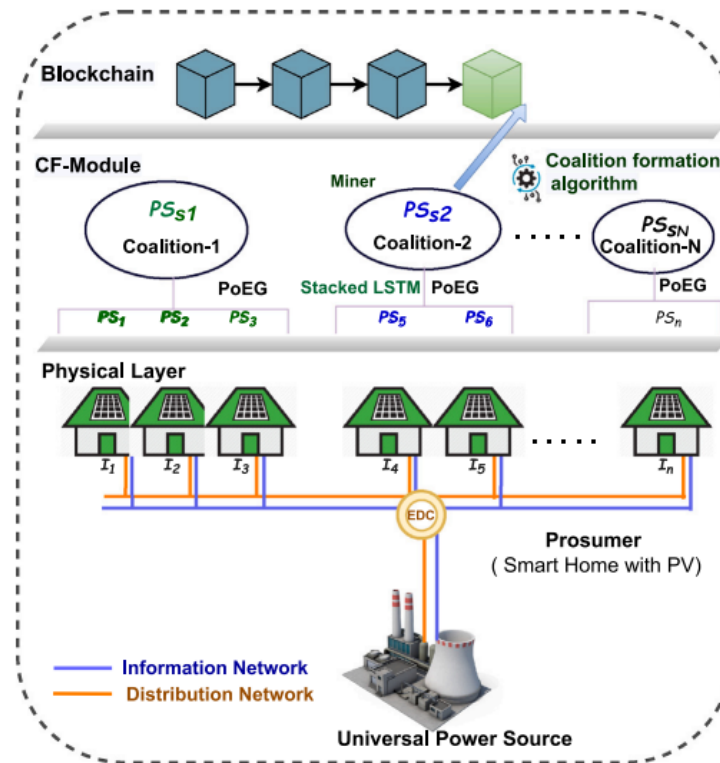


Figura 2.15: Framework de distribución de energía P2P basado en la comunidad con blockchain y teoría de juegos cooperativos. Disponible en [18].

Finalmente, en el artículo [19] describe una solución para crear una plataforma de software inteligente para la gestión óptima del comercio de energía P2P en micredes. Se justifica la elección de una solución basada en la arquitectura de sistemas jerárquicos de dos niveles, utilizando las restricciones y recomendaciones del centro de control. Se propone un diseño funcional general de la plataforma utilizando tecnología blockchain y soluciones de ciberseguridad. La solución incluye la especificación técnica de la plataforma, utilizando la teoría de juegos como un caso especial. Se utilizó un método de aprendizaje mejorado para simular el comportamiento del cliente. La simulación del funcionamiento de la plataforma se llevó a cabo utilizando el ejemplo de optimizar la relación *peak-to-average ratio (PAR)* de la carga de la red por parte de los usuarios que toman decisiones individuales utilizando algoritmos de teoría de juegos. Los resultados de la simulación de la aplicación de escenarios con y sin recomendaciones confirmaron que el modelo propuesto proporciona una mejor relación PAR en la red.

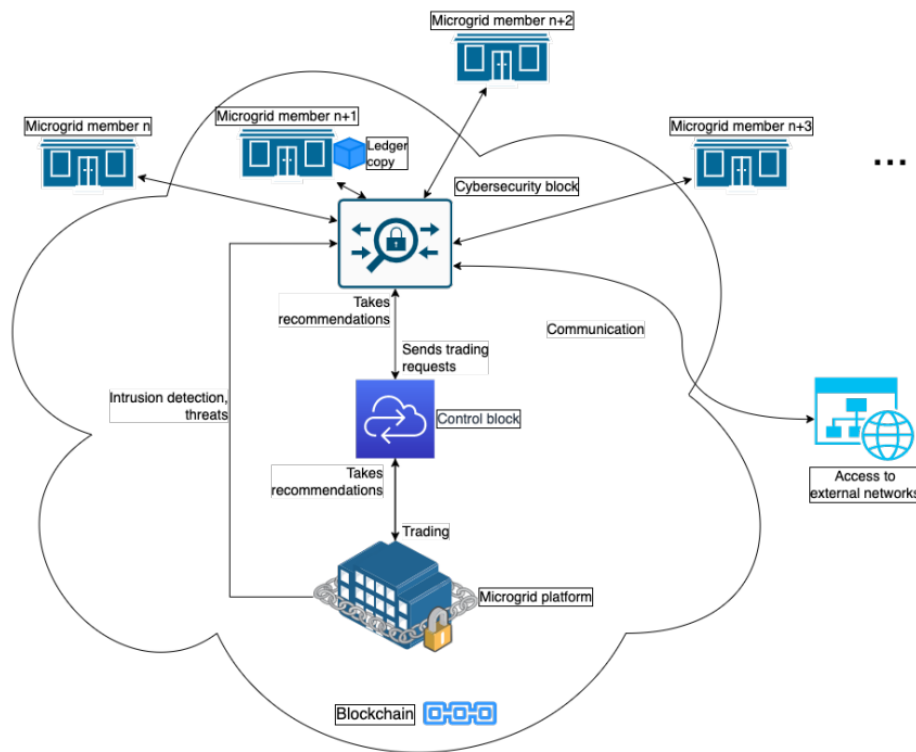


Figura 2.16: Imagen ilustrativa del uso de la plataforma propuesta. Disponible en [19].

Integración con Tecnologías Avanzadas

El artículo [20] explora el uso de la tecnología blockchain e IoT para la gestión eficiente de baterías en EVs. Aborda el reto de la limitada autonomía de los vehículos eléctricos y la infraestructura de carga proponiendo una red descentralizada para la carga y el intercambio de baterías. Los autores presentan dos implementaciones de blockchain: una utilizando contratos inteligentes de Ethereum y la otra utilizando un *Grafo Acíclico Dirigido (DAG)* en la red IOTA. Ambas estrategias se implementan y se comparan para demostrar su potencial como soluciones viables para un BMS semi-descentralizado y basado en datos. El objetivo principal es crear un sistema seguro y transparente donde los conductores de EV puedan acceder a información confiable sobre el estado de la batería y los servicios de carga/intercambio disponibles.

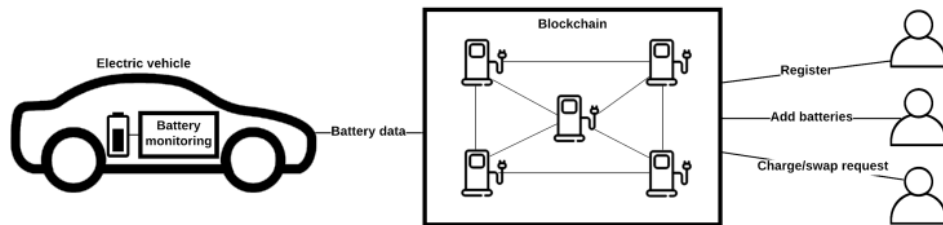


Figura 2.17: Esquema propuesto para el sistema de carga e intercambio de baterías. Disponible en [20].

El artículo [21] presenta un *Mercado de Energía Descentralizado (DEM)* que aprovecha la tecnología blockchain y la *inteligencia artificial (IA)* para gestionar los intercambios de energía entre hogares inteligentes con sistemas de almacenamiento de energía. El sistema utiliza *NFTs (Non-Fungible Token)* para representar perfiles de energía únicos, garantizando transparencia y seguridad. El *Aprendizaje por Refuerzo Profundo Federado (FDRL)* promueve la gestión de energía colaborativa y adaptativa, preservando la privacidad del usuario. Los contratos inteligentes aseguran transacciones de energía eficientes y seguras. La integración de agentes de IA, baterías domésticas y el DEM, crea una *Planta de Energía Virtual (VPP)*. Los oráculos de Chainlink proporcionan datos del mundo real. El sistema tiene como objetivo abordar los desafíos de alineación de incentivos y transparencia en el comercio de energía tradicional, transformando los hogares en consumidores y productores de energía dentro de un ecosistema energético sostenible.

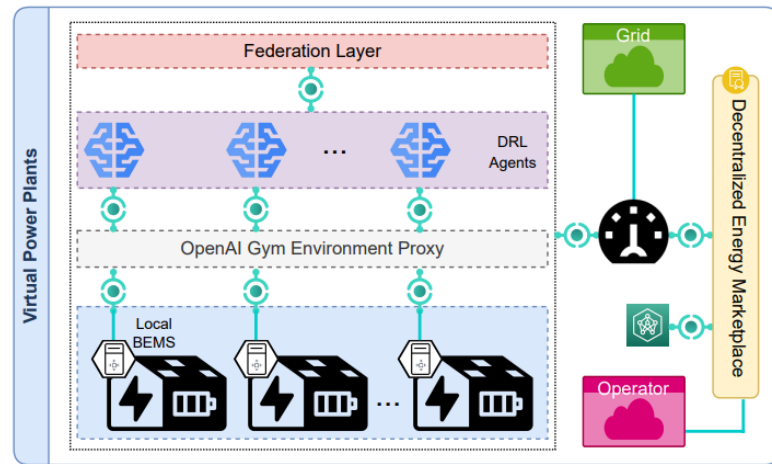


Figura 2.18: Modelo de sistema propuesto. Disponible en [21].

Consideraciones de Seguridad, Escalabilidad y Regulación

El artículo [22] propone un sistema de carga seguro para EVs basado en blockchain, abordando las vulnerabilidades de los sistemas tradicionales de carga ante ataques **DDoS** (*Distributed Denial of Service*) y ataques de escala de privilegios. El sistema aprovecha la tecnología blockchain para garantizar la seguridad de las claves, la autenticación mutua segura y el anonimato, al mismo tiempo que proporciona una carga eficiente. Los autores demuestran que el sistema propuesto ofrece una autenticación mutua segura utilizando la lógica de **Burrows-Abadi-Needham (BAN)** y previene ataques de reproducción e intermediarios (man-in-the-middle) mediante la validación automatizada de protocolos de seguridad de Internet y herramientas de simulación de aplicaciones. Además, se compara los costos de computación y comunicación con esquemas anteriores, lo que indica que el sistema de carga propuesto se aplica de manera eficiente a los sistemas de carga prácticos para vehículos eléctricos.

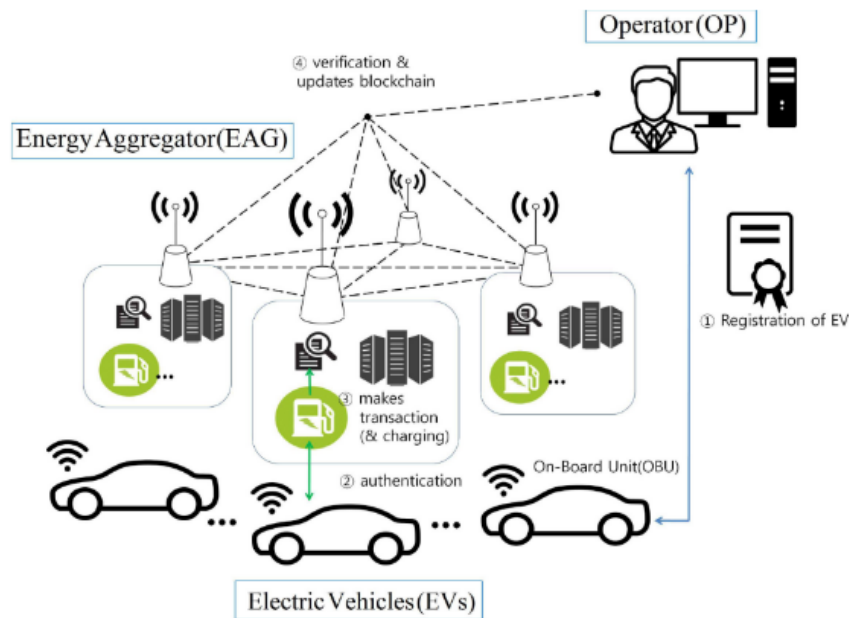


Figura 2.19: Modelo propuesto de un sistema de recarga para vehículos eléctricos basado en blockchain. Disponible en [22].

El artículo [23] presenta un sistema de comercio de energía P2P en una red inteligente, utilizando una subasta doble basada en teoría de juegos y tecnología blockchain. El objetivo principal es mejorar las ganancias de los participantes y reducir el impacto en la red. El sistema permite que los compradores ajusten la cantidad de energía que compran según el precio, mientras que el subastador controla el juego para maximizar el bienestar social. Se busca garantizar la privacidad de la información de los usuarios y la seguridad de las transacciones mediante el uso de blockchain. Los resultados de las simulaciones muestran la efectividad del método propuesto.

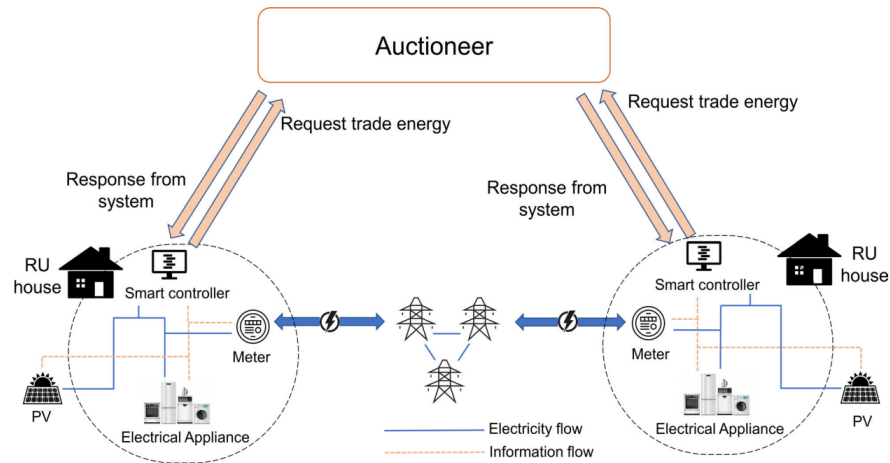


Figura 2.20: Visión general del sistema de comercio de energía P2P. Disponible en [23].

El artículo [24] revisa la implementación de la tecnología blockchain en las redes inteligentes con el objetivo de mejorar la ciberseguridad y la protección de datos energéticos. Se analizan los principales problemas de seguridad en los escenarios de redes inteligentes, que pueden ser resueltos mediante el uso de big data y blockchain. El documento identifica y discute investigaciones recientes basadas en blockchain, así como las preocupaciones de seguridad en los sistemas de redes inteligentes. También se exploran diseños prácticos, experimentos y elementos desarrollados recientemente. Finalmente, se examinan los problemas de investigación más importantes y las posibles direcciones para usar blockchain con el fin de abordar las preocupaciones de seguridad en las redes inteligentes. El estudio se enfoca en las tecnologías de características recientes en redes inteligentes, las vulnerabilidades de seguridad, las amenazas y sus contramedidas, y los factores críticos de éxito de blockchain para garantizar la seguridad de los sistemas de redes inteligentes.

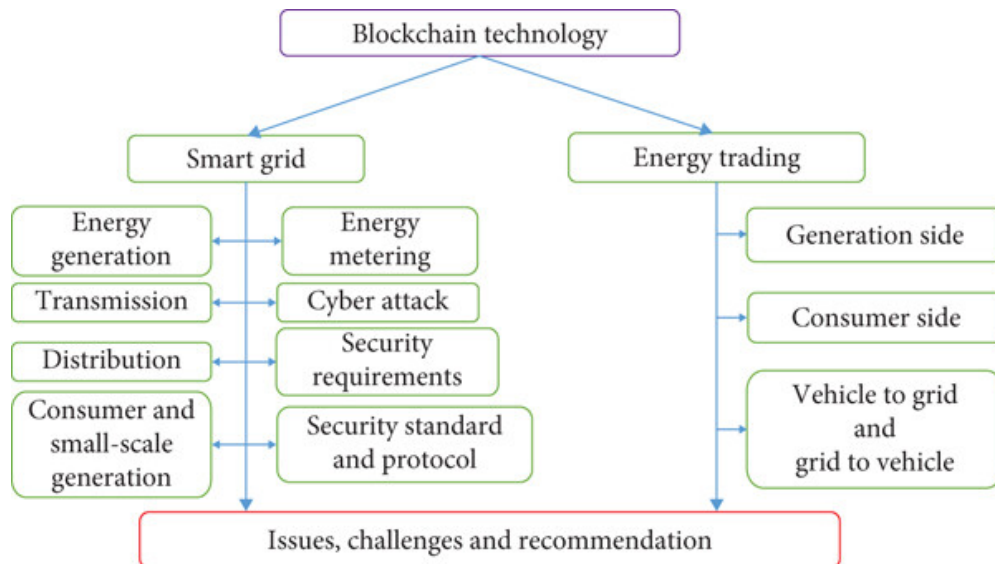


Figura 2.21: Resumen del estudio. Disponible en [24].

El artículo [25] propone una arquitectura unificada de **comercio de energía entre pares (P2P-ET)** basada en blockchain con permisos (UBETA) que integra tres tipos diferentes de mercados de energía y proporciona un modelo unificado de comercio de energía y liquidación de pagos. El sistema UBETA se basa en una Blockchain empresarial de Ethereum (Hyperledger Besu) y en el algoritmo de consenso **Istanbul Byzantine Fault Tolerance (IBFT)**. Los resultados experimentales muestran que el sistema basado en IBFT tiene una latencia 15 veces menor y un rendimiento casi 2 veces mayor en comparación con las soluciones P2P-ET existentes basadas en Proof of Work. Además, el sistema proporciona mejor escalabilidad y tasa de éxito que los sistemas P2P-ET existentes basados en Raft. El modelo unificado de comercio de energía propuesto ofrece una latencia más baja y reduce el número de transacciones blockchain en comparación con el modelo no unificado.

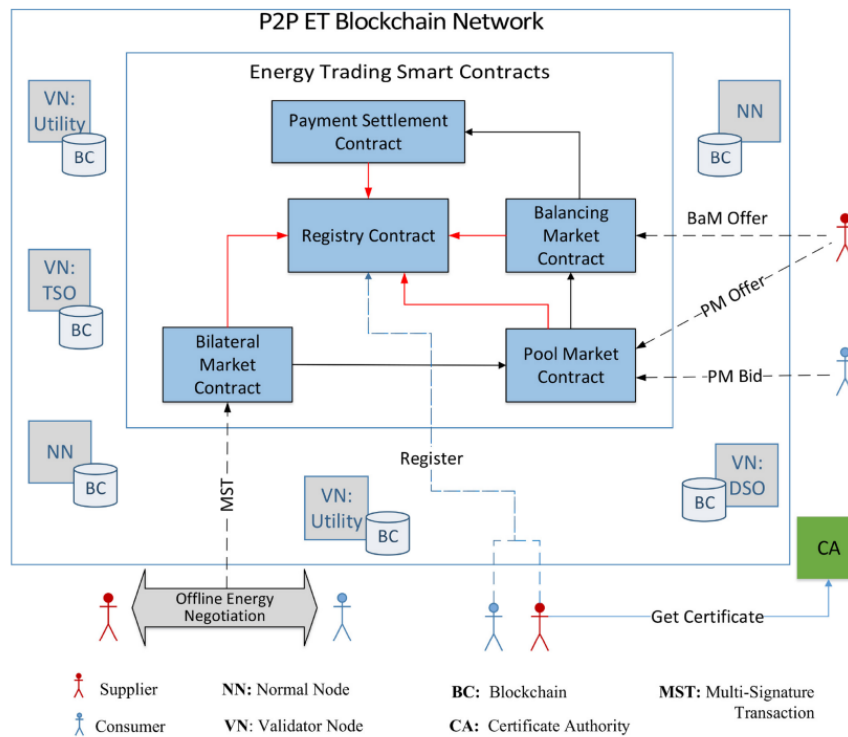


Figura 2.22: Arquitectura P2P-ET basada en Blockchain. Disponible en [25].

El artículo de revisión [26] explora las oportunidades que ofrece el Internet de la Energía (Energy Internet, EI) y la Red Eléctrica Inteligente 2.0 (Smart Grid 2.0, SG 2.0) para el comercio de energía distribuida P2P mediante el uso de la tecnología blockchain. El objetivo principal de SG 2.0 y EI es automatizar las operaciones innovadoras de la red eléctrica, pasando de un modelo centrado en el *operador de la red de distribución (DSO)* a uno centrado en el consumidor. El artículo destaca cómo blockchain puede mejorar la transparencia, el rendimiento general (incluyendo descentralización, escalabilidad y confiabilidad de los dispositivos) en el comercio de energía P2P, y aborda los retos y las orientaciones futuras del intercambio de energía basado en blockchain. También se examinan los problemas asociados con la integración de blockchain para garantizar el funcionamiento descentralizado, seguro y escalable de las redes eléctricas autónomas en el futuro.

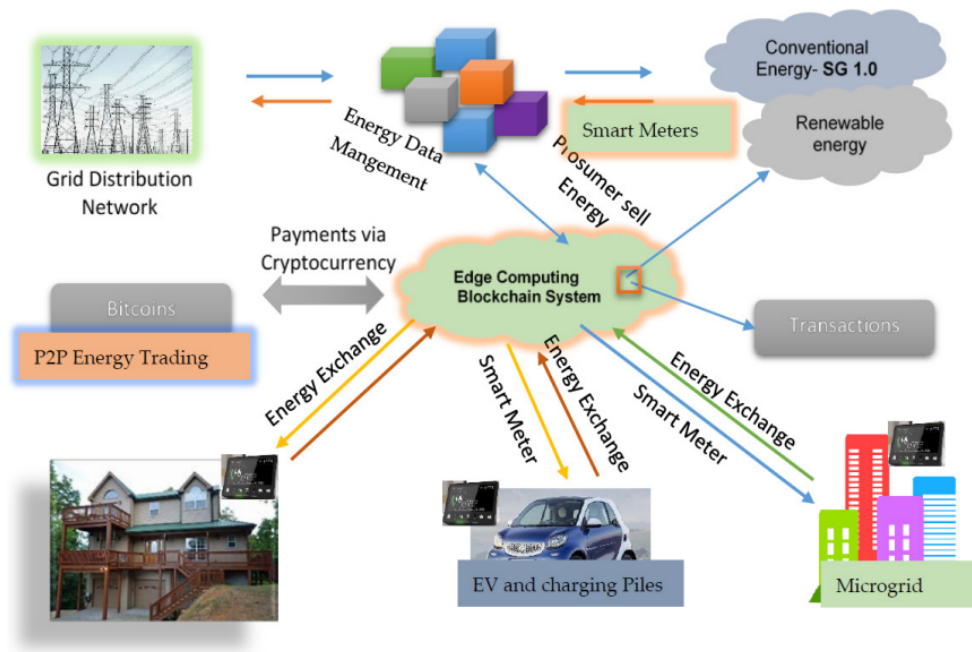


Figura 2.23: Estructura general de un sistema de distribución SG 2.0. Disponible en [26].

Visión General y Potencial del Blockchain en EVs

El artículo [27] propone un marco descentralizado de comercio de energía P2P de múltiples capas basado en blockchain para optimizar la coordinación de los recursos energéticos *distribuidos (DER)* dentro de una *planta de energía virtual (VPP)*. La arquitectura del modelo consta de un centro de control, prosumidores y operadores de servicio. Optimiza las ganancias de las tarifas de inyección, los servicios auxiliares y las ventas P2P, al tiempo que minimiza los gastos utilizando una formulación de programación lineal entera mixta. Los contratos inteligentes permiten a los prosumidores intercambiar fácilmente unidades de energía en la cadena de bloques de Ethereum a través de una plataforma web participativa. La eficacia del marco en la sincronización del suministro y la demanda de energía dentro de la VPP se demuestra coordinando la carga y descarga de los sistemas de almacenamiento de acuerdo con los patrones de consumo. El marco optimiza el uso de DER, mejorando la estabilidad de la red y la adopción de energías renovables frente a esquemas centralizados

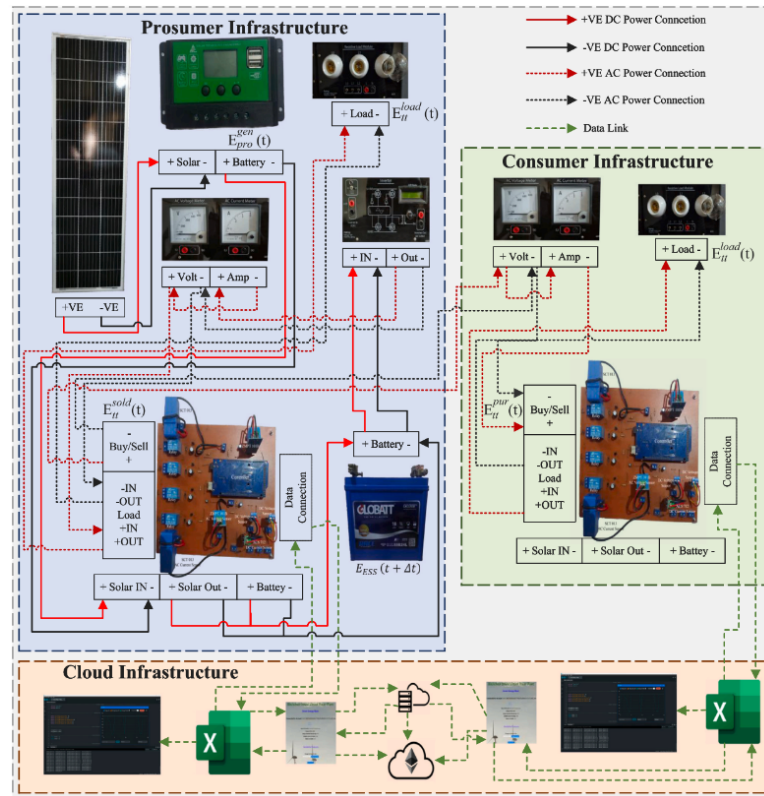


Figura 2.24: Configuración experimental. Disponible en [27].

El artículo [28] explora el uso de blockchain en vehículos eléctricos, destacando tanto los desafíos como las oportunidades. Las ventajas incluyen mejorar la seguridad y transparencia en áreas como la gestión de baterías, el comercio de energía P2P, y la autenticación del origen sostenible de la energía utilizada por estos vehículos. Sin embargo, también enfrenta desafíos técnicos relacionados con escalabilidad y velocidad de procesamiento, así como barreras regulatorias que pueden limitar su adopción generalizada. A pesar de estos obstáculos, las posibles ventajas sugieren un futuro prometedor donde blockchain podría jugar un papel crucial en optimizar operaciones sostenibles dentro del sector automotriz eléctrico.

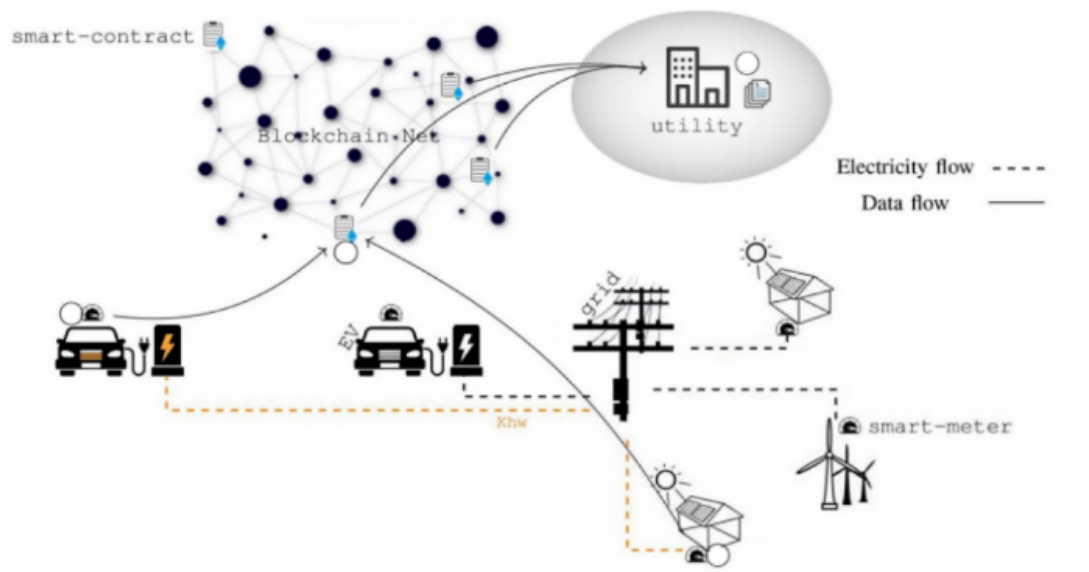


Figura 2.25: Panorama general de Blockchain y EVs. Disponible en [28].

A continuación, la Tabla 2.1 presenta un resumen comparativo de los artículos revisados. Se incluyen las referencias, año de publicación, contexto de aplicación, herramientas de blockchain utilizadas, si se implementa una *DApp (Decentralized Application)*, y otras tecnologías asociadas. Cabe destacar que las DApps son componentes fundamentales del ecosistema *Web3*, ya que permiten la interacción directa y descentralizada con la blockchain mediante tecnologías como Metamask o Remix, también mencionadas en la tabla.

Cuadro 2.1: Comparación de los diferentes acercamientos en el estado del arte

Ref	Año	Aplicación	Blockchain	Otras Tecnologías
[7]	2019	Comercio energético en PL de campus	Ethereum, SC	Web3, SQL
[8]	2024	Gestión de energía solar en PL	Ethereum	Web3, Hardhat
[9]	2021	PL con paneles solares para carga de EVs	N/A	IoT
[10]	2021	Gestión de carga en PL inteligentes	N/A	Sensor Network
[11]	2022	Planificación de carga en PL comerciales	Ethereum	Web3
[12]	2022	Comercio de energía P2P en comunidades remotas	Hyperledger	IoT, HTTP
[13]	2021	Pago y comercio de energía para EV	Ethereum	Web3, Ganache
[14]	2023	Comercio de energía P2P en EV	Ethereum, SC	SQL, DLT
[15]	2021	Servicios de carga en áreas urbanas	SC, Ethereum	Metamask, Web3
[16]	2022	Estrategias P2P para sistemas residenciales	SC	Remix, Ganache
[20]	2020	Gestión de baterías de vehículos eléctricos	Hyperledger, IoT	Web3
[21]	2023	Mercado de energía usando NFTs	NFTs, Ethereum	Ganache, Remix
[17]	2021	Comercio de energía usando aprendizaje automático	Hyperledger	Machine Learning, SQL
[18]	2023	Comercio de energía usando teoría de juegos cooperativos	NFTs	Web3, Ganache
[19]	2024	Gestión de microneces mediante blockchain jerárquico	Hyperledger	Remix, IoT
[22]	2019	Sistema seguro de carga para EV	Blockchain general	SQL
[23]	2021	Teoría de juegos para comercio de energía	Blockchain general	SQL
[24]	2022	Seguridad en redes inteligentes	N/A	Big Data, SQL
[25]	2021	Arquitectura P2P de comercio energético	Ethereum	Metamask, SQL
[26]	2022	Internet de la energía en redes inteligentes	Blockchain general	DLT
[27]	2024	Gestión energética en plantas virtuales	NFTs, Ethereum	Web3, Metamask
[28]	2024	Blockchain en EV	Solana	Remix, Hardhat
Our	2024	Marketplace energético para EVs en PLs	Hyperledger Besu, Quorum, SC	Metamask, Remix, Web3

Análisis crítico: En general, los estudios revisados muestran avances significativos en el desarrollo de plataformas energéticas P2P basadas en blockchain. Sin embargo, se observa que la mayoría de las propuestas se mantienen en un nivel teórico o de laboratorio, sin validación en entornos reales como estacionamientos inteligentes. Además, muy pocos trabajos integran de forma simultánea IoT, blockchain y una DApp funcional. A partir de estas brechas, esta memoria propone una solución que aborda directamente estos desafíos mediante la creación de una plataforma funcional y replicable con tecnologías como Hyperledger Besu, contratos inteligentes y MetaMask, aplicada a un escenario concreto y escalable.

Capítulo 3

Arquitectura Propuesta para EVel Park

3.1 Arquitectura del sistema

En esta sección se describe la solución propuesta para la gestión y el comercio de energía entre vehículos eléctricos en entornos de estacionamiento inteligente. La arquitectura fue diseñada considerando los desafíos identificados en capítulos anteriores, tales como la necesidad de trazabilidad, la descentralización de las transacciones y la participación activa de los usuarios como prosumidores.

Para abordar estos desafíos de forma eficiente, se adopta un enfoque basado en arquitectura por capas, que divide el sistema en infraestructuras físicas y cibernéticas. Esta separación facilita la escalabilidad, el mantenimiento y la integración de nuevas tecnologías, además de asegurar una operación segura y transparente.

A continuación, se presentan los distintos componentes que conforman esta arquitectura, junto con los diagramas que permiten visualizar su funcionamiento general.

3.1.1 Arquitectura por capas del sistema

La Figura 3.1 presenta el esquema de arquitectura del sistema propuesto para la gestión de energía en estacionamientos inteligentes. Este se estructura en dos infraestructuras principales: una infraestructura física, que abarca los componentes que interactúan con el entorno, y una infraestructura cibernética, que gestiona el procesamiento, comunicación y almacenamiento de datos.

Physical Infrastructure

Esta infraestructura identifica los componentes físicos, como las estaciones de carga y los vehículos eléctricos, a través de dispositivos inteligentes.

- **Parking Energy Layer:** En esta capa se encuentran los distintos actores que participan en las transacciones energéticas. Los vehículos pueden asumir tres estados diferentes:
 - *Buyer Electric Vehicle (BEV)*: Actor que desea comprar energía para su vehículo.
 - *Seller Electric Vehicle (SEV)*: Actor que desea vender energía de su vehículo.
 - *Non Participant Vehicle (NPV)*: Vehículo inactivo que puede estar estacionado sin necesidad de realizar una transacción energética.
- **IoT Devices:** También denominada capa de sensores (Sensing Layer), esta capa está compuesta por dispositivos IoT que recopilan información relevante desde la infraestructura física —como la presencia de vehículos, niveles de carga o estado de conexión— y la transmiten hacia las capas superiores para su procesamiento y almacenamiento.

Cyber Infrastructure

Esta infraestructura incluye los componentes responsables de recolectar los datos de la capa de IoT Devices y, mediante una tecnología de comunicación, enviarlos a la red blockchain. Desde allí, estos datos pueden ser consultados por la capa de servidores del sistema.

- **Communication Network Layer:** Incluye la infraestructura de red que permite la comunicación entre los dispositivos físicos de la Physical Infrastructure y el Centro Local de Estacionamiento (Parking Lots Local Center, PLLC).
- **Blockchain Layer:** Esta capa corresponde a la red blockchain del sistema, la cual opera bajo un modelo descentralizado tipo P2P. Su función principal es registrar de forma segura e inmutable las transacciones energéticas mediante contratos inteligentes (Smart Contracts). Cada operación queda almacenada en un bloque, lo que permite garantizar la trazabilidad, integridad y autenticidad de los datos, así como la correcta identificación de los actores involucrados.
- **System Servers:** En la capa superior se encuentran los servidores que gestionan los datos del sistema, incluyendo seguridad, almacenamiento y visualización. Aquí se despliega la DApp, que permite manejar los datos desde la blockchain y mostrarlos al usuario final. Dado que estos datos almacenados no requieren un gran impacto de almacenamiento en la red blockchain, no se considera necesario utilizar un sistema de almacenamiento externo, como puede ser un *IPFS (InterPlanetary File System)*. Por lo tanto, se emplea una red blockchain privada y descentralizada.

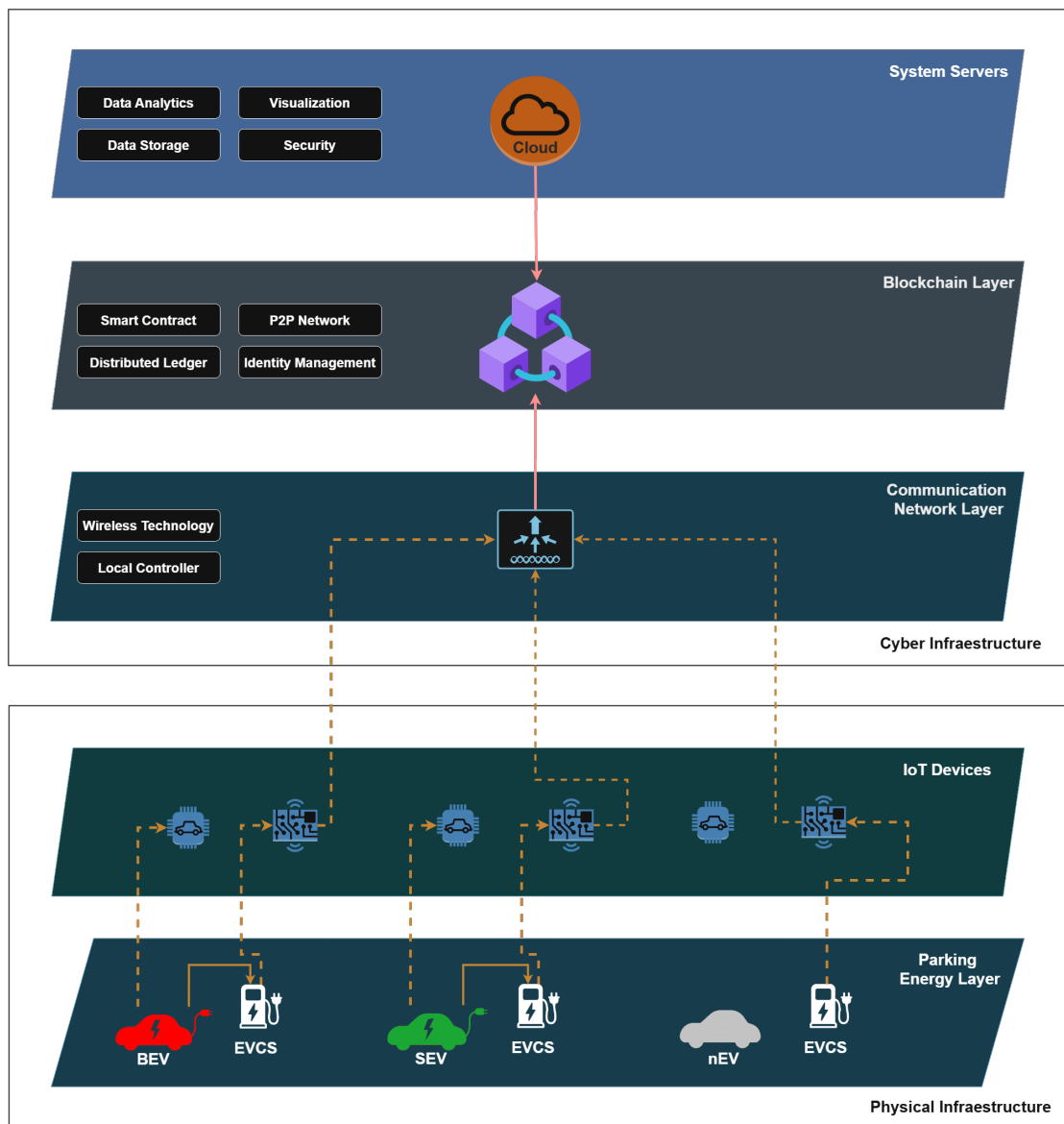


Figura 3.1: Arquitectura General EVel Park

3.1.2 Diagrama de Arquitectura general del sistema

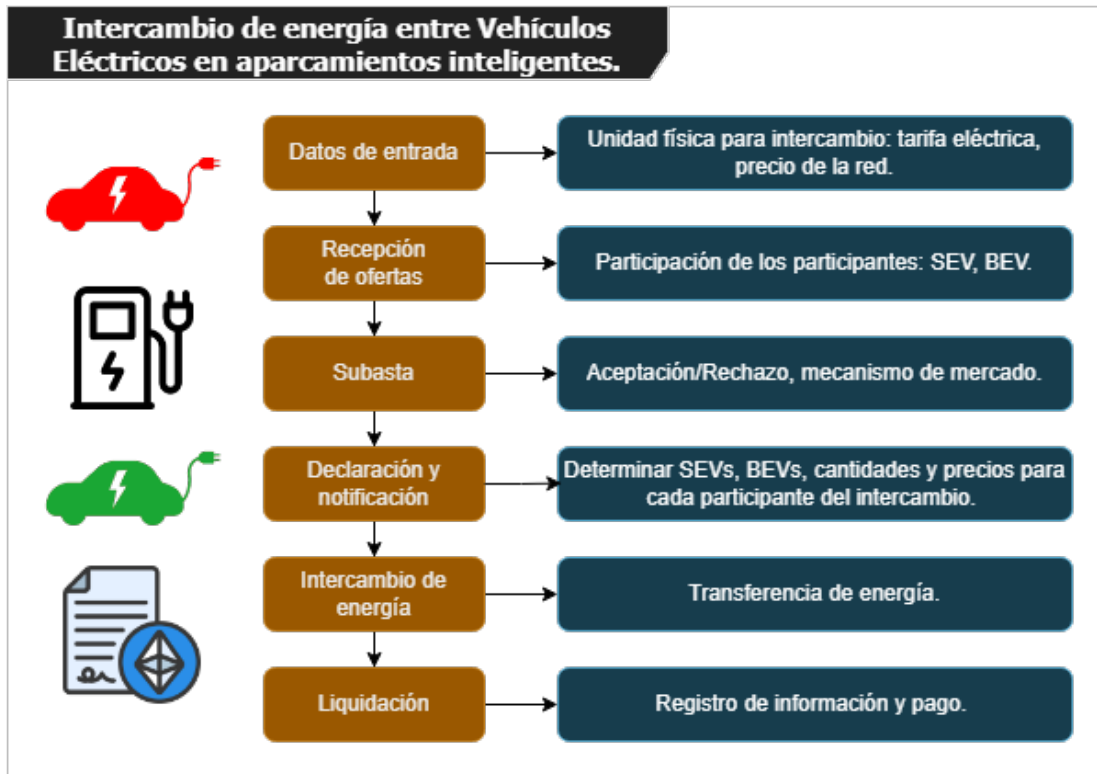


Figura 3.2: Diagrama de Arquitectura EVEL Park

El diagrama 3.2 muestra la estructura de las interacciones entre los componentes físicos y cibernéticos del sistema, destacando las capas necesarias para asegurar un flujo de datos eficiente y seguro. Este sistema permite la administración de transacciones de energía entre vehículos eléctricos en un entorno seguro y descentralizado.

La infraestructura de EVEL Park se centra en la interoperabilidad entre los dispositivos IoT, la red de blockchain y los servidores del sistema, asegurando que cada capa cumpla funciones específicas y colaborativas. A continuación, se presentan algunos aspectos clave de esta arquitectura general:

- **Conexión y Transmisión de Datos:** La infraestructura de comunicación, representada por la *Communication Network Layer*, es el núcleo que conecta la capa física (*IoT Devices* y *Parking Energy Layer*) con el sistema blockchain y los servidores. Esta

red debe tener baja latencia y alta disponibilidad para soportar la transmisión constante de datos de los dispositivos de estacionamiento a la blockchain y posteriormente a los usuarios a través de la DApp.

- **Seguridad y Autenticidad de Transacciones:** En el centro del sistema, la *Blockchain Layer* proporciona una capa de seguridad fundamental mediante el uso de contratos inteligentes, los cuales automatizan y aseguran la verificación de las transacciones de energía entre compradores y vendedores (*BEV* y *SEV*). Cada transacción es registrada en un bloque de la cadena, asegurando transparencia y confiabilidad en el registro histórico de interacciones dentro del sistema.
- **Gestión de Datos y Aplicación Descentralizada (DApp):** Los *System Servers* no solo actúan como intermediarios en la gestión de datos, sino que también ejecutan la lógica de negocio y sirven de puente para la interacción de los usuarios con la blockchain mediante la DApp. Esta aplicación permite a los usuarios monitorear en tiempo real sus balances, realizar transacciones de compra y venta de energía, y acceder a sus datos de cuenta, todo a través de una interfaz intuitiva.
- **Capacidades de Expansión y Escalabilidad:** El diseño modular de esta arquitectura permite que el sistema sea escalable y adaptable para incorporar nuevas estaciones de carga o gestionar un mayor número de transacciones. La infraestructura de red y los servidores pueden expandirse para soportar un volumen mayor de datos y usuarios, mientras que el uso de una blockchain privada facilita la adición de nodos y la adaptación de contratos inteligentes sin comprometer la descentralización del sistema.

Este enfoque por capas asegura que cada componente del sistema cumpla su función específica dentro de la arquitectura, permitiendo una operación eficiente y fiable de EVel Park, y ofreciendo una experiencia de usuario sólida en la gestión de transacciones energéticas para vehículos eléctricos.

3.1.3 Diagrama de secuencia

Los diagramas de secuencia presentados a continuación muestran el flujo de transacciones en el sistema de EVel Park, donde un vehículo eléctrico puede actuar como comprador (BEV) o como vendedor (SEV) de energía. En cada caso, se consideran dos posibles escenarios: una transacción fallida debido a fondos insuficientes y una transacción exitosa donde se completa la transferencia de fondos.

BEV: Buyer Electric Vehicle

Este diagrama representa el proceso en el que un BEV participa en una transacción de compra de energía dentro del sistema. El flujo inicia con la vinculación de la identidad del comprador y del vendedor, seguida por la validación de fondos. Se presentan dos casos posibles:

- **Compra fallida:** En caso de fondos insuficientes, el sistema notifica al comprador sobre la falla en la transacción.
- **Compra exitosa:** Si los fondos son suficientes, el sistema procede con la gestión del contrato inteligente, que incluye la firma y despliegue del contrato, finalizando con la transferencia de fondos.

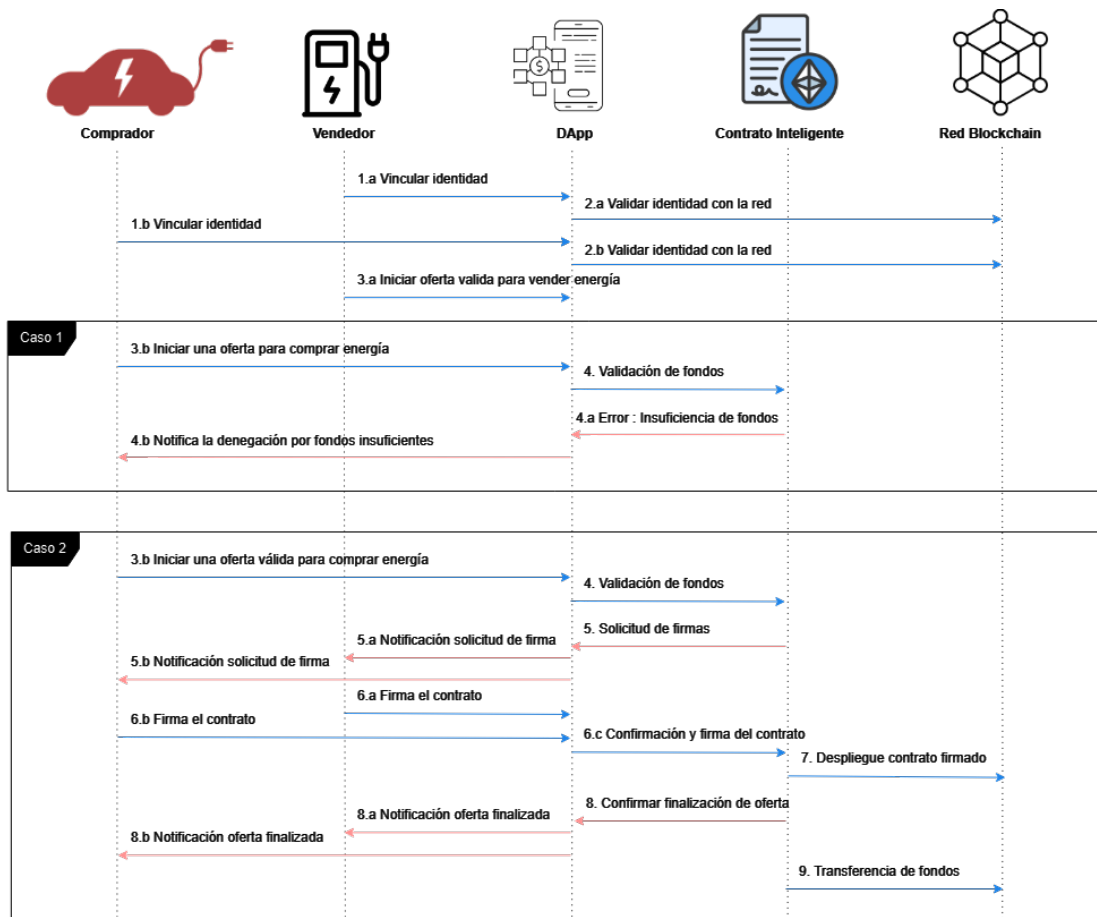


Figura 3.3: Diagrama de secuencia para un BEV.

SEV: Seller Electric Vehicle

Este diagrama representa el proceso en el que un SEV actúa como vendedor de energía dentro del sistema. El flujo comienza con la vinculación de la identidad del comprador y del vendedor, seguida por la validación de fondos. Se presentan dos escenarios posibles:

- **Venta fallida:** Si el comprador no dispone de fondos suficientes, el sistema lo notifica y la transacción no se completa.
- **Venta exitosa:** Si los fondos son suficientes, el contrato inteligente gestiona la firma y el despliegue del contrato, permitiendo la transferencia de fondos al SEV y finalizando la transacción de manera segura.

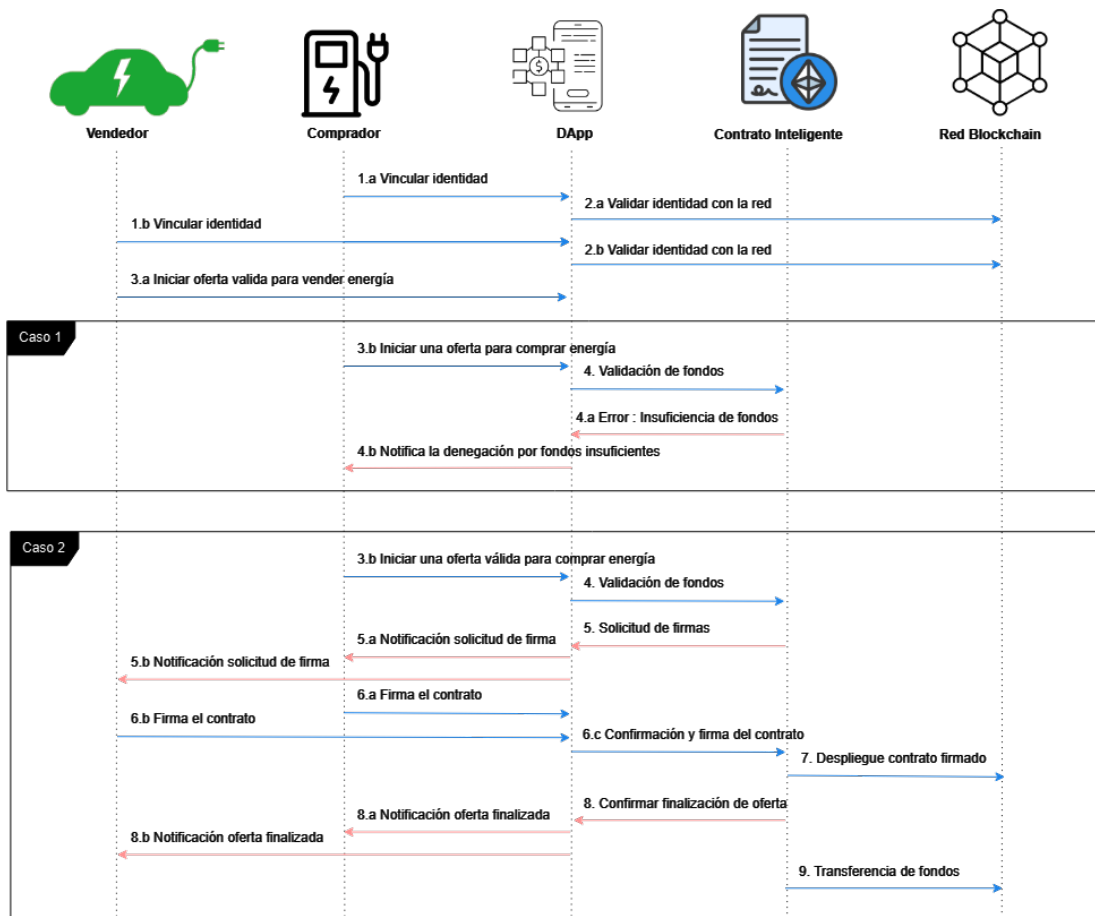


Figura 3.4: Diagrama de secuencia para un SEV.

3.2 Requisitos del Sistema

3.2.1 Requisitos Funcionales

- **RF1 - Registro de Usuarios:** El sistema debe permitir a los usuarios registrarse con sus datos personales y crear una cuenta. Esto incluye la validación de correos electrónicos y la gestión de contraseñas.
- **RF2 - Gestión de Transacciones:** El sistema debe facilitar la compra y venta de energía entre los usuarios, incluyendo la creación, seguimiento y verificación de transacciones de energía.
- **RF3 - Seguridad de la Plataforma:** El sistema debe implementar funciones de autenticación y autorización de usuarios, y encriptación de datos para asegurar todas las transacciones y la información sensible.
- **RF4 - Visualización de Datos en Tiempo Real:** El sistema debe proporcionar a los usuarios la capacidad de ver datos actualizados en tiempo real sobre sus transacciones y consumo de energía.
- **RF5 - Generación de Informes:** El sistema debe generar informes detallados sobre las transacciones de energía, el uso de la plataforma y el estado de la cuenta del usuario.
- **RF6 - Integración con Blockchain:** El sistema debe integrar una blockchain para registrar y verificar todas las transacciones de energía, asegurando transparencia y seguridad.
- **RF7 - Compatibilidad Móvil:** El sistema debe ser accesible y funcional en dispositivos móviles, permitiendo a los usuarios gestionar sus cuentas y transacciones desde cualquier lugar.

3.2.2 Requisitos No Funcionales

- **RNF1 - Rendimiento:** El sistema debe ser capaz de manejar un alto volumen de transacciones simultáneas sin degradar el rendimiento.
- **RNF2 - Disponibilidad:** El sistema debe estar disponible para los usuarios el 99.9% del tiempo, asegurando mínima interrupción del servicio.
- **RNF3 - Usabilidad:** El sistema debe ser intuitivo y fácil de usar, con interfaces claras y sencillas que faciliten la interacción del usuario.
- **RNF4 - Escalabilidad:** El sistema debe ser escalable para soportar un crecimiento en el número de usuarios y transacciones sin necesidad de una reestructuración significativa.
- **RNF5 - Seguridad:** El sistema debe implementar medidas robustas de seguridad para proteger los datos del usuario y garantizar la integridad de las transacciones, incluyendo resistencia a ataques cibernéticos y cumplimiento de normativas de seguridad.
- **RNF6 - Interoperabilidad:** El sistema debe ser compatible con otros sistemas de gestión de energía y plataformas de blockchain, facilitando la integración y la cooperación entre diferentes servicios.

3.2.3 Requisitos de Ambiente

- **RA1 - Servidor Web:** Necesario para alojar la aplicación web móvil y los servicios API que gestionarán las transacciones energéticas entre los vehículos eléctricos. Este servidor será el punto central de acceso para los usuarios y permitirá la gestión de las interacciones con la red blockchain.
- **RA2 - Conexión a Internet:** Fundamental para la comunicación entre los diferentes componentes del sistema, asegurando la sincronización de datos, la interacción con la red blockchain, y el acceso continuo a los servicios desde cualquier ubicación.

- **RA3 - Entorno de Pruebas:** Se implementará un entorno controlado que simulará las condiciones de un estacionamiento inteligente, incluyendo simuladores de EV y EVCS. Este entorno será clave para probar las transacciones energéticas en condiciones reales.
- **RA4 - Medidas de Seguridad:** El sistema debe incorporar medidas robustas de seguridad, como autenticación y autorización, cifrado de datos, y protección contra ataques cibernéticos. Esto garantizará la integridad y confidencialidad de las transacciones energéticas dentro del sistema.
- **RA5 - Disponibilidad del Sistema:** El diseño del sistema debe asegurar una alta disponibilidad, minimizando el tiempo de inactividad y garantizando que los usuarios puedan realizar transacciones en cualquier momento. La infraestructura debe ser resiliente y capaz de escalar según la demanda.
- **RA6 - Red Blockchain:** Se desplegará una red blockchain con cuatro nodos Quorum soportados por Hyperledger Besu utilizando Docker bajo consenso IBFT 2.0. Estos nodos serán el núcleo del sistema, procesando y registrando todas las transacciones energéticas. Además, se utilizarán herramientas de desarrollo como Remix para desplegar y gestionar contratos inteligentes.
- **RA7 - MetaMask:** Los usuarios interactúan con la red blockchain mediante MetaMask, una extensión de navegador que permitirá la compra y venta de energía desde sus billeteras de manera segura y sencilla.
- **RA8 - Monitorización y Registro:** Se implementarán herramientas de monitorización para supervisar el rendimiento del sistema y registrar todas las actividades. Esto permitirá una rápida detección y resolución de problemas, asegurando que el sistema funcione de manera óptima en todo momento.

3.3 Software de Desarrollo

Las siguientes tecnologías han sido seleccionadas después de un análisis del estado del arte y el diseño de la arquitectura de la solución:

3.3.1 Entorno de Desarrollo Integrado (IDE):

- Visual Studio Code: Un entorno de desarrollo altamente personalizable y popular que soporta múltiples lenguajes de programación. Ofrece una amplia gama de extensiones que mejoran la experiencia de desarrollo, permitiendo un flujo de trabajo eficiente.
- Remix: Un IDE especializado en el desarrollo de contratos inteligentes para Ethereum y compatible con la red Hyperledger Besu. Permite conectar a la blockchain, desarrollar, probar y desplegar los smart contracts directamente en la red.

3.3.2 Control de Versiones:

- Git: Un sistema de control de versiones distribuido ampliamente utilizado para rastrear cambios en el código fuente durante el desarrollo del proyecto. Se puede utilizar junto con plataformas de alojamiento de repositorios como GitHub o GitLab para colaboración y gestión de código.

3.3.3 Lenguajes de Programación y Frameworks:

- Python: Utilizado para el desarrollo de scripts y la implementación de la lógica de negocio en diferentes componentes del sistema.
- Solidity: Lenguaje principal para el desarrollo de contratos inteligentes. Los smart contracts serán desarrollados y probados en Remix, para luego desplegarse en la red Hyperledger Besu.

3.3.4 Herramientas de Desarrollo Adicionales:

- Postman: Herramienta de colaboración para el desarrollo y prueba de APIs. Permite enviar solicitudes HTTP y probar la interacción con los servicios backend del sistema, facilitando el desarrollo y depuración de las APIs.
- Docker: Plataforma que permite la creación, implementación y ejecución de aplicaciones en contenedores, asegurando un entorno de desarrollo consistente y facilitando la portabilidad del software.
- Docker Compose: Complemento de Docker que permite definir y ejecutar aplicaciones multicontenedor, facilitando la configuración y gestión del entorno completo del sistema en contenedores.

Capítulo 4

Diseño de Arquitectura del Sistema

4.1 Diagrama de Flujo

La Figura 4.1 presenta el diagrama de flujo del proceso de comercio de energía local entre EVs y PLLC. En este esquema se identifican tres actores principales: la **red de distribución (DSO)**, el PLLC como intermediario del mercado, y los propietarios de EV. El proceso inicia con el registro del EV y la decisión del usuario de participar en la subasta energética. El mecanismo de mercado utilizado es una subasta ascendente, en la cual los participantes envían ofertas de compra o venta de energía, y el PLLC determina los resultados de acuerdo con las reglas del sistema. Finalmente, se realiza la verificación de mediciones, la liquidación de transacciones y el pago. El flujo contempla también factores como la demanda del campus universitario y la tarifa eléctrica vigente, integrando información en tiempo real para asegurar eficiencia y trazabilidad.

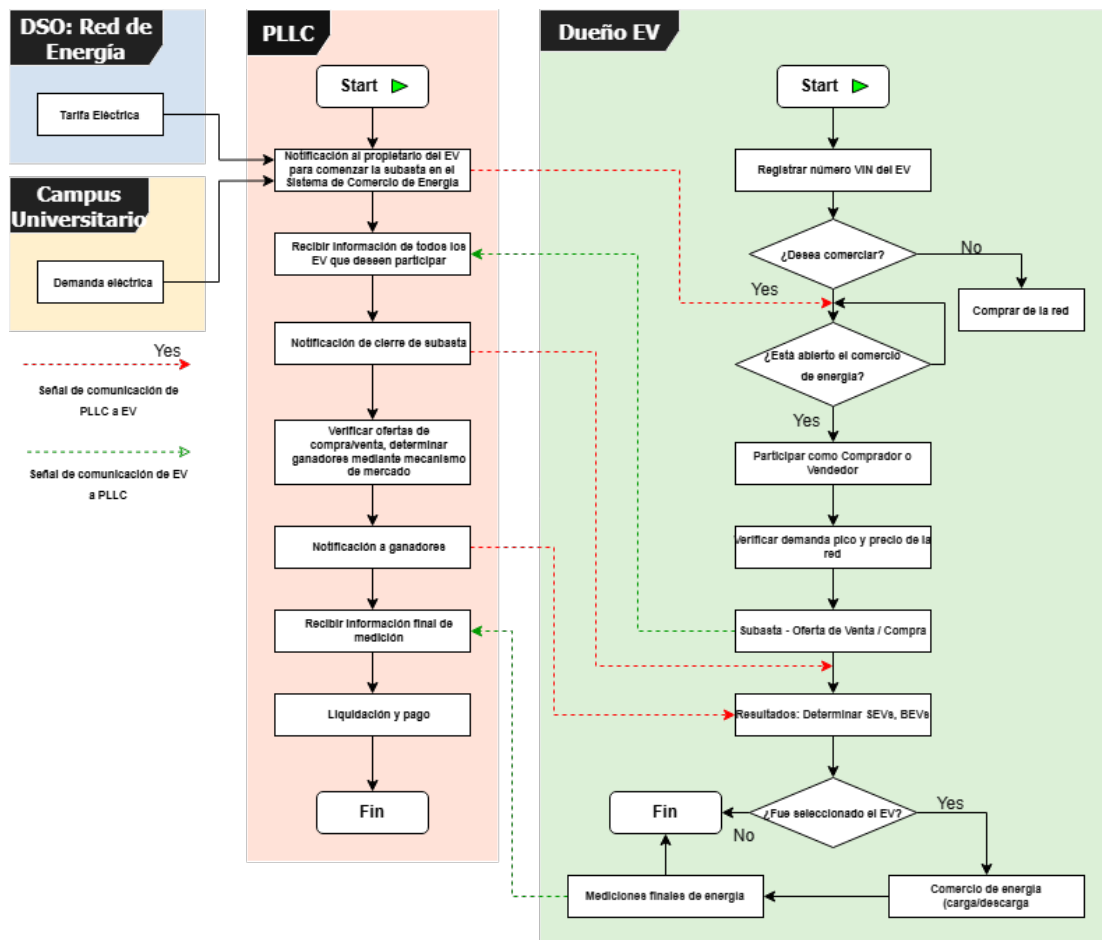


Figura 4.1: Diagrama de flujo de la plataforma de comercio de energía propuesta. VIN: Número de identificación del vehículo.

4.2 Diagrama de Arquitectura red Blockchain Privada

El diagrama 4.2 muestra de manera simple el proceso de comunicación entre la red Blockchain y el resto de componentes, en donde tenemos:

- Una red de nodos que utilizan el protocolo de consenso **IBFT 2.0 (Istanbul Byzantine Fault Tolerance)**, lo cual asegura que la red es tolerante a fallos y tiene seguridad en la confirmación de transacciones. Esta arquitectura de nodos en cuadrado simboliza la estructura de la red, donde cada nodo es parte del proceso de consenso. Además, esta red se está ejecutando en contenedores, lo que facilita la configuración, despliegue y escalabilidad de los nodos. Docker permite encapsular cada nodo en un contenedor, facilitando el despliegue y administración de la red blockchain en diferentes entornos.
- Conexión hacia MetaMask, los usuarios pueden interactuar con la blockchain a través de esta wallet, permitiéndoles acceder y gestionar sus fondos. MetaMask actúa como una interfaz para que los usuarios firmen transacciones y accedan a la red de forma segura.
- Se tienen los contratos inteligentes que son desplegados en la red a través de una conexión entre Remix y MetaMask, los contratos gestionan las reglas del negocio y el flujo de transacciones de energía en el sistema. Estos contratos están alojados en la blockchain y controlan las interacciones entre los usuarios.
- La aplicación descentralizada se comunica tanto con MetaMask como con los smart contracts en la blockchain, permitiendo que los usuarios puedan interactuar con la red y realizar transacciones energéticas. La DApp actúa como la interfaz de usuario donde se inician las transacciones de compra y venta de energía.

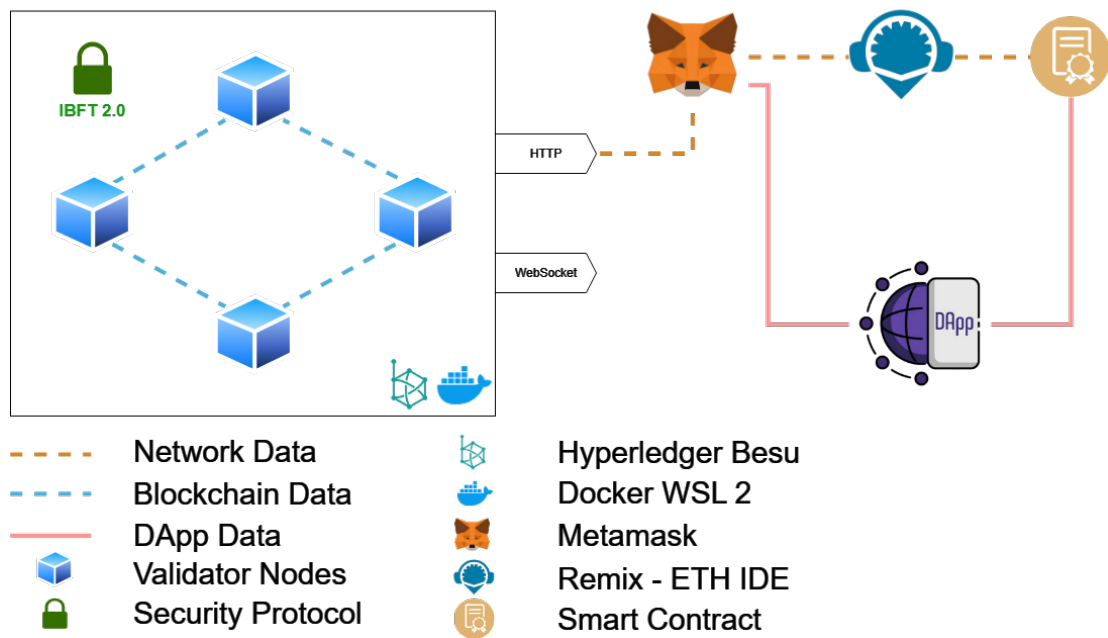


Figura 4.2: Diagrama Arquitectura red Blockchain y sus interacciones con componentes externos

4.3 Diagrama de Transacciones en el Marketplace

El diagrama 4.3 muestra el flujo de transacciones dentro del Marketplace de energía en EVelPark, donde los usuarios (compradores y vendedores de energía) interactúan a través de la DApp. El sistema utiliza MetaMask para la firma de contratos y asegura la ejecución de las transacciones en la blockchain.

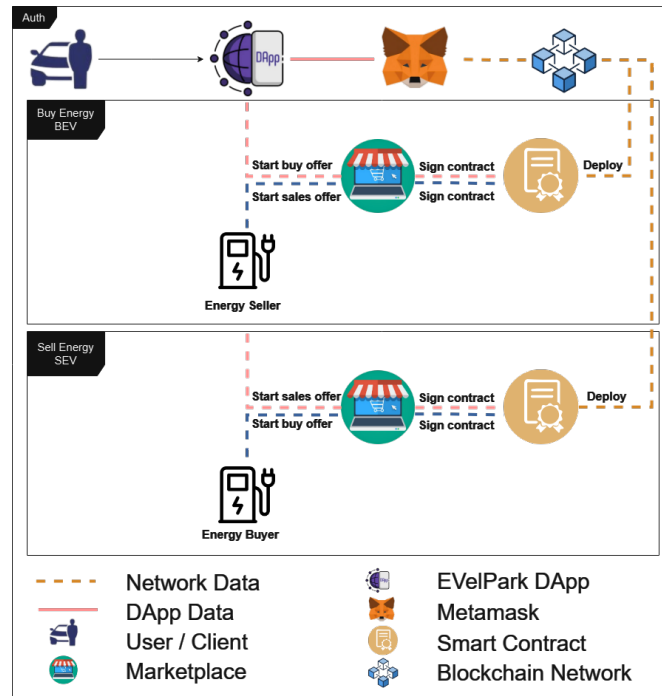


Figura 4.3: Flujo de transacciones en el Marketplace de energía para vehículos eléctricos

En el diagrama, se muestran dos casos de uso principales:

- **Compra de energía (BEV como comprador):** donde el comprador inicia la oferta y, tras la verificación de fondos y la firma del contrato, se realiza la transacción.
- **Venta de energía (SEV como vendedor):** donde el vendedor establece la oferta y sigue un flujo similar para completar la transacción.

Cada paso del flujo asegura la seguridad y transparencia del proceso, desde la validación de fondos hasta el despliegue en la red blockchain.

4.4 Enumeración de Módulos

La Tabla 4.1 muestra cómo módulos las secciones presentadas en la Figura 4.2. Por cada módulo se entrega un breve párrafo descriptivo de su propósito, además de la sección en donde se especifica el módulo en detalle.

Cuadro 4.1: Módulos de la arquitectura del sistema

Módulo	Propósito	Sección
M1. Red Blockchain	Desplegar una red blockchain que permita transacciones seguras y transparentes entre usuarios del marketplace, con: • Red P2P: Intercambio directo entre compradores y vendedores. • Cadena de bloques: Registro inmutable de todas las transacciones.	Capa Cibernética → Subcapa Blockchain
M2. Smart Contract	Desarrollar contratos inteligentes para facilitar y automatizar la compraventa de energía en la red blockchain.	Capa Cibernética → Subcapa Blockchain
M3. Identificación	Gestionar identidades digitales para autenticar usuarios y transacciones, mediante: • Gestión de identidades: Administración y verificación de usuarios.	Capa Cibernética → Subcapa Blockchain
M4. Frontend	Desarrollar una interfaz móvil con Next.js que permita a los usuarios: • Comprar y vender energía. • Monitorear su consumo. • Gestionar su cuenta.	Capa Cibernética → Subcapa Aplicación
M5. API Backend	Crear una API en Node.js para conectar los contratos inteligentes con la base de datos y gestionar las operaciones de usuario. Funciones principales: • Alojamiento en la nube. • Gestión segura y escalable de solicitudes.	Capa Cibernética → Subcapa Aplicación

4.5 Matriz de Requisitos Funcionales y Módulos

En el Cuadro 4.2 se muestra cómo cada uno de los módulos del sistema contribuye al cumplimiento de los distintos requisitos funcionales definidos en la etapa de análisis, facilitando así la validación de la arquitectura propuesta.

Cuadro 4.2: Matriz de requisitos funcionales y módulos

Requisito Funcional	M1	M2	M3	M4	M5
Registro de Usuarios		X	X		
Gestión de Transacciones	X			X	X
Seguridad de la Plataforma	X			X	
Visualización de Datos en Tiempo Real				X	X
Generación de Informes					X
Integración con Blockchain		X		X	X
Compatibilidad Móvil				X	X

4.6 Diseño Modular Propuesto

4.6.1 Módulo Red Blockchain

En el Cuadro 4.3 se describe el módulo correspondiente a la red blockchain, encargado de establecer la base tecnológica para garantizar la seguridad, trazabilidad y descentralización de las transacciones energéticas en el sistema.

Cuadro 4.3: Descripción del Módulo Red Blockchain

Categoría	Descripción
Propósito	Este módulo se encarga del despliegue de una red Blockchain que facilita transacciones seguras y transparentes en el mercado de energía.
Alcance	El módulo M1 opera en la capa cibernética, específicamente en la subcapa Blockchain, donde se procede a crear una red P2P que permite a los usuarios intercambiar energía directamente mediante una cadena de bloques para registrar todas las transacciones de energía.
Dependencias	Este módulo depende de la infraestructura de red y los nodos de la Blockchain, pero puede operar independientemente de los contratos inteligentes y los sistemas de gestión de datos.
Supuestos	Los participantes de la red Blockchain son entidades confiables. Se dispone de los recursos necesarios para desplegar y mantener los nodos de la red Blockchain.
Restricciones	La red debe ser segura contra ataques y manipulaciones. Debe cumplir con las normativas legales para el intercambio de energía.
Estructura General	Red P2P: Implementación de nodos, protocolo de comunicación y mecanismos de consenso. Cadena de Bloques: Configuración de la estructura de bloques, protocolo de consenso y registro de transacciones.

4.6.2 Módulo Smart Contract

El Cuadro 4.4 presenta el módulo de contratos inteligentes, cuya función principal es automatizar el proceso de compra y venta de energía mediante reglas de negocio codificadas y ejecutadas en la red blockchain.

Cuadro 4.4: Descripción del Módulo Smart Contract

Categoría	Descripción
Propósito	Este módulo se centra en desarrollar un contrato inteligente para automatizar la compra y venta de energía en la red Blockchain.
Alcance	Crear y desplegar contratos inteligentes que automaticen las transacciones de energía entre usuarios, generando una estructura para las transacciones.
Dependencias	Depende del módulo 1 correspondiente a la Red Blockchain para el despliegue y ejecución del contrato, pero puede desarrollarse en paralelo a otros módulos.
Supuestos	Los usuarios entienden y aceptan las condiciones del contrato.
Restricciones	Los contratos deben ser seguros y sin errores que puedan ser explotados. Deben ser auditables para garantizar la transparencia de las transacciones.
Estructura General	Desarrollo del Contrato: Programación en un lenguaje compatible con la Blockchain, como Solidity. Despliegue del Contrato: Implementación en la red Blockchain y pruebas de funcionalidad a través de Remix Ethereum IDE.

4.6.3 Módulo Identificación

En el Cuadro 4.5 se detalla el módulo de identificación, responsable de gestionar la autenticación y verificación de los usuarios mediante identidades digitales y herramientas como MetaMask, asegurando que solo participantes válidos accedan al sistema.

Cuadro 4.5: Descripción del Módulo Gestión de Identidades

Categoría	Descripción
Propósito	Este módulo establece métodos para identificar vendedores y compradores en la red Blockchain.
Alcance	Crear y gestionar identidades digitales para los usuarios del sistema. El sistema debe asegurar que todas las transacciones sean realizadas por usuarios autenticados mediante una billetera virtual. Para ello, se implementa la funcionalidad de MetaMask para que los usuarios puedan gestionar sus identidades y firmar transacciones de manera segura.
Dependencias	Depende del módulo 1 correspondiente a la Red Blockchain, para almacenar y verificar identidades. Además de depender de MetaMask para la gestión de identidades digitales y la firma de transacciones.
Supuestos	Los usuarios se familiarizan con el uso de MetaMask. MetaMask es compatible con la red Blockchain utilizada en el proyecto (Hyperledger Besu). Los mecanismos de autenticación de MetaMask son adecuados para las necesidades del sistema.
Restricciones	Los datos de identificación deben ser seguros y protegidos contra accesos no autorizados. MetaMask debe ser configurado para garantizar la privacidad de las identidades digitales; además, la integración con MetaMask debe ser compatible con la versión de la red Blockchain utilizada.
Estructura General	Gestión de Identidades: Los usuarios se registran en la red Blockchain mediante MetaMask, creando una dirección digital única para cada usuario. Los usuarios son verificados mediante MetaMask, asegurando que las direcciones digitales estén asociadas con identidades válidas y verificadas. Autenticación de Transacciones: Los usuarios utilizan MetaMask para firmar transacciones de compra y venta de energía. Las transacciones firmadas con MetaMask son verificadas por la red Blockchain para garantizar su validez. Integración con MetaMask: Integrar MetaMask en la aplicación web móvil a través de una interfaz donde se permita a los usuarios conectar sus billeteras y así gestionar sus identidades y firmar transacciones.

4.7 Gestión de Riesgos

4.7.1 Supuestos

- **Disponibilidad de Red Eléctrica Estable:** Se asume que hay un suministro constante y confiable de electricidad provenientes de baterías en las EVCSs.
- **Conectividad de Internet:** Se asume que tanto los puntos de carga como los usuarios están conectados a internet para comunicarse con la DApp y la blockchain.
- **Capacidad de Procesamiento:** Se cuenta con suficiente capacidad de procesamiento y almacenamiento en la red para manejar los datos y transacciones de blockchain.
- **Seguridad de la Información:** Se asume que la plataforma tiene medidas de seguridad adecuadas para proteger los datos de los usuarios y las transacciones en la blockchain.
- **Transferencia de Energía a través de EVCS:** Se considera que el movimiento eléctrico siempre pasa por la EVCS ya sea un BEV o un SEV, es decir, no se puede transferir energía directamente entre EV.
- **Desarrollo en Ambiente de Laboratorio:** Se desarrollará el sistema en un ambiente controlado, es decir, no se cuenta con actores reales como un EV o una EVCS como tal.

4.7.2 Dependencias

- **Infraestructura de Red Eléctrica:** Dependencia de la infraestructura eléctrica del PL para el suministro de energía a los puntos de carga.
- **Proveedor de Servicios Blockchain:** Dependencia de una infraestructura adecuada o proveedor que facilite la implementación y gestión de la red blockchain.
- **Tecnología Blockchain:** Dependencia de la tecnología blockchain para la gestión de transacciones y seguridad de los datos.
- **Uso de MetaMask:** Dependencia de esta billetera digital para autenticar a los usuarios, gestionar sus identidades y firmar transacciones dentro del sistema.

- **Proveedores de Equipos de Carga:** Dependencia de fabricantes y proveedores de estaciones de carga para la instalación y mantenimiento del hardware.
- **Regulaciones Gubernamentales:** Dependencia de las normativas y regulaciones locales que afectan la instalación y operación de estaciones de carga y el uso de tecnologías de blockchain.

4.7.3 Restricciones

- **Capacidad de los puntos de carga:** La potencia máxima disponible puede verse limitada por la infraestructura eléctrica existente y las especificaciones técnicas de los cargadores instalados.
- **Latencia de la red:** La latencia en la red de internet puede afectar la eficiencia en la comunicación entre vehículos, estaciones de carga, servicios en la nube y la red blockchain.
- **Escalabilidad de la blockchain:** La red blockchain podría enfrentar limitaciones en el procesamiento simultáneo de un alto volumen de transacciones, lo que impactaría en el rendimiento general del sistema.
- **Costos de implementación y mantenimiento:** La instalación y operación de la infraestructura de carga, servicios en la nube y tecnologías blockchain pueden requerir una inversión considerable.
- **Seguridad y privacidad:** Existen restricciones vinculadas a la protección de datos sensibles de los usuarios y la privacidad de las transacciones almacenadas en la blockchain, las cuales deben cumplir con normativas vigentes.

4.7.4 Riesgos

En el Cuadro 4.6 se identifican los principales riesgos asociados al diseño e implementación del sistema propuesto. Cada riesgo incluye una descripción, su posible impacto en la operación del sistema y las medidas de mitigación recomendadas para reducir su probabilidad o severidad. Esta evaluación es clave para anticipar escenarios críticos y garantizar la resiliencia del sistema ante eventos imprevistos.

Cuadro 4.6: Riesgos del sistema

Riesgo	Medida de mitigación
1. Interrupciones en el suministro eléctrico Descripción: Fallas en la red eléctrica pueden afectar la disponibilidad de los puntos de carga. Impacto: Los usuarios no podrán cargar sus vehículos, afectando su movilidad y confianza en el sistema.	Generadores de respaldo: Equipar las estaciones de carga con baterías o generadores para mantener la operación ante cortes de energía. Fuentes de energía alternativas: Integrar paneles solares u otras energías renovables para reducir la dependencia de la red.
2. Fallos en la conectividad a internet Descripción: La pérdida de conexión puede interrumpir la comunicación entre vehículos, puntos de carga, la nube y la blockchain. Impacto: Se dificulta la gestión de carga y el registro de transacciones, provocando retrasos y posible pérdida de datos.	Redundancia de conexión: Contar con múltiples proveedores o enlaces alternativos para asegurar continuidad del servicio. Modo offline: Habilitar funcionalidades básicas sin conexión y sincronización posterior con la red.
3. Ataques cibernéticos Descripción: Posibles ataques a la infraestructura de red, servicios en la nube o la blockchain. Impacto: Riesgo de robo de información, manipulación de transacciones o interrupciones del servicio.	Seguridad en capas: Implementar firewalls, detección de intrusos y cifrado de datos. Auditorías periódicas: Realizar evaluaciones de seguridad y pruebas de penetración para detectar vulnerabilidades.
4. Limitaciones de escalabilidad de la blockchain Descripción: La red blockchain podría no soportar altos volúmenes de transacciones simultáneas. Impacto: Aumentos en la latencia y degradación de la experiencia de usuario.	Optimización de transacciones: Usar canales de pago o agrupación de operaciones para reducir carga. Tecnologías complementarias: Aplicar sidechains o soluciones de segunda capa para mejorar el rendimiento.
5. Fallas en la infraestructura de carga Descripción: Fallos técnicos en estaciones de carga pueden afectar la operación continua del sistema. Impacto: Indisponibilidad del servicio para los usuarios y pérdidas operativas.	Mantenimiento preventivo: Establecer rutinas de revisión y monitoreo en tiempo real. Contratos de soporte: Acordar servicios técnicos con proveedores para garantizar tiempos de respuesta rápidos.
6. Cambios en regulaciones gubernamentales Descripción: Nuevas normativas pueden afectar la operación de tecnologías de carga y blockchain. Impacto: Requiere ajustes operacionales o técnicos, con riesgo de sanciones o suspensión temporal.	Monitoreo regulatorio: Seguir de cerca las actualizaciones legales y participar en foros del sector. Arquitectura flexible: Diseñar el sistema de forma adaptable a nuevos requisitos normativos.
7. Problemas de compatibilidad Descripción: Incompatibilidades entre ciertos modelos de vehículos eléctricos y estaciones de carga. Impacto: Limitación en el acceso al servicio y reducción de usabilidad para algunos usuarios.	Estándares universales: Adoptar protocolos de carga compatibles con múltiples fabricantes. Actualizaciones constantes: Mantener el software de carga actualizado para nuevas tecnologías vehiculares.

Capítulo 5

Implementación y Evaluación del Sistema

5.1 Validación

La validación asegura que la solución basada en blockchain cumple con los objetivos del proyecto. Se enfoca en garantizar que la red blockchain, los contratos inteligentes y la gestión de identidades sean funcionales, seguras y escalables.

Plan de Validación

- **Objetivos:**

- Validar que la red blockchain registra transacciones energéticas correctamente y con baja latencia.
- Confirmar que los contratos inteligentes ejecutan las reglas de negocio previstas.
- Asegurar que la gestión de identidades protege adecuadamente los datos de los usuarios.

- **Métodos:**

- *Pruebas de Usabilidad de la Red Blockchain:* Simular transacciones entre nodos para verificar la funcionalidad y la generación correcta de bloques.

- *Validación de Contratos Inteligentes*: Probar escenarios reales de compra y venta de energía para confirmar la correcta ejecución de las transacciones.
- *Revisión con Stakeholders*: Validar si las funcionalidades cumplen con los objetivos definidos en conjunto con los interesados del proyecto.
- **Criterios de Aceptación:**
 - La red blockchain registra transacciones de manera consistente y eficiente.
 - Los contratos inteligentes operan según las reglas definidas y garantizan la seguridad.
 - Las identidades son gestionadas de manera segura y compatible con MetaMask.

5.2 Verificación

La verificación se centra en evaluar si los módulos de blockchain funcionan correctamente y cumplen con los requisitos técnicos.

Plan de Verificación

- **Objetivos:**
 - Garantizar que cada módulo de blockchain funciona como se especifica.
 - Confirmar que las transacciones son seguras y transparentes.
- **Métodos:**
 - *Pruebas Unitarias*: Evaluar la funcionalidad de los contratos inteligentes, como transferencias de tokens y validación de identidades.
 - *Pruebas de Integración*: Verificar la interacción entre la red blockchain, contratos inteligentes y el sistema de gestión de identidades.
 - *Pruebas de Rendimiento*: Medir la latencia y el throughput de la red blockchain bajo cargas de transacciones simuladas.
 - *Pruebas de Seguridad*: Realizar análisis de vulnerabilidades en contratos inteligentes (e.g., ataques de reingreso, desbordamientos).

- **Criterios de Aceptación:**

- Los módulos pasan las pruebas unitarias y de integración sin errores.
- La red blockchain gestiona transacciones concurrentes con un rendimiento aceptable.
- Los contratos inteligentes son auditables y libres de vulnerabilidades críticas.

5.3 Casos de Prueba Críticos

- **Autenticación de Usuarios con MetaMask:** Validar la autenticación de usuarios mediante MetaMask para garantizar que solo usuarios autorizados puedan acceder al sistema. Si este proceso falla, los usuarios no podrán iniciar sesión ni realizar transacciones energéticas, comprometiendo el acceso y la seguridad.
- **Transacciones de Energía:** Verificar que las transacciones de energía se registren correctamente en la blockchain, incluyendo la transferencia de fondos y la energía asociada. Fallos en este proceso pueden provocar inconsistencias en el registro, pérdida de datos y desconfianza en el sistema.
- **Latencia de la Red Blockchain:** Evaluar el tiempo necesario para confirmar y registrar transacciones en la blockchain. Latencias elevadas pueden impactar negativamente la experiencia del usuario y la eficiencia del sistema.
- **Consenso en la Red Blockchain:** Validar que los nodos de la red alcanzan consenso bajo el protocolo IBFT 2.0, incluso en caso de fallos en uno o más nodos.
- **Auditoría de Contratos Inteligentes:** Probar que los contratos inteligentes implementan correctamente las reglas de negocio y son resistentes a vulnerabilidades como ataques de reingreso y desbordamientos.

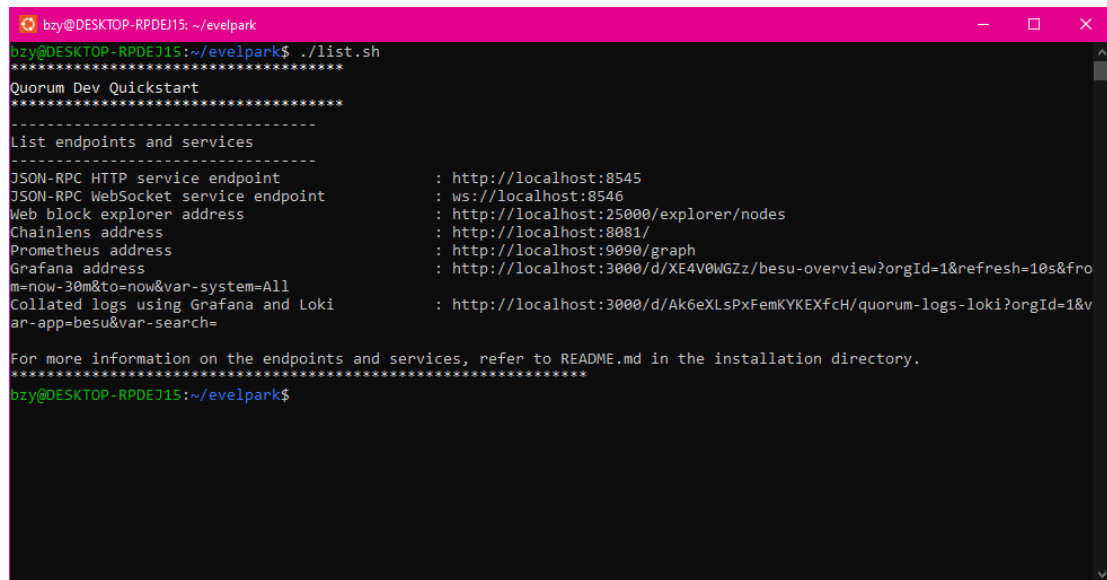
5.4 Resultados del Sistema Implementado

M1. Red Blockchain

Para habilitar la trazabilidad y seguridad de las transacciones energéticas, se desplegó una red Blockchain privada utilizando **Hyperledger Besu**. Esta red se configuró bajo el protocolo de consenso **IBFT 2.0 (Istanbul Byzantine Fault Tolerance)**, permitiendo una validación rápida y tolerante a fallos entre los nodos participantes.

La red consta de **cuatro nodos validadores** interconectados y desplegados sobre contenedores Docker en un entorno **Ubuntu (WSL2)**, simulando un entorno distribuido de producción. Esta configuración garantiza la replicación y sincronización de los bloques, asegurando que todas las transacciones energéticas queden registradas de manera inmutable y consistente.

Como punto de partida, se utilizó el *quickstart* oficial de Hyperledger Besu para redes privadas¹, el cual permite desplegar una red funcional mediante una configuración mínima basada en Docker Compose. Una vez clonado el repositorio, se ejecutó el script `./run.sh` para iniciar la red, y se verificaron los endpoints disponibles mediante el comando `./list.sh`.



```
bzy@DESKTOP-RPDEJ15: ~/evelopark
bzy@DESKTOP-RPDEJ15:~/evelopark$ ./list.sh
*****
Quorum Dev Quickstart
*****
-----
List endpoints and services
-----
JSON-RPC HTTP service endpoint      : http://localhost:8545
JSON-RPC WebSocket service endpoint : ws://localhost:8546
Web block explorer address          : http://localhost:25000/explorer/nodes
Chainlens address                   : http://localhost:8081/
Prometheus address                  : http://localhost:9090/graph
Grafana address                     : http://localhost:3000/d/XE4V0WGZz/besu-overview?orgId=1&refresh=10s&fro
m=now-30m&to=now&var-system=All
Collated logs using Grafana and Loki : http://localhost:3000/d/Ak6eXLsPxFemKYKEXfch/quorum-logs-loki?orgId=1&v
ar-app=besu&var-search=
For more information on the endpoints and services, refer to README.md in the installation directory.
*****
bzy@DESKTOP-RPDEJ15:~/evelopark$
```

Figura 5.1: Visualización de la red Blockchain ejecutándose en Ubuntu mediante WSL2

Los nodos se desplegaron como contenedores independientes utilizando Docker, lo que facilitó su

¹<https://besu.hyperledger.org/private-networks/tutorials/quickstart>

aislamiento y gestión. Esta arquitectura permite un despliegue ágil y replicable en distintos entornos de prueba.

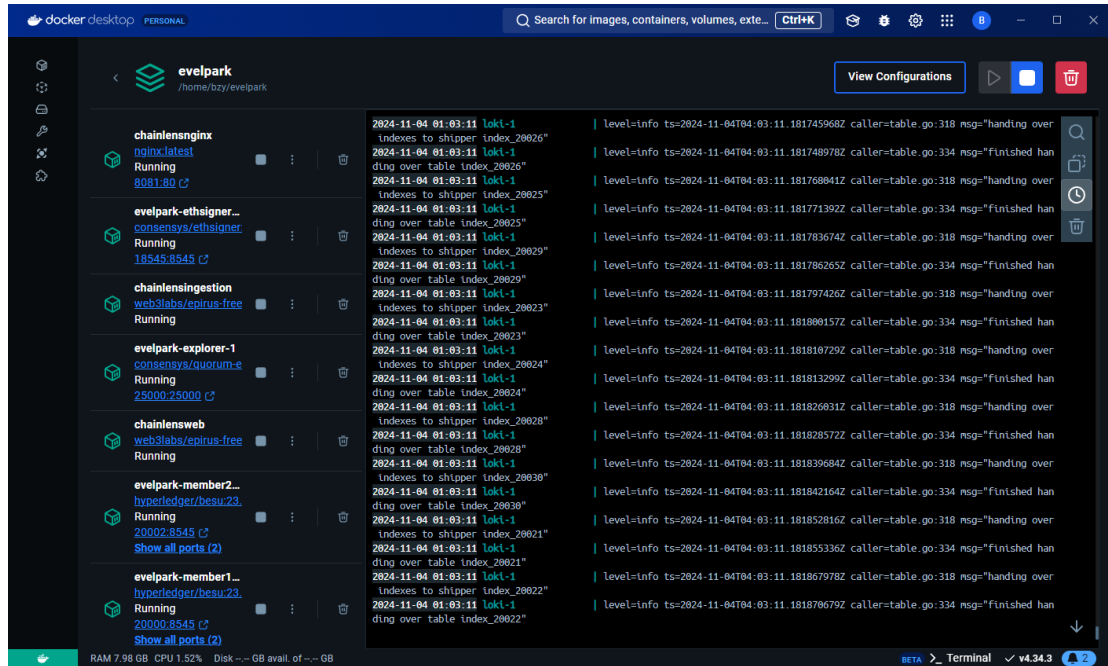


Figura 5.2: Contenedores Docker en ejecución correspondientes a los nodos de la red

Para monitorear el estado y funcionamiento de la red, se utilizó **Quorum Explorer**, una herramienta que permite visualizar en tiempo real los bloques creados, el número de peers conectados, y la información de cada nodo como identificadores, direcciones IP y enodes.

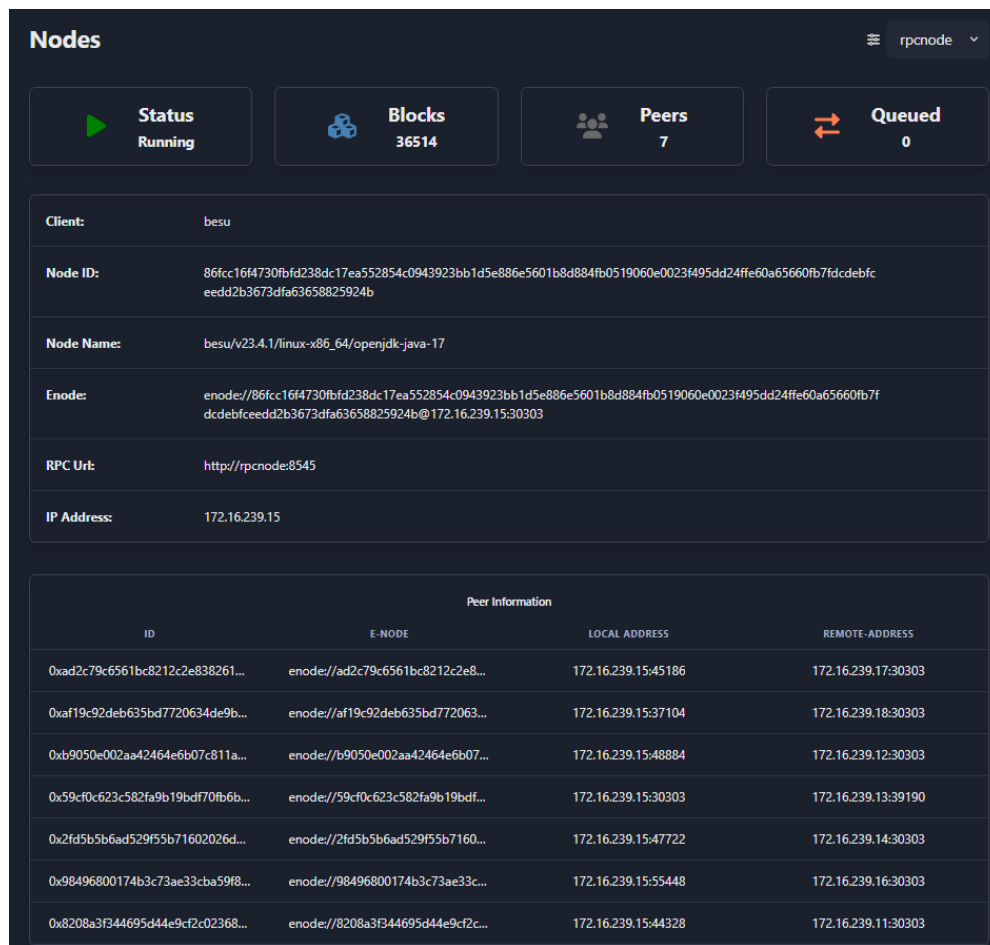


Figura 5.3: Estado de la red Blockchain mostrado por Quorum Explorer: nodos activos, bloques generados y conexiones entre pares

En total, la red alcanzó una generación de más de **36.000 bloques**, aunque esto no implica una cantidad equivalente de transacciones. El ritmo de creación de bloques está determinado por los tiempos de bloque configurados por defecto en la red.

En resumen, la red Blockchain desplegada cumple con su rol como **infraestructura base del sistema**, permitiendo registrar de manera segura y distribuida todas las interacciones energéticas del marketplace, con posibilidad de escalar el número de nodos según los requerimientos del entorno.

M2. Smart Contract

El contrato inteligente desarrollado para este proyecto fue escrito en el lenguaje **Solidity** y representa el núcleo de la lógica del sistema de subastas energéticas. Este contrato permite la creación y gestión de subastas de dos tipos: *Supply* (venta de energía) y *Demand* (compra de energía), contemplando todos los escenarios necesarios para su correcto funcionamiento.

El código fuente completo del contrato puede encontrarse en **Anexo 1 - Contrato Inteligente para Subastas Energéticas**, donde se detallan sus estructuras, funciones y eventos principales.

Para su despliegue, se utilizó el entorno de desarrollo **Remix IDE**, debido a su integración directa con MetaMask y su capacidad para conectarse a redes personalizadas como la creada mediante Hyperledger Besu. Si bien inicialmente se evaluó la opción de usar **Hardhat**, esta fue descartada para reducir la carga computacional en la máquina virtual utilizada durante las pruebas, ya que presentaba un uso intensivo de recursos.

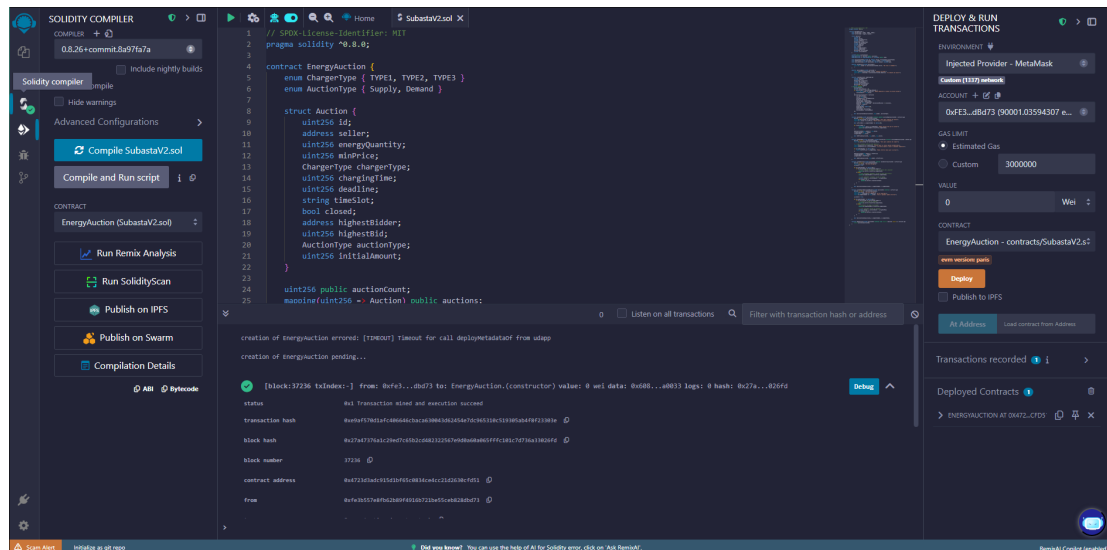


Figura 5.4: Despliegue del contrato inteligente en la red privada mediante Remix IDE

Remix permitió probar las funcionalidades del contrato de forma directa, utilizando diferentes cuentas conectadas mediante MetaMask. Entre las funciones evaluadas se encuentran:

- **createAuction**: creación de subastas con distintos parámetros de entrada.
- **placeBid** y **proposeBid**: registro de ofertas en subastas de venta y compra, respectivamente.

- `closeAuction` y `closeExpiredAuctionAsWinner`: cierre manual o automático de subastas y gestión de fondos.
- `getAuction`: consulta del estado de una subasta específica.

Como resultado de estas pruebas, se verificó el correcto funcionamiento de la lógica de negocio del contrato, incluyendo validaciones de condiciones, reembolsos, y asignación de ganadores.

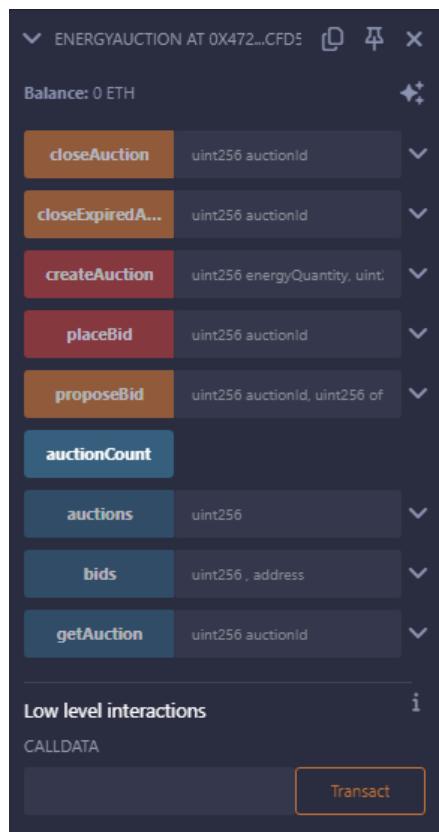


Figura 5.5: Visualización de las funciones del contrato `EnergyAuction` desplegado en Remix IDE. Se pueden observar las funciones públicas disponibles para crear subastas, realizar ofertas, cerrar procesos, y consultar el estado del sistema.

Para facilitar la interacción con el contrato desde un enfoque más visual e intuitivo, se desarrolló una **aplicación web (DApp)** que permite simular los distintos flujos del sistema, sin depender de Remix directamente. Esta interfaz está conectada a la red Blockchain privada a través de MetaMask y ofrece acceso a las funciones principales del contrato.

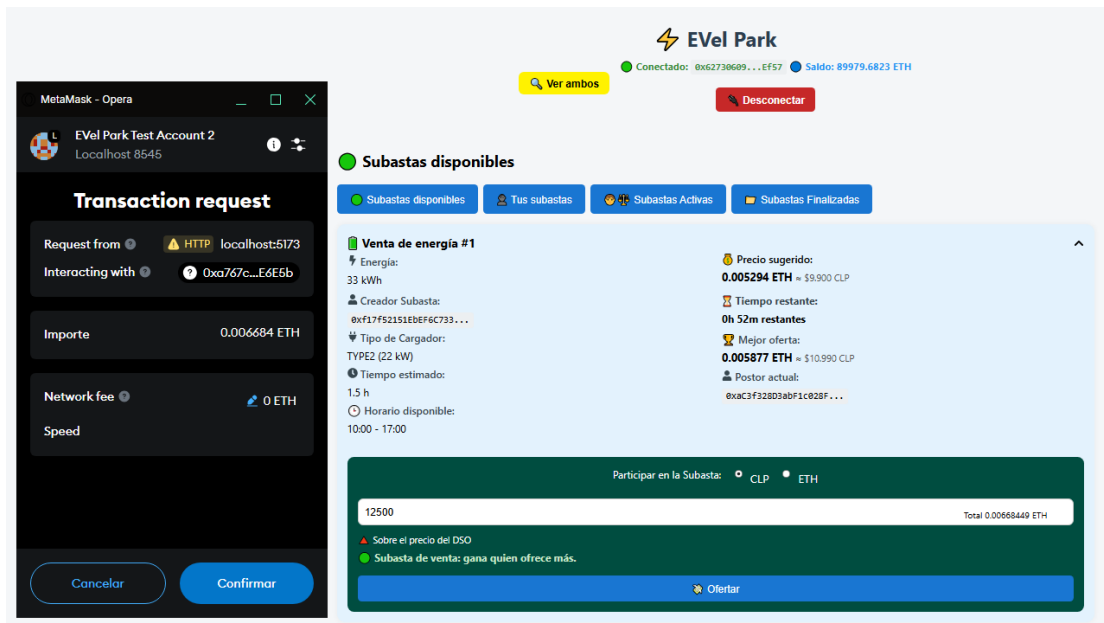


Figura 5.6: Interacción de un usuario con una subasta de venta activa mediante la DApp. A la izquierda, MetaMask solicita confirmación para realizar una puja en una subasta. A la derecha, la interfaz muestra los detalles de la subasta, incluyendo energía ofertada, tipo de cargador, precio sugerido y mejor oferta actual.

Gracias a esta herramienta, fue posible simular escenarios reales como:

- Creación y gestión de subastas desde la perspectiva del vendedor o comprador.
- Realización de pujas exitosas y rechazadas por reglas de negocio.
- Cierre de subastas con y sin ofertas, incluyendo los reembolsos correspondientes.
- Visualización de históricos según el rol del usuario (ganador, perdedor o creador).

Esta integración permitió validar el contrato inteligente desde una perspectiva tanto técnica como de usuario, reforzando su fiabilidad y adaptabilidad a distintos contextos de interacción.

M3. Identificación

Para operar dentro de la red Blockchain desarrollada, fue necesario establecer un sistema de identificación digital que vinculara a los usuarios con sus acciones dentro del sistema (como crear subastas, ofertar, cerrar procesos, etc.). Para esto se utilizó la extensión de navegador **MetaMask**, que actúa como billetera digital y herramienta de autenticación descentralizada.

MetaMask permite a los usuarios gestionar sus cuentas Ethereum y firmar transacciones directamente desde el navegador, funcionando como puerta de entrada al ecosistema Blockchain. En este caso, se configuró MetaMask para conectarse a la red privada levantada mediante Hyperledger Besu, utilizando el endpoint local `http://localhost:8545`.

Para fines de prueba y validación, se utilizaron las cuentas oficiales proporcionadas por el tutorial *quickstart* de Hyperledger Besu, las cuales cuentan con llaves privadas públicas y fondos simulados. Estas fueron importadas directamente en MetaMask, y son las siguientes:

EVelPark Admin 0xfe3b557e8fb62b89f4916b721be55ceb828dbd73 — 90,000 ETH

EVelPark Test 2 0x627306090abaB3A6e1400e9345bC60c78a8BEf57 — 90,000 ETH

EVelPark Test 3 0xf17f52151EbEF6C7334FAD080c5704D77216b732 — 90,000 ETH

Adicionalmente, se crearon nuevas cuentas directamente desde MetaMask para representar distintos tipos de usuarios en el sistema, como compradores, vendedores y cuentas no autenticadas:

EVelPark Acc 1: 0xaC3f328D3abF1c028FdBb01E929ff7A5e290fFc8 - 0 ETH

EVelPark Acc 2: 0x78bC0c714045b86530210d5cB8a5d0Bb1a5fce75 - 0 ETH

EVelPark Acc 3: 0x9A478714a24605ab2ab298f87cC129aA3fC42C57 - 0 ETH

CuentaNoAuth: 0x0b393027FC3aDEb489842C3fda7D2984145C9561 - 0 ETH

Cabe mencionar que, durante las pruebas, se incluyó una cuenta denominada **CuentaNoAuth** con la intención de validar el comportamiento del sistema frente a usuarios no autorizados. Inicialmente, se consideró utilizar bibliotecas como `quaintunoauth` para restringir el acceso según la cuenta

conectada, pero esta funcionalidad no logró ser implementada correctamente ni verificada en el entorno de pruebas.

La única alternativa factible era mantener una lista de direcciones permitidas directamente en el frontend, lo cual resultaba poco escalable y contrario a los principios de descentralización del sistema. Por ello, esta cuenta quedó como un remanente de pruebas iniciales, sin impacto en la lógica ni en el diseño final del sistema.

Además, se crearon cuentas adicionales directamente desde MetaMask para simular múltiples usuarios interactuando dentro del marketplace. Estas nuevas cuentas fueron financiadas con transacciones internas realizadas entre las cuentas de prueba.

La DApp desarrollada refuerza esta lógica de identidad digital, ya que no permite acceso a ninguna funcionalidad (como crear o visualizar subastas) sin una cuenta previamente conectada mediante MetaMask, como se muestra en la Figura 5.7.

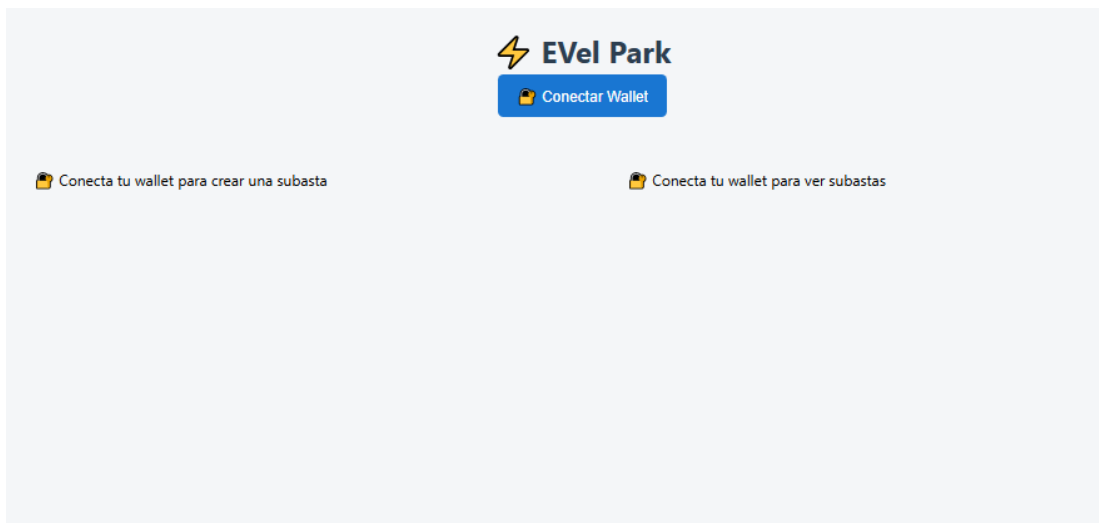


Figura 5.7: Interfaz de la DApp sin conexión a una wallet. Para acceder a funcionalidades como crear o ver subastas, es obligatorio conectar una cuenta válida mediante MetaMask.

Actualmente, la red Blockchain se ejecuta de manera local en el entorno de desarrollo, lo cual implica que solo el navegador del host (donde corren los nodos) puede conectarse mediante MetaMask al endpoint `localhost:8545`. Aunque cualquier usuario podría importar una cuenta válida, no puede interactuar con la red si no tiene acceso al nodo activo.

En un entorno de producción, esta limitación podría resolverse desplegando los nodos en una red

accesible desde el exterior, como un servidor en la nube (AWS, Azure, GCP, etc.). Sin embargo, dado que el sistema está diseñado para realizar el comercio de energía de forma local —es decir, dentro del estacionamiento inteligente—, el acceso remoto solo se consideraría válido para funcionalidades secundarias, como la reserva anticipada de estaciones de carga. En nuestro caso, para que una transacción energética sea válida, el usuario debe encontrarse físicamente en el lugar, conectado a la red local del estacionamiento. Esto garantiza la trazabilidad y verificación real del proceso de carga o descarga de energía.

Esto refuerza la arquitectura propuesta: una red Blockchain donde las identidades están descentralizadas (controladas por el usuario mediante su llave privada), y la participación depende únicamente del acceso a un nodo activo de la red.

5.5 Validación del Sistema

La validación del sistema se llevó a cabo considerando los módulos principales implementados: Red Blockchain (M1), Smart Contract (M2) e Identificación de Usuarios (M3).

Como se describe en la sección 3.1.3, los diagramas de secuencia representan claramente los procesos de transacción energética para vehículos actuando como compradores (ver Figura 3.3) y vendedores (ver Figura 3.4). Estos diagramas fueron utilizados como base para definir los flujos esperados y comparar el comportamiento real del sistema frente a los escenarios modelados.

Validación de M1: Red Blockchain

Se verificó que la red privada desplegada mediante Hyperledger Besu generara y propagara bloques de manera continua y sin errores, cumpliendo su rol como infraestructura de respaldo para las transacciones energéticas. La información presentada por Quorum Explorer confirmó el estado activo de los nodos, el número de peers conectados, y la correcta sincronización de bloques entre ellos. Esto permite concluir que la red cumple con los requisitos de trazabilidad e inmutabilidad definidos en el diseño.

Validación de M2: Smart Contract

El contrato inteligente fue validado a través de pruebas funcionales realizadas en Remix IDE y en la DApp conectada a la red. Se comprobaron distintos escenarios de subasta, tanto de venta como de compra, incluyendo la creación de subastas, recepción de ofertas válidas e inválidas, y cierre de procesos. En todos los casos, el contrato reaccionó según lo esperado, validando las condiciones establecidas en su lógica y ejecutando correctamente las transferencias de fondos. Además, se observaron casos negativos como pujas fuera de rango o usuarios sin fondos, los cuales fueron manejados adecuadamente, evitando el procesamiento de transacciones inválidas.

Subasta de Venta (Supply)

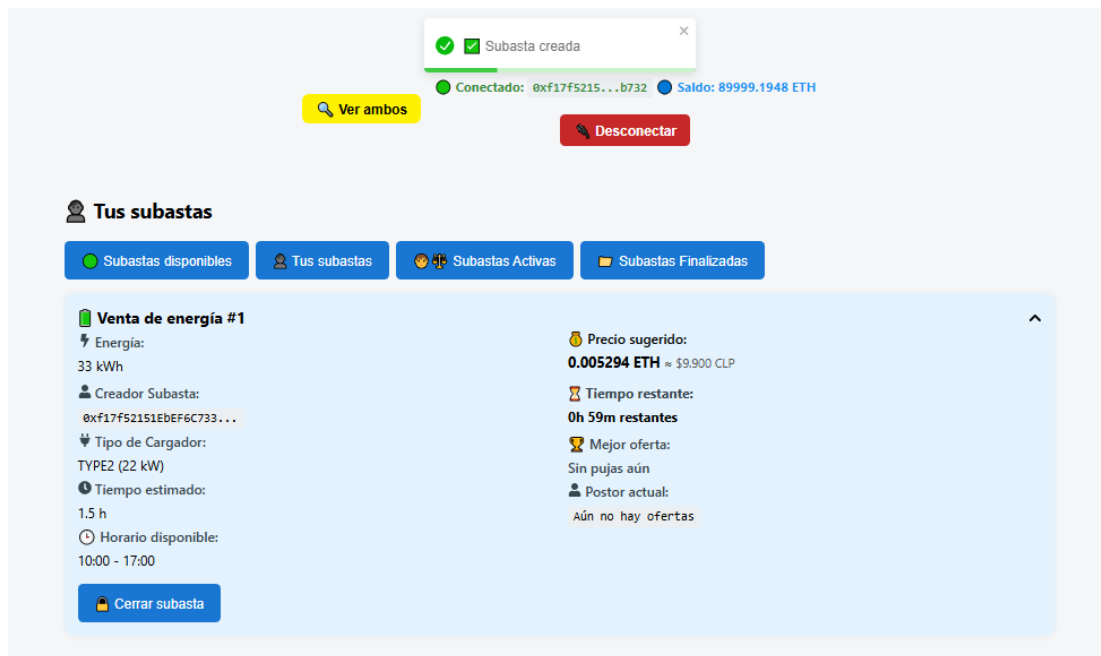


Figura 5.8: Confirmación visual de la creación de una subasta de venta desde la DApp.

Subasta de Compra (Demand)

✓ Oferta enviada

Conectado: 0xaC3f328D...fFc8 Saldo: 20.0100 ETH

Ver ambos

Desconectar

Subastas Activas

Subastas disponibles

Tus subastas

Subastas Activas

Subastas Finalizadas

Solicitud de energía #1

✓ Vas ganando esta subasta

Energía:
17 kWh

Creador Subasta:
0xf17f52151EbeF6C733...

Tipo de Cargador:
TYPE2 (22 kW)

Tiempo estimado:
0.8 h

Horario disponible:
10:00 - 17:00

Precio máximo:
0.001727 ETH ≈ \$3,230 CLP

Tiempo restante:
0h 57m restantes

Mejor oferta:
0.001658 ETH ≈ \$3,100 CLP

Postor actual:
0xaC3f328D3abF1c028F...

Participar en la Subasta: ☐ CLP ☒ ETH

Ej: 15000 CLP

Subasta de compra: gana quien ofrece menos.

Ofertar

Figura 5.9: Puja exitosa realizada por un proveedor en una subasta de compra.

Manejo de errores

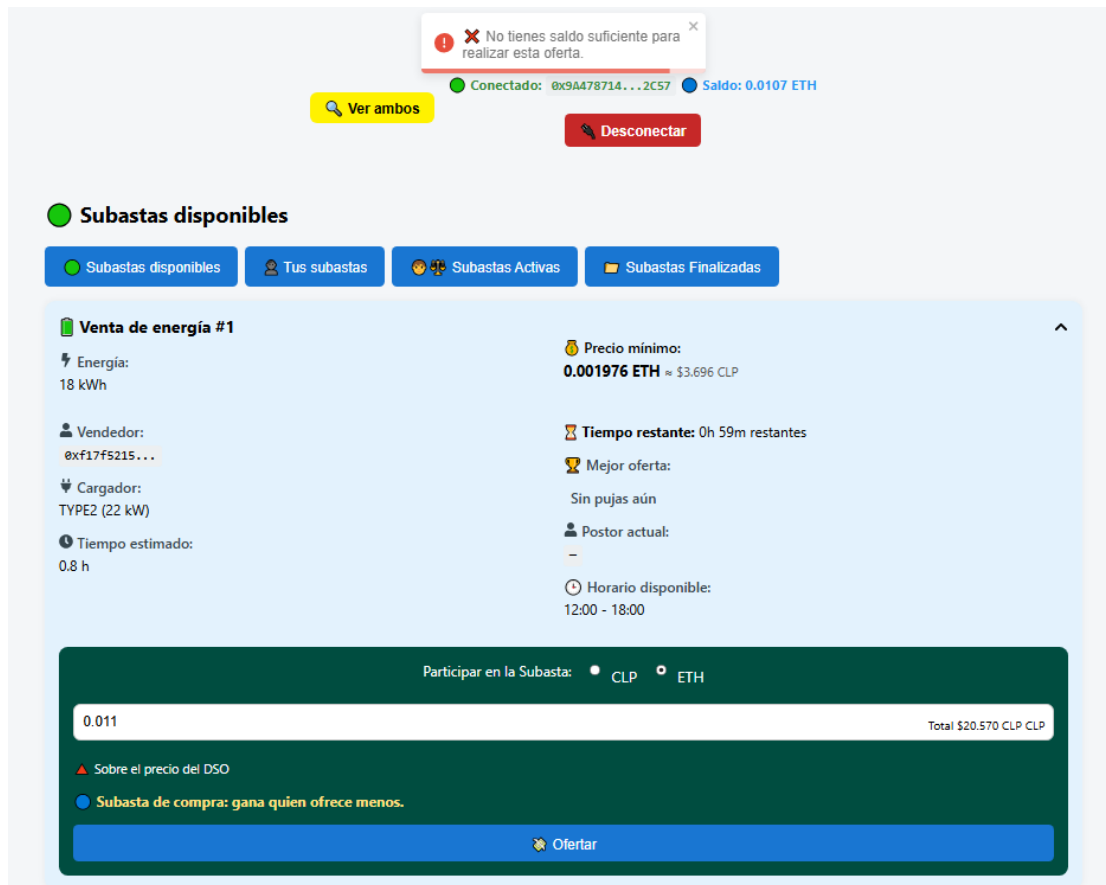


Figura 5.10: Error al intentar ofertar una cantidad superior al saldo disponible.

Visualización del historial



Conectado: 0xf17f5215...b732 Saldo: 89999.2015 ETH

[Ver ambos](#) [Desconectar](#)

Subastas Finalizadas

[Subastas disponibles](#) [Tus subastas](#) [Subastas Activas](#) [Subastas Finalizadas](#)

 **Venta de energía #2**

 Energía:
10 kWh

 Precio sugerido:
0.001219 ETH ≈ \$2.279 CLP

[Haz clic para ver más detalles...](#)

 **Venta de energía #1**

 Energía:
33 kWh

 Creador Subasta:
0xf17f52151EbEF6C733...

 Tipo de Cargador:
TYPE2 (22 kW)

 Tiempo estimado:
1.5 h

 Horario disponible:
10:00 - 17:00

 Subasta cerrada por ti

 Subasta finalizada con ofertas activas

 Precio sugerido:
0.005294 ETH ≈ \$9.900 CLP

 Tiempo restante:
Expirada

 Mejor oferta:
0.006684 ETH ≈ \$12.500 CLP

 Postor actual:
0x627306090abaB3A6e1...

Figura 5.11: Historial de subastas desde la perspectiva del creador.

Para una revisión detallada de todos los casos probados —incluyendo múltiples interacciones con subastas, cierres manuales, subastas sin ofertas y vistas desde distintos tipos de usuarios— se puede consultar la **Sección 5.6**, donde se presenta evidencia visual del comportamiento del sistema durante su validación.

Escenarios Integrados

A lo largo del desarrollo del sistema, se identificaron múltiples flujos posibles de interacción entre los distintos tipos de usuarios: compradores, vendedores y el administrador. Sin embargo, para efectos de validación funcional y claridad explicativa, en esta sección se presentan dos escenarios representativos que permiten ilustrar de forma clara y concreta el funcionamiento del sistema. Estos casos fueron seleccionados por su relevancia técnica y por cubrir aspectos claves del modelo de negocio, como la competencia entre usuarios, la automatización del administrador y la trazabilidad de las subastas.

Flujo Completo de Venta y Compra de Energía

En este escenario se describe una interacción completa dentro del sistema de EVel Park, donde un usuario crea una subasta de venta de energía y otro usuario realiza una oferta como comprador. El sistema gestiona la creación, participación y cierre de la subasta de forma automática, garantizando la transferencia de fondos y la asignación del resultado.

- **Paso 1: Creación de subasta de venta** El usuario A, actuando como vendedor, accede a la DApp e ingresa los parámetros de la subasta: cantidad de energía (kWh), tipo de cargador, franja horaria y precio mínimo aceptado. Confirma la transacción mediante MetaMask, y la subasta queda publicada. Este flujo se muestra en la Figura 5.15.
- **Paso 2: Participación del comprador** El usuario B, actuando como comprador, identifica la subasta activa y decide ofertar una cantidad igual o superior al precio mínimo. Realiza la puja y firma la operación con su cuenta MetaMask. El sistema actualiza la subasta con el nuevo postor y valor más alto (ver Figura 5.17).
- **Paso 3 (opcional): Intervención del administrador** Si el precio ofertado se encuentra dentro del rango configurado previamente en el módulo AutoBid del administrador, el sistema activa automáticamente la interfaz de firma y ejecuta una nueva puja superadora (si corresponde). Esta acción es visible en la confirmación mostrada en la Figura 5.47 y en el historial del administrador (ver Figura 5.48).
- **Paso 4: Cierre de la subasta** Una vez alcanzado el tiempo límite o cuando el creador decide cerrar manualmente la subasta, el sistema identifica al mejor postor. Si hay ganador, los

fondos se transfieren al vendedor y se ejecutan los reembolsos si corresponde (por ejemplo, al comprador original si fue superado por el administrador). Todo queda registrado en la red blockchain.

- **Paso 5: Visualización del historial** Cada usuario puede consultar su historial en la DApp. El vendedor visualiza el éxito de su subasta (Figura 5.23); si no hubo ofertas, puede revisar el estado sin pujas (Figura 5.24). Por otro lado, el comprador ganador ve su resultado reflejado en la Figura 5.25, mientras que el comprador perdedor accede a la vista de la Figura 5.26.
- **Paso 6 (futuro): Verificación física de la energía transferida** En una versión futura del sistema, sensores físicos validarían la cantidad exacta de energía entregada al vehículo. Si difiere del valor pactado, el sistema ajustaría automáticamente el pago, realizando devoluciones proporcionales.

Este escenario permite comprobar la correcta interacción entre los componentes técnicos del sistema (blockchain, contratos, frontend), así como la lógica de negocio subyacente. Además, refleja la participación de distintos actores (usuarios comunes y administrador), simulando una dinámica realista de intercambio energético descentralizado.

Participación Exclusiva del Administrador

Este escenario presenta un flujo de validación en el cual el administrador del sistema actúa como único participante en una subasta. Representa un caso de uso donde el administrador, al identificar una subasta favorable mediante su estrategia automática, ejecuta una puja de forma eficiente y directa, validando tanto su funcionalidad de negocio como su rol técnico dentro del ecosistema.

- **Paso 1: Detección de subasta activa favorable** Desbloquea el botón para acceder a su panel personalizado (Figura 5.45), el administrador accede al listado de subastas activas (Figura 5.46) y detecta una subasta de compra con un precio dentro del rango predefinido en el módulo AutoBid.
- **Paso 2: Activación de puja automática** El sistema ejecuta automáticamente una oferta en nombre del administrador, al estar dentro del umbral configurado en la estrategia (Figura 5.13). La confirmación manual de la transacción se realiza mediante MetaMask.

- **Paso 3: Cierre exitoso de la subasta** La subasta se cierra ya sea por expiración del tiempo o de forma manual (Figura 5.47). El administrador, al haber sido el único participante con una oferta válida, es adjudicado como ganador. La transacción queda registrada en su historial personal (Figura 5.48).
- **Paso 4 (futuro): Asignación espacial** En versiones futuras del sistema, el administrador podría asociar la subasta ganada a un espacio físico específico dentro del estacionamiento inteligente, utilizando la vista de gestión espacial mostrada en la Figura 5.49.

Este escenario valida la capacidad del sistema para operar con mínima intervención humana en favor del administrador, automatizando su rol como proveedor de energía y facilitando su participación estratégica mediante reglas de negocio configurables.

Validación de M3: Identificación de Usuarios

El uso de MetaMask como sistema de identificación y firma digital permitió simular distintos actores dentro de la red. Solo las cuentas conectadas pudieron ejecutar funciones del contrato, y se confirmó que la DApp impide el acceso a funcionalidades sin una cuenta activa. Esto valida el esquema de autenticación propuesto y demuestra que la red es segura desde el punto de vista de control de acceso, incluso operando en un entorno de pruebas.

Asimismo, se comprobó que el acceso a la red está condicionado no solo a tener una cuenta válida, sino también a la disponibilidad del nodo activo. Esta dependencia implica que, para un despliegue en producción, sería necesario habilitar nodos accesibles públicamente mediante servidores en la nube.

Caso especial: Cuenta Administrador y modelo de negocio asociado

Durante las pruebas del sistema, se definió un rol especial representado por la **cuenta administradora** 0xFE3B557E8Fb62b89F4916B721be55cEb828dBd73. Esta cuenta simula al **dueño de un estacionamiento inteligente**, quien no solo proporciona la infraestructura física (espacio de carga), sino que además participa activamente en el marketplace realizando operaciones tanto de compra como de venta de energía.

A diferencia de otros usuarios, el administrador tiene acceso a un **Dashboard exclusivo**, donde puede:

- Visualizar todas las subastas activas e históricas de la red.
- Ver estadísticas agregadas (total transado, subastas exitosas, etc.).
- Configurar horarios disponibles del estacionamiento.
- Administrar una interfaz de asignación espacial para los cargadores.
- Activar una estrategia de **puja automática**.



Figura 5.12: Vista del dashboard exclusivo disponible solo para la cuenta administradora. Se observa el resumen de actividad energética y acceso a configuración.

Estrategia de Puja Automática

Una de las funcionalidades más destacadas es la implementación de un **módulo de puja automática**, el cual permite al administrador actuar de forma más competitiva dentro del sistema de subastas. Esta estrategia analiza el precio publicado en la subasta —ya sea un **precio máximo** en el caso de compras o un **precio mínimo** en subastas de venta— y, si se encuentra dentro de un rango previamente definido, genera automáticamente una oferta válida. Esta acción agiliza la participación del

administrador, pero siempre requiere una **confirmación manual mediante MetaMask** por motivos de seguridad y control.

Lista completa de subastas

Estrategia de puja automática Ocultar detalles ▲

Estado: ✓ **Activado**

Estrategia actual: 📊 **Rango de precio aceptado**

Seleccionar estrategia:

📊 Rango de precio aceptado ▼

Rango de precio en CLP

Precio DSO actual: **200 CLP**

Se ofertará automáticamente si el precio mínimo de la subasta está dentro de este rango.

☒ **Activar pujas automáticas** Activo

Figura 5.13: Configuración del rango de precios aceptado en el módulo de puja automática. Dependiendo del tipo de subasta, el sistema analiza el precio mínimo o máximo definido y, si está dentro del rango permitido, genera una oferta automática que debe ser posteriormente confirmada en MetaMask

Este enfoque refuerza el modelo de negocio en el cual el administrador busca capturar oportunidades rentables tanto en la compra como en la venta de energía, maximizando el uso del espacio disponible en su estacionamiento.

Consideraciones

La implementación actual del módulo AutoBid utiliza `localStorage` para almacenar parámetros configurables por el administrador, tales como el rango de precios aceptado. Las acciones automáticas se ejecutan de manera periódica mediante un temporizador basado en `setInterval`, el cual consulta las subastas activas para determinar si existe alguna dentro del rango definido.

Si se detecta una subasta válida, el sistema genera una oferta automáticamente desde la cuenta administradora. No obstante, por razones de seguridad, esta transacción siempre debe ser firmada manualmente por el administrador mediante MetaMask, asegurando así control y trazabilidad sobre cada operación ejecutada.

Esta lógica modular representa un primer paso hacia la automatización parcial de decisiones dentro del sistema de subastas energéticas descentralizadas. Su diseño acoplado a la lógica de negocio del contrato inteligente permite escalar hacia estrategias más complejas —como la priorización por horarios, tipo de usuario o demanda energética— manteniendo la integridad del sistema. Además, facilita la incorporación futura de inteligencia artificial o reglas adaptativas sin alterar el núcleo de la plataforma.

Para más detalles sobre el código fuente que implementa esta funcionalidad, se puede consultar **Anexo 2 — Módulo AutoBid del Administrador**.

Visión extendida: el administrador como actor clave

Desde una perspectiva de diseño, esta figura del administrador amplía los casos de uso originales de la plataforma, ya que representa a un actor institucional que opera de manera más intensiva en la red. En un despliegue real, este rol podría ser asumido por operadores de infraestructura, empresas de energía o centros comerciales que desean monetizar su espacio de carga mediante lógica de mercado.

Aunque actualmente solo se encuentra implementada la estrategia de puja automática basada en **rango de precio aceptado**, la interfaz contempla otras modalidades como “Primero en llegar (FIFO)”, “Asignación manual” o “Aleatoria”. Estas opciones aún no están habilitadas funcionalmente, pero fueron incluidas en el diseño con la finalidad de explorar, en versiones futuras, distintas lógicas de comportamiento automático del administrador según su perfil comercial o técnico.

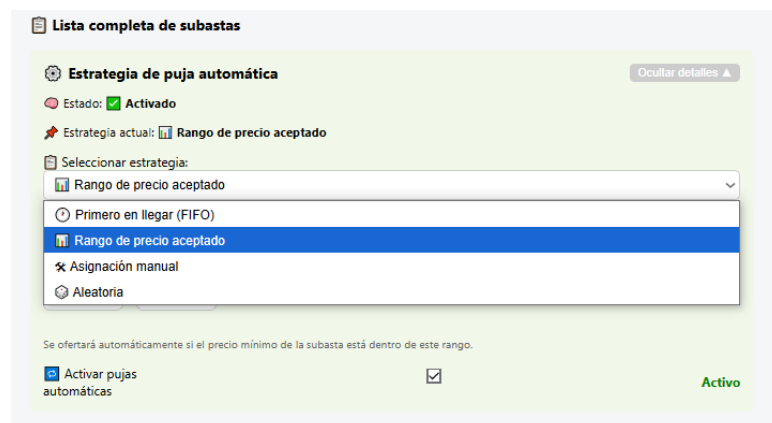


Figura 5.14: Estrategias disponibles para el módulo de puja automática. Actualmente solo la opción de “Rango de precio aceptado” se encuentra operativa.

Esta estructura modular permite al sistema adaptarse a distintos estilos de operación, facilitando la incorporación de mejoras en la toma de decisiones del administrador. Por ejemplo, una lógica FIFO podría ser útil en contextos donde se prioriza la temporalidad de las subastas, mientras que la asignación aleatoria puede ser útil para balancear carga entre múltiples ofertantes.

La existencia de este panel administrativo, junto con la estrategia automática activa, posiciona al administrador como un actor fundamental para la dinamización del ecosistema, participando activamente como proveedor inteligente de energía sin requerir intervención constante.

Evaluación General

En conjunto, los resultados obtenidos validan el correcto funcionamiento del sistema en sus aspectos estructurales y funcionales. Cada módulo cumplió con los objetivos planteados en su diseño, y los flujos observados se ajustaron a lo modelado en los diagramas de secuencia. La plataforma se comportó de forma estable, coherente y predecible, sentando así una base sólida para futuras mejoras, integración con hardware físico o despliegues en entornos más amplios.

5.6 Visualización del Prototipo en Funcionamiento

La siguiente sección recopila evidencias visuales obtenidas durante las pruebas realizadas. Estas imágenes ilustran los distintos flujos descritos en el sistema —incluyendo subastas exitosas, errores, interacciones de usuarios, y acciones realizadas por el administrador— y permiten validar que el sistema se comporta conforme a lo esperado en múltiples escenarios.

Subastas de Venta (Supply)

The image shows a web application interface for 'Evel Park'. At the top, there's a header with the logo, a 'Solo dashboard' button, and a 'Desconectar' button. Below the header, a MetaMask transaction request window is open, showing details like 'Request from', 'Interacting with', 'Network fee', and 'Speed'. The main form, titled 'Vender Energía', contains the following fields and options:

- Precio DSO actual:** \$200 kWh CLP
- Nivel de batería actual:** 34.1 kWh
- Buttons:** Vender, Comprar
- Tipo de cargador:** Lento (3.7 kW), Rápida (22 kW), DC Rápida (50 kW)
- Energía (kWh):** 33,00
- Duración estimada (horas):** 1,50
- Horario disponible:** 10:00 a 17:00
- Precio por kWh:** 300 (CLP), Total: \$9,900 CLP
- Warning:** Sobre el precio del DSO
- Button:** Publicar Subasta

Figura 5.15: Formulario de creación de subasta de venta. El usuario ha completado los parámetros requeridos (energía a vender, tipo de cargador, horario disponible, duración estimada y precio por kWh) y está confirmando la transacción en MetaMask.

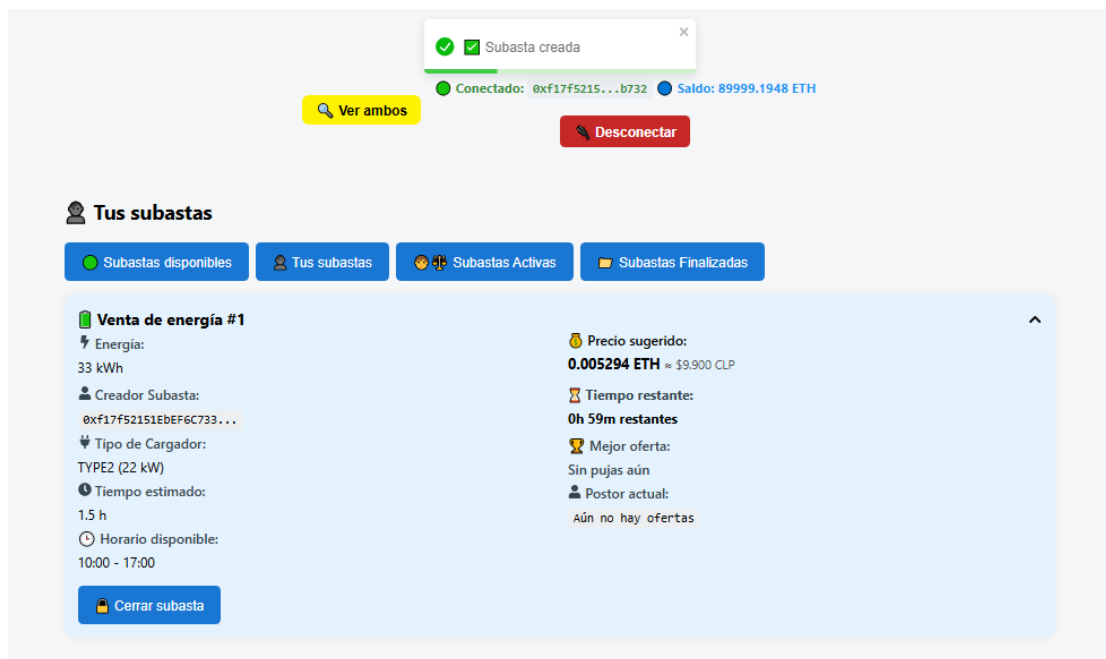


Figura 5.16: Confirmación visual posterior a la creación de una subasta de venta. El sistema notifica que la subasta fue creada exitosamente y la muestra en la lista de subastas activas del usuario.

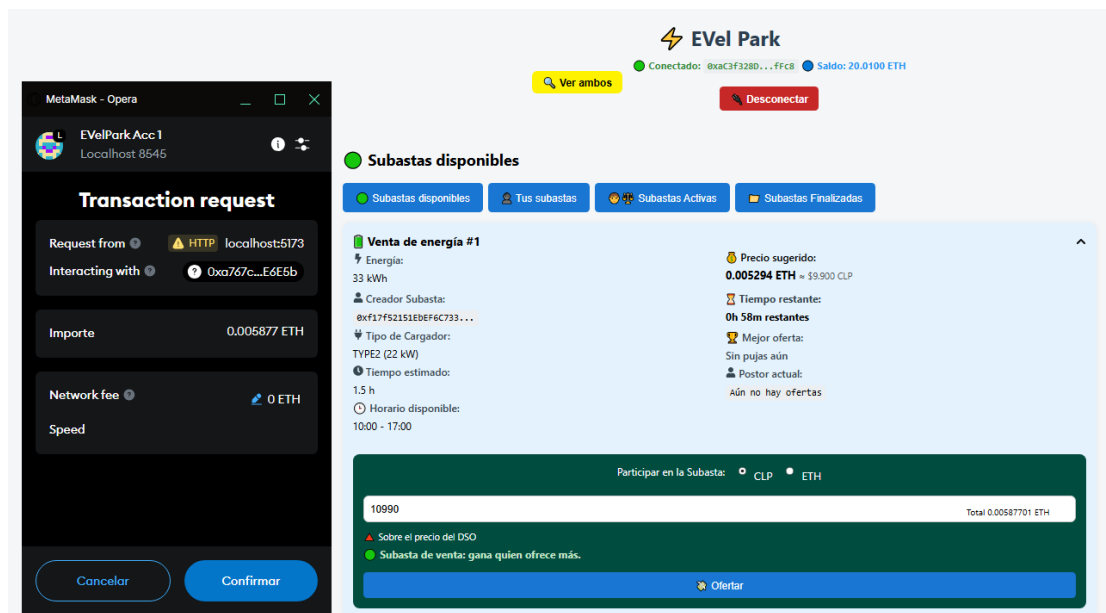


Figura 5.17: Un usuario realiza una puja válida en una subasta de venta y confirma la transacción en MetaMask.

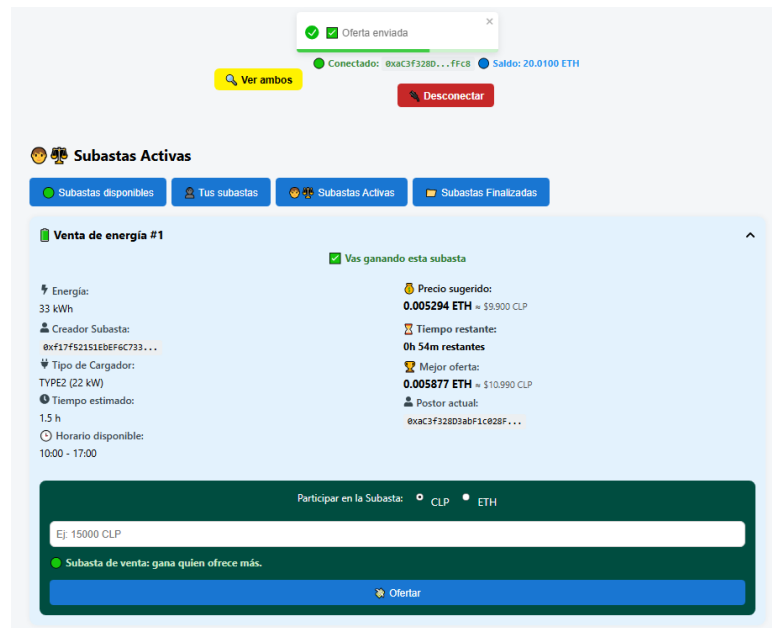


Figura 5.18: Confirmación de una puja exitosa en una subasta de venta. El sistema registra la puja y actualiza la mejor oferta.

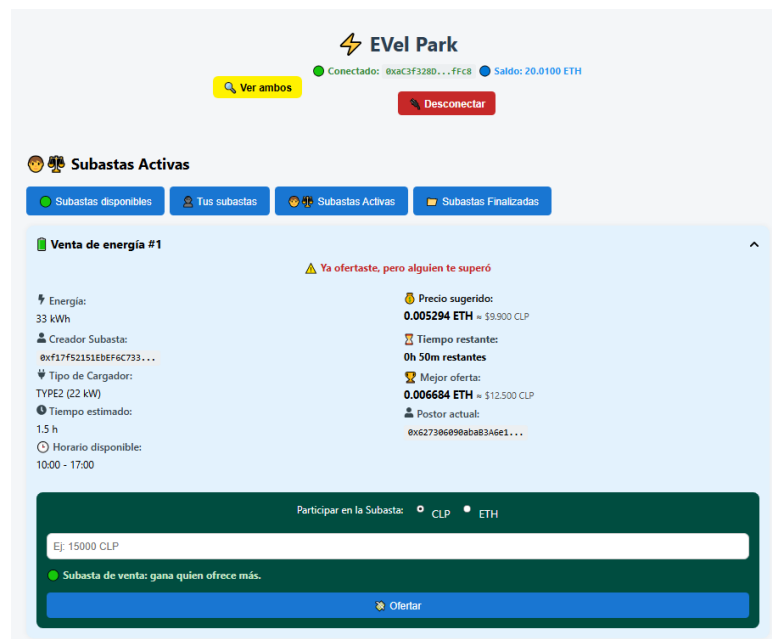


Figura 5.19: Visualización desde la perspectiva de un usuario que perdió una subasta. El sistema notifica que su oferta fue superada.

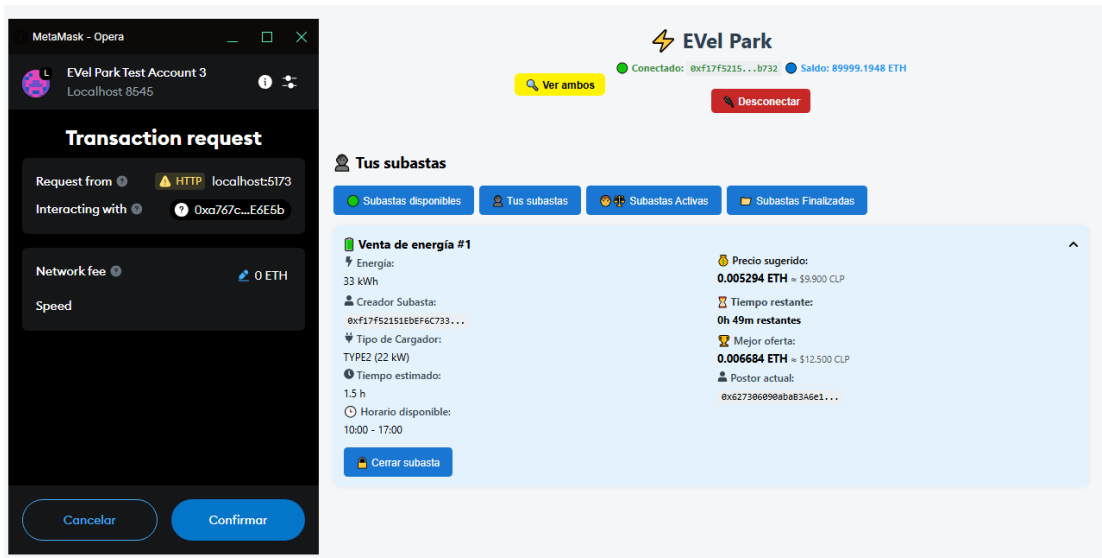


Figura 5.20: El creador de la subasta decide cerrarla manualmente luego de recibir ofertas válidas. Se requiere confirmación en MetaMask.

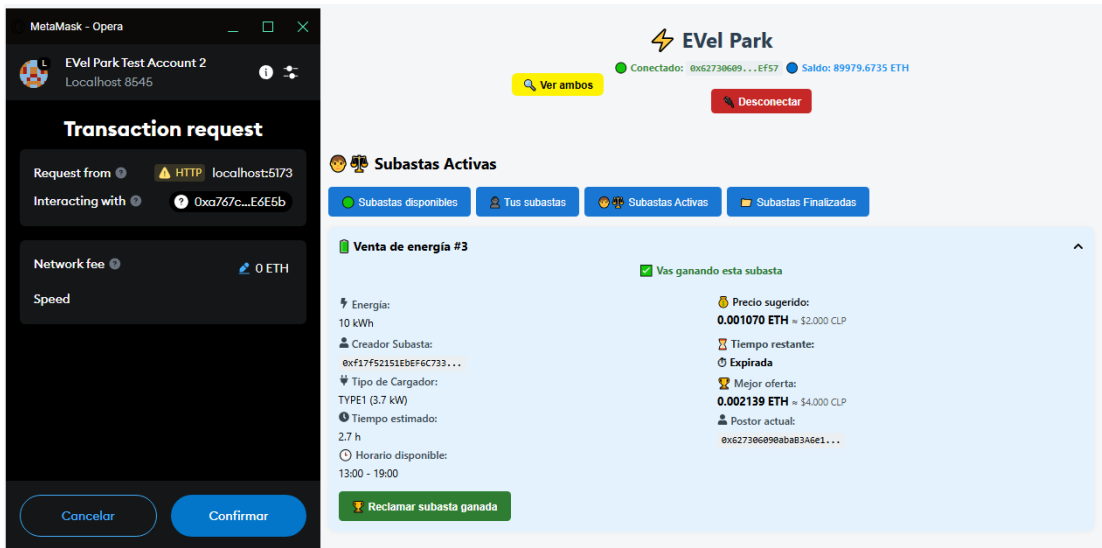


Figura 5.21: Cierre de subasta por parte del postor ganador utilizando la opción de cerrar como usuario final al expirar la subasta.

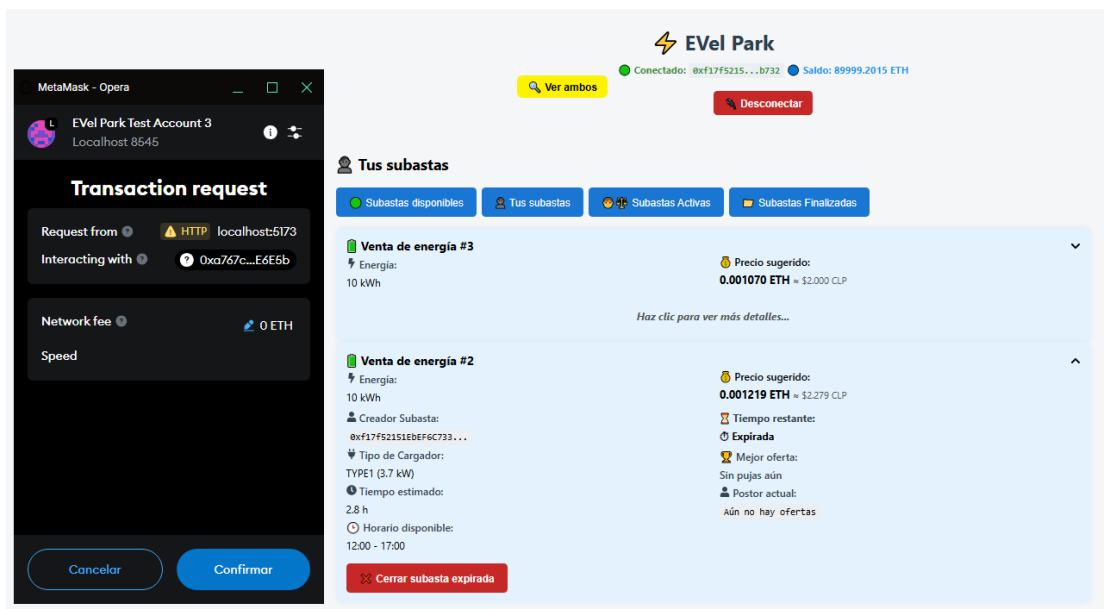


Figura 5.22: Subasta expirada sin recibir ofertas. El creador puede cerrarla de forma manual.

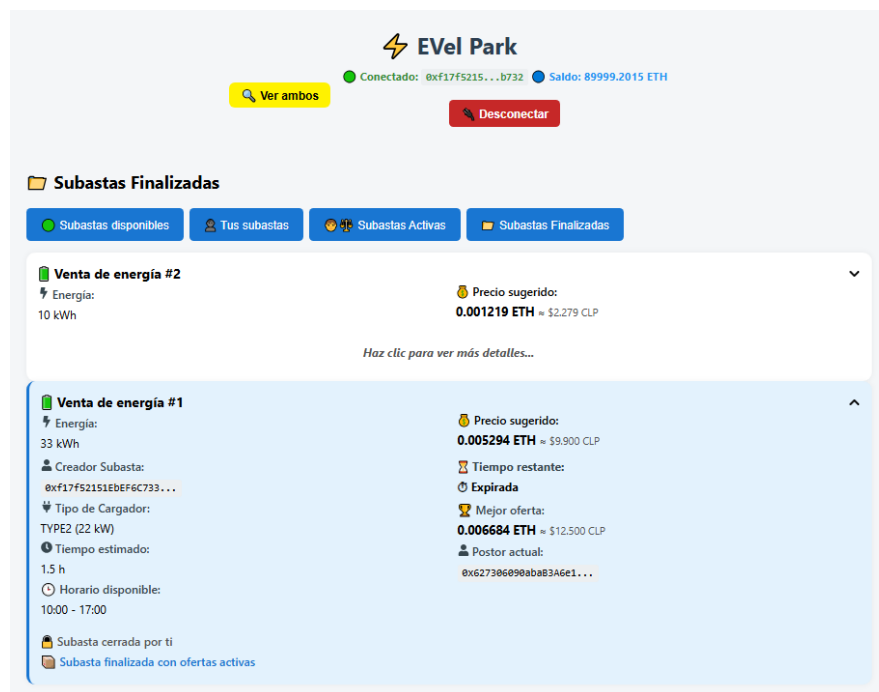


Figura 5.23: Historial del creador de una subasta que finalizó exitosamente con una oferta ganadora.



Conectado: 0xf17f5215...b732
Saldo: 89999.2015 ETH

Ver ambos
Desconectar

Subastas Finalizadas

Subastas disponibles
Tus subastas
Subastas Activas
Subastas Finalizadas

Venta de energía #2

Energía:
10 kWh
Creador Subasta:
0xf17f52151EbEf6C733...
Tipo de Cargador:
TYPE1 (3.7 kW)
Tiempo estimado:
2.8 h
Horario disponible:
12:00 - 17:00
Subasta cerrada por ti

Precio sugerido:
0.001219 ETH ≈ \$2,279 CLP
Tiempo restante:
Expirada
Mejor oferta:
Sin pujas aún
Postor actual:
Aún no hay ofertas

Venta de energía #1

Energía:
33 kWh

Precio sugerido:
0.005294 ETH ≈ \$9,900 CLP

Haz clic para ver más detalles...

Figura 5.24: Historial del creador de una subasta que finalizó sin recibir pujas.



Conectado: 0x62730609...Ef57
Saldo: 89979.6756 ETH

Ver ambos
Desconectar

Subastas Finalizadas

Subastas disponibles
Tus subastas
Subastas Activas
Subastas Finalizadas

Venta de energía #1

Energía:
33 kWh
Creador Subasta:
0xf17f52151EbEf6C733...
Tipo de Cargador:
TYPE2 (22 kW)
Tiempo estimado:
1.5 h
Horario disponible:
10:00 - 17:00
¡Ganaste esta subasta!

Precio sugerido:
0.005294 ETH ≈ \$9,900 CLP
Tiempo restante:
0h 44m restantes
Mejor oferta:
0.006684 ETH ≈ \$12,500 CLP
Postor actual:
0x627306090abaB3A6e1...

Figura 5.25: Historial de subastas desde la perspectiva de un usuario que ganó una subasta.



Conectado: 0xaC3f328D...fFc8

Saldo: 20.0100 ETH

Ver ambos

Desconectar

Subastas Finalizadas

Subastas disponibles

Tus subastas

Subastas Activas

Subastas Finalizadas

Venta de energía #1

Ya ofertaste, pero alguien te superó

Energía:

33 kWh

Creador Subasta:

0xf17f52151EbEF6C733...

Tipo de Cargador:

TYPE2 (22 kW)

Tiempo estimado:

1.5 h

Horario disponible:

10:00 - 17:00

Precio sugerido:

0.005294 ETH ≈ \$9.900 CLP

Tiempo restante:

0h 43m restantes

Mejor oferta:

0.006684 ETH ≈ \$12.500 CLP

Postor actual:

0x627306090abaB3A6e1...

No ganaste esta subasta

Figura 5.26: Historial de un usuario que participó en una subasta pero fue superado por otra oferta.

90

Subastas de Compra (Demand)

The image shows a web application interface for EVel Park. At the top, there's a header with the EVel Park logo, a connection status "Conectado: 0xf17f5215...b732", and a balance "Saldo: 89999.2036 ETH". Below the header, there's a yellow button "Solo dashboard" and a red button "Desconectar".

On the left, a MetaMask window is open, showing a "Transaction request" for "EVel Park Test Account 3" at "Localhost 8545". The request details include: "Request from: HTTP localhost:5173", "Interacting with: 0x297E2...00165", "Importe: 0.001727 ETH", "Network fee: 0 ETH", and "Speed". At the bottom of the MetaMask window are "Cancelar" and "Confirmar" buttons.

On the right, the "Solicitar Energía" form is displayed. It shows the current DSO price as "\$200 kWh CLP" and the current battery level as "20.1 kWh". There are "Vender" and "Comprar" buttons. The form includes fields for "Tipo de cargador" (Lenta 3.7 kW, Rápida 22 kW, DC Rápida 50 kW), "Energía (kWh)" (17), "Duración estimada (horas)" (0,77), "Horario disponible" (10:00 to 17:00), and "Precio por kWh" (190 CLP). The total price is calculated as "Total \$3.230 CLP". A note indicates "Bajo el precio del DSO". At the bottom is a "Publicar Subasta" button.

Figura 5.27: Formulario de creación de subasta de compra. El usuario ha completado los parámetros requeridos (energía requerida, tipo de cargador, duración estimada, horario y precio máximo por kWh) y está confirmando la transacción en MetaMask.

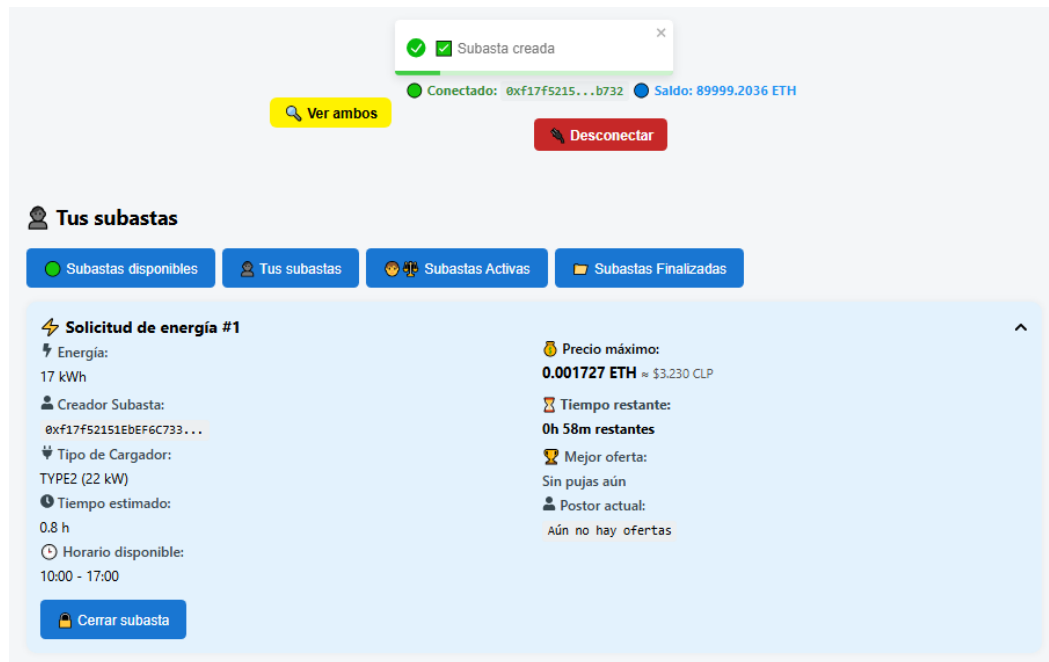


Figura 5.28: Confirmación de la creación de una subasta de compra. El sistema notifica que la subasta fue creada exitosamente y la presenta como activa en la sección “Tus subastas”.

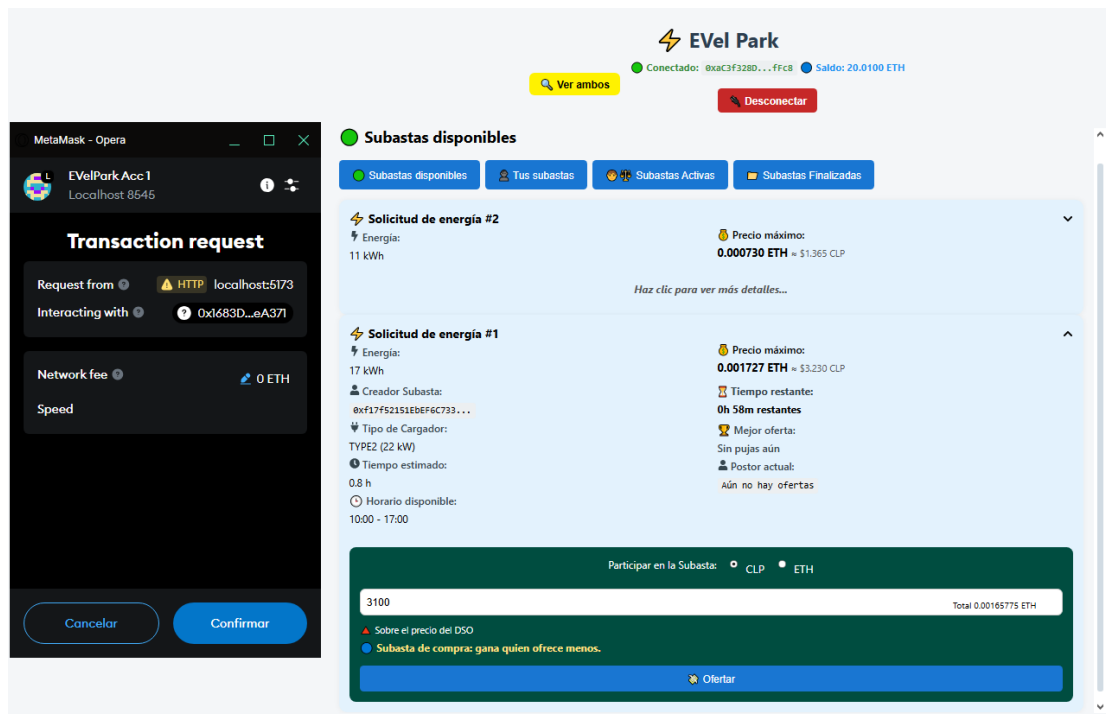


Figura 5.29: Vista posterior a una puja exitosa realizada por un proveedor en una subasta de compra. Se muestra la mejor oferta actual y el botón de cierre disponible para el creador.

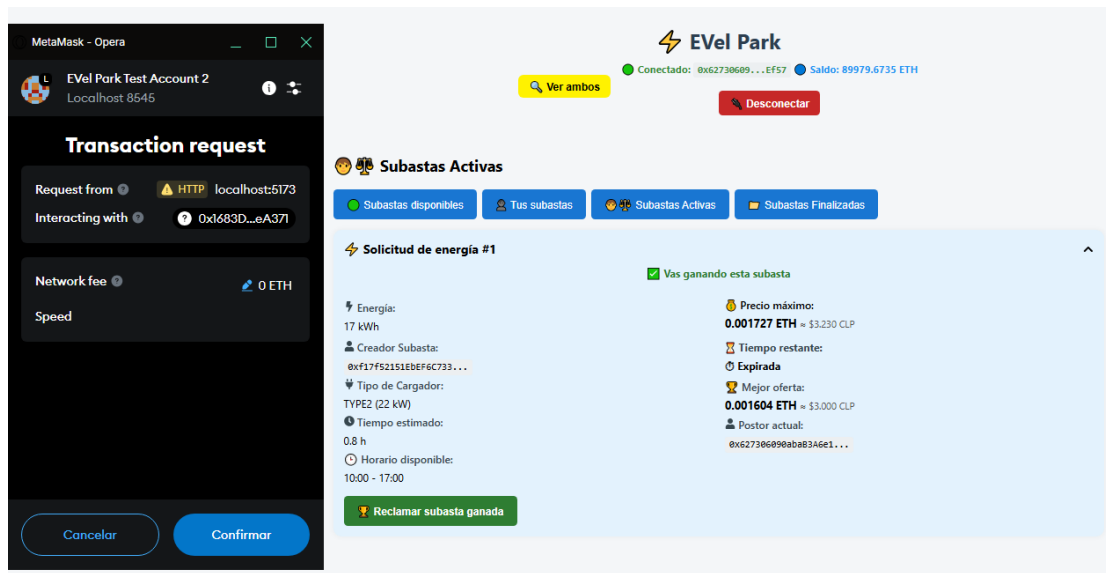


Figura 5.30: Cierre manual de la subasta por parte del proveedor ganador, tras haber realizado la mejor oferta dentro del tiempo establecido.

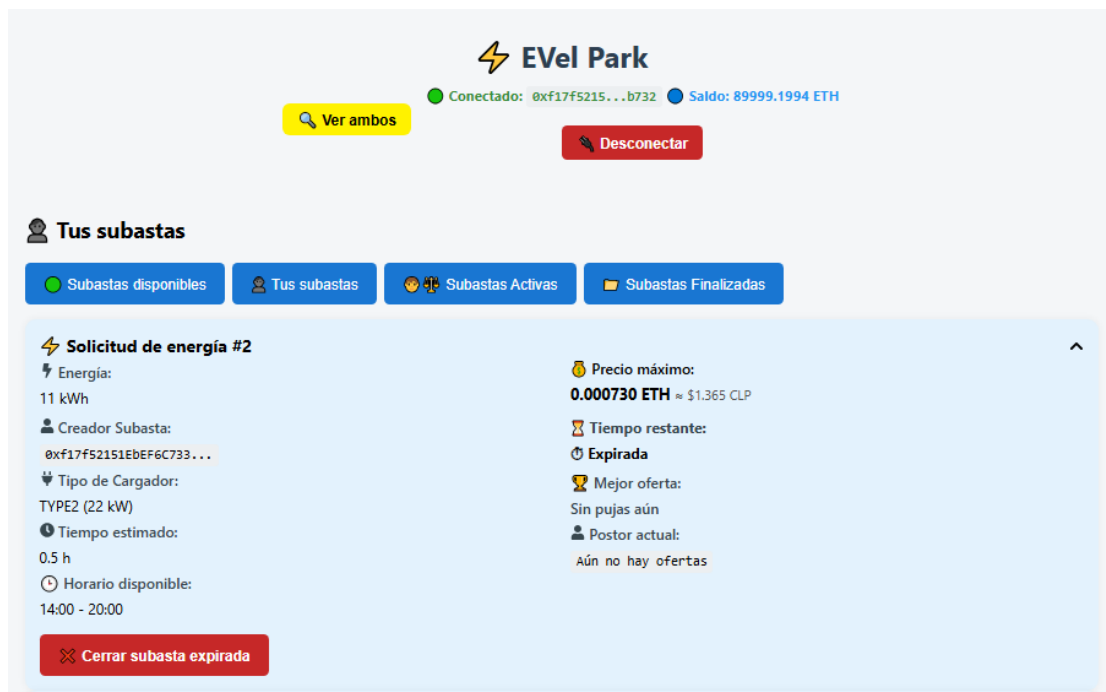


Figura 5.31: Vista del historial del creador de una subasta de compra que expiró sin recibir ninguna oferta.



Conectado: 0xf17f5215...b732
Saldo: 89999.1996 ETH

Ver ambos
Desconectar

Subastas Finalizadas

Subastas disponibles
Tus subastas
Subastas Activas
Subastas Finalizadas


Solicitud de energía #2

 Energía:

11 kWh

 Creador Subasta:

0xf17f52151EbEf6C733...

 Tipo de Cargador:

TYPE2 (22 kW)

 Tiempo estimado:

0.5 h

 Horario disponible:

14:00 - 20:00

 Subasta cerrada por ti

 Precio máximo:

0.000730 ETH ≈ \$1.365 CLP

 Tiempo restante:

 Expirada

 Mejor oferta:

Sin pujas aún

 Postor actual:

Aún no hay ofertas

Figura 5.32: Historial del creador en una subasta que cerró sin actividad de postores.



Conectado: 0x62730609...EF57
Saldo: 89979.6735 ETH

Ver ambos
Desconectar

Subastas Finalizadas

Subastas disponibles
Tus subastas
Subastas Activas
Subastas Finalizadas


Solicitud de energía #1

 Energía:

17 kWh

 Creador Subasta:

0xf17f52151EbEf6C733...

 Tipo de Cargador:

TYPE2 (22 kW)

 Tiempo estimado:

0.8 h

 Horario disponible:

10:00 - 17:00

 ¡Ganaste esta subasta!

 Precio máximo:

0.001727 ETH ≈ \$3.230 CLP

 Tiempo restante:

 Expirada

 Mejor oferta:

0.001604 ETH ≈ \$3.000 CLP

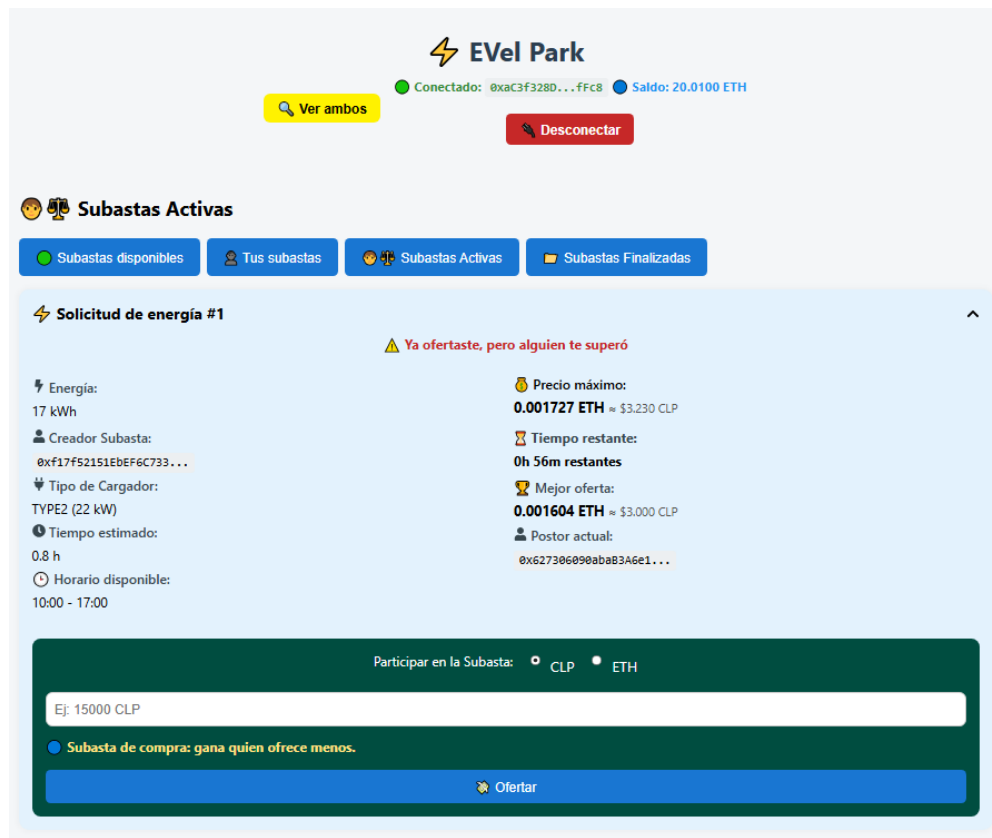
 Postor actual:

0x627306090abaB3A6e1...

Figura 5.33: Historial del usuario que ganó una subasta de compra. El sistema refleja el éxito y muestra detalles de la oferta realizada.

Escenario: Usuario superado por una mejor oferta

En este flujo, un usuario realiza una oferta válida, pero posteriormente es superado por otro postor. El sistema reembolsa automáticamente al usuario perdedor y refleja correctamente el resultado en el historial individual.



The screenshot displays the EVeL Park interface. At the top, the user is connected (Conectado) with a balance (Saldo) of 20.0100 ETH. Below this, the 'Subastas Activas' (Active Auctions) section is visible. The main content area shows 'Solicitud de energía #1' (Energy Request #1) with a warning: 'Ya ofertaste, pero alguien te superó' (You have bid, but someone has outbid you). The auction details include:

- Energía: 17 kWh
- Creador Subasta: 0xf17f52151EbEf6C733...
- Tipo de Cargador: TYPE2 (22 kW)
- Tiempo estimado: 0.8 h
- Horario disponible: 10:00 - 17:00

On the right side of the details, the following information is shown:

- Precio máximo: 0.001727 ETH ≈ \$3,230 CLP
- Tiempo restante: 0h 56m restantes
- Mejor oferta: 0.001604 ETH ≈ \$3,000 CLP
- Postor actual: 0x627386890aba83A6e1...

At the bottom, there is a section for 'Participar en la Subasta' (Participate in the Auction) with a dropdown menu set to 'CLP'. A text input field contains 'Ej: 15000 CLP'. Below the input field, a radio button is selected for 'Subasta de compra: gana quien ofrece menos.' (Buy auction: winner is the lowest bidder). A blue 'Ofertar' (Bid) button is at the bottom right.

Figura 5.34: Vista de subasta activa en la que un ofertante fue superado por una mejor oferta. Se indica claramente que ya ha ofertado, pero fue superado.

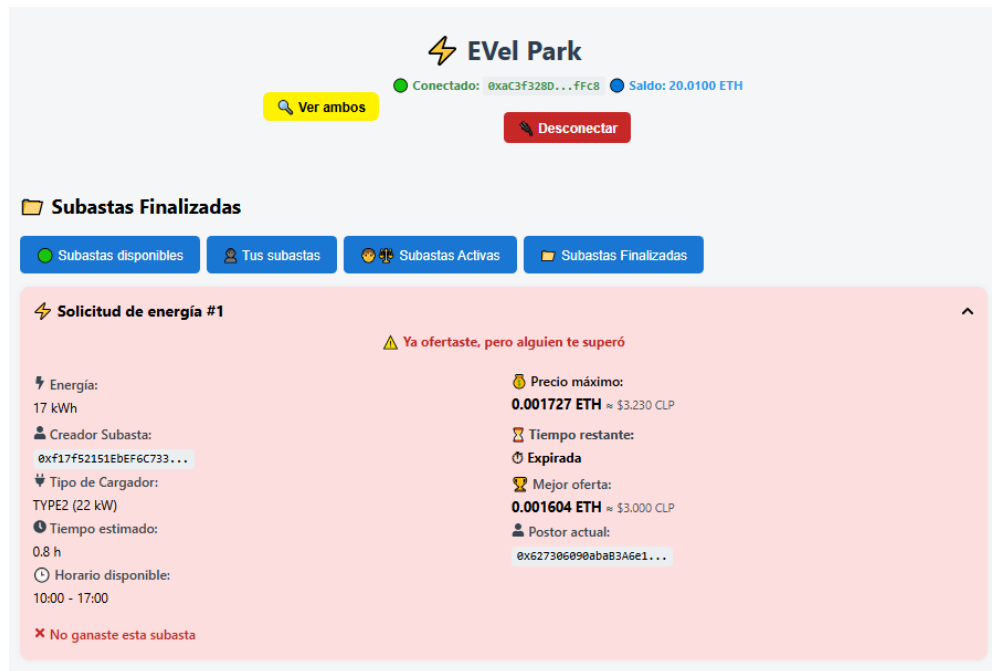


Figura 5.35: Historial del usuario que perdió la subasta. Se indica que su oferta fue superada y que no resultó adjudicado.

Verificación de Transferencias en la Blockchain

Para corroborar que las operaciones realizadas en la DApp efectivamente desencadenan transacciones reales en la red, se ejecutaron subastas con montos elevados. A continuación se presentan las vistas desde las cuentas de usuario y creador de subasta, junto con sus carteras MetaMask, reflejando la interacción exitosa con el contrato inteligente y la confirmación de las transferencias.

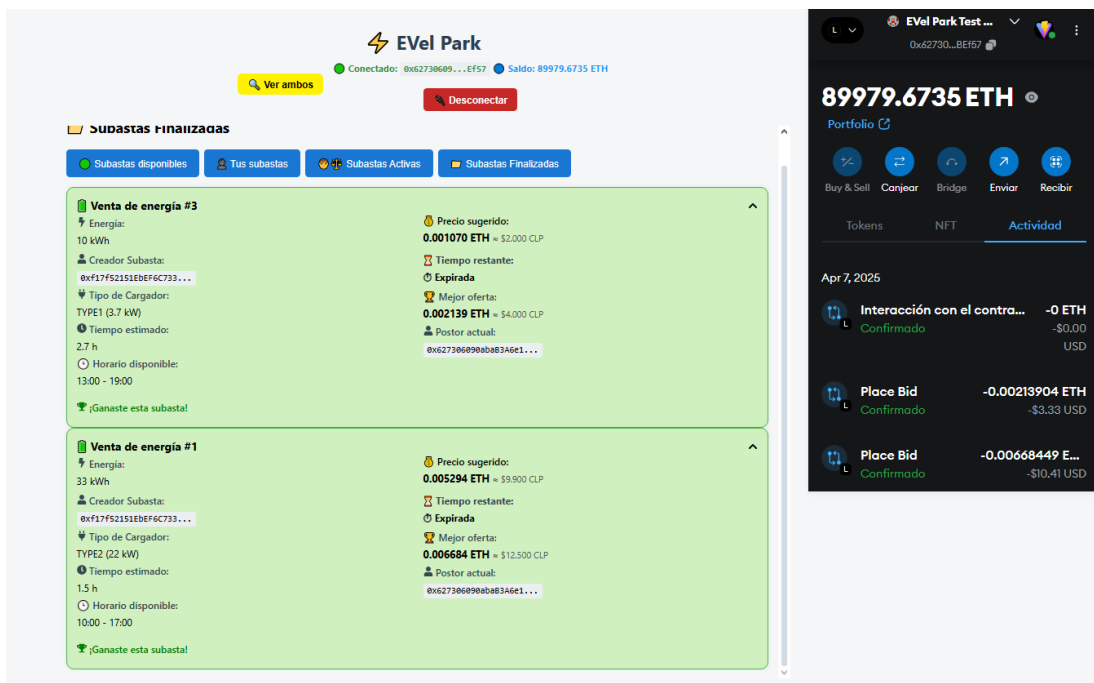


Figura 5.36: Venta energética: Detalle de transacciones registradas en MetaMask asociadas a subastas ganadas.

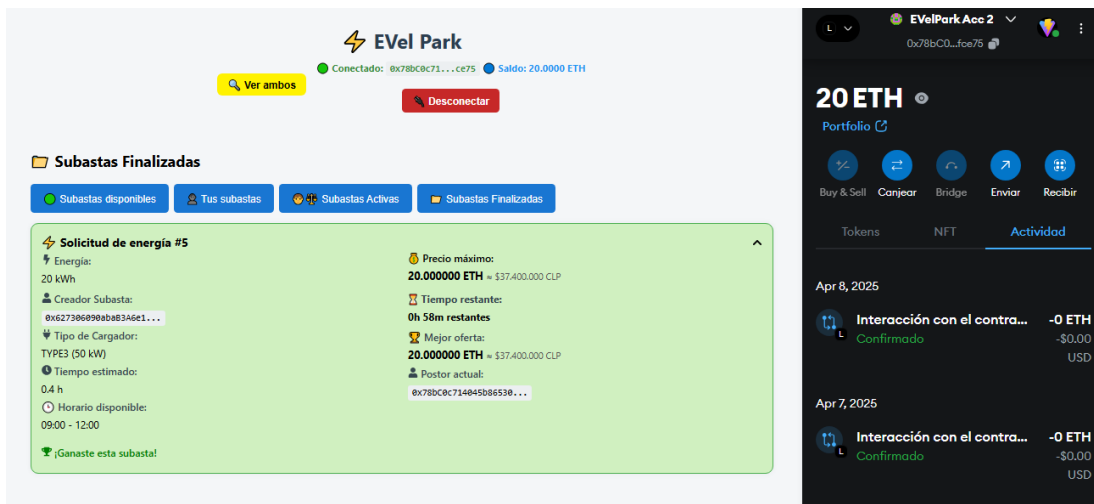


Figura 5.37: Vista desde la cuenta del proveedor que ganó la subasta. Se observa el mensaje de subasta ganada y la actividad registrada en MetaMask, confirmando la interacción con el contrato y la ejecución de la transacción con un monto de 20 ETH.

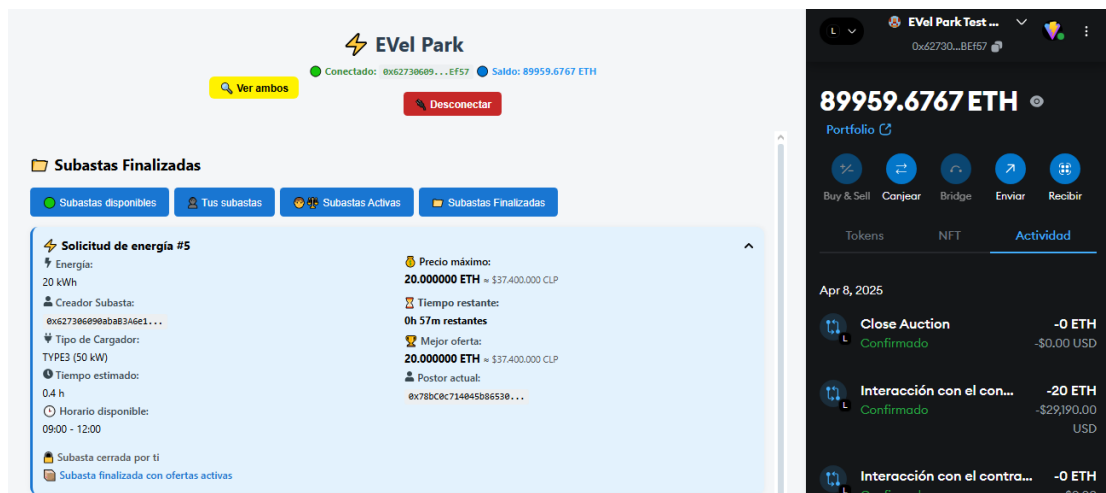


Figura 5.38: Vista desde la cuenta del creador de la subasta. Se muestra la subasta como cerrada y finalizada con ofertas activas, junto con la actividad en MetaMask que confirma la transferencia de 20 ETH recibida por la ejecución del cierre.

Casos con Errores

No puedes vender más energía de la que tienes disponible.

Conectado: 0xf17f5215...b732 Saldo: 89998.8635 ETH

Solo dashboard

Desconectar

Vender Energía

Precio DSO actual: \$200 kWh CLP

Nivel de batería actual: 24.8 kWh

Vender Comprar

Tipo de cargador:

Lenta (3.7 kW)Rápida (22 kW)DC Rápida (50 kW)

Energía (kWh):

28,60

Duración estimada (horas):

1,30

Horario disponible:

12:00 a 18:00

Precio por kWh:

CLPETH

210

Total \$6.006 CLP

Sobre el precio del DSO

Publicar Subasta

Figura 5.39: Error al intentar publicar una subasta de venta con una cantidad de energía superior al nivel actual de la batería.

99

Completar todos los campos correctamente.

Conectado: 0x62730609...Ef57

Saldo: 89959.6767 ETH

Solo dashboard

Desconectar

Vender Energía

Precio DSO actual: \$200 kWh CLP

Nivel de batería actual: 29.6 kWh

Vender

Comprar

Tipo de cargador:

Lenta (3.7 kW)

Rápida (22 kW)

DC Rápida (50 kW)

Energía (kWh):

16

Duración estimada (horas):

4,32

Horario disponible:

09:00

a

12:00

Precio por kWh:

CLP

ETH

Ingresar precio por kWh en CLP

Publicar Subasta

Figura 5.41: Advertencia al intentar crear una subasta sin completar todos los campos requeridos.

101

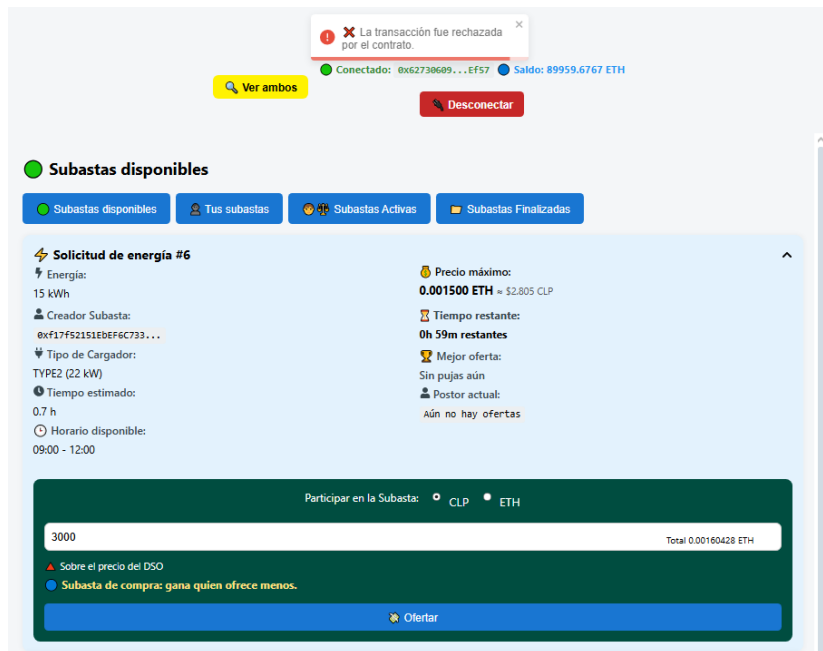


Figura 5.42: Error al intentar realizar una puja en una subasta de compra con un valor mayor al precio máximo definido.

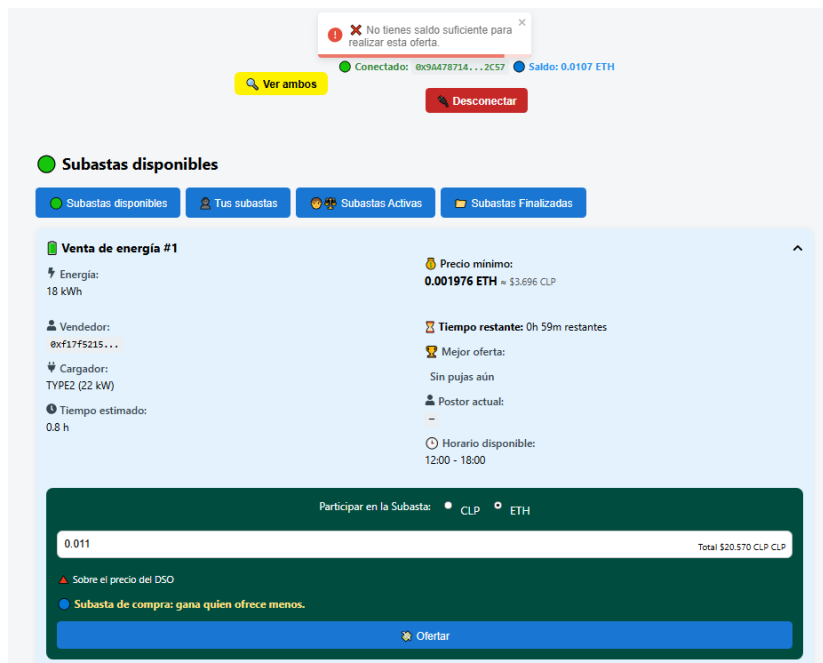


Figura 5.43: Error al intentar realizar una puja que supera el saldo disponible en la cuenta conectada.

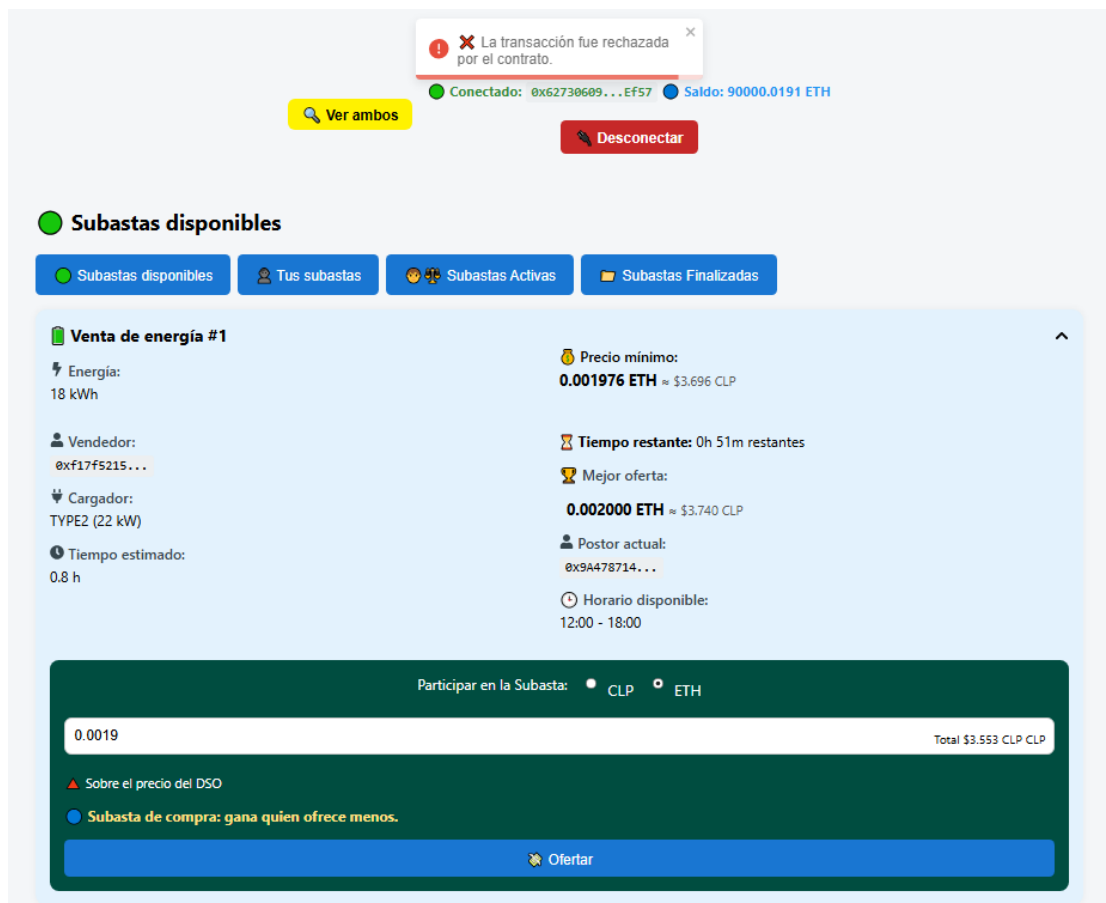


Figura 5.44: Error al realizar una puja en una subasta de venta con un valor inferior al precio mínimo establecido.

Panel Administrativo — Funcionalidades Adicionales



Conectado: 0xFE3B557E...Bd73

Saldo: 90001.0359 ETH

Solo formulario

Desconectar

 **Vender Energía**

Precio DSO actual: \$200 kWh CLP

Vender

Comprar

Tipo de cargador:

Lenta (3.7 kW)

Rápida (22 kW)

DC Rápida (50 kW)

Energía (kWh):

Duración estimada (horas):

Horario disponible:

09:00

a

12:00

Precio por kWh:

CLP

ETH

Ingresar precio por kWh en CLP

Publicar Subasta

Subastas disponibles

Tus subastas

Subastas Activas

Subastas Finalizadas

Admin

No hay subastas para mostrar.

Figura 5.45: Vista inicial del administrador tras conectarse. Se muestran las secciones principales disponibles en la plataforma.

104



Conectado: 0xFE3B557E...Bd73
Saldo: 90001.0359 ETH

Solo formulario
Desconectar

Volver al Dashboard

Panel de Administración

Resumen

Todas las subastas

Horarios

Estacionamiento

Lista completa de subastas

Estrategia de puja automática
Mostrar detalles ▼

Estado: Activado

Estrategia actual: Rango de precio aceptado

ID	Tipo	Estado	Vendedor	Comprador	Precio mínimo	Mejor oferta	Automática
6	⚡ Compra	⌚ Expirada	0xf17f5215...	—	0.001500 ETH \$2.805 CLP	Sin pujas	—
5	⚡ Compra	🔒 Cerrada	0x62730609...	0x78bC0c71...	20.000000 ETH \$37.400.000 CLP	20.0 ETH	—
4	⚡ Compra	🔒 Cerrada	0xf17f5215...	0x62730609...	0.001727 ETH \$3.230 CLP	0.00160428 ETH	—
3	🌱 Venta	⌚ Expirada	0xf17f5215...	—	0.001727 ETH \$3.230 CLP	Sin pujas	—
2	⚡ Compra	🔒 Cerrada	0xf17f5215...	—	0.000730 ETH \$1.365 CLP	Sin pujas	—
1	⚡ Compra	🔒 Cerrada	0xf17f5215...	0x62730609...	0.001727 ETH \$3.230 CLP	0.00160428 ETH	—

Figura 5.46: Sección con todas las subastas visualizadas desde la cuenta administradora. Incluye tipo, estado, valores y si hubo participación automática.

105

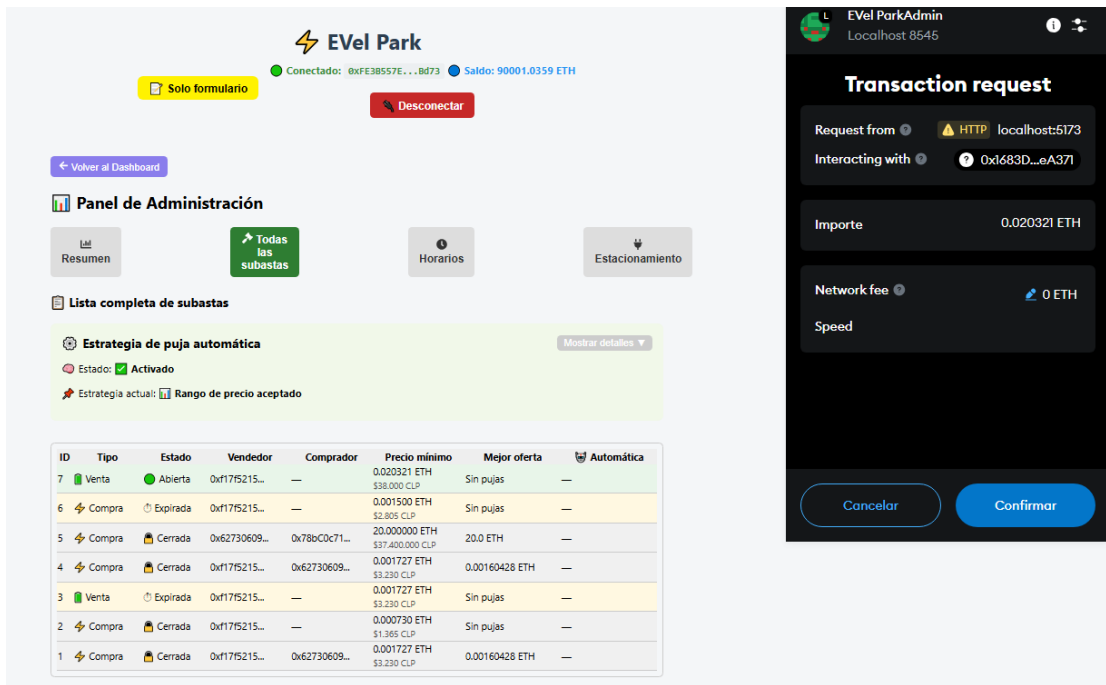


Figura 5.47: Confirmación de una puja automática generada por el sistema tras detectar una subasta dentro del rango. Se requiere validación del administrador en MetaMask.



● Conectado: 0xFE3B557E...Bd73
● Saldo: 90001.0156 ETH

Solo formulario
Desconectar

Volver al Dashboard


Panel de Administración


Resumen


Todas las subastas


Horarios


Estacionamiento


Lista completa de subastas


Estrategia de puja automática
Mostrar detalles ▼

Estado: ✓ Activado

Estrategia actual:  Rango de precio aceptado

ID	Tipo	Estado	Vendedor	Comprador	Precio mínimo	Mejor oferta	 Automática
7	 Venta	● Abierta	0xf17f5215...	0xFE3B557E...	0.020321 ETH \$38.000 CLP	0.02032086 ETH	Realizada con:  Rango de precio aceptado
6	 Compra	⌚ Expirada	0xf17f5215...	—	0.001500 ETH \$2.805 CLP	Sin pujas	—
5	 Compra	🔒 Cerrada	0x62730609...	0x78bC0c71...	20.000000 ETH \$37.400.000 CLP	20.0 ETH	—
4	 Compra	🔒 Cerrada	0xf17f5215...	0x62730609...	0.001727 ETH \$3.230 CLP	0.00160428 ETH	—
3	 Venta	⌚ Expirada	0xf17f5215...	—	0.001727 ETH \$3.230 CLP	Sin pujas	—
2	 Compra	🔒 Cerrada	0xf17f5215...	—	0.000730 ETH \$1.365 CLP	Sin pujas	—
1	 Compra	🔒 Cerrada	0xf17f5215...	0x62730609...	0.001727 ETH \$3.230 CLP	0.00160428 ETH	—

Figura 5.48: Historial completo de la cuenta administradora, incluyendo subastas exitosas y fallidas, y detalle de participación automática.



Conectado: 0xFE38557E...Bd73

Saldo: 90001.0359 ETH

Solo formulario

Desconectar

Volver al Dashboard

 **Panel de Administración**

Resumen

Todas las subastas

Horarios

Estacionamiento

Configuración del Estacionamiento

Dimensiones:

Filas:

Columnas:

Guardar y Actualizar

#1

TYPE1

ID Subasta

dd-mm-aaaa --:--

#2

TYPE1

ID Subasta

dd-mm-aaaa --:--

#3

TYPE1

ID Subasta

dd-mm-aaaa --:--

#4

TYPE1

ID Subasta

dd-mm-aaaa --:--

#5

TYPE1

ID Subasta

dd-mm-aaaa --:--

#6

TYPE1

ID Subasta

dd-mm-aaaa --:--

Figura 5.49: Configuración de espacio físico en el estacionamiento. El administrador puede asignar subastas activas a espacios específicos y definir horarios.

108

Capítulo 6

Conclusiones y Proyección del Sistema EVel Park

6.1 Conclusiones

El sistema desarrollado para EVel Park representa una solución innovadora y funcional para el intercambio de energía en estacionamientos inteligentes, basada en tecnologías descentralizadas como **blockchain** y herramientas asociadas al ecosistema Web3. A través de la implementación de una red privada con **Hyperledger Besu**, contratos inteligentes en **Solidity**, y una interfaz web interactiva conectada con **MetaMask**, se ha logrado construir una plataforma segura, trazable y escalable para facilitar subastas energéticas entre vehículos eléctricos.

La validación funcional de los módulos (M1: Red Blockchain, M2: Smart Contract, M3: Identificación) permitió comprobar que el sistema ejecuta correctamente sus flujos críticos: creación de subastas, recepción de ofertas, cierre de procesos y asignación de fondos, todo en un entorno distribuido y protegido por llaves criptográficas.

Un aporte relevante del sistema es la incorporación del **rol administrador**, quien representa al operador del estacionamiento. Este actor tiene acceso a una vista diferenciada en la DApp, con funcionalidades específicas como control de horarios, monitoreo de subastas y un primer módulo de **puja automática (AutoBid)**. Esta estrategia permite generar ofertas de forma automatizada bajo ciertas condiciones, combinando lógica descentralizada con decisiones configurables por el operador.

Desde una perspectiva de diseño, EVel Park no solo ofrece una arquitectura sólida y modular, sino que también propone un **modelo de negocio energético** centrado en la eficiencia, el auto-consumo y la colaboración entre usuarios. Este enfoque convierte al vehículo eléctrico en un agente activo del sistema energético urbano.

Cabe señalar que, si bien el sistema fue validado funcionalmente, no se realizaron pruebas formales de verificación orientadas al rendimiento, escalabilidad o robustez del sistema bajo carga. Esta decisión responde a dos factores: primero, el entorno de pruebas se ejecutó localmente en condiciones controladas y con recursos limitados; segundo, aún no se ha integrado el sistema con hardware físico, lo que podría afectar directamente el comportamiento real de la red. Por tanto, se considera que la medición de rendimiento sería prematura en esta etapa, y deberá ser abordada en futuras fases del proyecto, una vez que el sistema esté desplegado en condiciones más representativas.

Finalmente, el sistema demuestra que es posible construir infraestructuras inteligentes que promuevan el uso eficiente de recursos renovables, contribuyendo a una movilidad más sostenible y a la construcción de ciudades resilientes. El proyecto sienta las bases para futuras extensiones técnicas, comerciales y territoriales, tanto en Chile como en otros países que busquen integrar blockchain en la gestión energética urbana.

6.2 Trabajos Futuros

A partir de la implementación desarrollada, se identifican diversas líneas de mejora y expansión que permitirían escalar el sistema y llevarlo a entornos reales de producción. Estas mejoras abarcan tanto aspectos técnicos como estratégicos del modelo de negocio y la integración con el mundo físico.

- **Integración con infraestructura física:** Uno de los desafíos más importantes para la evolución del sistema es la incorporación de hardware que permita validar la entrega real de energía. Por ejemplo, si una subasta es acordada por 10 kWh, pero en la práctica solo se transfieren 7 kWh, el sistema debería mantener el precio acordado proporcionalmente, devolviendo el saldo restante o ajustando el cobro. Esto requerirá la integración con medidores inteligentes, sensores e incluso el uso de **oráculos** para verificar la cantidad de energía efectivamente transferida.

- **Estrategias avanzadas de AutoBid:** Actualmente solo se encuentra operativa la estrategia de puja automática basada en un rango de precio predefinido. Como mejora futura se podrían considerar técnicas como:

- Priorización por carga de batería restante o nivel de urgencia del vehículo.
- Algoritmos de aprendizaje automático (ML) que ajusten las ofertas según comportamientos históricos del mercado energético local.
- Integración con calendarios de disponibilidad del estacionamiento o demanda proyectada.

Estas estrategias permitirían que el PLLC actúe como un participante activo e inteligente del mercado, maximizando su eficiencia sin intervención manual constante.

- **Modelo económico, monetización e incentivos:** Actualmente, el sistema opera con la moneda base de la red Ethereum (**ETH**) y unidades mínimas llamadas **Wei**, sin una capa adicional de abstracción. Esto puede generar confusión entre usuarios al no existir una conversión visible o clara entre ETH y CLP (pesos chilenos). Para mejorar esta experiencia y facilitar la adopción masiva, se sugiere:

- Introducir un **token nativo** (por ejemplo, EVelToken o EVK) que actúe como unidad de intercambio propia del sistema.
- Implementar un oráculo de precios que actualice el tipo de cambio ETH/CLP en tiempo real.
- Establecer un sistema de incentivos por participación, como bonificaciones al proveedor más activo o descuentos por operaciones frecuentes.

- **Despliegue en red pública o infraestructura en la nube:** Actualmente la red blockchain funciona en un entorno local. Para su operación comercial, sería necesario desplegar nodos validados en plataformas como AWS, GCP o Azure, configurando accesos externos mediante RPC seguros y permitiendo la conexión de usuarios desde cualquier ubicación.
- **Interfaz y experiencia de usuario:** Se propone mejorar la DApp con una interfaz más amigable y didáctica, orientada a usuarios no técnicos. Esto incluiría:
 - Visualización del equivalente ETH/CLP en todas las operaciones.

- Asistentes para crear subastas con pasos guiados.
- Notificaciones en tiempo real y mayor visibilidad de historial de transacciones.
- **Escalabilidad urbana:** Finalmente, se proyecta la posibilidad de conectar múltiples estacionamientos inteligentes a una misma red blockchain compartida. Esto permitiría crear un **ecosistema energético distribuido**, donde usuarios puedan participar de forma dinámica en distintos puntos de carga dentro de una ciudad, aumentando la flexibilidad y el alcance del sistema.

Estas líneas de desarrollo permitirían no solo robustecer el sistema desde el punto de vista técnico, sino también proyectarlo como una solución escalable, adaptable y preparada para integrarse en escenarios reales de movilidad eléctrica y gestión energética urbana.

Anexo 1 - Contrato Inteligente para Subastas Energéticas

El siguiente contrato inteligente fue desarrollado en Solidity y corresponde a la lógica central del sistema de trading energético propuesto. Implementa subastas tanto de oferta como de demanda de energía entre vehículos eléctricos y la infraestructura del estacionamiento inteligente.

```
1      // SPDX-License-Identifier: MIT
2      pragma solidity ^0.8.0;
3
4      contract EnergyAuction {
5          enum ChargerType { TYPE1, TYPE2, TYPE3 }
6          enum AuctionType { Supply, Demand }
7
8          struct Auction {
9              uint256 id;
10             address seller;
11             uint256 energyQuantity;
12             uint256 minPrice;
13             ChargerType chargerType;
14             uint256 chargingTime;
15             uint256 deadline;
16             string timeSlot;
17             bool closed;
18             address highestBidder;
19             uint256 highestBid;
20             AuctionType auctionType;
```

```

21         uint256 initialAmount;
22     }
23
24     uint256 public auctionCount;
25     mapping(uint256 => Auction) public auctions;
26     mapping(uint256 => mapping(address => uint256)) public bids;
27
28     event AuctionCreated(uint256 id, address seller, AuctionType
        auctionType);
29     event BidPlaced(uint256 auctionId, address bidder, uint256
        amount);
30     event AuctionClosed(uint256 auctionId, address winner,
        uint256 bid);
31
32     modifier onlySeller(uint256 auctionId) {
33         require(msg.sender == auctions[auctionId].seller, "No
            eres el vendedor");
34         _;
35     }
36
37     modifier auctionOpen(uint256 auctionId) {
38         require(!auctions[auctionId].closed, "Subasta cerrada");
39         require(block.timestamp < auctions[auctionId].deadline, "
            La subasta ya expiro");
40         _;
41     }
42
43     function createAuction(
44         uint256 energyQuantity,
45         uint256 minPrice,
46         ChargerType chargerType,
47         uint256 chargingTime,
48         uint256 durationInMinutes,
49         AuctionType auctionType,
50         string memory timeSlot
51     ) external payable {

```

```

52         auctionCount++;
53         uint256 initialAmount = 0;
54
55         if (auctionType == AuctionType.Demand) {
56             require(msg.value >= minPrice, "Debes depositar al
57                 menos el precio minimo");
58             initialAmount = msg.value;
59         }
60
61         auctions[auctionCount] = Auction({
62             id: auctionCount,
63             seller: msg.sender,
64             energyQuantity: energyQuantity,
65             minPrice: minPrice,
66             chargerType: chargerType,
67             chargingTime: chargingTime,
68             deadline: block.timestamp + (durationInMinutes * 1
69                 minutes),
70             timeSlot: timeSlot,
71             closed: false,
72             highestBidder: address(0),
73             highestBid: 0,
74             auctionType: auctionType,
75             initialAmount: initialAmount
76         });
77
78         emit AuctionCreated(auctionCount, msg.sender, auctionType
79             );
80     }
81
82     function placeBid(uint256 auctionId) external payable
83         auctionOpen(auctionId) {
84         Auction storage a = auctions[auctionId];
85         require(a.auctionType == AuctionType.Supply, "Solo para
86             subastas de venta");

```

```

82         require(msg.value >= a.minPrice, "Oferta menor al precio
           minimo");
83
84         if (a.highestBidder != address(0)) {
85             require(msg.value > a.highestBid, "Debes ofertar mas
               que la actual");
86             payable(a.highestBidder).transfer(a.highestBid);
87         }
88
89         bids[auctionId][msg.sender] = msg.value;
90         a.highestBidder = msg.sender;
91         a.highestBid = msg.value;
92
93         emit BidPlaced(auctionId, msg.sender, msg.value);
94     }
95
96     function proposeBid(uint256 auctionId, uint256 offerPrice)
           external auctionOpen(auctionId) {
97         Auction storage a = auctions[auctionId];
98         require(a.auctionType == AuctionType.Demand, "Solo para
               subastas de compra");
99         require(offerPrice <= a.minPrice, "Oferta mayor al precio
               maximo establecido");
100        require(offerPrice <= a.initialAmount, "La oferta supera
               lo que el comprador deposito");
101
102        if (a.highestBidder != address(0)) {
103            require(offerPrice < a.highestBid, "Debes ofertar
               menos que la actual");
104        }
105
106        bids[auctionId][msg.sender] = offerPrice;
107        a.highestBidder = msg.sender;
108        a.highestBid = offerPrice;
109
110        emit BidPlaced(auctionId, msg.sender, offerPrice);

```

```

111     }
112
113     function closeAuction(uint256 auctionId) external onlySeller(
        auctionId) {
114         Auction storage a = auctions[auctionId];
115         require(!a.closed, "Ya esta cerrada");
116         a.closed = true;
117
118         if (a.highestBidder != address(0)) {
119             if (a.auctionType == AuctionType.Supply) {
120                 payable(a.seller).transfer(a.highestBid);
121             } else {
122                 payable(a.highestBidder).transfer(a.highestBid);
123                 uint256 refund = a.initialAmount - a.highestBid;
124                 if (refund > 0) {
125                     payable(a.seller).transfer(refund);
126                 }
127             }
128         }
129
130         emit AuctionClosed(auctionId, a.highestBidder, a.
            highestBid);
131     }
132
133     function closeExpiredAuctionAsWinner(uint256 auctionId)
        external {
134         Auction storage a = auctions[auctionId];
135         require(!a.closed, "Ya esta cerrada");
136         require(block.timestamp >= a.deadline, "No ha expirado");
137         require(a.highestBidder == msg.sender, "Solo el ganador
            puede cerrarla");
138
139         a.closed = true;
140
141         if (a.highestBidder != address(0)) {
142             if (a.auctionType == AuctionType.Supply) {

```

```

143         payable(a.seller).transfer(a.highestBid);
144     } else {
145         payable(a.highestBidder).transfer(a.highestBid);
146         uint256 refund = a.initialAmount - a.highestBid;
147         if (refund > 0) {
148             payable(a.seller).transfer(refund);
149         }
150     }
151 }
152
153     emit AuctionClosed(auctionId, a.highestBidder, a.
        highestBid);
154 }
155
156 function getAuction(uint256 auctionId) external view returns
    (Auction memory) {
157     return auctions[auctionId];
158 }
159 }

```

Listing 6.1: Contrato EnergyAuction en Solidity

Anexo 2 — Módulo AutoBid del Administrador

Descripción general

Este anexo presenta parte del código fuente correspondiente al módulo de puja automática (*Auto-Bid*) desarrollado para el panel de administración del sistema. Este componente permite automatizar ofertas en subastas activas, en función de criterios predefinidos como un rango de precios. A continuación, se incluyen los componentes clave implementados en React para ejecutar esta lógica dentro del dashboard del administrador.

AutoBidExecutor.jsx — Lógica de ejecución

```
if (strategy === "range") {  
  const min = parseFloat(localStorage.getItem("autoBidMinCLP"));  
  const max = parseFloat(localStorage.getItem("autoBidMaxCLP"));  
  const minPriceEth = parseFloat(ethers.utils.formatEther(a.minPrice));  
  const clpPrice = minPriceEth * FIXED_CLP_PER_ETH;  
  
  if (clpPrice >= min && clpPrice <= max) {  
    const tx = await contract.placeBid(a.id, {  
      value: a.minPrice  
    });  
    await tx.wait();  
  }  
}
```

```

    }
}

```

Este fragmento evalúa si el precio mínimo de una subasta está dentro del rango definido por el administrador (valores almacenados localmente). En caso afirmativo, se ejecuta automáticamente una oferta utilizando el contrato inteligente, desde la cuenta conectada vía MetaMask.

Fragmento de contrato inteligente — placeBid()

```

1 // Función ejecutada por AutoBid para ofertar en subastas de tipo
  Supply
2 function placeBid(uint256 auctionId) external payable auctionOpen(
  auctionId) {
3   Auction storage a = auctions[auctionId];
4   require(a.auctionType == AuctionType.Supply, "Solo para subastas
      de venta");
5   require(msg.value >= a.minPrice, "Oferta menor al precio minimo")
      ;
6
7   if (a.highestBidder != address(0)) {
8       payable(a.highestBidder).transfer(a.highestBid);
9   }
10
11   a.highestBidder = msg.sender;
12   a.highestBid = msg.value;
13
14   emit BidPlaced(auctionId, msg.sender, msg.value);
15 }

```

Esta función del contrato es invocada por el módulo AutoBid cuando se cumplen los criterios de rango de precio definidos. Aunque el proceso de decisión está automatizado, la transacción sigue requiriendo la firma del usuario a través de MetaMask, manteniendo la seguridad e integridad de la operación.

Bibliografía

- [1] I. S. Bayram, M. Z. Shakir, M. Abdallah y K. Qaraqe, “A survey on energy trading in smart grid”, en *2014 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, doi: 10.1109/GlobalSIP.2014.7032118, dic. de 2014.
- [2] Instituto Nacional de Estadísticas (INE), *Permisos de Circulación 2022 y Propuestas del Ministerio de Energía*, Disponible en: <https://www.ine.gob.cl>, 2023.
- [3] Gobierno de Chile, Ministerio de Energía y Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, *Hoja de ruta para el avance de la electromovilidad en Chile. Acciones concretas al 2026 para masificar el uso de esta tecnología*, Disponible en: <https://energia.gob.cl>, 2023.
- [4] P. Electromovilidad, *Orientaciones de Políticas Públicas*, Disponible en: <https://energia.gob.cl>, 2023.
- [5] Ministerio de Energía, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones y Ministerio del Medio Ambiente, *Estrategia Nacional de Electromovilidad: Un camino para los vehículos eléctricos*, Disponible en: <https://www.energia.gob.cl>, 2023.
- [6] ANAC, Asociación Nacional Automotriz de Chile A.G., *Informe de ventas de vehículos cero emisiones y bajas emisiones*, Disponible en: <https://www.anac.cl>, 2024.
- [7] F. C. Silva, A. Ahmed, M. Martínez e Y.-C. Kim, “Design and Implementation of a Blockchain-Based Energy Trading Platform for Electric Vehicles in Smart Campus Parking Lots”, *Energies*, vol. 12, n° 24, pág. 4814, dic. de 2019, doi: 10.3390/en12244814.

- [8] A. Mohammad, R. Zamora y T. T. Lie, “Transactive energy management of solar-based range anxious electric vehicle integrated parking lots”, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 38, pág. 101 360, 2024, doi: 10.1016/j.segan.2024.101360.
- [9] G. J. Osório, P. Name y A. Authors, “Rooftop photovoltaic parking lots to support electric vehicles charging: A comprehensive survey”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 133, pág. 107 274, dic. de 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107274.
- [10] M. Alinejad, O. Rezaei, A. Kazemi y S. Bagheri, “An Optimal Management for Charging and Discharging of Electric Vehicles in an Intelligent Parking Lot Considering Vehicle Owner’s Random Behaviors”, *Journal of Energy Storage*, vol. 35, pág. 102 245, mar. de 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102245.
- [11] M. A. Baherifard, R. Kazemzadeh, A. S. Yazdankhah y M. Marzband, “Intelligent charging planning for electric vehicle commercial parking lots and its impact on distribution network’s imbalance indices”, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 30, pág. 100 620, jun. de 2022, doi: 10.1016/j.segan.2022.100620.
- [12] M. J. A. Baig, M. T. Iqbal, M. Jamil y J. Khan, “A Low-Cost, Open-Source Peer-to-Peer Energy Trading System for a Remote Community Using the Internet-of-Things, Blockchain, and Hypertext Transfer Protocol”, *Energies*, vol. 15, n° 13, pág. 4862, jul. de 2022, doi: 10.3390/en15134862.
- [13] R. K. Kaushal, S. Jain, R. G. S. Rao, B. Thirumalaimuthu, R. Rawat y N. L., “A Payment System for Electric Vehicles Charging and Peer-to-Peer Energy Trading”, págs. 984-991, 2023, doi: 10.1109/I-SMAC58438.2023.10290505.
- [14] S. Khan, U. Amin y A. Abu-Siada, “P2P Energy Trading of EVs Using Blockchain Technology in Centralized and Decentralized Networks: A Review”, *Energies*, vol. 17, n° 9, pág. 2135, abr. de 2024, doi: 10.3390/en17092135.
- [15] Z. Fu, P. Dong, S. Li, Y. Ju y H. Liu, “How blockchain renovate the electric vehicle charging services in the urban area? A case study of Shanghai, China”,

- Journal of Cleaner Production*, vol. 315, pág. 128 172, sep. de 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128172.
- [16] T. AlSkaif, J. L. Crespo-Vazquez, M. Sekuloski, G. van Leeuwen y J. P. S. Catalão, “Blockchain-Based Fully Peer-to-Peer Energy Trading Strategies for Residential Energy Systems”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, nº 1, págs. 231-241, 2022, doi: 10.1109/TII.2021.3077008.
 - [17] F. Jamil, N. Iqbal, Imran, S. Ahmad y D. Kim, “Peer-to-Peer Energy Trading Mechanism Based on Blockchain and Machine Learning for Sustainable Electrical Power Supply in Smart Grid”, *IEEE Access*, vol. 9, págs. 39 193-39 217, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3060457.
 - [18] M. Moniruzzaman, A. Yassine y R. Benlamri, “Blockchain and cooperative game theory for peer-to-peer energy trading in smart grids”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 151, pág. 109 111, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109111>.
 - [19] K. Košťál, V. Khilenko y M. Hunák, “Hierarchical Blockchain Energy Trading Platform and Microgrid Management Optimization”, *Energies*, vol. 17, nº 6, 2024, doi: 10.3390/en17061333.
 - [20] B. C. Florea y D. D. Taralunga, “Blockchain IoT for Smart Electric Vehicles Battery Management”, *Sustainability*, vol. 12, nº 10, 2020, doi: 10.3390/su12103984.
 - [21] R. Nikbakht, F. Javed, F. Rezazadeh, N. Bartzoudis y J. Manges-Bafalluy, *Decentralized Energy Marketplace via NFTs and AI-based Agents*, [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.10406>, 2023. doi: 10.48550/arXiv.2311.10406.
 - [22] M. Kim et al., “A Secure Charging System for Electric Vehicles Based on Blockchain”, *Sensors*, vol. 19, nº 13, pág. 3028, jul. de 2019, doi: 10.3390/s19133028.
 - [23] H. T. Doan, J. Cho y D. Kim, “Peer-to-Peer Energy Trading in Smart Grid Through Blockchain: A Double Auction-Based Game Theoretic Approach”, *IEEE Access*, vol. 9, págs. 49 206-49 218, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3068730.

- [24] M. K. Hasan et al., “Blockchain Technology on Smart Grid, Energy Trading, and Big Data: Security Issues, Challenges, and Recommendations”, *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, n° 1, págs. 9 065 768, 2022, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/9065768>.
- [25] J. Abdella, Z. Tari, A. Anwar, A. Mahmood y F. Han, “An Architecture and Performance Evaluation of Blockchain-Based Peer-to-Peer Energy Trading”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, n° 4, págs. 3364-3378, jul. de 2021, doi: [10.1109/TSG.2021.3056147](https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3056147).
- [26] B. Zafar y S. B. Slama, “Energy Internet Opportunities in Distributed Peer-to-Peer Energy Trading Reveal by Blockchain for Future Smart Grid 2.0”, *Sensors*, vol. 22, n° 21, págs. 8397, nov. de 2022, doi: [10.3390/s22218397](https://doi.org/10.3390/s22218397).
- [27] K. S. Alam, A. M. A. D. Kaif y S. K. Das, “A blockchain-based optimal peer-to-peer energy trading framework for decentralized energy management within a virtual power plant: Lab scale studies and large scale proposal”, *Applied Energy*, vol. 365, págs. 123 243, jul. de 2024, doi: [10.1016/j.apenergy.2024.123243](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123243).
- [28] S. Mohammed, T. K. Asman, H. M. Salih y A. M. Mahmood, “ELECTRIC VEHICLE BLOCKCHAIN: PROBLEMS AND OPPORTUNITIES”, *Babylonian Journal of Networks (Babylonian J. Netw.)*, vol. 2024, n° SE-Articles, págs. 18-24, feb. de 2024, doi: [10.58496/BJN/2024/003](https://doi.org/10.58496/BJN/2024/003).