



Prototipo de plataforma Blockchain para la Gestión de Transacciones de Bonos de Carbono: Mercado Eléctrico colombiano

Santiago Vásquez Gómez

Universidad de Medellín
Facultad de Ingenierías, Maestría en Ingeniería de Software
Medellín, Colombia
22 de septiembre de 2025

Trabajo de Grado

Presentado como requisito parcial para optar al título de
Magíster en Ingeniería de Software

Autor: Santiago Vásquez Gómez

Director: PhD. Gabriel Mauricio Ramírez Villegas

Codirector: PhD(c). Ricardo Alonso Gallego Burgos

Universidad de Medellín
Facultad de Ingenierías, Maestría en Ingeniería de Software
Medellín, Colombia
22 de septiembre de 2025

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, **Guillermo** y **Margarita**. Su ejemplo de disciplina, constancia y amor por el aprendizaje me ha enseñado que la dedicación abre caminos y que todo reto puede convertirse en logro.

En tercer término, reconozco la guía invaluable de mi director de tesis, **PhD Gabriel Mauricio Ramírez**, cuya motivación constante y orientaciones oportunas resultaron esenciales para culminar este proyecto. De igual manera, agradezco a mi co-director, **PhD(c) Ricardo Gallego**, por sus acertados consejos y la dedicación con la que revisó y enriqueció cada etapa de mi trabajo.

Finalmente, agradezco el respaldo de la compañía **Global MVM**, que puso a mi disposición la infraestructura necesaria para desplegar el prototipo y fomentó un entorno colaborativo que enriqueció esta investigación. Extiendo este reconocimiento a mis compañeros de equipo, quienes, con su conocimiento y entusiasmo, contribuyeron decisivamente a la concreción de los objetivos planteados.

A todos ustedes, muchas gracias por creer en mí y acompañarme en esta etapa tan significativa de mi formación.

Resumen

El cambio climático representa uno de los desafíos más apremiantes de nuestra era, y el mercado de bonos de carbono (MBC) emerge como una solución crucial para financiar proyectos de mitigación. A pesar de su potencial, el mercado se enfrenta a obstáculos considerables en términos de verificación de emisiones, trazabilidad de transacciones y confiabilidad. Esta investigación se centra en cómo la tecnología blockchain puede superar tales desafíos específicamente en el contexto del mercado colombiano de bonos de carbono. A través de una revisión exhaustiva y análisis del estado actual del mercado, casos anteriores de integración de blockchain y el diseño y evaluación de un modelo basado en esta tecnología, se busca proponer un sistema más transparente y eficaz. Los resultados de esta tesis aspiran a beneficiar a reguladores, emisores de bonos y otras entidades relacionadas, no solo en Colombia sino en mercados similares alrededor del mundo.

Palabras clave: blockchain, bonos de carbono, trazabilidad, verificación, smart contracts, criptografía.

Abstract

Climate change represents one of the most pressing challenges of our era, and the carbon bond market emerges as a pivotal solution to finance mitigation projects. Despite its potential, the market faces significant hurdles in terms of emissions verification, transaction traceability, and reliability. This research delves into how blockchain technology can overcome such challenges specifically within the context of the Colombian carbon bond market. Through a comprehensive review and analysis of the current state of the market, previous cases of blockchain integration, and the design and evaluation of a model based on this technology, the aim is to propose a more transparent and efficient system. The findings of this thesis aspire to benefit regulators, bond issuers, and other related entities, not only in Colombia but in similar markets around the world.

Keywords: blockchain, carbon credits, traceability, verification, smart contracts, cryptography.

Contenido

Agradecimientos	2
Resumen	3
Abstract	3
1. Introducción	10
2. Contextualización	12
2.1. Contextualización del problema	12
2.2. Descripción del área problemática	16
2.3. Pregunta de investigación	18
2.4. Hipótesis	18
2.4.1. Hipótesis inicial	18
2.4.2. Hipótesis nula	18
2.5. Justificación	18
2.6. Objetivos	24
2.6.1. Objetivo general	24
2.6.2. Objetivos específicos	24
3. Estado del arte: Marco teórico y practico	25
3.1. Marco Teórico	25
3.1.1. Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV)	25
3.1.2. El mercado y la transición energética	26
3.1.3. Mercados de bonos de carbono	26
3.1.3.1. Mercados regulados	26
3.1.3.2. Mercados voluntarios	27
3.1.3.3. Tipos de bonos	27
3.1.3.4. Participantes en los mercados de bonos de carbono	28
3.1.4. Gobernanza y regulación	29
3.1.5. Blockchain	30
3.1.6. Tipos de redes blockchain	30
3.1.6.1. Redes públicas	30

3.1.6.2.	Redes privadas o permisionadas	31
3.1.6.3.	Hyperledger Fabric	31
3.1.6.4.	Hyperledger Besu	31
3.1.7.	Contratos inteligentes	31
3.1.7.1.	Lenguajes comúnmente utilizados	32
3.1.7.2.	Aplicaciones de blockchain en mercados de bonos de carbono	32
3.1.8.	Estándares de certificación en mercados de bonos de carbono	33
3.1.9.	Metodología de la Revisión Sistemática	33
3.2.	Marco metodológico	35
3.2.1.	Descripción del área de estudio	35
3.2.2.	Metodología de investigación	35
3.3.	Estado del arte	36
3.3.1.	Proceso de la revisión sistemática	36
3.3.2.	Pregunta de la RS	37
3.3.3.	Definición de la población, intervención, comparación y resultados (PICOC)	37
3.3.4.	Palabras clave	37
3.3.5.	Cadena de búsqueda	38
3.3.6.	Bases de datos.	38
3.3.7.	Criterios de inclusión y exclusión.	38
3.3.8.	Proceso de búsqueda	39
3.3.9.	Extracción de datos	39
3.3.10.	Resultados de la revisión sistemática	40
3.3.11.	Hallazgos y resultado de la RSL Desarrollada.	44
4.	Diseño e implementación del prototipo	48
4.1.	Fase 1: Revisión de la literatura como apoyo teórico y conceptual al proyecto de investigación	48
4.2.	Fase 2: Revisión de casos de éxito y de no éxito en la incorporación de tecnologías <i>blockchain</i> al MBC	49
4.3.	Fase 3: Diseño del prototipo del sistema de MRV en el MBC	51
4.3.0.1.	Diagrama de procesos del ciclo de vida del bono de carbono	53
4.3.1.	Arquitectura de referencia	54
4.3.1.1.	Principios de diseño.	55
4.3.2.	Descripción de componentes.	57
4.4.	Diagramas UML	59
4.4.1.	Diagrama de clases	59
4.4.2.	Diagrama de paquetes	60

4.4.3.	Diagrama de implementación	62
4.4.4.	Diagrama de secuencia	63
4.5.	Fase 4: Construcción del artefacto	64
4.5.1.	Configuración de la red <i>Hyperledger Besu</i>	64
4.5.2.	Desarrollo y despliegue de contratos inteligentes	66
4.5.2.1.	Flujo de despliegue.	66
4.5.3.	Desarrollo y despliegue del Oráculo (Azure Function)	68
4.5.4.	Implementación del <i>Frontend</i> de la dApp	70
4.6.	Fase 5: Estimación de costos	75
4.6.1.	Análisis de retorno de inversión (ROI)	77
5.	Validación y evaluación experta del prototipo	82
5.1.	Diseño metodológico	82
5.2.	Caracterización del panel	82
5.3.	Instrumento, escala y análisis de resultados	83
5.3.1.	Diseño del instrumento	83
5.3.2.	Resultados del análisis descriptivo	83
5.4.	Acciones derivadas	88
5.5.	Conclusión de la validación	89
6.	Conclusiones y Recomendaciones	90
6.1.	Conclusiones	90
6.2.	Recomendaciones	93
6.3.	Trabajo futuro	95
	Epílogo: una reflexión personal sobre el camino recorrido	96
	Referencias	97
	Anexos	114
.1.	Declaración de Propiedad Intelectual del Prototipo	114
.2.	Código fuente de los contratos inteligentes	115
.3.	Configuración de la red blockchain en Kubernetes	136
.4.	Formulario de validación de expertos	148
.5.	Resultados validación de expertos	167
.6.	Grabación reunión validación de expertos	177

Índice de cuadros

3.1. Palabras claves de la RS	37
3.2. Cadena de Búsqueda	38
3.3. Artículos más relevantes	44
4.1. Requisitos funcionales del prototipo	50
4.2. Requisitos no funcionales del prototipo	51
4.3. Correspondencia de la arquitectura propuesta con el patrón Broker	56
4.4. Atributos de calidad y mecanismos que los soportan en la ar- quitectura propuesta	57
4.5. Contratos inteligentes y responsabilidades	66
4.6. Parámetros de red para MetaMask	70
4.7. Escenario base del piloto y proyección anual estimada	75
4.8. Comparativa de servicios equivalentes en Azure, AWS y Goo- gle Cloud para el piloto	76
4.9. Comparativo de costos operativos por mes en USD	77
4.10. Ingresos mensuales proyectados por comisiones de transacción	78

Índice de figuras

19figure.caption.4	
3.1. Mapa conceptual de participantes en el mercado voluntario de bonos de carbono. Fuente: Elaboración propia.	28
3.2. Porcentaje de artículos por estado. Fuente: Elaboración propia.	40
3.3. Distribución de artículos por bases de datos. Fuente: Elaboración propia.	41
3.4. Numero de artículos por año. Fuente: Elaboración propia.	42
3.5. Resultados de la Agrupación por Clústeres de Artículos. Fuente: Elaboración propia.	43
44figure.caption.12	
44figure.caption.13	
4.1. Diagrama de procesos del ciclo de vida del bono de carbono. Fuente: Elaboración propia.	54
4.2. Arquitectura de referencia prototipo blockchain. Fuente: Elaboración propia.	55
4.3. Diagrama de clases: entidades y helpers implicados en el proceso de generación y venta del bono de carbono. Fuente: Elaboración propia	60
4.4. Diagrama de paquetes. Fuente: Elaboración propia	62
4.5. Diagrama de implementación del sistema. Fuente: Elaboración propia	63
4.6. Diagrama de secuencia: flujo de generación y venta del bono de carbono. Fuente: Elaboración propia	64
4.7. Registro de órdenes de despacho (rol Regulador). Fuente: Imagen extraída de prototipo Enerchain	72
4.8. Inyección de energía producida (rol Generador). Fuente: Imagen extraída de prototipo Enerchain	73
4.9. Listado de bonos disponibles (rol Cliente). Fuente: Imagen extraída de prototipo Enerchain	73
4.10. Confirmación de compra. Fuente: Imagen extraída de prototipo Enerchain	74

4.11. Certificado PDF emitido tras la compra. Fuente: Imagen extraída de prototipo Enerchain	74
4.12. Proyección económica del proyecto por etapas. Fuente: Elaboración propia	80
5.1. Caracterización de panel de expertos. Fuente: Análisis resultados <i>Microsoft forms</i>	83
5.2. Visión general del prototipo. Fuente: Análisis resultados <i>Microsoft forms</i>	84
5.3. Evaluación componentes principales. Fuente: Análisis resultados <i>Microsoft forms</i>	85
5.4. Evaluación calidad de la arquitectura. Fuente: Análisis resultados <i>Microsoft forms</i>	86
5.5. Evaluación global del prototipo. Fuente: Análisis resultados <i>Microsoft forms</i>	87
5.6. Evaluación alienación objetivos climaticos Colombia. Fuente: Análisis resultados <i>Microsoft forms</i>	87
5.7. Evaluación objetivos transición energética Colombia. Fuente: Análisis resultados <i>Microsoft forms</i>	88

1. Introducción

El cambio climático constituye uno de los mayores retos de de la humanidad actualmente, pues amenaza la seguridad hídrica y alimentaria, la salud pública y, en última instancia, la viabilidad misma de la vida en el planeta. Para encarar este desafío resulta imprescindible acelerar la transición hacia fuentes renovables de energía y, simultáneamente, instaurar mecanismos de mercado que reconozcan y remuneren las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

En ese contexto, el mercado de bonos de carbono se perfila como un instrumento idóneo para canalizar recursos hacia proyectos de mitigación; su efectividad, sin embargo, depende de la solidez de los procesos de medición, reporte y verificación (MRV) y de la trazabilidad de cada tonelada de CO₂ equivalente negociada. Hoy persisten ineficiencias —costos elevados de verificación, riesgos de doble conteo y opacidad informativa— que reducen la confianza de los actores y frenan la expansión del mercado.

Con el propósito de responder a ese problema, el presente trabajo diseña, implementa y evalúa un prototipo de plataforma basada en tecnología *blockchain* y contratos inteligentes que respalda las transacciones de bonos de carbono en el mercado eléctrico colombiano y garantiza la integridad de los datos de punta a punta. La investigación adopta la metodología *Design Science Research* (DSR). En una primera fase se explora el dominio mediante una revisión crítica de la literatura sobre retos de MRV y doble conteo en mercados de carbono, con énfasis en Latinoamérica; la segunda fase examina casos internacionales que emplean *blockchain* en mercados ambientales y extrae lecciones que orientan el diseño de la solución.

Posteriormente se define la arquitectura de red, la estructura de datos y la lógica de los contratos inteligentes que automatizan la tokenización de créditos; a continuación se construye el prototipo sobre Hyperledger Besu, integrando datos operativos de planta y un motor transaccional en tiempo real; finalmente, se somete el artefacto a evaluación experta mediante un panel Delphi, a fin de valorar su pertinencia técnica, operativa y regulatoria para el contexto colombiano.

Se espera que los resultados de este esfuerzo ofrezcan, por un lado, un marco de referencia que oriente a reguladores y actores del sector eléctrico en la adopción segura de *blockchain* en mercados ambientales emergentes y, por otro, un artefacto tecnológico que reduzca los costos de verificación, mitigue riesgos de manipulación de datos y fortalezca la gobernanza del mercado de bonos de carbono.

Al facilitar la financiación de proyectos de energía renovable, la plataforma propone además un impacto ambiental y social positivo que contribuirá a la construcción de un futuro climático viable para las próximas generaciones. En los capítulos que siguen se profundiza en la contextualización del problema, los fundamentos teóricos, el estado del arte, la metodología aplicada y la discusión de los hallazgos.

2. Contextualización

2.1 Contextualización del problema

El cambio climático es un fenómeno global que se debe principalmente a las actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles y la deforestación, que liberan gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera (Trenberth y Hurrell, 2019). Estos gases, como el dióxido de carbono y el metano, provocan un aumento en la temperatura global y cambios en el clima.

Los efectos del cambio climático incluyen el aumento del nivel del mar, eventos climáticos extremos, mayores tiempos de sequía, el deshielo de los glaciares a nivel mundial han aumentado el nivel del mar, alteraciones en los ecosistemas, cambios en los recursos hídricos, etc. (Inouye, 2022). Todos estos efectos tienen graves consecuencias para la seguridad alimentaria, la salud y la economía (Gattuso, Hoegh-Guldberg, y Pörtner, 2015).

La mitigación de los efectos negativos del cambio climático es fundamental para lograr la neutralidad climática (J. Chen, Cui, Xu, y Ge, 2021), un estado en el que las emisiones humanas de gases de efecto invernadero (GEI) se compensan con procesos naturales que los eliminan de la atmósfera.

La neutralidad climática, también conocida como neutralidad de carbono, se refiere al logro de un balance en el cual la cantidad total de emisiones de CO₂ liberados a la atmósfera es igualada por la cantidad de estos gases que son secuestrados o compensados a través de diversas estrategias (Chung y To, 2023). Estas estrategias incluyen la reforestación, la utilización de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono y la transición hacia fuentes de energía renovables y prácticas sostenibles que reduzcan las emisiones de carbono a la atmósfera (Pradhan, Shrestha, Pandey, y Limmeechokchai, 2018; Thew, Martin, Ford, Hale, y Omukuti, 2021; Singh, 2022).

Esto exige acciones inmediatas por parte de la sociedad, las entidades corporativas y las naciones. Una forma para lograr estas acciones es mediante la compra de bonos verdes o bonos de carbono a otras entidades o naciones que los emiten con el fin de compensar sus propias emisiones.

El mercado de bonos funciona bajo el principio de compensación, es decir las entidades y las naciones que no pueden reducir sus propias emisiones de manera inmediata y directa puedan comprar ese equivalente de emisiones de GEI a entidades o proyectos que si pueden reducir las emisiones de GEI o contribuyen a la mitigación del cambio climático (D. Zhang, Mohsin, y Taghizadeh-Hesary, 2022), permitiendo una expansión en la implementación de tecnologías limpias y prácticas sostenibles. Además, el retorno de la inversión se puede observar en términos financieros y en la contribución a la consecución de objetivos climáticos globales.

Los beneficios del mercado de bonos son múltiples y se extienden a todas las partes involucradas. **Los bonos verdes** son instrumentos de deuda emitidos para financiar proyectos con impactos ambientales positivos (p.ej. energías renovables, eficiencia energética o transporte limpio) (Hunt, 2024; Freeburn y Ramsay, 2020). **Los bonos de carbono** (o bonos de reducción de emisiones) se estructuran sobre la base de certificados de reducción verificada de CO₂; sus flujos financieros están vinculados a la generación o compraventa de créditos de carbono (International Organization of Securities Commissions, 2022; Science Based Targets initiative, 2023). Por su parte, **los bonos catastróficos (cat bonds)** permiten transferir al mercado de capitales el riesgo derivado de desastres naturales—por ejemplo, huracanes o terremotos—y liberan recursos para la reconstrucción si se activa el evento gatillo (Braun y Kousky, 2021).

Para los emisores, estos instrumentos proporcionan fuentes de financiación que viabilizan proyectos que de otra forma no serían posibles (Tang y Zhang, 2018). Para los inversionistas, representan una oportunidad de mejorar sus credenciales de sostenibilidad, cumplir regulaciones o compromisos climáticos y, al mismo tiempo, obtener rendimientos competitivos (Tang y Zhang, 2018).

Finalmente, para la sociedad y el medio ambiente, el financiamiento de estos proyectos contribuye directamente a la mitigación de los efectos del cambio climático, la promoción de tecnologías limpias, la transición energética y el desarrollo sostenible (Banga, 2018).

A pesar de los esfuerzos en la lucha contra el cambio climático mediante la utilización de bonos verdes o bonos de carbono, se presentan importantes desafíos en cuanto a la medición, reporte y verificación (MRV) de la información generada a través de proyectos de mitigación (Betz y cols., 2022; Kila, 2018; Mheiri y Nobanee, 2020; D. Zhang y cols., 2019). Estos desafíos pueden ser contraproducentes para el medio ambiente, la rentabilidad del mercado y la confianza del mismo (Betz y cols., 2022).

Especialmente en los países en vías de desarrollo, donde estos mecanismos aún no están plenamente establecidos, se observa una diferencia significativa

entre las emisiones de CO2 reducidas reportadas por las entidades y aquellas que han sido verificadas de manera independiente (Y. Hu, Ren, Wang, y Chen, 2020).

Aunque si bien el MBC tiene consecuencias positivas para las comunidades en los países en desarrollo, como las políticas basadas en el comercio de emisiones podría ampliar las oportunidades de mitigación a un coste menor y el beneficio económico para las comunidades (Oliveira, Gurgel, y Tonry, 2020), también genera consecuencias negativas como la injusticia climática y la concentración de la propiedad de la tierra en manos de grandes empresas y corporaciones, beneficiando especialmente a estas últimas (Wittman, Powell, y Corbera, 2015).

Adicionalmente, el deseo de establecer una economía de bonos de carbono que sea verdaderamente democrática, descentralizada y transparente aún no se ha concretado de manera eficiente, segura y confiable. Este desafío señala la necesidad de explorar soluciones innovadoras capaces de abordar estas deficiencias críticas en la gestión de transacciones de bonos de carbono (Sipthorpe, Brink, Leeuwen, y Staffell, 2022; Kyu Kim y Huh, 2020; Marchant, Cooper, y Gough-Stone, 2022).

Si bien entre 2020 y 2023 la economía de los bonos de carbono impulsó modelos de negocio innovadores y empoderó a usuarios y comunidades en la adopción de energías sostenibles (Saraji y Borowczak, 2021), el panorama de 2024-2025 exhibe un repliegue político que erosiona aquel ímpetu inicial.

En *Estados Unidos*, la nueva administración federal revirtió compromisos climáticos: se retiró nuevamente del Acuerdo de París y desmanteló más de 140 normas ambientales, debilitando con ello la señal regulatoria que sostenía parte de la demanda de créditos de carbono (Milman, 2025). Un efecto similar se observa en el *Reino Unido*, donde el gobierno dilató o suavizó políticas cruciales para alcanzar el objetivo de *net-zero*, entre ellas la prohibición de automóviles de combustión a partir de 2030; dichas decisiones ya han motivado recursos judiciales contra el Estado por incumplir sus propias metas (Jones Day, 2024). Finalmente, en *Brasil*, investigaciones sobre proyectos *REDD+* sospechosos de fraude llevaron al registro Verra a suspender preventivamente la emisión de créditos, mientras el Ministerio de Medio Ambiente advertía sobre el creciente riesgo reputacional para los compradores internacionales (Sax, 2024; Harris, 2024).

Estas turbulencias han intensificado las exigencias de **integridad y transparencia** en el Mercado de Bonos de Carbono (MBC). En este contexto, las soluciones tecnológicas destinadas a sostener la confianza de inversores y reguladores deben reunir tres atributos esenciales. Primero, han de ser **resilientes** frente a cambios regulatorios súbitos y frecuentemente heterogéneos entre jurisdicciones, de modo que continúen operando sin pérdidas

de funcionalidad o seguridad.

Segundo, deben ser plenamente **auditables**: cada tonelada de CO₂e transada tiene que quedar vinculada a un registro criptográfico inmutable que pueda verificarse en tiempo real. Finalmente, resulta indispensable la **interoperabilidad** con los estándares internacionales vigentes —en particular los lineamientos del Artículo 6 del Acuerdo de París— para facilitar el intercambio y la futura convergencia entre mercados voluntarios y de cumplimiento (Betz y cols., 2022).

En síntesis, el foco ya no es solo la eficiencia de las transacciones, sino la capacidad del sistema para *sobrevivir a la volatilidad política*. Este contexto refuerza la pertinencia de plataformas basadas en *blockchain*, donde la inmutabilidad de los registros y la gobernanza distribuida pueden amortiguar los vaivenes regulatorios y salvaguardar la legitimidad ambiental de los proyectos de mitigación.

Colombia ha creado un marco legal para controlar las emisiones de carbono y promover la sostenibilidad. La Ley 1819 de 2016 estableció el primer impuesto al carbono e incentivó a las empresas que utilizan energías renovables y comercian con certificados de carbono (Gobierno de Colombia, 2016). La Ley 1844 de 2017 ratificó los acuerdos de París (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2017), mientras que la Ley 1931 de 2018 definió las directrices para el cambio climático y creó el fundamento para el mercado de carbono (Gobierno de Colombia, 2018). El Decreto 446 de 2020 exige la validación y verificación de proyectos de mitigación de gases de efecto invernadero por entidades certificadas (Gobierno de Colombia, 2020). Estas leyes y regulaciones evidencian un enfoque proactivo de Colombia hacia la sostenibilidad y la reducción de emisiones de carbono.

Estas disposiciones sobre carbono se complementan con políticas energéticas que apuntan a la misma meta climática. En particular, la **Ley 1715 de 2014** sentó las bases para incorporar Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) al Sistema Interconectado Nacional y otorgó incentivos tributarios a los proyectos de generación limpia (*Ley 1715 de 2014: Por medio de la cual se regula la integración de las fuentes no convencionales de energía al Sistema Energético Nacional*, 2014). A partir de este andamiaje normativo reforzado por las subastas de 2019 y 2021, así como por recientes ajustes regulatorios de la CREG el mercado eléctrico colombiano ha entrado en una fase de transformación que exige nuevos mecanismos de flexibilidad y precio.

El impulso a las renovables se reflejaba en apenas *30 MW* solares y eólicos operativos en 2018 (Ministerio de Minas y Energía, 2018), pero dio un giro decisivo con la primera *subasta de cargo por confiabilidad* de 2019, que adjudicó *1.3 GW* en proyectos FNCER (Ini, 2019). Gracias a ello, la capacidad

renovable en pruebas u operación superó **1.0 GW** a mediados de 2024 y cerró el año con *1.3 GW* efectivos (del SIN, 2024; Sanclemente Fernández Abogados S.A., 2024). Las proyecciones para 2025 anticipan que Colombia rozará los *2 GW* fotovoltaicos instalados (Ini, 2025).

La integración del mercado eléctrico colombiano con el MBC y las políticas nacionales con respecto a la lucha contra el cambio climático podría acelerar la transición energética del país hacia las fuentes renovables no convencionales (Dai, Xie, Liu, y Masui, 2018) mejorando así las emisiones de GEI y un acceso a la energía en Colombia más equitativo, pero todo esto se podría ver obstaculizado, debido a las limitaciones que existen actualmente en cuanto a los sistemas de MRV del país.

2.2 Descripción del área problemática

El uso de los bonos de carbono se ha convertido en una herramienta popular para combatir el cambio climático, debido a su potencial para regular las emisiones de GEI (David, 2022). Estos instrumentos financieros permiten que las empresas o entidades compensen sus emisiones de carbono invirtiendo en proyectos que reducen o secuestran GEI de la atmósfera, como la reforestación o las energías renovables. Al proporcionar un mecanismo económico para la reducción de emisiones, los bonos de carbono fomentan la inversión en tecnologías limpias y prácticas sostenibles (Shaydurova, Panova, Fedosova, y Zlotnikova, 2018).

Sin embargo, la implementación no está exenta de desafíos, entre los cuales se encuentran la verificación de emisiones GEI, la cual es fundamental para asegurarse de que las emisiones de gases de efecto invernadero realmente hayan sido reducidas o evitadas gracias a la implementación del proyecto (D. Zhang y cols., 2022; Sanderson, 2018). Esta verificación debe ser precisa y fiable para confirmar el impacto positivo del proyecto en el medio ambiente.

Otro desafío crucial es demostrar la **adicionalidad**. Un proyecto se considera *adicional* cuando las reducciones de emisiones que genera *no habrían ocurrido* en un escenario de referencia sin el financiamiento proveniente de los créditos de carbono (Trencher, Nick, Carlson, y Johnson, 2024; Salzman y Weisbach, 2024). En otras palabras, los ingresos del bono deben ser la condición que viabiliza la acción de mitigación; de lo contrario, el crédito no aporta valor climático neto (D. Zhang y cols., 2022). Asegurar la adicionalidad mediante pruebas de barrera económica, reglamentaria o de inversión garantiza que los bonos de carbono representen beneficios reales y verificables para la lucha contra el cambio climático.

El **problema del doble conteo** también presenta un reto significativo.

Esto ocurre cuando las mismas emisiones reducidas o evitadas se cuentan más de una vez, lo cual puede suceder si varios compradores adquieren créditos de carbono de un mismo proyecto (L. Schneider y cols., 2019; Lee, hwan Kim, y il Kim, 2018). Evitar el doble conteo es esencial para mantener la integridad y credibilidad del MBC, asegurando que cada tonelada de CO₂ compensada sea única y no se atribuya a múltiples partes.

Más allá de los desafíos técnicos asociados al MRV, el mercado presenta un problema sistémico: **coexisten múltiples plataformas y registros de bonos de carbono que operan con estándares semejantes, pero rara vez compatibles**. Verra Registry y Gold Standard, por ejemplo, administran libros contables propios, mientras que bolsas como Xpansiv CBL, AirCarbon Exchange o ClimateTrade tokenizan créditos en redes *blockchain* diferentes (*Verified Carbon Standard (VCS) Registry*, 2025; *Gold Standard Impact Registry*, 2025; *Global Carbon Exchange — Market Data 2024*, 2024). La proliferación de sistemas no interoperables ha generado tres efectos principales. En primer lugar, la información relativa a un proyecto inscrito en Verra no se replica de forma automática en Gold Standard ni en los ledgers distribuidos, de modo que la ausencia de sincronización

Por último, **la calidad y credibilidad de los verificadores** es esencial en este contexto, ya que la transparencia y la independencia de estos hacen que los proyectos sean confiables y mantengan una buena reputación (Wang, Wang, y Chen, 2022).

Mientras que los bonos de carbono representan una estrategia prometedora para combatir el cambio climático, la efectividad de esta herramienta depende en gran medida de la solidez de los mecanismos de MRV (Betz y cols., 2022; Kila, 2018; Mheiri y Nobanee, 2020; D. Zhang y cols., 2019). La mejora de estos mecanismos es crucial para superar los desafíos asociados con la verificación de emisiones, la adicionalidad, el doble conteo, y la credibilidad de los verificadores.

La adopción de políticas eficaces y la integración de nuevas tecnologías emergentes de la cuarta revolución industrial, como la inteligencia artificial, *blockchain* y el Internet de las cosas (IoT), pueden ofrecer soluciones innovadoras para mejorar la transparencia, precisión y fiabilidad de los procesos de MRV (Marchant y cols., 2022; Woo y cols., 2021). El fortalecimiento de los mecanismos de MRV, apoyado por un marco legal claro y el aprovechamiento de los avances tecnológicos, es importante para asegurar que el MBC cumpla con su objetivo de ser una herramienta vital para la lucha contra el cambio climático.

2.3 Pregunta de investigación

¿Como la implementación de la tecnología blockchain y los contratos inteligentes en el mercado de bonos de carbono en Colombia podría mejorar los mecanismos de medición, reporte y verificación de las reducciones de emisiones, en comparación con los métodos actuales?

2.4 Hipótesis

2.4.1. Hipótesis inicial

La implementación de tecnologías blockchain en las transacciones del MBC de Colombia, específicamente en el contexto de las energías renovables, potenciará el monitoreo, reporte y verificaciones de las reducciones de emisiones y fortalecerá la confiabilidad en dicho mercado.

2.4.2. Hipótesis nula

La implementación de tecnologías blockchain en las transacciones del MBC de Colombia, específicamente en el contexto de las energías renovables, no tendrá un impacto significativo en el monitoreo, reporte y verificaciones de las reducciones de emisiones ni en la confianza del mercado.

2.5 Justificación

En la actualidad, el cambio climático es uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad y es esencial tomar medidas para mitigar sus efectos, según el panel intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC) advierte que la temperatura media global podría aumentar en 1.5 grados Celsius para el año 2030, trayendo consigo el aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos (Thompson, 2015; Sadai, Spector, De-Conto, y Gomez, 2022; *GLIMS Database Advances Glacier Monitoring from Space*, 2025; World Meteorological Organization, 2025).

Para financiar proyectos que buscan mitigar los efectos del cambio climático, como la conservación de bosques, la reforestación y las energías limpias, se creó el MBC. Este mercado busca que las empresas y las naciones sean cada vez más neutrales en sus emisiones de carbono, lo que ha llevado a un crecimiento significativo en los últimos años (Zhou y Zhang, 2022).

Según el *State and Trends of Carbon Pricing 2024* del Banco Mundial, los ingresos mundiales por instrumentos de fijación de precios del carbono

superaron por primera vez los USD 100 000 millones en 2023 y el número de instrumentos operativos ascendió a 75 (World Bank, 2024). Sin embargo, en el segmento voluntario se observó una contracción continuada.

En cuanto a la **emisión de créditos**, los registros independientes expidieron **324 Mt CO₂e** en 2023, lo que representa un descenso del 22% respecto de las 417 Mt de 2022 (Marketplace, 2024); datos preliminares de *BloombergNEF* apuntan a una nueva caída del 4% en 2024, hasta 311 Mt CO₂e (BloombergNEF, 2025). Esta reducción se ha visto agravada por los **cuellos de botella de auditoría**, ya que la escasez de validadores y verificadores acreditados ralentizó el flujo de proyectos hacia el registro y, por ende, la oferta total de créditos (Marketplace, 2024).

La oferta sigue dominada por **créditos de energías renovables**. Si bien su peso cayó del 55% en 2022 al 46% en 2023 (148.9 Mt de un total de 324.4 Mt)(World Bank, 2024), continúan siendo la categoría más numerosa, seguida de proyectos de Uso de la Tierra y Forestales (LUF). La figura 2.1 presenta la evolución de las emisiones por tipo de proyecto.

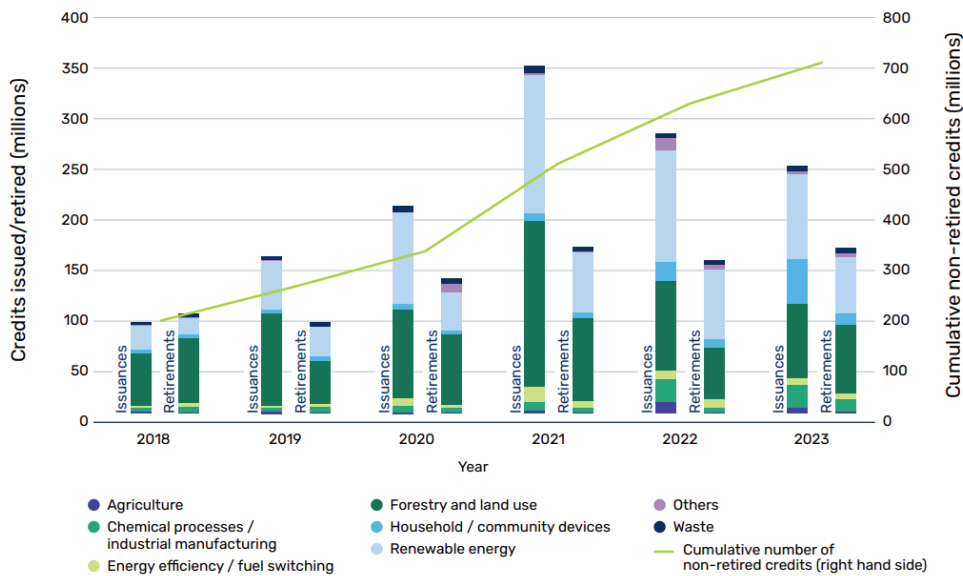


Figura 2.1: Distribución de créditos por categoría y año. Fuente: State of the Voluntary Carbon Market 2024(World Bank, 2024)

El mismo informe del Banco Mundial recuerda que los instrumentos de precio del carbono *sólo* cubren actualmente el **24%** de las emisiones globales(World Bank, 2024). Esto no implica que dicho porcentaje esté com-

pensado; significa que ese volumen de emisiones está sujeto a un impuesto al carbono o a un sistema de comercio de emisiones (ETS), mientras que la compensación efectiva a través de bonos voluntarios u otros mecanismos sigue siendo mucho menor.

Sin embargo, uno de los mayores desafíos en el MBC es la verificación de las reducciones de GEI por parte de los proyectos de mitigación, la trazabilidad de las transacciones de compra, venta y emisión de bonos es otra preocupación vital. La falta de un seguimiento claro puede generar dudas sobre la legitimidad de los bonos y la autenticidad de las reducciones de emisiones (Rodríguez y Gouritin, 2020).

En Latinoamérica existen proyectos de mitigación, como el Scolel Té en el estado de Chiapas en México (Osborne y Shapiro-Garza, 2017), este no solo busca producir créditos de carbono, sino también generar beneficios para las comunidades locales y estructuras de gobierno tradicionales. El proyecto empezó a vender bonos de carbono en el mercado de voluntario a partir de 1997, beneficiando desde entonces a más de 1200 pequeños productores de bonos en nueve grupos comunitarios (Osborne y Shapiro-Garza, 2017).

En Paraguay, el proyecto *Corazón Verde del Chaco* el mayor REDD+ del país obtuvo en 2023 su primera verificación VCS + CCB Gold, con una expectativa de 5.6 millones t CO₂e evitadas durante los próximos diez años (Quadriz, 2023).

En Brasil, la *startup* Mombak restauró ya 45,000 acres de la Amazonía y ha firmado offtakes por 150 millones USD con corporaciones como Google y Microsoft para la compra de créditos de remoción basados en reforestación nativa (S., 2024; Reuters, 2025).

En México, los proyectos de restauración de manglar liderados por la Fundación San Crisanto en Yucatán emitieron 13,400 créditos certificados y sirven de modelo para cuatro iniciativas NbS en validación (P. V. Foundation, 2024).

En Colombia existe el proyecto ubicado en la selva Matavén el cual es una zona boscosa ubicada en el departamento del Vichada, este proyecto busca financiar a más de 13 mil indígenas para que preserven el hábitat a través de la venta de créditos de carbono, el cual entro en vigencia desde enero de 2013 y en promedio evitan emitir 3'622,352 toneladas de CO₂ al año (for Technical Standards y Certification-ICONTEC, 2017).

El mercado eléctrico Colombiano representa un caso de estudio relevante debido a sus características y desafíos específicos que enfrenta. Y a su enorme potencial en energías renovables, especialmente en energía solar y eólica, que podría financiarse a través del MBC (Perez, Carabali, y Benavides-Franco, 2022).

Analizando la información disponible en la plataforma de XM, opera-

dor del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y administrador del mercado eléctrico colombiano, se identifica que actualmente Colombia cuenta con más de 80 proyectos de generación solar fotovoltaica en operación y 2 proyectos de generación eólica, los cuales en conjunto suman aproximadamente 1.632 MW de capacidad instalada a partir de fuentes renovables no convencionales (E.S.P., 2024b).

En cuanto a los agentes del mercado, se identifican **clientes no regulados**, que son aquellos usuarios con consumos superiores a 55.000 kWh al mes o 100 kW de potencia, quienes pueden negociar libremente sus contratos de suministro de energía eléctrica directamente con un comercializador. Esta categoría incluye grandes consumidores industriales o comerciales, y representa una parte estratégica del mercado por su capacidad de decisión sobre precios y condiciones (Colombia, 2024). Actualmente, se estima que existen entre 2.000 y 3.000 usuarios no regulados registrados en Colombia, distribuidos en diferentes niveles de tensión y sectores económicos (E.S.P., 2023; de Servicios Públicos Domiciliarios, 2023b).

Por otro lado, los **comercializadores** actúan como intermediarios entre los generadores de energía y los usuarios finales (tanto regulados como no regulados). En el contexto colombiano, estos agentes adquieren la energía en el mercado mayorista (ya sea a través de contratos bilaterales o en bolsa) y se encargan de su distribución y facturación a los consumidores, asumiendo riesgos comerciales y operativos (E.S.P., 2024c). Según registros recientes, el país cuenta con aproximadamente entre 80 y 100 empresas comercializadoras activas en el mercado de energía mayorista (República, 2023).

El Mercado de Energía Mayorista (MEM) liquida en promedio del orden de **15 transacciones de compraventa de energía por día**, sumando la operación diaria de la bolsa spot y los contratos bilaterales registrados (de Servicios Públicos Domiciliarios, 2023a). El valor total negociado puede superar los \$3,8 billones mensuales, de los cuales la bolsa representa cerca del 12–15 % y los acuerdos a plazo el resto (E.S.P., 2024a).

Debido a la matriz eléctrica predominantemente hidráulica del país, aproximadamente **70–85 % de la energía negociada cada día proviene de fuentes renovables** —principalmente hidroeléctricas—, cifra que puede descender a 60 % en períodos secos intensificados por el fenómeno de El Niño (E.S.P., 2024d). Aunque las fuentes solares y eólicas aún participan con una fracción menor, su aporte crece al ritmo de la nueva capacidad FNCER incorporada (más de 1,6 GW hasta 2024).

Sin embargo, existen obstáculos importantes en su camino, como el alto costo y la escala limitada del mercado, la falta de interconexión con el sistema eléctrico nacional podría evitar que los consumidores de micro-redes aisladas participen en el mercado eléctrico colombiano como auto generadores,

limitando la demanda potencial de proyectos de energía renovable financiados mediante bonos de carbono (García-Vera, Dufo-López, y Bernal-Agustín, 2020).

La relación entre el mercado eléctrico Colombiano y el MBC, es importante para comprender el porque de la investigación. Los proyectos de energía renovable, como los de energía solar y eólica contribuyen a la reducción de las emisiones de GEI. Estas reducciones pueden ser cuantificadas y certificadas como bonos de carbono, los cuales pueden ser vendidos en el MBC para financiar parcialmente los costos de implementación de dichos proyectos. Así el MBC se convierte en un mecanismo interesante para fomentar la inversión en energías renovables dentro del mercado eléctrico colombiano.

Estudiar la implementación y la transición del mercado eléctrico colombiano hacia fuentes de energía renovable, y su integración con el Mercado de Bonos de Carbono (MBC) a través de la generación y comercialización de créditos, permitirá comprender con mayor profundidad los retos actuales y aportará información valiosa sobre cómo superarlos mediante la aplicación de la tecnología *blockchain*.

La evidencia más reciente respalda tres hechos clave. En primer lugar, la ambición climática mundial no deja de crecer: en 2023 los ingresos por instrumentos de fijación de precios del carbono superaron los USD 100 000 millones y el total de instrumentos operativos alcanzó los 75 (World Bank, 2024); sin embargo, la oferta de créditos de alta integridad se contrajo un 22 % en ese año y muestra una nueva caída del 4 % en 2024 de manera preliminar (Marketplace, 2024; BloombergNEF, 2025).

En segundo lugar, el stock acumulado de créditos no retirados supera ya las 700 Mt CO₂, más del doble que en 2018 según los balances de los registros independientes (Marketplace, 2024). Y en tercer lugar, América Latina —y en particular Colombia— posee un abundante potencial de mitigación basado en energías renovables y soluciones naturales (por ejemplo, 50 GW de capacidad solar-eólica técnicamente viable (Perez y cols., 2022)), pero afronta todavía importantes barreras de financiamiento, auditoría y articulación entre los mercados eléctricos y de carbono.

Estos elementos justifican emprender un estudio que analice las brechas de confianza, estandarización e interoperabilidad que limitan el MBC; evalúe en qué medida las tecnologías de la Cuarta Revolución Industrial —*blockchain*, inteligencia artificial e Internet de las Cosas— pueden reducir tales brechas; y aporte evidencia aplicable al contexto colombiano, donde la transición energética y la expansión del mercado de carbono avanzan de manera paralela.

Generar conocimiento riguroso sobre estos puntos es indispensable para que el mercado de bonos de carbono cumpla su propósito de canalizar recursos

hacia proyectos que contribuyan, de forma creíble y medible, a limitar el calentamiento global muy por debajo de 2°C (*GLIMS Database Advances Glacier Monitoring from Space*, 2025; World Meteorological Organization, 2025).

2.6 Objetivos

2.6.1. Objetivo general

Diseñar y evaluar un prototipo de plataforma blockchain basada en smart contracts para mejorar el MRV de las reducciones de emisiones de la generación eléctrica en Colombia, facilitar la emisión, trazabilidad y validación de bonos de carbono, mediante la evaluación de expertos.

2.6.2. Objetivos específicos

1. Analizar el estado actual del MBC, evaluando los desafíos asociados a la verificación y contabilidad de las reducciones de emisiones y las soluciones propuestas para abordar el problema del doble conteo.
2. Revisar casos de éxito y no exitosos en la incorporación de tecnologías blockchain en el MBC, identificando mejores prácticas y lecciones aprendidas.
3. Diseñar el modelo usando tecnologías blockchain de acuerdo con las mejores prácticas identificadas en la revisión de la literatura, para la validación y trazabilidad de las transacciones.
4. Implementar un prototipo funcional en una **red blockchain permissionada**, mediante contratos inteligentes y módulos MRV, para demostrar la emisión, trazabilidad y verificación de bonos de carbono.
5. Evaluar el prototipo blockchain en el mercado colombiano de bonos de carbono a partir de las evaluaciones y percepciones de los usuarios y el desempeño observado.

3. Estado del arte: Marco teórico y practico

3.1 Marco Teórico

El monitoreo, reporte y verificación de las transacciones en los mercados de bonos de carbono se han convertido en condiciones indispensables para garantizar la integridad y eficacia de estos instrumentos en la lucha contra el cambio climático y la transición hacia sistemas energéticos sostenibles (Gerbeti, 2021; K. Hu y Chen, 2019; Zappa, Junginger, y van den Broek, 2021). Bajo el esquema de asignar un valor económico a la reducción de emisiones y en línea con la teoría de la “mano invisible” de Adam Smith, que subraya cómo mercados libres conducen a equilibrios eficientes, los bonos de carbono incentivan tanto a emisores públicos y privados como a inversores a financiar proyectos de mitigación.

3.1.1. Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV)

La hipótesis sostiene que la incorporación de *blockchain* en el Mercado de Bonos de Carbono (MBC) de Colombia, especialmente para proyectos de energías renovables, fortalecerá cada fase del ciclo de *Monitoreo, Reporte y Verificación* (MRV) y, con ello, la solidez ambiental y financiera de dichos instrumentos (Schletz, Franke, y Salomo, 2020; Siphthorpe y cols., 2022; Mungroo, Tupsee, y Pierre, 2024).

El **monitoreo** comprende la medición continua y sistemática de variables clave —producción de energía, factores de emisión, uso de combustibles— que sirven para estimar las toneladas de CO₂ evitadas o removidas. Gracias a un libro mayor distribuido, los datos primarios del proyecto pueden registrarse de forma inmutable y con sello temporal, lo que permite a los verificadores acceder a la serie histórica completa sin riesgo de manipulación (Luo, Shen, Liang, Sun, y Dong, 2024; Patro, Jayaraman, Acquaye, y Salah, 2024).

El **reporte** reúne esas mediciones y los supuestos metodológicos en documentos estructurados que deben ser accesibles para la autoridad competente

y los participantes del mercado. Mediante contratos inteligentes, cada versión del informe queda anclada criptográficamente a la cadena, garantizando integridad y trazabilidad documental automática sin depender de un repositorio centralizado (Schletz y cols., 2020; Siphthorpe y cols., 2022).

La **verificación** implica la evaluación independiente, a cargo de un organismo acreditado, que confirma la coherencia y exactitud del reporte. Al registrar tanto las evidencias analizadas como la firma digital del verificador en la misma red, *blockchain* facilita la auditoría y reduce la asimetría de información entre vendedores, compradores y reguladores (Mungroo y cols., 2024; Luo y cols., 2024).

3.1.2. El mercado y la transición energética

Un mercado eficiente, regulado por la oferta y la demanda, es el escenario donde se descubren los precios que asignan valor a bienes y servicios. En el contexto energético, la transición hacia fuentes renovables —definida como el proceso de reemplazar gradualmente los combustibles fósiles por alternativas más limpias y tecnológicamente avanzadas— está impulsada tanto por cambios estructurales en la oferta y la demanda de energía como por políticas que internalizan el costo de las emisiones (Pukite, Coyne, y Challou, 2018; Markard, 2018). La fijación de un precio al carbono, ya sea mediante impuestos o mediante sistemas de comercio de emisiones (ETS), corrige la falla de mercado original, al obligar o motivar a los agentes económicos a reducir su huella de CO₂.

3.1.3. Mercados de bonos de carbono

Los mercados de bonos de carbono surgen como un mecanismo de política pública y voluntaria para asignar permisos de emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Desde la creación de los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) en el Protocolo de Kioto (1997), hasta los mercados cumplimentarios y voluntarios reforzados por el Acuerdo de París (2015), estos sistemas han evolucionado para ofrecer flexibilidad a las empresas que superan sus límites de emisión y a aquellas que buscan reputación y sostenibilidad corporativa (Tan, Sirichand, Vivian, y Wang, 2020; Spalek, 2022; Kalesná, 2023). Se distinguen dos modalidades principales:

3.1.3.1. Mercados regulados

Los *mercados regulados* (o de cumplimiento) son aquellos establecidos por mandato legal. En estos sistemas, las autoridades fijan un límite máximo

de emisiones (*cap*) y asignan o subastan permisos a las empresas; quienes superen ese límite están obligados a comprar bonos para evitar sanciones regulatorias (Kalesná, 2023). Ejemplos emblemáticos incluyen el Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS) y, a nivel nacional, los esquemas derivados de la Ley 1931 de 2018 y el Decreto 446 de 2020 en Colombia.

3.1.3.2. Mercados voluntarios

Por su parte, los *mercados voluntarios* operan sin imposición legal directa. En ellos, las organizaciones adquieren créditos de carbono de forma opcional, atraídas por incentivos reputacionales, estrategias de responsabilidad social corporativa y el compromiso con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Estos mercados facilitan la compra de bonos generados en proyectos de energías renovables, reforestación o eficiencia energética, y constituyen una vía para que las empresas compensen sus huellas de carbono más allá de lo exigido por la regulación (Kalesná, 2023).

Desde la introducción de los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) establecidos en el Protocolo de Kioto de 1997 (UNFCCC, 1998) hasta el impulso otorgado por el Acuerdo de París de 2015 (UNFCCC, 2015), los mercados voluntarios se han consolidado como un complemento relevante a los esquemas de cumplimiento, ampliando las oportunidades para la compensación de emisiones de GEI.

3.1.3.3. Tipos de bonos

El mercado distingue hoy tres instrumentos clave: (1) **bonos de carbono clásicos**, medidos en toneladas de CO₂ evitadas; (2) **bonos verdes**, títulos de deuda destinados a financiar proyectos ambientales; y (3) **bonos catastróficos**, que trasladan a los inversores el riesgo de eventos climáticos extremos. A continuación se describe cada uno.

Los bonos de carbono clásicos (*“carbon credits”*) Son permisos que equivalen a una tonelada de CO₂ evitada o removida. Se generan tras verificar que un proyecto adicionalmente reduce emisiones de GEI (por ejemplo, un parque eólico) (Gorain, Malakar, y Chanda, 2021; Lo y Cong, 2022).

Los bonos verdes (*“green bonds”*) son instrumentos de deuda emitidos por gobiernos o corporaciones para financiar exclusivamente proyectos ambientales, incluidas energías limpias, eficiencia energética o reforestación. Aunque no siempre están ligados a un mercado de carbono formal, pueden complementarlo financiando infraestructura que genere futuros créditos de carbono (Hunt, 2024; Freeburn y Ramsay, 2020).

en cuanto a los **bonos catastróficos** Si bien no se centran en carbono, estos títulos transfieren riesgos de eventos extremos climáticos a inversores, liberando recursos para recuperación tras huracanes o sequías. Su relación con el mercado de carbono radica en gestionar riesgos asociados al cambio climático y en incentivar acciones de adaptación (Braun y Kousky, 2021).

3.1.3.4. Participantes en los mercados de bonos de carbono

Como se muestra en la Figura 3.1, en los mercados de bonos de carbono participan diversos actores que garantizan la generación, verificación, comercialización y cancelación de los créditos de carbono.

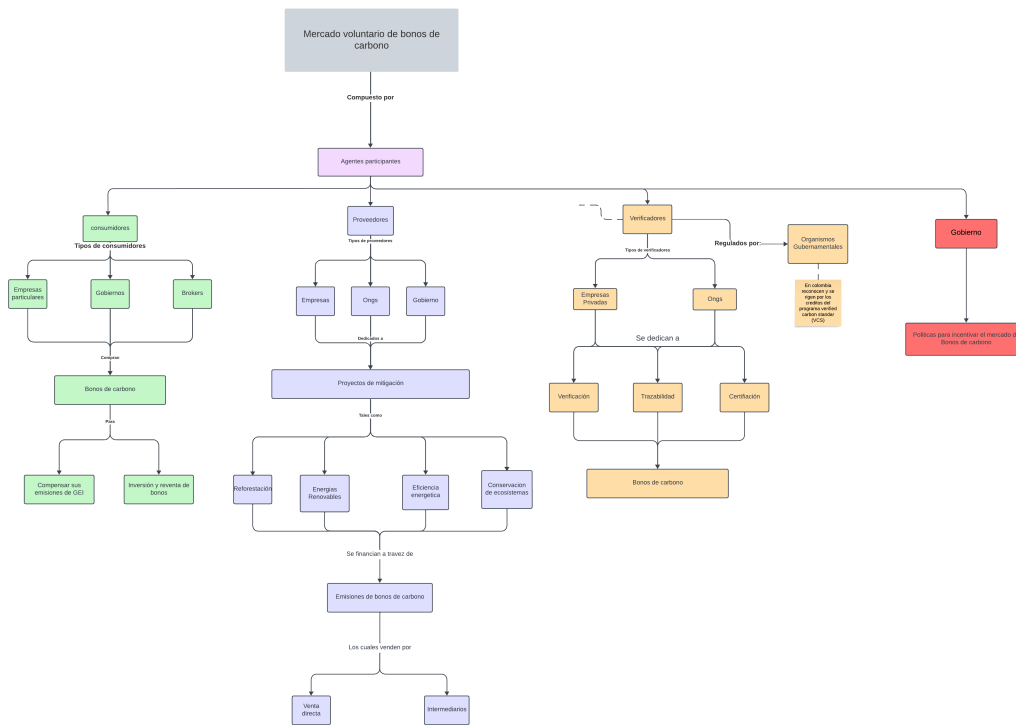


Figura 3.1: Mapa conceptual de participantes en el mercado voluntario de bonos de carbono. Fuente: Elaboración propia.

Los proveedores —empresas industriales, organizaciones no gubernamentales y otras entidades públicas o privadas— desarrollan proyectos de mitigación de emisiones, tales como plantas de energías renovables, iniciativas de eficiencia energética o programas de restauración de ecosistemas. Una vez que las reducciones de GEI han sido validadas por entidades certificadoras independientes, estos actores obtienen los créditos de carbono correspondientes (Jia, Fan, y Xia, 2023; “State and Trends of Carbon Pricing 2023”, 2023).

Los consumidores adquieren estos créditos para compensar sus emisiones de gases de efecto invernadero: en los mercados voluntarios, motivados por incentivos reputacionales y de responsabilidad social corporativa; en los mercados regulados, por obligación legal si exceden sus límites de emisiones (Camilleri, Cricelli, Mauriello, y Strazzullo, 2023; Kalesná, 2023). Entre ellos, los intermediarios o brokers juegan un papel clave al facilitar la liquidez, conectar de forma eficiente a proveedores y compradores, y reducir los costos de transacción (Camilleri y cols., 2023).

El proceso de verificación y certificación recae en organismos independientes que aseguran la adicionalidad, permanencia y exactitud de las reducciones de emisiones reportadas, evitando el doble conteo y garantizando el cumplimiento de estándares internacionales como VCS o Gold Standard (Joseph, Herold, Sunderlin, y Verchot, 2013).

En conjunto, este entramado de actores —generadores, intermediarios, compradores y auditores— conforma el ciclo completo de los bonos de carbono, asegurando que cada tonelada de CO₂ reducida sea contabilizada y comercializada con total transparencia y confiabilidad.

3.1.4. Gobernanza y regulación

La gobernanza de los mercados de bonos de carbono se apoya en un sólido marco institucional capaz de definir y aplicar estándares de acreditación, verificación y trazabilidad que aseguren la integridad de los créditos generados. A escala global, el Acuerdo de París de 2015 exige transparencia en las contribuciones nacionales (NDCs) y promueve la creación de mecanismos de mercado comparables entre países, de modo que los sistemas de comercio de emisiones y otras herramientas basadas en el precio del carbono operen bajo criterios homogéneos de reporte y contabilidad de reducción de GEI (Cadman y Hales, 2022; Dietzenbacher, Cazcarro, y Arto, 2020).

La adopción de estándares rigurosos —tales como los desarrollados por Verra (VCS) (*Verified Carbon Standard (VCS) Registry*, 2025), Gold Standard (*Gold Standard Impact Registry*, 2025) o el Registro General de Acreditación Climática (RGAC)— y de prácticas de acreditación transparentes es fundamental para garantizar la credibilidad y efectividad de estos mercados en la mitigación del cambio climático (C. Chen, Loft, Sattler, y Matzdorf, 2023).

En el caso colombiano, el desarrollo normativo ha acompañado las metas internacionales con legislación específica para internalizar el costo del carbono y estimular proyectos de mitigación. La Ley 1819 de 2016 introdujo el primer impuesto al carbono, gravando a los emisores de GEI y ofreciendo incentivos fiscales para la adquisición de créditos en mercados voluntarios (Gobierno de

Colombia, 2016). Posteriormente, la Ley 1931 de 2018 estableció las directrices de la política nacional de cambio climático, alineando las estrategias domésticas con las obligaciones del Acuerdo de París y promoviendo explícitamente la utilización de instrumentos de mercado para alcanzar las metas de reducción de emisiones (Gobierno de Colombia, 2018).

Para robustecer la calidad de los proyectos y la fiabilidad de los créditos, el Decreto 446 de 2020 impuso requisitos más estrictos de validación y verificación por parte de entidades certificadoras acreditadas, asegurando que toda reducción de emisiones sea adicional, medible y permanente antes de su ingreso al mercado (Gobierno de Colombia, 2020). Complementariamente, el Programa Colombiano de Carbono Neutral busca incentivar al sector privado a compensar su huella de carbono mediante la compra voluntaria de bonos, fomentando así la participación de empresas en iniciativas de eficiencia energética, energías renovables y restauración de ecosistemas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024). Gracias a este entramado regulatorio y de acreditación, Colombia consolida un esquema de gobernanza que combina exigencia normativa, controles de integridad y mecanismos de mercado para impulsar la descarbonización.

3.1.5. Blockchain

Blockchain es una tecnología de registro distribuido que permite almacenar y verificar información de manera segura, transparente y descentralizada (Stanciu, 2017). Cada bloque en la cadena agrupa un conjunto de transacciones validadas y se enlaza al bloque anterior mediante un código criptográfico denominado “hash”, de modo que cualquier alteración en un bloque invalidaría toda la secuencia. Cuando se añade un nuevo bloque, su información se propaga y actualiza automáticamente en todos los nodos de la red, garantizando la inmutabilidad y la consistencia global de los datos (Nakamoto, 2008; Kotha y Patel, 2020).

3.1.6. Tipos de redes blockchain

Según el grado de acceso y el modelo de gobernanza, las redes blockchain se clasifican principalmente en públicas y privadas.

3.1.6.1. Redes públicas

Las redes públicas permiten que cualquier persona participe como usuario o nodo validador, sin necesidad de permiso previo. En ellas, todas las transacciones y saldos son visibles para cualquiera, lo que asegura un alto

nivel de transparencia y resistencia a la censura. Bitcoin y Ethereum son los ejemplos más representativos de este tipo de redes, donde el consenso se alcanza mediante algoritmos de prueba de trabajo o prueba de participación (Doumenis, Izadi, Dhamdhare, Katsikas, y Koufopoulos, 2021).

3.1.6.2. Redes privadas o permissionadas

Las redes privadas o permissionadas restringen quién puede leer, escribir o validar transacciones. Estos entornos son gestionados por una o varias organizaciones que definen políticas de acceso y control de roles, y suelen emplear mecanismos de consenso más ligeros (por ejemplo, votación entre nodos autorizados). Este tipo de redes resulta especialmente útil para proyectos empresariales que requieren confidencialidad y cumplimiento normativo (Leal, Chis, y González-Vélez, 2020).

3.1.6.3. Hyperledger Fabric

Hyperledger Fabric es una plataforma modular de código abierto diseñada para entornos empresariales que necesitan canales privados de comunicación entre participantes. Gracias a su arquitectura por “cadenas laterales” (channels), Fabric permite que sólo ciertos miembros vean y aprueben las transacciones relacionadas, garantizando la privacidad y el aislamiento de datos sensibles (Hyperledger Fabric Documentation, 2024).

3.1.6.4. Hyperledger Besu

Hyperledger Besu es un cliente compatible con Ethereum que puede operar en redes públicas y privadas. Al ofrecer compatibilidad con la máquina virtual de Ethereum (EVM), Besu facilita la interoperabilidad con contratos inteligentes existentes y con herramientas del ecosistema Ethereum, al tiempo que permite configurar permisos y nodos autorizados según las necesidades de la organización (Hyperledger Besu, 2024).

3.1.7. Contratos inteligentes

Los contratos inteligentes son fragmentos de código autoejecutables que residen en una blockchain y se activan automáticamente cuando se cumplen condiciones predefinidas. Estos programas permiten transferir valor, actualizar registros o emitir pagos sin intermediarios, mejorando la eficiencia, reduciendo costos y minimizando riesgos de manipulación (Z. Zhang, Yang, Su, y Wen, 2022; Mukundan y cols., 2020; Hassan y cols., 2021; Basu, Deb, y Singh, 2023; de Boer y cols., 2022).

3.1.7.1. Lenguajes comúnmente utilizados

Solidity

Solidity es el lenguaje más extendido para desarrollar contratos inteligentes en la red Ethereum y sus derivados (por ejemplo, Binance Smart Chain, Polygon). De estilo orientado a objetos, está diseñado para expresar con claridad condiciones y flujos de negocio dentro de un contrato, y cuenta con un sólido ecosistema de herramientas —como Remix, Truffle y Hardhat— y una comunidad activa que contribuye a su continuo perfeccionamiento (Team, 2023).

Chaincode (Go)

En Hyperledger Fabric, los contratos inteligentes reciben el nombre de “chaincode” y suelen implementarse en Go (aunque también se soportan Java y JavaScript). Chaincode permite definir la lógica de negocio y las reglas de acceso en un entorno permissionado, donde la privacidad y el control granular de las transacciones entre participantes son fundamentales (Project, 2023; Androulaki y cols., 2018).

3.1.7.2. Aplicaciones de blockchain en mercados de bonos de carbono

Diversos sectores han incorporado soluciones de blockchain para reforzar la trazabilidad y confiabilidad de los créditos de carbono:

En la aviación, la OACI ha puesto en marcha el *Blockchain Sandbox*, una infraestructura DLT para que aerolíneas y Estados prueben servicios regulatorios, incluida la trazabilidad de compensaciones bajo CORSIA (Organization, 2023). Además, Awesso et al. (2022) muestran cómo un sistema DLT puede reducir tiempos de transacción y evitar el doble conteo en el Esquema CORSIA (Awesso, Marke, Mehling, y Correa, 2022).

El Climate Action Data Trust, impulsado por el Banco Mundial y sus socios, emplea una plataforma permissionada basada en Hyperledger Fabric para unificar los registros de múltiples registradores, facilitando el intercambio de créditos entre jurisdicciones y minimizando el doble conteo (Group, 2022).

En el sector energético, Shell ha descrito en su documentación cómo pilotos de tokenización de créditos de captura de carbono y energías renovables aprovechan contratos inteligentes para automatizar emisión, transferencia y cancelación de tokens representativos de bonos, reduciendo tiempos de liquidación y costos de transacción (International, 2020).

Asimismo, la documentación de Toucan Protocol presenta un marketplace sobre Ethereum que permite a particulares y pymes comprar, fraccionar y rastrear créditos de carbono con total transparencia (Protocol, 2024), y la de KlimaDAO detalla un sistema de tokenización que incentiva la participación descentralizada en el mercado voluntario de bonos de carbono (KlimaDAO, 2024).

3.1.8. Estándares de certificación en mercados de bonos de carbono

La generación y comercialización de créditos de carbono voluntarios se basa en estándares internacionalmente reconocidos que garantizan la adicionalidad, la permanencia y la transparencia en la reducción de emisiones. El Verified Carbon Standard (VCS), administrado por Verra y establecido en 2007, proporciona metodologías rigurosas para cuantificar reducciones en categorías que van desde la reforestación hasta la captura de metano; su registro de Verified Carbon Units (VCU) ha superado los 1,000 millones de créditos emitidos, todos verificados por auditores independientes y respaldados por líneas base, monitoreo periódico y reservas de buffer para mitigar riesgos de no permanencia (*Verified Carbon Standard (VCS) Registry*, 2025).

Gold Standard (GS), fundado en 2003 por WWF y otras ONG, complementa el enfoque de mitigación de GEI al exigir además la generación de co-beneficios sociales y ambientales locales, como mejoras en salud, educación y conservación; con más de 1,400 proyectos certificados en ochenta países, GS ha consolidado su reputación por la publicación abierta de documentación de monitoreo y metodologías actualizadas (*Gold Standard Impact Registry*, 2025).

Además de VCS y GS, otros programas voluntarios de certificación, como el *Climate Action Reserve* (CAR), el *American Carbon Registry* (ACR), el estándar *Plan Vivo* (especializado en agroforestería) y el *Global Carbon Council* (GCC) en Medio Oriente, diversifican las opciones de certificación y promueven la competencia en la calidad de los estándares (“Reserve Offset Program Manual, Version 9.1”, 2024; “The American Carbon Registry Standard (V7.0)”, 2020; *Plan Vivo Climate Methodologies*, 2022; “Global Carbon Council Program Manual (V4.0)”, 2024).

3.1.9. Metodología de la Revisión Sistemática

Para llevar a cabo la revisión sistemática se siguió, en primer lugar, el protocolo de Kitchenham (Kitchenham y Charters, 2007). Además, se incorporaron las pautas metodológicas propuestas por Ramírez Villegas et

al. (Ramirez Villegas, Collazos Ordóñez, Moreira, y Fardoun, 2018), que complementan y refinan las fases de búsqueda, selección y análisis de la literatura.

Primero se justificó la conveniencia de realizar la RS y se delineó su proceso general. Luego se formuló la pregunta de investigación y se precisaron los conceptos centrales, lo que sirvió de base para construir las palabras clave y seleccionar las bases de datos pertinentes. A continuación, se fijaron los criterios de inclusión y exclusión y se diseñó la cadena de búsqueda correspondiente. Con estos insumos se ejecutó la búsqueda bibliográfica, se extrajeron y gestionaron los registros relevantes y, finalmente, se organizaron los resultados para responder a la pregunta de investigación.

3.2 Marco metodológico

3.2.1. Descripción del área de estudio

El presente proyecto tiene como unidad de análisis la integración de fuentes de energía renovable con el mercado de bonos de carbono en el contexto del sistema eléctrico colombiano. Este estudio se enfoca en abordar los desafíos inherentes al proceso de Medición, Reporte y Verificación (MRV) de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en proyectos de mitigación relacionados con este mercado.

En particular, la investigación examina cómo la implementación de tecnologías blockchain puede optimizar la validación y trazabilidad de las transacciones asociadas, aportando mayor transparencia y eficiencia. Esto incluye analizar cómo estas tecnologías pueden superar las limitaciones actuales del sistema MRV, garantizar la integridad de los datos y fomentar la confianza entre los actores involucrados.

3.2.2. Metodología de investigación

El proyecto adopta la metodología *Design Science Research* (DSR), un enfoque iterativo que permite afrontar problemas complejos por medio de la creación y la evaluación sistemática de soluciones tecnológicas. En primera instancia se realiza la **identificación y definición del problema**, donde se delimita su naturaleza dentro del contexto del mercado eléctrico colombiano y se justifica la necesidad de atenderlo.

A continuación se aborda la **comprensión del problema**. Esta fase comprende un análisis pormenorizado de la literatura y la recolección de información empírica, lo que conduce a la formulación de objetivos específicos que orientan la investigación.

Con el problema claramente caracterizado, se pasa al **diseño y desarrollo del artefacto**. En esta etapa se concibe y construye la solución —en este caso, un prototipo blockchain basado en contratos inteligentes— que responde a los requisitos funcionales y no funcionales previamente establecidos.

Finalmente, la fase de **implementación y evaluación** traslada el artefacto al entorno seleccionado, donde se pone en operación y se somete a una valoración rigurosa. Esta evaluación, apoyada en la retroalimentación de expertos, determina la pertinencia, utilidad y alineación del prototipo con las necesidades reales del sector, cerrando así el ciclo iterativo propio de la DSR.

La elección de esta metodología se fundamenta en su uso extendido en la investigación de sistemas de información, dado su enfoque en el desarrollo

y evaluación de creaciones tecnológicas e informativas. Dentro del marco del DSR, los artefactos generados pueden clasificarse en las siguientes categorías:

- **Construcciones:** Lenguajes y conceptos.
- **Modelos:** Representaciones y abstracciones.
- **Métodos:** Procesos para ejecutar tareas específicas.
- **Instancias:** Implementaciones prácticas en contextos definidos.

3.3 Estado del arte

Para definir el estado del arte, se realizó una revisión sistemática de la literatura en las principales bases de datos académicas en los campos de la ingeniería de software, la economía y el medio ambiente (por ejemplo, Scopus, IEEE Xplore y ScienceDirect). Esta revisión integral permitió descubrir las últimas tendencias, las perspectivas teóricas dominantes y las lagunas en la investigación en el campo de la gestión de transacciones de bonos de carbono. Los resultados no solo sitúan nuestra contribución en el escenario científico actual, sino que también constituyen un valioso marco para justificar nuestros objetivos, métodos y contribuciones.

3.3.1. Proceso de la revisión sistemática

El proceso arrancó con la formulación de la pregunta de investigación y la definición preliminar de los alcances de la búsqueda. A partir de allí se delimitaron los conceptos clave, las cadenas de búsqueda y las bases de datos científicas pertinentes, junto con los criterios de inclusión y exclusión que regirían la selección de los estudios (Ramirez Villegas y cols., 2018).

Una vez ejecutadas las búsquedas en cada repositorio, los resultados se depuraron aplicando dichos criterios y, acto seguido, se valoró la calidad metodológica de cada artículo. La información retenida se organizó para extraer los datos esenciales que alimentan el análisis final. Este análisis, a su vez, permitió identificar tendencias, brechas y oportunidades de investigación en el dominio estudiado.

Para agilizar cada una de estas fases se empleó la plataforma *Parsifal*, la cual centraliza la importación de referencias, la aplicación sistematizada de filtros, la evaluación de la calidad de los estudios, el análisis comparativo y la generación automática de informes.

3.3.2. Pregunta de la RS

El objetivo principal de este estudio es examinar la validación y trazabilidad de las reducciones de emisiones de CO2 en los mercados de créditos de carbono, así como analizar cómo la implementación de tecnologías, en particular blockchain, podría mejorar la fiabilidad en dicho mercado. Teniendo en cuenta estos aspectos, se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo puede la tecnología blockchain mejorar la medición, reporte y verificación (MRV) de la reducción de emisiones en el mercado de créditos de carbono?

3.3.3. Definición de la población, intervención, comparación y resultados (PICOC)

Para establecer la población, intervención, comparación, los resultados y el contexto (PICOC, por sus siglas en inglés), se definen los siguientes parámetros:

- **Población:** Reguladores de Mercados de bonos de carbono.
- **Intervención:** Tecnologías blockchain.
- **Comparación:** Verificación y trazabilidad de transacciones en el MBC actual
- **Resultados:** Eficacia de blockchain en términos de verificación, trazabilidad en el MBC.
- **Contexto:** MBC en Colombia.

3.3.4. Palabras clave

Para la RS se definió la búsqueda de 4 palabras claves en inglés y en español, de acuerdo con la definición del PICOC.

Cuadro 3.1: Palabras claves de la RS

Español	Ingles
Bonos de carbono	Green Credits, Carbon credits, carbon market
blockchain	blockchain
verificación	traceability, verification

3.3.5. Cadena de búsqueda

De acuerdo con las palabras claves planteadas para la realización de la RS, se realiza la cadena de búsqueda en cada una de las bases de datos y se plantea una cadena de consulta general con todas las palabras utilizando los conectores lógicos “AND” y “OR”. el cuadro 3.2 presenta la cadena de búsqueda.

Cuadro 3.2: Cadena de Búsqueda

Búsqueda	Palabra 1	Palabra 2	Palabra 3
	(“Bonos de carbono” OR “Green credits” OR “carbon credits” OR “carbon market”)	(“blockchain” OR “distributed ledger technology”)	(“verificacion” OR “traceability” OR “verification”)

La cadena general utilizada en las búsquedas de la revisión sistemática es: (“Bonos de carbono” OR “Green credits” OR “carbon credits” OR “carbon market”) AND (“blockchain” OR “distributed ledger technology”) AND (“verificacion” OR “traceability” OR “verification”).

3.3.6. Bases de datos.

Se utilizaron siete (7) bases de datos para la búsqueda de información en la RS. Se eligieron estas bases de datos al ser las más reconocidas internacionalmente en el área de ingeniería, informática y medio ambiente. Las bases de datos utilizadas son: *ACM Digital Library*, *IEEE Digital Library*, *Science@Direct*, *Scopus*, *Springer Link*, *DimensionsAI* y *GoogleScholar*.

3.3.7. Criterios de inclusión y exclusión.

Los criterios de inclusión y exclusión de la revisión sistemática (RS) se definieron tomando en cuenta las palabras clave indicadas previamente y la pregunta de investigación planteada para la búsqueda. Los criterios de inclusión abarcan: artículos indexados en bases de datos, publicados en inglés y español, publicados entre los años 2019 a 2025, que mencionen el MBC y mencionen la validación de reducciones de emisiones. Por otro lado, los criterios de exclusión incluyen: artículos sin citas, artículos anteriores al

2019, aquellos en idiomas diferentes a inglés y español, y literatura que no esté indexada en bases de datos.

3.3.8. Proceso de búsqueda

En el proceso de búsqueda de artículos relevantes para la revisión sistemática (RS), se empleó la herramienta Parsifal. A partir de la definición del PICOC y las palabras clave, se crean las cadenas de búsqueda específicas para cada una de las diferentes bases de datos. Una vez elaborada la cadena de búsqueda, se accedió a las bases de datos seleccionadas y se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión previamente descritos.

Después de filtrar la información, se exportaron los archivos BibTeX de cada base de datos para importarlos en Parsifal. La herramienta, a continuación, guio el proceso de evaluación de la calidad de los artículos, utilizando las siguientes preguntas

1. ¿El estudio aborda estrategias o enfoques para verificar las reducciones de emisiones en el mercado de créditos de carbono?
2. ¿El estudio presenta casos de éxito o lecciones aprendidas en la implementación de proyectos de mitigación que hayan mejorado la validación de las reducciones de emisiones en el mercado de créditos de carbono?
3. ¿El estudio presenta enfoques y soluciones para mejorar la fiabilidad, transparencia y accesibilidad del mercado de créditos de carbono?

Las respuestas para dichas preguntas son “Si”, “Parcialmente” y “No” y los pesos para cada una de las respuestas son 2.0, 1.0 y 0.0 respectivamente, obteniendo una puntuación máxima de 6.0 y se seleccionaran todos aquellos artículos que superen la puntuación de 2.90.

3.3.9. Extracción de datos

Una vez consolidados los datos obtenidos de los archivos BibTeX de cada una de las bases de datos, se registraron 392 documentos en total.

Se llevó a cabo una revisión detallada de los títulos, resumen y conclusiones de los documentos de acuerdo con los criterios de inclusión y exclusión. El resumen general se detalla en la figura 3.2.

De los 392 documentos, se seleccionaron 67 artículos, lo que representa el 17.09% del total. Estos cumplen con los criterios de inclusión y son relevantes para abordar la pregunta de investigación de la revisión sistemática. Por otro lado, 325 artículos no cumplieron con dichos criterios. Los documentos

seleccionados provienen de las bases de datos establecidas en el proceso de búsqueda.

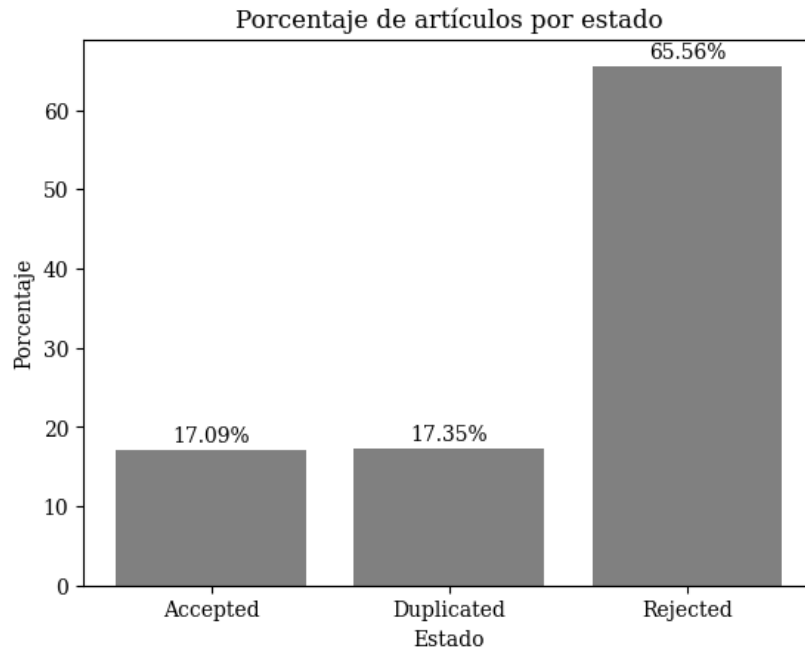


Figura 3.2: Porcentaje de artículos por estado. Fuente: Elaboración propia.

3.3.10. Resultados de la revisión sistemática

De los 67 artículos aceptados en la revisión sistemática, la mayor parte procede de plataformas de búsqueda multidisciplinar. En concreto, Dimensions AI aporta el 34,33 % (aproximadamente 23 artículos) y Google Scholar el 25,37 % (aprox. 17 artículos). Estas dos fuentes concentran en conjunto el 59,70 % de los trabajos seleccionados. A continuación, ScienceDirect concentra el 16,42 % (11 artículos) e IEEE Digital Library el 11,94 % (8 artículos). Las bases de datos más especializadas en informática y electrónica tienen una representación menor: ACM Digital Library con un 5,97 % (4 artículos), y tanto Scopus como Springer Link con un 2,99 % (2 artículos cada una). La figura 3.3 muestra gráficamente esta distribución.

El predominio de Dimensions AI y Google Scholar sugiere que los estudios sobre blockchain y bonos de carbono están dispersos en múltiples fuentes y no siempre indexados en repositorios especializados. Por su parte, la contribución significativa de ScienceDirect e IEEE Digital Library indica que una parte importante de los trabajos tiene un enfoque técnico e ingenieril.

La baja representación de Scopus y Springer Link, con tan solo un 2,99% cada una, pone de manifiesto que estas bases ofrecen una cobertura más limitada de los estudios sobre blockchain y bonos de carbono. En conjunto, la distribución de las fuentes —desde la predominancia de plataformas multidisciplinares como Dimensions AI y Google Scholar hasta la contribución técnica de ScienceDirect e IEEE Digital Library— revela la naturaleza dispersa e interdisciplinar de este campo de investigación y la importancia de recurrir a diversos repositorios para obtener una visión exhaustiva del estado del arte.

La figura 3.3 muestra la distribución de los artículos en las distintas bases de datos.

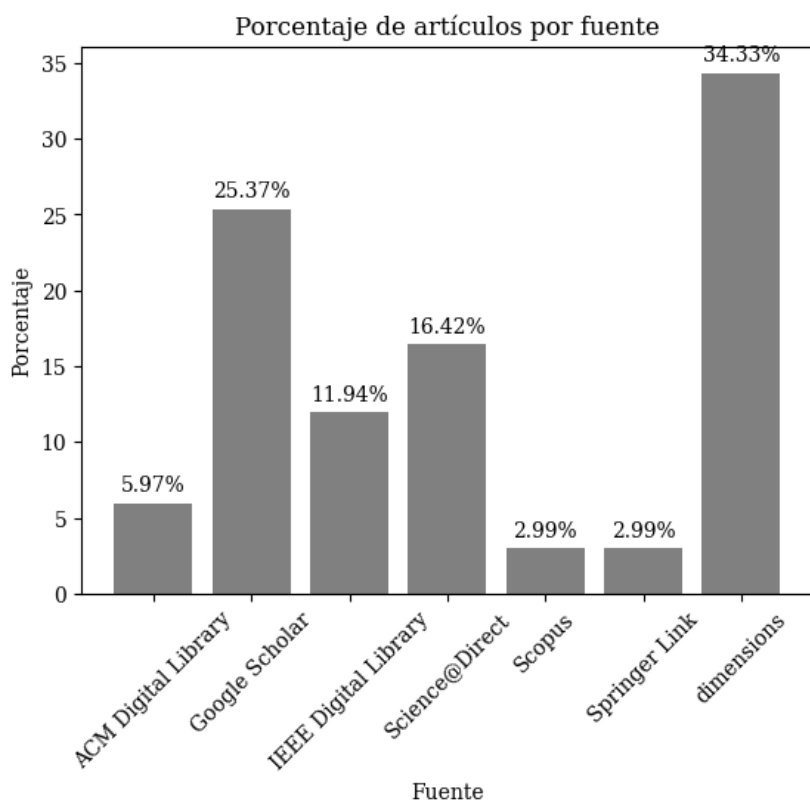


Figura 3.3: Distribución de artículos por bases de datos. Fuente: Elaboración propia.

Entre 2019 y 2022, el número de publicaciones sobre blockchain y bonos de carbono pasó de 4 a 21, evidenciando el auge de la investigación en este campo. A continuación, en 2023 se registró un descenso a 7 trabajos, para recuperar ligeramente la tendencia con 9 en 2024 (más 3 registros preliminares

en 2025), lo que indica una fase de consolidación vinculada tanto a la madurez tecnológica como a factores geopolíticos recientes: la guerra en Ucrania, que ha forzado a Europa a aplazar ciertas políticas climáticas para garantizar su suministro energético; y el giro de la agenda de Estados Unidos, donde las medidas de impulso económico han cobrado prioridad frente a las iniciativas ambientales. La figura 3.4 ilustra esta evolución anual.

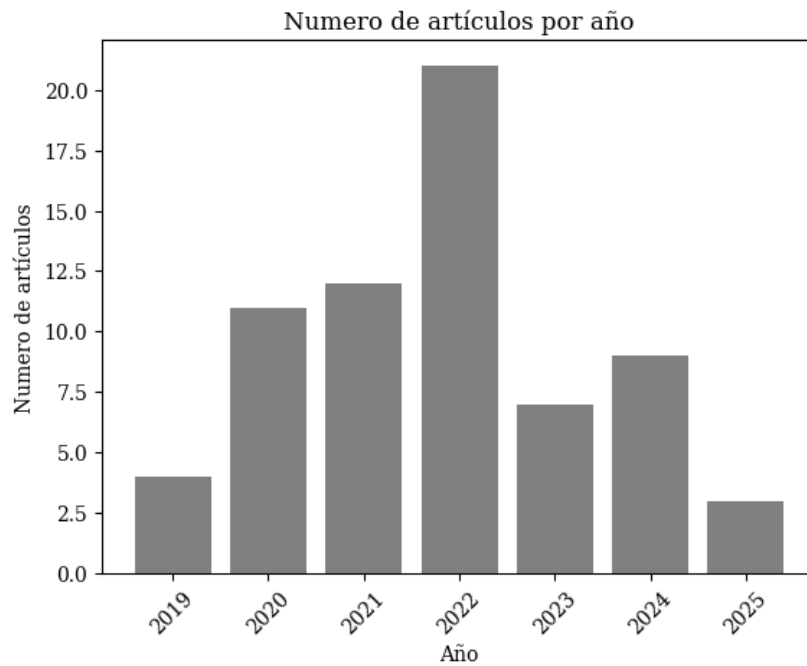


Figura 3.4: Numero de artículos por año. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3.5 muestra un gráfico de clúster que representa la red de citas de los trabajos consultados para la Revisión Sistemática (RS). Cada nodo simboliza un artículo de investigación y las conexiones entre ellos indican las citas recíprocas. Obras fundamentales como las de Schletz (Schletz y cols., 2020), Kim (Kim y Huh, 2020) y Gerbeti (Gerbeti, 2021) proporcionan una fundación teórica sobre la cual se construye la investigación más reciente. Este análisis de la red de clúster permite identificar los estudios fundamentales y cómo estos han influenciado la trayectoria de la investigación en el MBC, evidenciando así la progresión temática y metodológica dentro del campo.

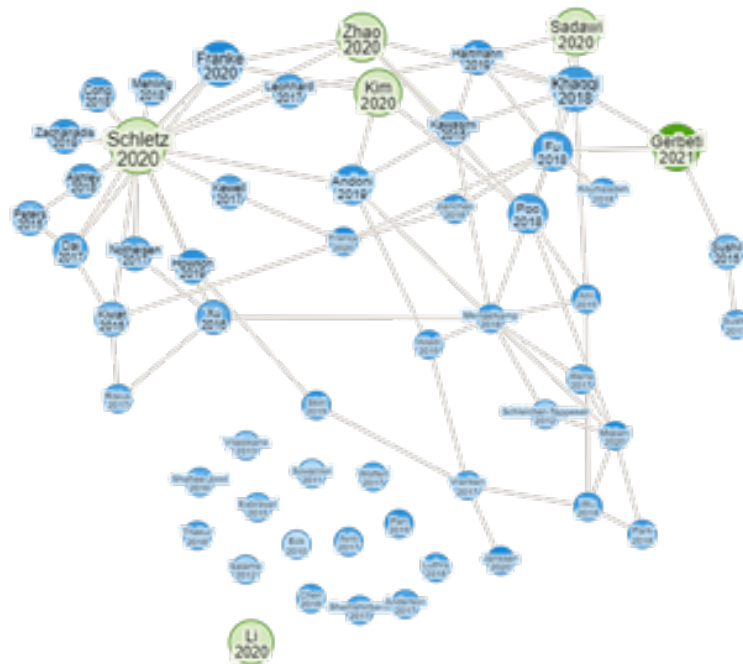


Figura 3.5: Resultados de la Agrupación por Clústeres de Artículos. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.6 y 3.7, se visualiza un análisis bibliométrico relacionado con el artículo de Kim (Kim y Huh, 2020) y el artículo Zhao (Zhao y Chan, 2020), enfocado en temas como “Carbon Credit”, “Carbon Emission”, “Emission Right”, y “Net Revenue Trading”. Los diferentes tonos de color y el tamaño de las palabras clave reflejan su importancia y frecuencia en la literatura. Las secciones del diagrama muestran la relación entre estos conceptos y su relevancia en el contexto de los estudios sobre comercio de emisiones y su impacto económico. Los documentos citados alrededor de cada término clave ofrecen un panorama de su relevancia y contribuyen a la comprensión del análisis temático.

Cuadro 3.3 – continuación de la página anterior

Id	Título	Fuente	A
2(Enejison y cols., 2022)	Blocks and Credits: A Sustainability Lens on Blockchain Technology in Voluntary Carbon Markets	Google Scholar	2
3(Sadawi y cols., 2020)	A hierarchical blockchain of things network for unified carbon emission trading (hbuets): A conceptual framework	Google Scholar	2
4(Mandaroux y cols., 2021)	A European Emissions Trading System Powered by Distributed Ledger Technology: An Evaluation Framework	Dimensions Ai	2
5(Schletz y cols., 2020)	Blockchain Application for the Paris Agreement Carbon Market Mechanism: A Decision Framework and Architecture	Dimensions Ai	2
6(Zhao y Chan, 2020)	When is blockchain worth it? A case study of carbon trading	Google Scholar	2
7(Kim y Huh, 2020)	Blockchain of carbon trading for UN sustainable development goals	Google Scholar	2
8(Li y cols., 2022)	An authenticated and secure accounting system for international emissions trading	Scopus	2
9(Gerbeti, 2021)	Market Mechanisms for Reducing Emissions and the Introduction of a Flexible Consumption Tax	Dimensions Ai	2
10(Kotsialou y cols., 2022)	Blockchain's potential in forest offsets, the voluntary carbon markets and REDD+	Dimensions Ai	2

De acuerdo con el análisis de los artículos relacionados, se pueden responder las preguntas planteadas en la RS

- ¿Qué soluciones propone el artículo para mejorar la validación de las transacciones en el mercado de créditos de carbono?

R:/ Los documentos analizados proponen varias soluciones para mejorar la validación de las transacciones en el mercado de créditos de carbono. Entre las más comunes se encuentran la implantación de un mercado de carbono basado en tecnologías blockchain, el uso de contratos inteligentes para codificar las reglas del mercado (Schletz y cols., 2020; Zhao y Chan, 2020; Sadawi y cols., 2020) , y el establecimiento de estándares internacionales para la verificación y trazabilidad de las reducciones de emisiones (Gerbeti, 2021; Li y cols., 2022; Enejison y

cols., 2022). Además, se sugiere la integración de tecnologías complementarias, como la inteligencia artificial (Kim y Huh, 2020; Kotsialou y cols., 2022) o el Internet de las Cosas (IoT) (Schletz y cols., 2020), con blockchain a través de contratos inteligentes para mejorar la precisión y la eficiencia en la validación de las reducciones en el mercado de créditos de carbono.

- ¿Cómo se comparan los costes de implantación y mantenimiento de soluciones basadas en blockchain con los sistemas tradicionales de validación y trazabilidad en el mercado del carbono?

R:/ La mayoría de los trabajos analizados se quedan cortos a la hora de responder a esta pregunta; sin embargo, algunos puntos importantes a destacar son los siguientes:

- El estudio *“¿Cuándo vale la pena usar blockchain? Un estudio de caso sobre el comercio de carbono.”* sugiere que debería producirse una transición gradual de los sistemas tradicionales a los basados en blockchain para optimizar costes y riesgos. Esto pone de relieve la necesidad de inversiones adicionales en actualizaciones y configuraciones de validación para mantener un coste medio en el sistema blockchain, en particular debido a problemas de escalabilidad con el aumento del número de transacciones (Zhao y Chan, 2020).
 - El uso de la tecnología blockchain podría reducir los costes de transacción al eliminar intermediarios y automatizar procesos (Schletz y cols., 2020). Además de desintermediar el mercado, la tecnología blockchain puede garantizar que los promotores de proyectos reciban un pago financiero más justo (Enejison y cols., 2022).
 - La implementación de tecnologías blockchain en el mercado puede aumentar la eficiencia del mercado, reduciendo así los costes de transacción y simplificando los procesos, especialmente con la ayuda de contratos inteligentes (X. Chen y Lloyd, 2021).
- ¿Por qué utilizar la tecnología blockchain para mejorar la MRV de las transacciones en el mercado de bonos?

R:/ La tecnología Blockchain mejora significativamente los procesos MRV en el mercado de créditos de carbono. A continuación se destacan las principales razones, según los artículos analizados:

- Automatización y eficiencia: La blockchain facilita el procesamiento automático de transacciones según protocolos predefinidos y,

cuando se integra con dispositivos IoT y sistemas de gestión de la producción, accede a datos de emisiones en tiempo real, optimizando la contabilidad del carbono (Zhao y Chan, 2020).

- **Transparencia y prevención del fraude:** La naturaleza descentralizada y transparente del blockchain permite registrar transacciones visibles para todos los participantes del mercado, garantizando su autenticidad y evitando la doble contabilidad y otros tipos de fraude (Gerbeti, 2021; Kim y Huh, 2020).
- **Registro inmutable:** La blockchain proporciona un registro auditable e inalterable de las transacciones, lo que garantiza que los datos no se manipulen y reduce riesgos como la doble contabilidad.
- **Contratos inteligentes:** Automatizan la verificación y el comercio de derechos de emisión de carbono, reduciendo potencialmente los costes de transacción y maximizando la eficiencia (Gerbeti, 2021).
- **Verificación descentralizada:** Con blockchain, la verificación de las emisiones, el seguimiento e incluso la revocación del crédito se procesan de forma descentralizada y transparente, lo que garantiza una validación más precisa y fiable (Kotsialou y cols., 2022).

La revisión sistemática ha identificado que los documentos citados en la Tabla 3.3 son fundamentales para validar las reducciones de emisiones en el mercado de créditos de carbono. Estos documentos abordan las cuestiones planteadas inicialmente en la RS y representan un avance significativo en la integración de tecnologías emergentes como blockchain. Esta RS permitió la creación de un marco de conocimiento que refleja el estado del arte del mercado de créditos de carbono y la aplicación de tecnologías innovadoras para mejorar su fiabilidad.

4. Diseño e implementación del prototipo

En este capítulo se presenta tanto el **diseño como la implementación del prototipo** de una plataforma blockchain para gestionar transacciones de bonos de carbono. Esto se alinea tanto con el objetivo general de la investigación como con su hipótesis, que busca optimizar los procesos MRV (medición, reporte y verificación) de los bonos en el mercado eléctrico colombiano.

Para ello, se presenta: recopilación de datos de la RSL, revisión de casos exitosos y no exitos, definición de los requisitos tanto funcionales como no funcionales, diseño del prototipo mediante el establecimiento de una arquitectura de referencia, un diagrama de secuencia sobre el ciclo de vida del bono de carbono, construcción del artefacto, la estimación comparativa de costos de despliegue en Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure y Google Cloud Platform (GCP). En conjunto, estos apartados evidencian la ruta metodológica seguida para materializar la propuesta y evaluar su viabilidad técnica, económica y ambiental.

4.1 Fase 1: Revisión de la literatura como apoyo teórico y conceptual al proyecto de investigación

El propósito de esta fase fue la elaboración de un marco conceptual que sirviera como base para la referenciación y apropiación de los fundamentos relacionados con el objeto de estudio. Esta etapa permitió

- Construir un marco teórico sólido que respalde el análisis y desarrollo del proyecto.
- Cumplir con el objetivo específico de analizar el estado actual del Mercado de Bonos de Carbono (MBC), evaluando los desafíos asociados con:
 - La verificación y contabilidad de las reducciones de emisiones.

- Las soluciones propuestas para abordar el problema del doble conteo de emisiones.

La revisión de la literatura fue crucial para identificar las brechas existentes en el conocimiento actual y las posibles oportunidades para la aplicación de soluciones innovadoras, como las tecnologías blockchain, en este contexto.

4.2 Fase 2: Revisión de casos de éxito y de no éxito en la incorporación de tecnologías *blockchain* al MBC

El propósito de esta fase fue evaluar la viabilidad de integrar el Mercado de Bonos de Carbono (MBC) al sistema eléctrico colombiano como mecanismo de financiación para proyectos de energías renovables. Para ello se analizó el prototipo *Enerchain*, diseñado por *Global MVM*, una plataforma basada en *blockchain* que impulsa la descentralización, democratización y confiabilidad del mercado energético nacional.

Se propuso añadir a *Enerchain* funcionalidades que permitan registrar los bonos de carbono generados por la producción de energía limpia y realizar transacciones directas sobre ellos. Con ello se amplían las capacidades de la plataforma, favoreciendo la transparencia, la trazabilidad y la confianza en la gestión de los bonos.

Paralelamente, se levantaron los requisitos funcionales y no funcionales que optimizan tanto el prototipo como los procesos de Medición, Reporte y Verificación (MRV). El análisis incluyó una revisión sistemática de literatura (RSL) y la comparación de casos internacionales exitosos y no exitosos de uso de *blockchain* en el MBC, así como la validación con expertos del sector eléctrico colombiano. Las principales lecciones aprendidas se agrupan a continuación.

Casos de éxito

- **Colaboración público–privada.** Una gobernanza compartida entre regulador, generadores y operadores aumenta la adopción y legitima el sistema.
- **Educación y capacitación.** Programas de formación temprana para todos los actores reducen barreras técnicas y aceleran la puesta en marcha.
- **Enfoque en la sostenibilidad.** Plataformas que priorizan la reducción de emisiones y la alineación con los objetivos climáticos nacionales reciben mayor respaldo institucional y financiero.

Casos de no éxito

- **Gestión de riesgos insuficiente.** La falta de un marco claro frente a aspectos legales, técnicos y de privacidad incrementa la exposición a sanciones y brechas de seguridad.
- **Flexibilidad limitada en la implementación.** Despliegues monolíticos o prematuros, sin iteraciones piloto, elevan costos y dificultan la adaptación a nuevas regulaciones.
- **Protocolos de MRV complejos.** Procesos de verificación demasiado exigentes excluyen a pequeños generadores; la simplificación de estos protocolos es crítica para una adopción inclusiva.

En conjunto, estas lecciones posicionan a *Enerchain* como un mecanismo clave para la transición hacia fuentes renovables no convencionales, aportando una herramienta eficaz de financiación de proyectos sostenibles y fortaleciendo el papel del MBC en la mitigación del cambio climático. La adopción gradual, la simplificación de protocolos y un marco regulatorio claro son factores decisivos para el éxito a largo plazo.

El diseño del prototipo contempla requisitos funcionales que aseguran la trazabilidad, automatización y control de las transacciones. La Tabla 4.1 resume estos requisitos junto con los aspectos clave para su implementación.

Cuadro 4.1: Requisitos funcionales del prototipo

Código	Requisito	Aspectos clave
RF-01	Registro de transacciones de créditos de carbono	Tipo, monto, partes, fecha
RF-02	Registro automático de bonos generados	MWh renovables → bonos
RF-03	Validación automática mediante <i>smart contracts</i>	Reglas de negocio y consistencia de datos
RF-04	Control antifraude y calidad de datos	Rechazo de inconsistencias
RF-05	Historial inmutable para auditorías	Consultas internas y externas
RF-06	Cálculo y asignación de bonos	Módulo de conversión MWh → bonos

Continúa en la página siguiente

Cuadro 4.1 – continuación de la página anterior

Código	Requisito	Aspectos clave
RF-07	Interfaz para generadores, comercializadores, reguladores y clientes	Registro, consulta y auditoría
RF-08	Gestión de accesos por rol	Lectura, escritura o administración según participante

El prototipo incorpora requisitos no funcionales que garantizan su seguridad, eficiencia y adecuación al contexto regulatorio. La Tabla 4.2 presenta estos criterios junto con los aspectos clave para su cumplimiento.

Cuadro 4.2: Requisitos no funcionales del prototipo

Código	Requisito	Aspectos clave
RNF-01	Privacidad de datos	<i>Blockchain</i> permitida, acceso autorizado
RNF-02	Escalabilidad	Crecimiento de transacciones y participantes sin degradar rendimiento
RNF-03	Escalabilidad horizontal	Adición de nodos y servicios distribuidos
RNF-04	Eficiencia energética	Consenso pBFT / PoS
RNF-05	Cumplimiento regulatorio	Normativa local sobre créditos de carbono y emisiones

Este conjunto de requisitos asegura que el prototipo no solo sea funcional, sino que también cumpla con estándares técnicos y regulatorios necesarios para un sistema robusto de gestión de créditos de carbono en el mercado eléctrico colombiano.

4.3 Fase 3: Diseño del prototipo del sistema de MRV en el MBC

El diseño del prototipo parte de tres posturas clave que trasladan el ciclo de *Monitoreo, Reporte y Verificación* (MRV) a un entorno *blockchain*. **Monitoreo descentralizado.** Los datos primarios del proyecto—producción de

energía, factores de emisión, lecturas de sensores—se registran en el libro mayor distribuido con sello temporal e inmutabilidad, lo que minimiza el riesgo de alteraciones posteriores y facilita auditorías en línea (Luo y cols., 2024; Patro y cols., 2024).

Reporte automatizado. A partir de los eventos *on-chain*, la aplicación genera versiones firmadas de los informes de reducción de emisiones y las ancla criptográficamente a la cadena, garantizando integridad documental sin depender de repositorios centralizados (Schletz y cols., 2020; Siphthorpe y cols., 2022).

Verificación programable. Las reglas de negocio codificadas en *smart contracts*—umbrales de elegibilidad y controles de doble contabilidad—validan los datos en tiempo real; los contratos emiten o invalidan créditos únicamente cuando se cumplen todas las condiciones, reduciendo costos de terceros y la asimetría de información (Mungroo y cols., 2024). Estas posturas orientan las decisiones arquitectónicas que se presentan a continuación y alinean el prototipo con las mejores prácticas de MRV digital.

La red opera sobre una *blockchain* permissionada con *Proof-of-Authority* (PoA). Los nodos validadores integran un consorcio supervisado por la autoridad ambiental, mientras que los demás actores del mercado—clientes, generadores y comercializadores—participan mediante cuentas ordinarias sin intervenir en el consenso. El bloque génesis fija un intervalo de minado de dos segundos; con ello, la finalidad práctica de las operaciones de emisión, transferencia o retiro de bonos se alcanza en menos de cuatro segundos, un lapso compatible con la cadencia operativa del mercado eléctrico colombiano.

El dominio *on-chain* alberga contratos que gestionan el ciclo MRV: registran los *hashes* de los datos de monitoreo, aplican los criterios de elegibilidad y liquidan los créditos cuando se cumplen las reglas. Los procesos *off-chain*, ejecutados en segundo plano, reciben los datos primarios y publican únicamente la huella criptográfica en la cadena; así se preserva la privacidad y se optimiza el ancho de banda. La arquitectura permanece abierta a la futura integración de fuentes IoT sin requerir cambios en la lógica contractual.

Sobre esta base se expone la API, cuyas llamadas se firman con el estándar EIP-712 para garantizar *no repudio* desde aplicaciones web o móviles. Los bonos se emiten como tokens ERC-20, añadiendo controles de no retroactividad y trazabilidad completa desde la generación del dato hasta la jubilación del crédito. De esta forma, el prototipo integra monitoreo, reporte y verificación en un flujo auditable, reduce costos de intermediación y fortalece la confianza en el mercado colombiano de bonos de carbono.

4.3.0.1. Diagrama de procesos del ciclo de vida del bono de carbono

El ciclo de vida del bono de carbono, tal como se muestra en la Figura 4.1, comienza con la emisión de una orden de despacho por parte del Regulador de Mercado, quien determina el volumen de energía limpia a inyectar. Una vez que el Generador recibe esta orden, inyecta la energía al sistema eléctrico y registra los datos primarios de producción. A continuación, el Smart Contract de MRV procesa estos datos, aplica el factor de emisión correspondiente y calcula automáticamente las toneladas de CO₂ compensadas. Cuando el volumen calculado cumple los criterios establecidos, el contrato inteligente emite un bono de carbono y envía la solicitud de certificación al organismo certificador, que valida la integridad del registro.

Tras la certificación, el sistema notifica al Cliente la disponibilidad del bono para compra. Al aceptar la adquisición, se dispara una transacción on-chain que transfiere la propiedad del bono desde el Generador al Cliente. Simultáneamente, el contrato ERC-20 gestiona la liquidación económica, realizando la transferencia de tokens desde el Cliente al Generador. De este modo, la plataforma garantiza que tanto la emisión como la transferencia y liquidación se registran de forma inmutable en la blockchain, cumpliendo con los pilares de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV).

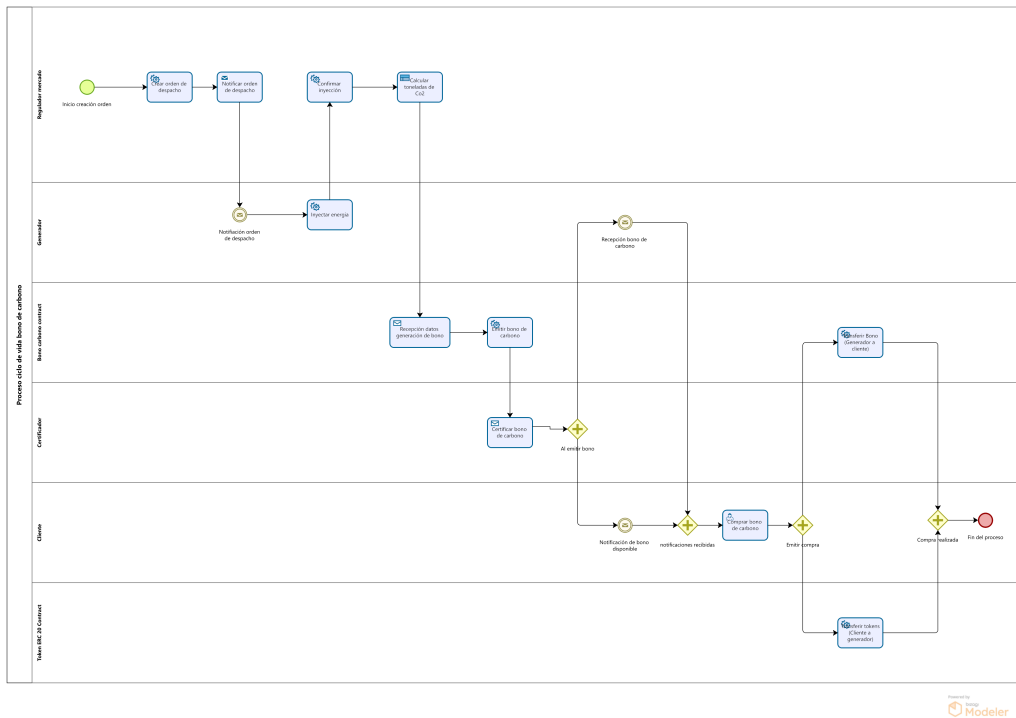


Figura 4.1: Diagrama de procesos del ciclo de vida del bono de carbono. Fuente: Elaboración propia.

4.3.1. Arquitectura de referencia

Esta sección presenta la arquitectura de referencia del prototipo diseñado para gestionar transacciones de bonos de carbono en el contexto del mercado eléctrico colombiano. El enfoque arquitectónico propuesto se construye sobre principios de desacoplamiento, escalabilidad y resiliencia, orientados a garantizar un funcionamiento eficiente y confiable en entornos distribuidos.

A lo largo de la sección se describen los principios de diseño que orientan la solución, destacando su capacidad para desacoplar componentes y facilitar la evolución del sistema. Posteriormente, se caracteriza cada uno de los elementos que conforman la arquitectura, explicando sus roles, tecnologías asociadas y relaciones funcionales. Finalmente, se incluye un diagrama de secuencia que ilustra el flujo de operaciones involucrado en el ciclo de vida de un bono de carbono, desde su emisión hasta su retiro, lo que permite entender cómo se articula la lógica de negocio sobre la infraestructura tecnológica propuesta.

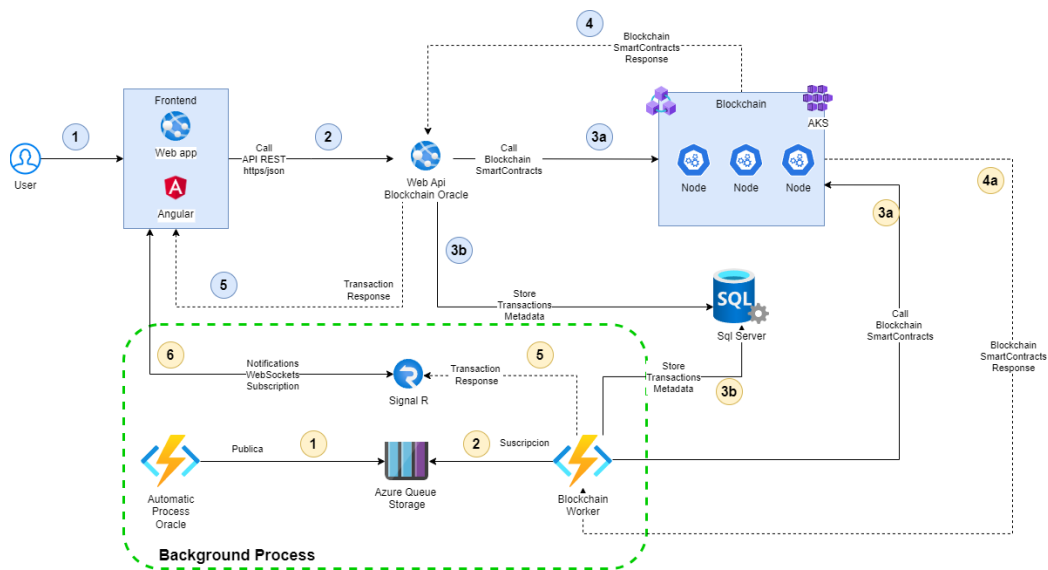


Figura 4.2: Arquitectura de referencia prototipo blockchain. Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.1. Principios de diseño.

La arquitectura se inspira en el **Service-Oriented Distributed Broker** (Bass, Clements, y Kazman, 2022), un estilo que introduce una capa intermedia —el *broker*— para desacoplar por completo a los consumidores (frontend Angular) de los productores de servicios (nodos Besu, oráculo, procesos de worker):

- los clientes invocan servicios remotos sin conocer su ubicación ni su tecnología.
- un broker intermedia las peticiones, traduce protocolos, enruta mensajes y publica resultados.
- múltiples servidores ejecutan la lógica, pueden escalar horizontalmente y añadirse o quitarse sin afectar a clientes.

Este patrón aporta tres ventajas clave para el prototipo:

1. **Desacoplamiento fuerte.** Cambios en la lógica on-chain (nuevos smart-contracts o versiones) sólo requieren actualizar el broker; la interfaz de usuario permanece intacta.

2. **Elasticidad y tolerancia a fallos.** Los servidores pueden escalar horizontalmente; los mensajes en cola se reintentan si un nodo está caído, preservando la disponibilidad (Park, Jeong, y Yeom, 2023).
3. **Extensibilidad.** Nuevos servicios —por ejemplo, algoritmos de analítica o validadores externos— se publican como endpoints o suscripciones adicionales sin afectar a los clientes existentes.

Así, el patrón Broker no sólo simplifica la comunicación con la red Hyperledger Besu, sino que también materializa los atributos de calidad definidos para la solución: disponibilidad, escalabilidad y facilidad de evolución.

Correspondencia patrón–componentes.

Cuadro 4.3: Correspondencia de la arquitectura propuesta con el patrón Broker

Rol en el patrón Broker	Elemento en el diagrama	Observaciones
Cliente	Frontend (Web App Angular)	Envía solicitudes REST y escucha notificaciones SignalR.
Broker	Web API Blockchain Oracle + Azure Queue + SignalR Hub	Expone una fachada HTTP/JSON Encapsula detalles de acceso a smart-contracts Publica eventos y escribe metadatos en la base de datos SqlServer Desacopla operaciones síncronas (llamada directa) y asíncronas (cola)

Continúa en la página siguiente

Cuadro 4.3 – continuación de la página anterior

Rol en el patrón Broker	Elemento en el diagrama	Observaciones
Servidor	Blockchain nodes (AKS) Blockchain Worker SqlServer	Varios nodos ejecutan contratos \Rightarrow alta disponibilidad Worker consume la cola y ejecuta transacciones de larga duración SqlServer almacena metadatos y permite consultas rápidas

Procesos en segundo plano.

El *Background Process* aplica una variante *event-based broker* (Pateria y Anyanwu, 2021; Idrees y Maiti, 2024): tareas lentas y procesos que se ejecuten automáticamente se delegan a *workers* que consumen la cola, manteniendo la experiencia de usuario ágil.

Atributo	Mecanismos concretos en la arquitectura
Disponibilidad	(1) Réplicas de nodos Besu en AKS; (2) reintentos automáticos vía Azure Queue; (3) lectura y escritura en SqlServer.
Escalabilidad	(1) Auto-scale en Frontend y Web API; (2) múltiples workers en paralelo; (3) red Besu extensible a nuevos validadores.
Extensibilidad	Exponer un nuevo servicio sólo implica añadir un endpoint en el Broker o suscribirse a una cola; no se toca el Frontend.

Cuadro 4.4: Atributos de calidad y mecanismos que los soportan en la arquitectura propuesta

4.3.2. Descripción de componentes.

- a) **Frontend Web (Angular)** Provee la interfaz web para que los participantes puedan realizar operaciones de registro, visualización y auditoría

de transacciones. Maneja la autenticación y autorización básica antes de remitir la información hacia la capa de servicios.

- b) **Azure Functions (Web API Blockchain Oracle)** Actúa como puerta de entrada a la Red Blockchain. Recibe las solicitudes REST desde el Frontend, valida credenciales y lógica de negocio preliminar, y luego delega la ejecución de transacciones a los Contratos Inteligentes.
- c) **Red Blockchain (Contratos Inteligentes en Nodos AKS)** Es la columna vertebral del sistema. Cada transacción de bonos de carbono y energía es registrada en la cadena de bloques, lo que asegura inmutabilidad y trazabilidad. Los Contratos Inteligentes automatizan la lógica de negocio, calculan la asignación de bonos, validan la información y generan un registro confiable de las transacciones.
- d) **SqlServer (Almacén de Metadatos)** Almacena y gestiona la metadata de las transacciones (detalles de registro, estado, resultados de validación). Facilita consultas rápidas y generación de reportes sin necesidad de procesar directamente la cadena de bloques.
- e) **Notificaciones en Tiempo Real (WebSockets / SignalR)** Envía notificaciones y actualizaciones instantáneas al Frontend cuando se confirman transacciones o ocurren eventos relevantes (por ejemplo, generación de nuevos bonos de carbono).
- f) **Azure function (Orquestador de procesos automáticos)** Ejecuta tareas automáticas o programadas (batch) que no necesitan interacción directa del usuario, como la verificación periódica de MWh producidos para la asignación de bonos de carbono o la comprobación de transacciones pendientes.
- g) **Azure Queue Storage (Mensajería Asíncrona)** Almacena y distribuye mensajes con información de transacciones o eventos a procesar en segundo plano. Desacopla los componentes para mejorar la disponibilidad y la capacidad de respuesta.
- h) **Azure function (Blockchain Worker)** Suscrito a la cola de mensajes, ejecuta llamadas a los Contratos Inteligentes, realiza validaciones adicionales y actualiza la información en el repositorio de metadatos. Permite la automatización de procesos que requieren alta disponibilidad y ejecución continua.

Este conjunto de componentes y su interacción (Figura 4.2) conforman un modelo informático robusto y escalable para la gestión de transacciones de bonos de carbono en el mercado eléctrico colombiano. La Red Blockchain permitida garantiza la inmutabilidad de los registros, la auditoría transparente y el cumplimiento normativo.

Las Funciones en la Nube y los Procesos Asíncronos aportan flexibilidad para manejar grandes volúmenes de datos y transacciones. Con esta arquitectura, se cubren los requisitos de registro, validación, auditoría y generación de bonos de carbono, así como los atributos no funcionales de privacidad, escalabilidad, eficiencia energética y alineación con la regulación local.

4.4 Diagramas UML

En esta sección se recopilan los principales diagramas UML que permiten analizar de manera integral la arquitectura y el comportamiento de la solución de gestión de bonos de carbono. El diagrama de clases expone la estructura estática de objetos, atributos y relaciones, facilitando la comprensión del modelo de datos y la lógica de negocio; el diagrama de paquetes organiza los módulos en capas coherentes, revelando las dependencias y responsabilidades de cada subsistema; el diagrama de implementación muestra la distribución de componentes en nodos de despliegue y los vínculos entre ellos; y el diagrama de secuencia detalla los flujos temporales de interacción entre actores y servicios para los casos de uso más relevantes. Estos cuatro diagramas ofrecen una visión complementaria que refuerza el diseño y la validación del prototipo.

4.4.1. Diagrama de clases

En la Figura 4.3 se presenta el diagrama de clases que modela los contratos inteligentes, las clases auxiliares y las estructuras de datos involucradas en todo el ciclo de vida de un bono de carbono. En este esquema, el servicio principal `ReguladorMercadoService` es responsable de orquestar la creación de órdenes de despacho, el cálculo de toneladas de CO₂ evitadas y la emisión del NFT `BonoCarbono`.

A su vez, el módulo `DespachosEnergia` y la clase `Generador` gestionan la notificación y confirmación de la inyección real de energía en planta. El contrato `ERC20Basic` dispone de las operaciones de aprobación y transferencia de tokens que permiten al cliente adquirir el bono, mientras que el propio `BonoCarbono` expone los métodos para generar y vender el NFT.

Las clases helper, es decir `GeneradorTransactionsHelper`,

ComercializadorTransactionsHelper y ClienteTransactionsHelper, agrupan los flujos transaccionales más complejos: registro de planta, fijación de precio y verificación de saldo.

Las clases de datos —OrdenDespacho, Planta y Bono— recogen los atributos persistentes de cada operación y establecen las relaciones y cardinalidades necesarias para garantizar la coherencia del proceso de generación y comercialización del bono.

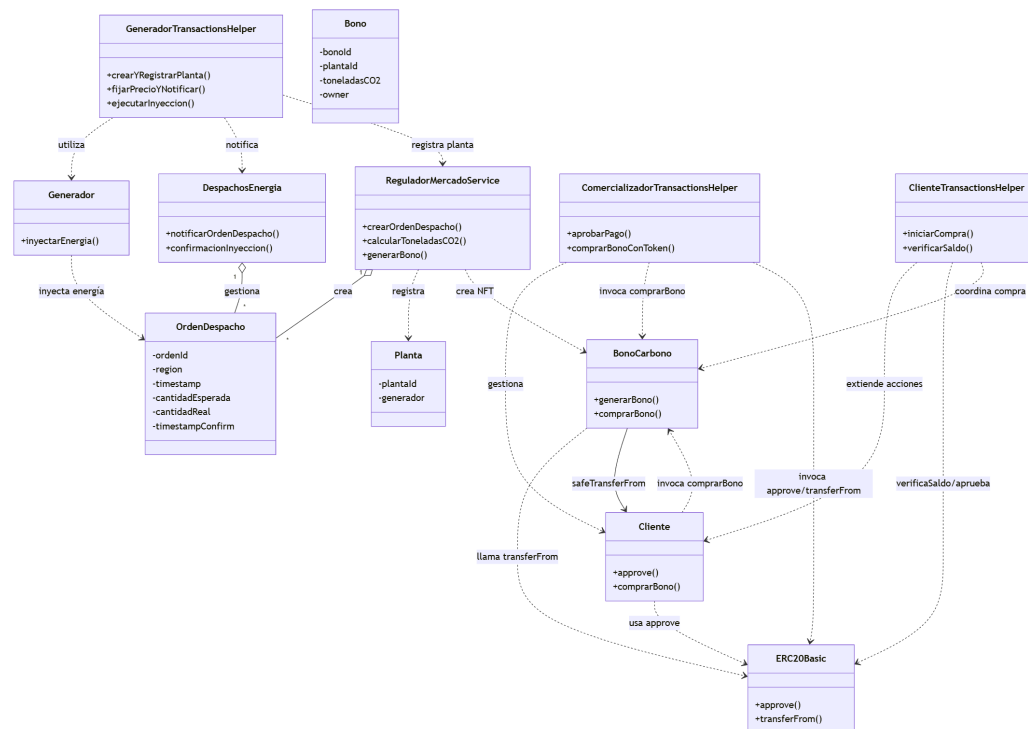


Figura 4.3: Diagrama de clases: entidades y helpers implicados en el proceso de generación y venta del bono de carbono. Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Diagrama de paquetes

En la Figura 4.4 se presenta el diagrama de paquetes que organiza la aplicación en cuatro capas independientes: Presentación, Aplicación, Dominio Blockchain e Infraestructura. La capa de presentación está representada por el paquete UI, que agrupa la interfaz Angular SPA y la extensión MetaMask para la gestión de claves y la firma de transacciones.

La capa de aplicación engloba dos paquetes principales: Oraculo API, expuesto como un servicio REST que recibe las solicitudes de la UI, y Blockchain Worker, responsable de procesar las transacciones de forma

asíncrona y orquestar los mensajes hacia la cadena.

La capa de dominio blockchain está constituida por el paquete **SmartContracts MRV**, que contiene los contratos inteligentes encargados del ciclo de vida de los bonos de carbono. Estos cubren las fases de registro, verificación, emisión y trazabilidad.

La capa de infraestructura incluye los paquetes **Azure Queue Storage**, **SQL Server Metadatos**, **Red Besu PoA** y **Azure Blob Storage ABI & Config**, que proporcionan los servicios de mensajería, almacenamiento de metadatos, red distribuida de nodos y persistencia de artefactos de contrato, respectivamente.

La comunicación entre paquetes sigue un flujo bien definido: la UI invoca el servicio **Oraculo API**, que a su vez llama internamente al **Blockchain Worker** y al paquete de **SmartContracts MRV**. El **Blockchain Worker** publica mensajes en la cola de Azure y consulta los contratos inteligentes para ejecutar operaciones on-chain. Tanto **Oraculo API** como **Blockchain Worker** acceden de manera opcional a la base de datos de metadatos y al almacenamiento de ABI para mantener la coherencia de estado y configuración. Este diseño garantiza un bajo acoplamiento, alta cohesión y escalabilidad horizontal de la solución.

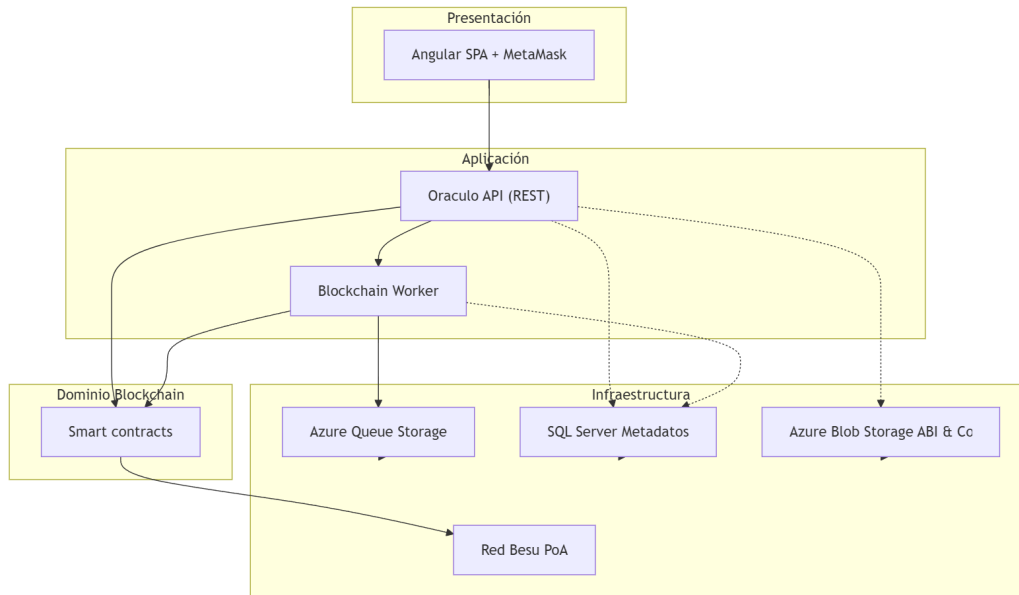


Figura 4.4: Diagrama de paquetes. Fuente: Elaboración propia

4.4.3. Diagrama de implementación

En la Figura 4.5 se muestra el diagrama de implementación que ilustra la ubicación y los vínculos de despliegue entre los componentes del sistema en las tres entidades principales: Cliente, Azure y Blockchain.

En el nodo **Cliente** residen el **Frontend Web (Angular)**, encargado de la interfaz de usuario, y la extensión **MetaMask** para gestión de claves y firma de transacciones. Cuando el usuario interactúa, **MetaMask** realiza la autenticación y firma de operaciones antes de enviarlas al frontend.

Dentro de la nube de **Azure** se despliegan las **Azure Functions**, que exponen las solicitudes REST del frontend y gestionan los procesos de negocio. Estas Functions envían las transacciones al nodo de la red blockchain; persisten los metadatos en **SQL Server (Metadatos)**; publican notificaciones en tiempo real al servicio de **Notif**, garantizando la actualización reactiva de la UI; y encolan y procesan tareas asíncronas mediante **Azure Queue Storage**, asegurando fiabilidad y desacoplamiento.

El nodo de **Blockchain** corresponde a la **Red Besu PoA**, donde se ins-

tancian y ejecutan los contratos inteligentes. Las **Azure Functions** envían allí las transacciones necesarias para el ciclo de vida de los bonos de carbono, mientras la cola de Azure garantiza la fiabilidad de los procesos.

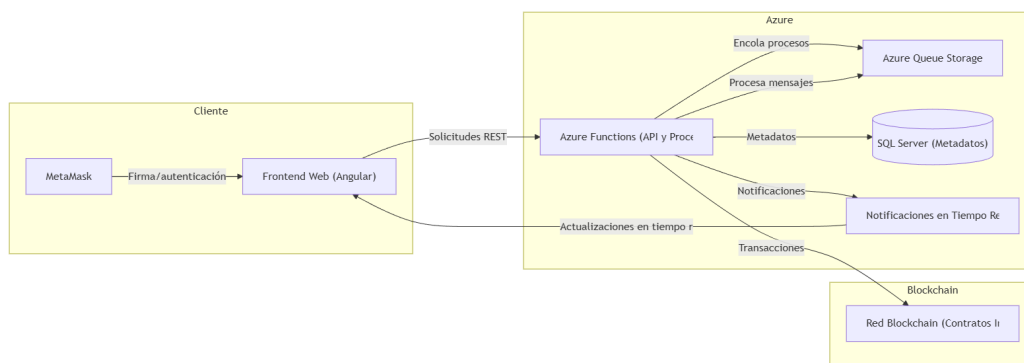


Figura 4.5: Diagrama de implementación del sistema. Fuente: Elaboración propia

4.4.4. Diagrama de secuencia

En la Figura 4.6 se muestra el diagrama de secuencia completo que describe el ciclo de vida de un bono de carbono dentro de la plataforma blockchain propuesta. El proceso inicia con la creación de una orden de despacho por parte del Regulador de Mercado, la cual es notificada al Generador para la inyección de energía real. Tras confirmarse la cantidad efectivamente inyectada, el sistema calcula las toneladas de CO₂ evitadas y genera el token ERC-721 que representa el BonoCarbono. A continuación, el Generador fija el precio del bono y el Cliente, previa aprobación del contrato, realiza la compra mediante el intercambio de tokens ERC-20. Finalmente, se produce la transferencia de los tokens de pago al Generador y la entrega segura del NFT del bono al Cliente, cerrando así el ciclo de generación y comercialización.

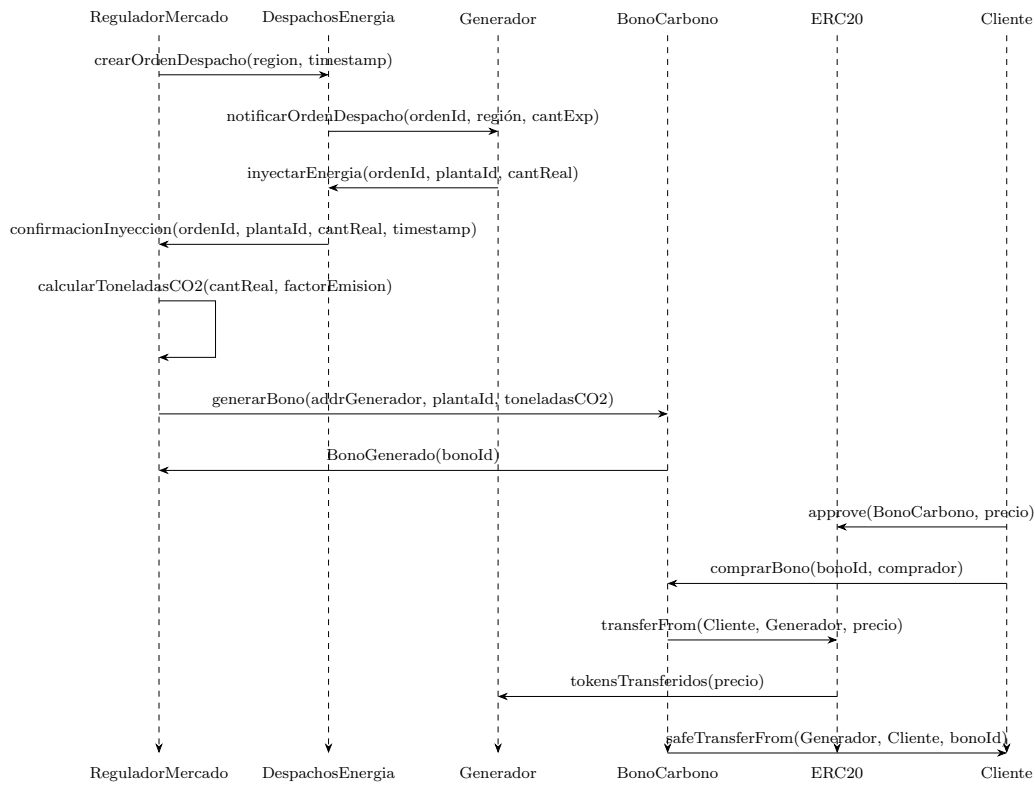


Figura 4.6: Diagrama de secuencia: flujo de generación y venta del bono de carbono. Fuente: Elaboración propia

4.5 Fase 4: Construcción del artefacto

En esta fase se muestra cómo los requisitos funcionales y la arquitectura de referencia se materializaron en una instancia operativa. El despliegue se integró en el prototipo **Enerchain**¹, por medio de:

4.5.1. Configuración de la red *Hyperledger Besu*

Se eligió Besu por su compatibilidad con los estándares ERC-20 y ERC-721 indispensables para los *utility tokens* de Enerchain y los NFTs que representan los bonos de carbono y por su capacidad para operar en redes permissionadas (Hyperledger Besu Community, 2025, 2023).

Los parámetros operativos de la red se sintetizan en tres decisiones de diseño que garantizan coherencia entre los requisitos de rendimiento, seguridad

¹Plataforma de Global MVM que simula el mercado eléctrico colombiano para la compraventa de energía renovable y, ahora, de bonos de carbono.

y compatibilidad con los estándares ERC-20/ERC-721:

- *Consenso*: IBFT 2.0 (Proof-of-Authority) (Saltini y Hyland-Wood, 2019; Consensys, 2019).
- *Topología*: 4 nodos validadores, cada uno expuesto como *full node* de acceso.
- *Parámetros clave*: periodo de bloque = 2 s; `min-gas-price` = 0 wei; límite de tamaño de contrato = 5 MiB.

El bloque génesis se define en el `values.yaml` del *chart* Helm (The Helm Authors, 2024) (Listing 4.1) e incluye dos cuentas profundidas para las pruebas de carga.

Listing 4.1: Extracto de `initialGenesis.json`

```
1  {
2    "config": {
3      "chainId": 1337,
4      "berlinBlock": 0,
5      "contractSizeLimit": 5242880,
6      "ibft2": { "blockperiodseconds": 2 }
7    },
8    "alloc": {
9      "0x23d2...a2a6": { "balance": "9e22" },
10     "0x102D...69F0": { "balance": "9e22" }
11   }
12 }
```

Orquestación Kubernetes.

El despliegue se empaquetó en un **Helm chart** (`besu-network`) que genera:

- *ConfigMap* con `genesis.json`, `config.toml` y los scripts de preparación.
- *Job* pre-hook que (i) genera los artefactos de red (`besu operator generate-blockchain-config`) y (ii) renombra las carpetas de claves según el orden de los validadores.
- *StatefulSet* de 4 réplicas (imagen `hyperledger/besu:22.10.0-RC2`) con puertos `30000/tcp` (P2P) y `8540/tcp` (RPC) (The Kubernetes Authors, 2024; ConsenSys, 2019).
- *PVC RWX* de 1 GiB para compartir los archivos de red entre pods.
- *Service headless + LoadBalancer* y un *Ingress* NGINX para exponer el RPC HTTP/WS (Poon, 2018).

Seguridad y permisos.

Los archivos `permissions_config.toml` permiten la lista blanca de nodos y cuentas y pueden actualizarse dinámicamente mediante la API `perm_addAccountsToAllowlist` (Hyperledger Besu Community, 2025).

Rendimiento alcanzado.

Con esta configuración la red logra un *throughput* sostenido de 74 tx/s y una latencia de confirmación de 2.4 ± 0.5 s, satisfaciendo el requisito RNF-02 < 5 s.

4.5.2. Desarrollo y despliegue de contratos inteligentes

Los contratos inteligentes que sustentan el prototipo se implementaron en **Solidity** y se compilaron con el *framework* Truffle². Para acelerar el desarrollo y asegurar el apego a las mejores prácticas se recurrió a las bibliotecas de *OpenZeppelin*, que proveen plantillas auditadas para ERC-20, ERC-721 y control de acceso.

4.5.2.1. Flujo de despliegue.

Truffle Migrations despliega cada contrato sobre la red Besu y regresa la dirección on-chain, la cual se persiste en la colección `SmartContracts` de SQL SERVER. Los ABI generados se almacenan en Azure Blob Storage, lo que permite que la *Web API Blockchain Oracle* los recupere dinámicamente sin re-compilar.

Cuadro 4.5: Contratos inteligentes y responsabilidades

Contrato	Rol principal	Interfaz clave
<code>BonoCarbono.sol</code>	Emite y transfiere bonos de carbono NFT	ERC-721
<code>Generador.sol</code>	Registra MWh renovables y dispara la acuñación de bonos	Propietaria
<code>GeneradorHelper.sol</code>	Biblioteca de validaciones y cálculos para Generador	Interna

Continúa en la página siguiente

²Truffle simplifica la compilación, pruebas y migración de contratos en redes compatibles con Ethereum.

Cuadro 4.5 – continuación de la página anterior

Contrato	Rol principal	Interfaz clave
ReguladorMercado.sol	Verifica criterios MRV y despacha energía	AccessControl
Certificador.sol	Certifica transacciones y la adicionalidad de cada bono	Ownable + Roles
ERC20.sol	Token transaccional para intercambiar energía	ERC-20 (mint/burn)

BonoCarbono.sol — Emisión y trazabilidad de NFTs (ERC-721)

- Genera un NFT por cada MWh de energía renovable producido, donde 1 NFT \equiv 1 t CO₂ evitada.
- Verifica que el bono no haya sido comercializado con anterioridad (*doble venta*).
- Registra metadatos clave en el evento `Mint` (generador, fecha, fuente renovable, historial de posesión).
- Expone `safeTransferFrom` para que otros participantes adquieran los bonos dentro de la plataforma.

Generador.sol & GeneradorHelper.sol — Gestión de productores

- Controlan las operaciones exclusivas de los agentes generadores de energía.
- Al recibir la notificación de producción renovable, calculan los bonos correspondientes y llaman a `BonoCarbono.mint`.
- `GeneradorHelper` encapsula fórmulas (factor de emisión, límites regulatorios) y utilidades de validación para mantener el código principal limpio y fácil de actualizar.

ReguladorMercado.sol — Supervisor y despachos de energía

- Representa a la entidad reguladora del mercado eléctrico dentro de la cadena.
- Verifica que cada bono haya sido generado bajo los estándares MRV definidos por la plataforma.

- Autoriza y registra los despachos de energía entre generadores y compradores, vinculando la transacción energética con los bonos correspondientes.

Certificador.sol — Validación global de transacciones

- Comprueba la validez de todas las transacciones que llegan a la DApp (compra-venta de bonos, pagos, despachos).
- Ratifica que los bonos emitidos por los generadores cumplen los criterios técnicos y normativos antes de que queden disponibles para el mercado.

ERC20.sol — Medio de pago interno

- Implementa el token utilitario que permite liquidar transacciones de energía y bonos.
- Mantiene el balance de cada participante y valida la suficiencia de fondos antes de autorizar pagos.
- Solo la cuenta ADMIN utilizada en el despliegue puede acuñar tokens adicionales, garantizando una política monetaria controlada.
- Soporta delegación de gasto (`approve/transferFrom`) para que los comercializadores (brokers) operen en nombre de clientes no regulados de gran demanda (p. ej. fábricas, centros comerciales).

Este conjunto de contratos cubre la emisión de bonos (RF-01), su comercialización segura (RF-02 y RF-03), la supervisión regulatoria (RF-04) y los mecanismos de pago interno, alineándose con los requisitos funcionales definidos para el prototipo.

4.5.3. Desarrollo y despliegue del Oráculo (Azure Function)

¿Qué es un oráculo en blockchain?

Un *oráculo* es un servicio *off-chain* que provee a los contratos inteligentes datos externos o ejecuta tareas que la red, por sí sola, no puede realizar, sirviendo de puente seguro entre la blockchain y el mundo real.

Implementación

El oráculo se implementó como una **Azure Function** en Python 3.11 con `web3.py`, y se desplegó como contenedor dentro del clúster Kubernetes que aloja la red Besu.

Responsabilidades actuales

- a. *Supervisión de nodos*. Cada 24 h consulta `eth_syncing` y `net_peerCount`. Si encuentra un nodo desincronizado, reinicia el `StatefulSet` correspondiente y comprueba de nuevo hasta que la altura de bloque sea consistente.
- b. *Gestión de cuentas*. Tras la aprobación del administrador, genera una **EOA (Externally Owned Account)**³ y su clave privada, incorpora la dirección a la `accounts-allowlist` mediante la API de permisos de Besu y persiste los metadatos (rol, razón social, fecha de alta) en SQL Server.

Extensibilidad planificada

Con la arquitectura *event-driven*, la plataforma puede reaccionar a registros IoT, integraciones con otras API o mensajes en colas:

- **Azure Service Bus / Queue Storage**. Dispositivos IoT publican un JSON con los MWh generados; la Function suscrita verifica la firma y, si es válido, invoca `BonoCarbono.mint` para acuñar el NFT correspondiente.
- **Notificaciones en tiempo real**. Tras confirmar la transacción on-chain, el oráculo publica en una cola *fan-out*; otra Function remite la actualización a la interfaz mediante **Azure SignalR Service**.
- **Reglas de negocio**. Eventos como `LogValidationNeeded` (bono próximo a expirar o límite de emisión alcanzado) se encolan; el oráculo consume el mensaje y ejecuta la validación sin intervención del usuario.

Este patrón desacopla las fuentes de datos (IoT, contratos, monitor de red) del procesamiento, mejora la escalabilidad y facilita añadir nuevas capacidades creando suscripciones o colas adicionales.

En la fase actual, el oráculo garantiza la *salud de la red* y el *on-boarding* de participantes, cumpliendo los requisitos funcionales

- **RF-05 — Gestión de participantes**: alta y parametrización segura de nuevas cuentas en la red.
- **RF-06 — Monitorización de infraestructura**: detección y recuperación automática de nodos fuera de sincronía.

³Cuenta controlada externamente mediante una clave privada, a diferencia de las *contract accounts*.

De esta forma, los contratos inteligentes operan siempre sobre nodos sincronizados y las cuentas autorizadas quedan registradas con la metadata necesaria para los procesos MRV.

4.5.4. Implementación del *Frontend* de la dApp

Visión general

La *dApp* Enerchain ofrece a los participantes del mercado (generadores, clientes, comercializadores, regulador y certificador) una interfaz web única para operar sobre la red Hyperledger Besu desarrollada con el framework de **Angular**, dicho framework nos ofrece una manera estructurada y clara de crear aplicaciones web complejas, facilitando la gestión y reutilización de los diferentes componentes de la aplicación.

Autenticación y firma de transacciones

La dApp se integra con la **extensión MetaMask**, que administra las **EOA** (Externally Owned Accounts) del usuario:

- a) Al iniciar sesión, la aplicación detecta MetaMask, solicita la conexión y verifica que la billetera esté en la red `chainId = 1337`.
- b) Las llamadas de escritura a los contratos (`send`) generan una ventana emergente de MetaMask donde el usuario revisa la estimación de *gas* y firma la transacción.

Configuración detallada de MetaMask

Para que los usuarios se conecten a la red Hyperledger Besu permitida internamente como **Enerchain-Mainnet** se añadió un *Custom RPC* en MetaMask con los parámetros que se listan en el Cuadro 4.6.

Cuadro 4.6: Parámetros de red para MetaMask

Campo	Valor
<i>Network Name</i>	BonosCarbonoMvm
<i>New RPC URL</i>	<code>http://mvmchain-nodes-balancer.eastus.cloudapp.azure.com:8540</code>
<i>Chain ID</i>	1337
<i>Currency Symbol</i>	ETH

Carga dinámica de contratos

Para minimizar mantenimiento y compilar una sola vez, los **ABI** y direcciones de los contratos se empaquetan en `/assets/contracts/<nombre>.json`. Al arrancar, un servicio Angular:

- lee cada archivo,
- construye instancias `web3.eth.Contract`,
- expone métodos tipados a los componentes de la UI mediante *services* inyectables.

Actualización en tiempo real

El frontend abre un **WebSocket** hacia el nodo Besu (`wss://mvmchain-nodes-balancer.east`) y se suscribe a los diferentes eventos que expone nuestros smartcontracts. Estos valores cumplen los objetivos de usabilidad y los requisitos funcionales **RF-02** (fluidez de operación) y **RF-03** (firma segura de transacciones) establecidos para el prototipo.

Diseño de la experiencia de usuario

La interfaz se diseñó con tres objetivos: (i) reforzar la autoridad del **regulador / administrador** rol que opera la mayor parte de los flujos, (ii) mantener a los generadores y comercializadores en un entorno familiar de “back-office”, y (iii) reducir al mínimo el número de clics para completar cada tarea de negocio. A continuación se describen los componentes claves visibles en las Figuras.

- 1. Asignar despacho de energía — rol Regulador** En la vista “Órdenes de despacho” (Fig. 4.7) el regulador introduce la cantidad (MWh) y confirma. La dApp llama a `ReguladorMercado.assignDispatch()` y dispara la ventana de firma `MetaMask`; al minarse el bloque se emite la notificación “Despacho registrado”.
- 2. Inyectar energía producida — rol Generador** El generador abre el diálogo “Inyectar energía” (Fig. 4.8), digita los MWh reales y pulsa *Inyectar*. Tras la firma de `Generador.injectEnergy()` la tabla actualiza los totales (*Total despachado / Total inyectada*) en tiempo real vía `WebSocket`.
- 3. Comprar bono de carbono — rol Cliente** En “Bonos de carbono” el cliente elige un bono disponible y confirma la compra. *Primer uso*: `MetaMask` muestra el permiso EIP-2612 (*Spending cap*); *compra*: transacción `BonoCarbono.buy(id)`. Al recibir el evento `Transfer` la UI:

- mueve el bono a la pestaña “Mis bonos”,
- descuenta los tokens ERC-20 del saldo,
- genera un PDF con el certificado y ofrece *Descargar*.

La Figura 4.7 muestra cómo el regulador puede emitir órdenes de despacho a los generadores, replicando el proceso operativo actual del mercado eléctrico colombiano dentro del prototipo.

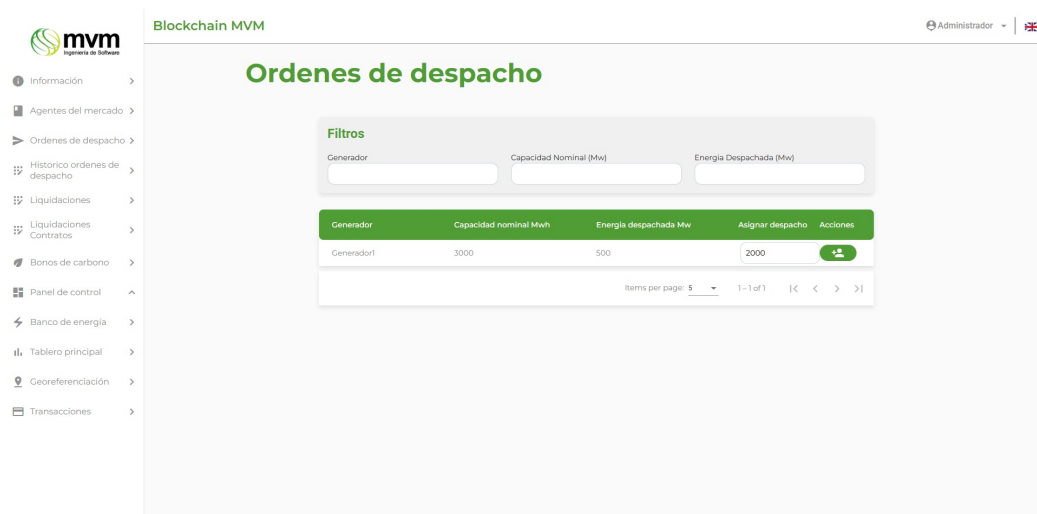


Figura 4.7: Registro de órdenes de despacho (rol Regulador). Fuente: Imagen extraída de prototipo Enerchain

La Figura 4.8 representa la vista del generador, quien puede registrar la energía producida por sus plantas y definir si esta se destina a subasta en el mercado de clientes no regulados o a la bolsa de energía.

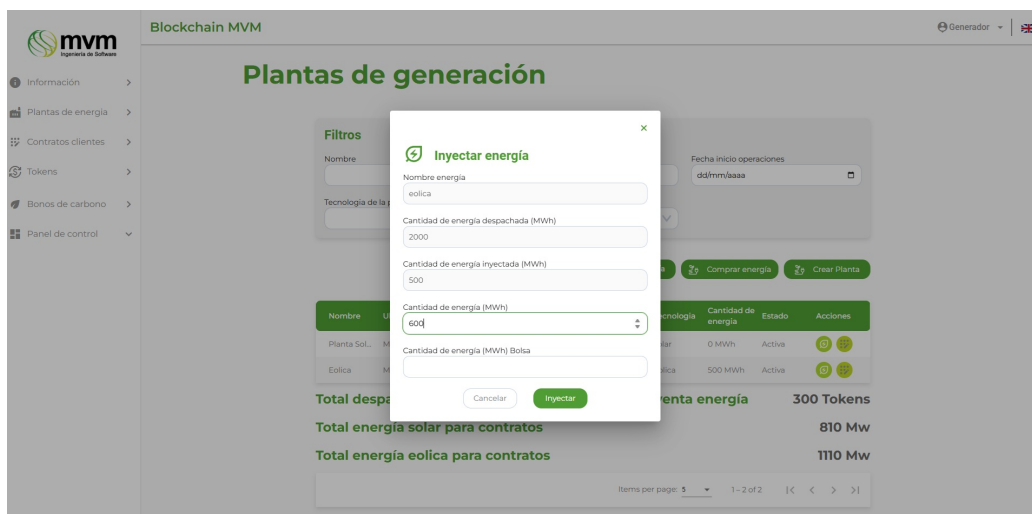


Figura 4.8: Inyección de energía producida (rol Generador). Fuente: Imagen extraída de prototipo Enerchain

Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran la experiencia del cliente en la plataforma. En la primera, se listan los bonos de carbono disponibles, indicando su fecha de creación, procedencia y equivalencia en toneladas de CO₂ reducidas. En la segunda, se presenta la confirmación de compra, donde el usuario visualiza el valor del bono expresado en tokens ERC-20.

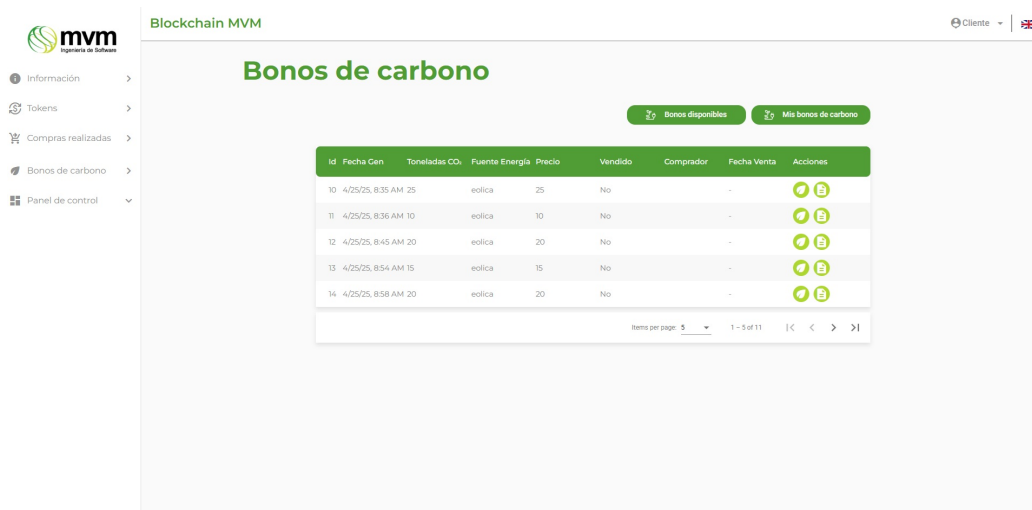


Figura 4.9: Listado de bonos disponibles (rol Cliente). Fuente: Imagen extraída de prototipo Enerchain

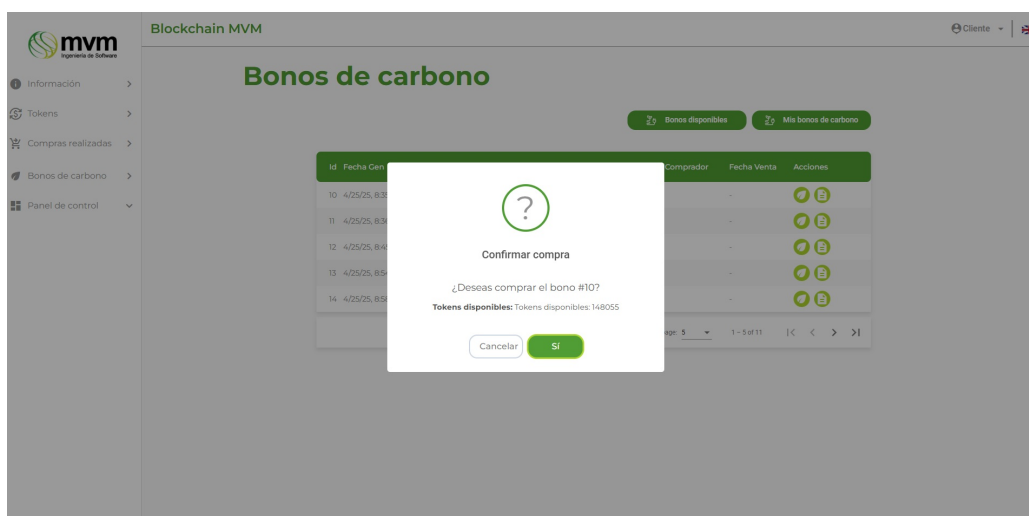


Figura 4.10: Confirmación de compra. Fuente: Imagen extraída de prototipo Enerchain

La Figura 4.11 muestra el certificado en formato PDF emitido tras la compra de un bono de carbono. En él se detallan la fecha de generación, vigencia, generador, fuente de energía y propietario actual del bono, como representación visual del token NFT generado por los contratos inteligentes.

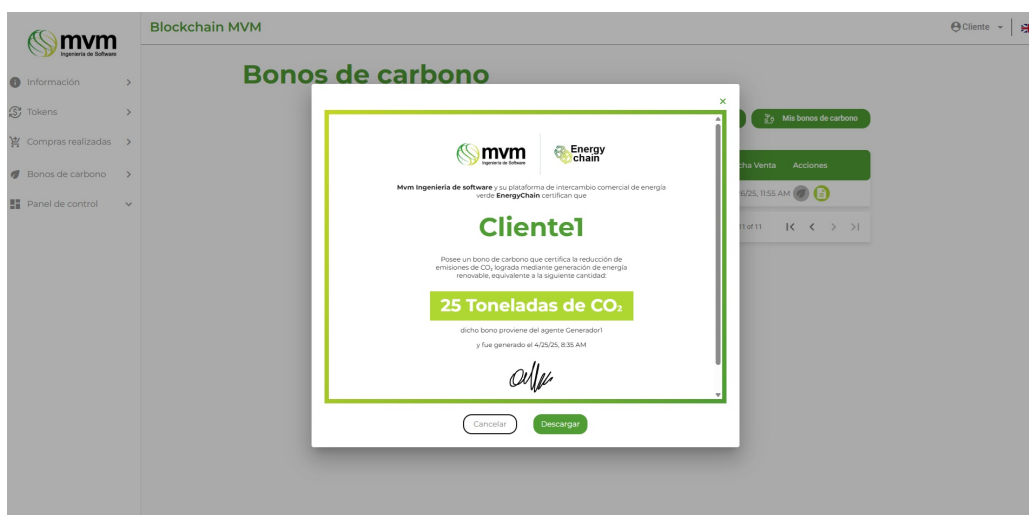


Figura 4.11: Certificado PDF emitido tras la compra. Fuente: Imagen extraída de prototipo Enerchain

Con estos tres flujos se cubren los requisitos funcionales **RF-01** (registro

de energía), **RF-05** (compra/venta de bonos) y **RF-06** (emitir comprobante descargable), asegurando trazabilidad y firma criptográfica en cada paso.

4.6 Fase 5: Estimación de costos

En esta fase se cuantifican los costos de ejecutar el prototipo en un entorno productivo y se comparan los precios de los tres proveedores de nube con mayor participación en el mercado —Microsoft Azure, Amazon Web Services (AWS) y Google Cloud Platform (GCP)—, manteniendo la misma arquitectura lógica en cada caso.

Para que la comparación sea coherente con el alcance académico y de investigación del proyecto, es necesario formular un conjunto de **supuestos de demanda** que reflejen el comportamiento esperado de la plataforma. Dichos supuestos abarcan (i) el consumo medio de recursos por aplicación, (ii) el volumen de transacciones diarias por agente, (iii) el número total de agentes que podría registrar la plataforma y (iv) la cantidad de transacciones que cada agente puede generar.

De acuerdo con la **Justificación** (Sección 2.5), el mercado eléctrico colombiano cuenta con **82 proyectos** de energías renovables, **2 000 – 3 000 clientes no regulados** y **80 – 100 comercializadores**. Estos proyectos suman una capacidad instalada cercana a **1 632 MW** y cada uno realiza en promedio **15 transacciones diarias**. Para el **piloto académico** se limita el universo de actores con el fin de mantener la complejidad bajo control:

Se modelará un (1) generador, cinco (5) clientes no regulados y dos (2) agentes comercializadores.

Con base en ese recorte y en las cifras del mercado se definen los siguientes parámetros operativos:

Parámetro	Valor
Duración del piloto	1 mes (fase inicial de validación)
Transacciones estimadas (mensual)	15 transacciones/día \times 30 días = 450 transacciones/mes
Proyección anual	450 transacciones/mes \times 12 meses = 5.400 transacciones/año
Clientes concurrentes	5 usuarios simultáneos (cliente final)
Comercializadores concurrentes	2 agentes comerciales activos

Cuadro 4.7: Escenario base del piloto y proyección anual estimada

A partir de los supuestos del Cuadro 4.7 se elaboró un inventario de recursos de cómputo, almacenamiento, red y servicios administrados. La Tabla 4.8 presenta la equivalencia funcional de esos recursos en Microsoft Azure, Amazon Web Services (AWS) y Google Cloud Platform (GCP). Para cada categoría se eligió la oferta administrada de menor tamaño que satisface los requisitos de capacidad del piloto; además, se señala la unidad de cobro (instancia-mes, nodo-hora, millones de ejecuciones, etc.) que los proveedores utilizan para facturar el servicio.

Este mapeo permite establecer una línea base de costos operativos para el piloto en diferentes plataformas de nube, considerando configuraciones equivalentes en cuanto a capacidad de cómputo, almacenamiento y rendimiento. La selección de servicios fue guiada por criterios de disponibilidad regional, facilidad de despliegue y compatibilidad con contenedores y funciones serverless. Así, la tabla busca no solo comparar precios, sino también ofrecer una perspectiva funcional de interoperabilidad entre nubes para eventuales escenarios de migración, escalado o despliegue híbrido.

Servicio	Azure	AWS	Google Cloud	Unidad
Web App Frontend	App Service Plan S1 (1 vCPU, 1.75 GB)	Elastic Beanstalk t3.medium (2 vCPU, 4 GB)	App Engine F2 (2 vCPU, 2 GB)	instancia-mes
Web API Oracle	App Service Plan S1 (1 vCPU, 1.75 GB)	Elastic Beanstalk t3.medium (2 vCPU, 4 GB)	Cloud Run (1 vCPU, 2 GB)	instancia-mes
Red Kubernetes	AKS: 2 nodos B2ms (2 vCPU, 8 GB RAM)	EKS: 2 nodos t3.large (2 vCPU, 8 GiB RAM)	GKE: 2 nodos e2-standard-2 (2 vCPU, 8 GB RAM)	nodo-hora
Funciones serverless	Functions (Consumption)	Lambda	Cloud Functions	ejec. / millones ejec.
Cola asíncrona	Queue Storage	SQS	Pub/Sub	GB-mes + operaciones
Base de datos SQL	SQL DB S1 (20 DTU, 5 GB)	RDS db.t3.small, 5 GB	Cloud SQL db-n1-standard-1, 5 GB	instancia-mes
Notificaciones RT	SignalR Service Unit 1	API Gateway (WebSockets)	Firebase Realtime DB	unidad-mes
Almacenamiento blob	Blob Storage: 10 GB	S3: 10 GB	Cloud Storage: 10 GB	GB-mes
Monitorización	Azure Monitor (Metrics + Logs: 5 GB ingesta)	CloudWatch (Metrics + Logs: 5 GB ingesta)	Cloud Monitoring (Metrics + Logs: 5 GB ingesta)	GB-mes

Cuadro 4.8: Comparativa de servicios equivalentes en Azure, AWS y Google Cloud para el piloto

El Cuadro 4.9 sintetiza el costo mensual estimado de cada servicio en los tres proveedores, calculado con las tarifas públicas vigentes para las dimensiones seleccionadas en el piloto. AWS presenta el menor costo total mensual, seguido por Google Cloud y Azure. Las diferencias se explican principalmente por los precios de red y bases de datos. Estas estimaciones permiten establecer una línea base para la proyección de costos operativos y apoyar la selección de proveedor según criterios técnicos y presupuestales.

Servicio	Costos mensuales por proveedor (USD)		
	Azure	AWS	Google Cloud
Web App Frontend	69,35	35,45	56,19
Web API Oracle	69,35	35,45	56,19
Red Kubernetes	213,16	131,40	185,39
Funciones Serverless	0,00	0,00	6,95
Cola asíncrona	9,81	4,905	4,905
Base de datos SQL	29,43	74,57	53,71
Notificaciones RT	49,91	4,63	1,50
Almacenamiento	1,25	0,23	0,23
Monitorización	15,00	25,22	20,11
Total	457,26	311,86	385,18

Cuadro 4.9: Comparativo de costos operativos por mes en USD

4.6.1. Análisis de retorno de inversión (ROI)

La viabilidad económica de la plataforma *Enerchain* depende de su capacidad para generar ingresos sostenibles y alineados con el valor que crea para sus participantes. A tal fin, se adopta un modelo basado en la aplicación de comisiones transaccionales sobre un token ERC-20, liquidado en una red *blockchain* permisionada compatible con Ethereum. Esta estrategia ha demostrado ser funcional en proyectos del sector energético como Power Ledger (Ltd, 2019) y Energy Web Chain (E. W. Foundation, 2019), en los cuales el token cumple un triple rol: unidad de intercambio, incentivo para operadores y mecanismo de gobernanza.

Cada operación energética (*inyección, fijación de precio, compra de bono*) descuenta una comisión c sobre el valor expresado en tokens, y esta se reparte automáticamente entre *nodos validadores, verificadores MRV* y la tesorería de la red. Este modelo permite que los ingresos crezcan proporcionalmente

al volumen de uso, habilitando una escalabilidad sostenible sin necesidad de subsidios externos (Avgerinopoulou, Hadjichristofi, y cols., 2021).

Modelo de ingresos.

Sean:

- T : número de transacciones mensuales,
- S : cantidad media de tokens por transacción,
- P : precio del token en USD,
- c : comisión sobre el monto (ej. $c = 0.01$).

Entonces, los ingresos mensuales proyectados se calculan como:

$$I = T \times S \times P \times c.$$

Del total recaudado, se asigna una fracción α a los validadores y otra β a los verificadores, reservando el resto para una tesorería on-chain ($\alpha + \beta < 1$) que financie la evolución del protocolo (E. W. Foundation, 2019).

Proyecciones y escalabilidad.

La Tabla 4.10 presenta tres escenarios: piloto, adopción moderada y plena, manteniendo $c = 0.01$. Se observa que los ingresos escalan linealmente con la cantidad de transacciones, demostrando que el modelo es proporcional al uso de la red.

Escenario	T (tx/mes)	S (tokens/tx)	P (USD/token)	I (USD/mes)
Piloto académico	450	100	1.00	450
Adopción moderada	2,250	150	1.20	4,050
Adopción plena	10,000	200	1.50	30,000

Cuadro 4.10: Ingresos mensuales proyectados por comisiones de transacción

Rentabilidad esperada.

Asumiendo un coste de operación que escala linealmente con el volumen de transacciones, podemos derivar el valor de USD 10,161 a partir del escenario piloto.

- En el piloto académico se tienen $T = 450$ transacciones y un costo mensual total de USD 457.26 (Tabla 4.9).

- De ahí se obtiene un costo unitario por transacción:

$$C_{\text{uni}} = \frac{457.26}{450} \approx 1.016 \text{ USD/tx.}$$

- Bajo un volumen de $T = 10,000$ tx/mes (escenario de adopción plena), el costo operativo estimado es:

$$C = 1.016 \times 10,000 \approx 10,161 \text{ USD/mes.}$$

Por tanto, el ROI mensual en adopción plena (ingresos $I = 30,000$ USD, costos $C \approx 10,161$ USD) se calcula como:

$$\text{ROI} = \frac{I - C}{C} = \frac{30,000 - 10,161}{10,161} \approx 1.95 \quad (195\%).$$

Esta métrica coincide con lo reportado en plataformas similares y valida la conveniencia de adoptar un modelo de marketplace digital con estructura de comisión proporcional (Soto, Zhang, y Morales, 2020).

Gestión del token y sensibilidad.

El valor del token P es endógeno y depende de la demanda y de la política monetaria. Para mitigar su volatilidad, se contempla su estabilización parcial con activos colateralizados o mecanismos de market-maker algorítmico, como se sugiere en Power Ledger (Ltd, 2019). A su vez, el ajuste gradual de c por parte de la gobernanza permite equilibrar competitividad, ingresos y descentralización del control (E. W. Foundation, 2019).

Análisis del punto de equilibrio

El *punto de equilibrio* (*break-even point*) es el nivel de actividad en el cual los **ingresos totales igualan a los costos totales**, generando utilidad nula (Salvatore, 1982; Gitman, 1982). Bajo el marco Costo–Volumen–Utilidad (CVU), los costos se descomponen en:

$$C_T(Q) = C_F + C_{V_{\text{unit}}} Q,$$

mientras que los ingresos se modelan como

$$I_T(Q) = P_{\text{unit}} Q.$$

Parámetros empleados

- **Costo fijo mensual** (C_F) = USD 457,26 (Tabla 4.9)

- **Costo variable unitario** ($C_{V\text{unit}}$) = USD 1,016/tx
- **Ingreso unitario** (P_{unit}) = $S \times P \times c = 150 \times 1,20 \times 0,01 =$ USD 1,80/tx (escenario de adopción moderada)

—

Cálculo del punto de equilibrio

$$Q_{\text{PE}} = \frac{C_F}{P_{\text{unit}} - C_{V\text{unit}}} = \frac{457,26}{1,80 - 1,016} \approx \mathbf{583 \text{ tx/mes.}}$$

Interpretación temporal. La simulación de 24 meses (Figura 4.12) confirma que el cruce entre las curvas de ingresos acumulados y costos acumulados ocurre alrededor del **mes 3**, coincidiendo con la transición a la fase de adopción moderada y con el umbral analítico de 583 transacciones mensuales.

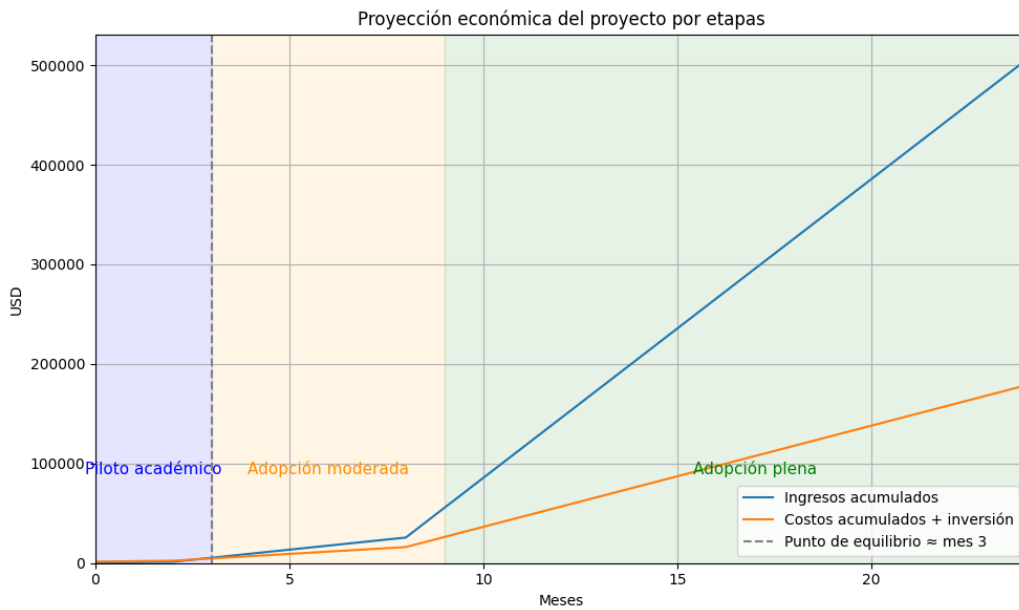


Figura 4.12: Proyección económica del proyecto por etapas. Fuente: Elaboración propia

Este análisis es, ante todo, un ejercicio académico: los resultados descansan en supuestos clave—volúmenes de transacciones mensuales y costos operativos que se mantienen constantes—y cubren exclusivamente los gastos de infraestructura en la nube, dejando fuera los gastos de personal necesarias para diseñar, desplegar y mantener la plataforma. Con esas premisas, y dado que el ingreso unitario supera al costo variable por transacción, la inversión

inicial se recupera al cabo de los tres primeros meses de operación; a partir de ese momento el margen crece de manera sostenida.

En síntesis, el modelo basado en comisiones y tokens no solo cubre los costos de operación sino que habilita un crecimiento orgánico, incentivando a los participantes a sostener la red. Su validez se respalda en casos reales, literatura técnica y estudios de escalabilidad en el sector energético. Al aplicar el análisis costo–volumen–utilidad (CVU) y la fórmula clásica del punto de equilibrio descrita por Horngren et al. (Horngren, Foster, y Datar, 2000) y Salvatore (Salvatore, 1982), se concluye que, bajo parámetros conservadores, **Enerchain** alcanza su umbral de rentabilidad al tercer mes de funcionamiento. La representación gráfica de ingresos y costos (Figura 4.12) confirma que, superado este punto, la plataforma genera un ROI superior al 100% y comienza a producir utilidades de forma sostenida, validando así el modelo sin necesidad de subsidios externos (Kiradoo, 2009). Este respaldo teórico y empírico refuerza la solidez financiera de **Enerchain** y su capacidad de escalar de manera sostenible (Gitman, 1982).

5. Validación y evaluación experta del prototipo

El prototipo se sometió a una *validación experta* mediante un **Delphi adaptado** (Chuenjitwongsa, 2017). A diferencia del procedimiento clásico de múltiples rondas, se optó por un esquema bifásico: una primera iteración de evaluación permitió recoger observaciones cualitativas y cuantitativas sobre la arquitectura propuesta, mientras que una segunda ronda incorporó las mejoras sugeridas y midió el grado de consenso alcanzado. La evaluación se centró en verificar la pertinencia técnica y la viabilidad operativa de la solución para el mercado eléctrico colombiano de energías renovables.

5.1 Diseño metodológico

La meta principal fue obtener un aval técnico independiente que confirmara, o refutara, la hipótesis de que una red *blockchain* permisionada basada en el patrón *Service-Oriented Distributed Broker* (Bass y cols., 2022) ofrece trazabilidad, transparencia y eficiencia suficientes para gestionar transacciones de bonos de carbono en Colombia. Se diseñó un cuestionario estructurado con 37 afirmaciones distribuidas en seis apartados: visión general, componentes, calidad arquitectónica, ajuste al contexto eléctrico, alineación climática y evaluación global. Cada enunciado se calificó en una escala de Likert de 1 (*desalineación total*) a 5 (*alineación completa*), complementada con campos abiertos para comentarios cualitativos.

5.2 Caracterización del panel

Se invitó a quince profesionales y respondieron once, lo que representa una tasa de respuesta del 73.3%. Como se puede observar en la figura 5.1 la mayoría cuenta con posgrado (81% entre especialización, maestría y doctorado) y una experiencia laboral superior a diez años (64%). En cuanto a roles, el grupo combinó perfiles de arquitectura de software, liderazgo técnico, cien-

cia de datos y gestión de proyectos; todos ellos han desarrollado o evaluado soluciones para el sector energético. Esta diversidad aseguró la convergencia de perspectivas tecnológicas, regulatorias y de negocio.

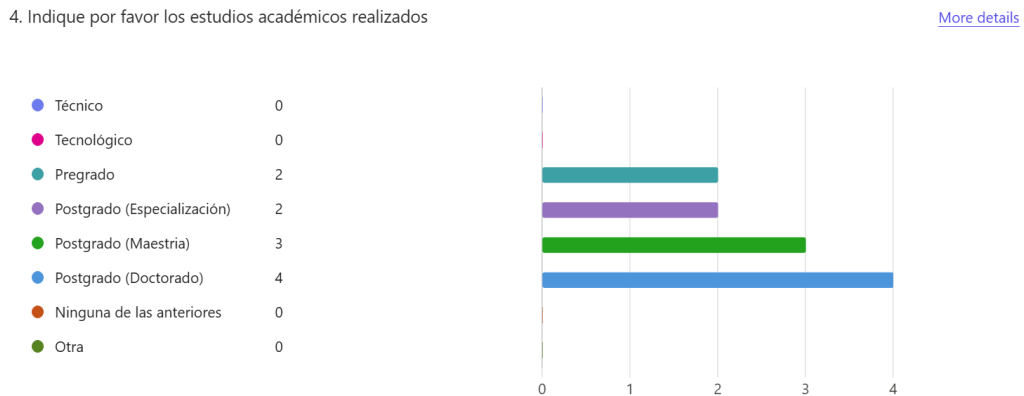


Figura 5.1: Caracterización de panel de expertos. Fuente: Análisis resultados *Microsoft forms*

5.3 Instrumento, escala y análisis de resultados

5.3.1. Diseño del instrumento

Para la validación experta del prototipo se aplicó un cuestionario estructurado bajo la metodología Delphi, adaptado a una única ronda cuantitativa. El instrumento fue construido a partir de criterios definidos en literatura sobre arquitectura de software y sistemas MRV para bonos de carbono. Cada dimensión fue evaluada mediante una **Escala de Alineación Arquitectónica** de cinco puntos, donde 1 indica “desalineación total” y 5 “alineación completa”.

Las dimensiones consideradas incluyeron: visión general del prototipo, definición de componentes principales, atributos de calidad arquitectónica, ajuste al contexto colombiano, evaluación global, alineación climática y contribución a la transición energética. Los datos fueron analizados utilizando medidas de tendencia central y dispersión, como la media, mediana y desviación estándar.

5.3.2. Resultados del análisis descriptivo

El análisis descriptivo mostró puntuaciones medianas de 4 (*alineación adecuada*) o superiores en todas las dimensiones evaluadas, lo que indica una

valoración positiva general del prototipo.

En la figura 5.5 se observa que en la evaluación de la **visión general**, el 87 % calificó la claridad global con 4 o 5, señalando como áreas de mejora la explicitación de requisitos funcionales y la simplificación de diagramas. Esta dimensión obtuvo una mediana de 5.0 y una media de 4.66 ($\sigma = 0.53$), lo que refleja un consenso elevado sobre su adecuación general.

11. Visión General del Prototipo

Pretende evaluar el grado en que la descripción global de la arquitectura resulta clara y comprensible: si facilita la identificación rápida de objetivos, componentes y relaciones, y si el diagrama de flujo de transacciones refleja fielmente el proceso de gestión de bonos de carbono.

[More details](#)

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación Arquitectónica** definida anteriormente.

● Desalineación total ● Alineación básica ● Alineación parcial ● Alineación adecuada ● Alineación completa

¿En qué medida la descripción de alto nivel de la arquitectura facilita la comprensión inicial del propósito y permite identificar...

¿En qué medida el nivel de detalle de los diagramas y la documentación asociada resulta suficiente para entender la...

¿En qué medida las relaciones y dependencias entre los bloques principales se presentan de forma coherente y completa?

¿En qué medida la arquitectura propuesta satisface adecuadamente los **requerimientos funcionales y no...**

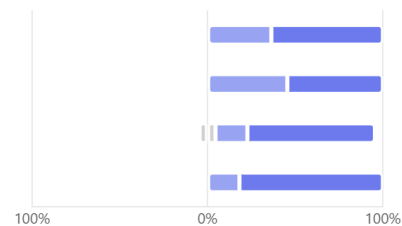


Figura 5.2: Visión general del prototipo. Fuente: Análisis resultados *Microsoft forms*

Los **componentes principales** alcanzaron un consenso del 75 % en alineación adecuada o completa, como se observa en la figura 5.3. Algunos expertos sugirieron incluir métricas de desempeño y ejemplos de trazabilidad para usuarios no técnicos. Esta dimensión también alcanzó una mediana de 5.0 (media 4.52, $\sigma = 0.63$), destacando la robustez de su diseño.

13. Componentes Principales

Busca validar la definición y rol de cada bloque arquitectónico: su claridad, cobertura de funciones clave, calidad de las interfaces de comunicación y nivel de desacoplamiento entre módulos.

[More details](#)

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación Arquitectónica** definida anteriormente.

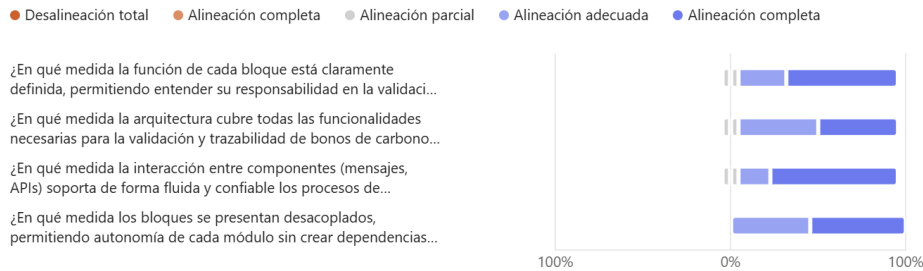


Figura 5.3: Evaluación componentes principales. Fuente: Análisis resultados *Microsoft forms*

En cuanto a la **calidad arquitectónica** de acuerdo a los resultados reflejados en la figura 5.4, los atributos mejor valorados fueron la flexibilidad, la seguridad y la extensibilidad. La mantenibilidad presentó la mayor dispersión, al considerarse parcialmente fuera del alcance de un prototipo académico. Las respuestas agregadas presentaron una media de 4.52 y mediana de 5.0 ($\sigma = 0.54$), lo que sugiere un nivel alto de aprobación pese a cierta variabilidad.

15. Calidad Arquitectónica

Mide los atributos técnicos críticos de la solución: flexibilidad, escalabilidad, rendimiento, fiabilidad, seguridad, mantenibilidad, interoperabilidad, extensibilidad, modularidad y simplicidad de despliegue, según [More details](#).

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación Arquitectónica** definida anteriormente.

● Desalineación total ● Alineación básica ● Alineación parcial ● Alineación adecuada ● Alineación completa

- Flexibilidad** ¿En qué medida la arquitectura permite adaptarse a cambios en requisitos o componentes sin afectar el...
- Escalabilidad** ¿En qué medida el diseño soporta un crecimiento de usuarios y volumen de transacciones de bonos sin degradar s...
- Rendimiento** ¿En qué medida la arquitectura garantiza tiempos de respuesta y latencias adecuadas bajo condiciones de carga...
- Fiabilidad** ¿En qué medida el sistema mantiene la continuidad operativa y se recupera automáticamente de fallos o errores?
- Seguridad** ¿En qué medida la arquitectura protege la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los datos de los bonos de...
- Mantenibilidad** ¿En qué medida es sencillo localizar, corregir y actualizar componentes o servicios sin introducir nuevos errores?
- Interoperabilidad** ¿En qué medida los módulos pueden intercambiar información y trabajar con sistemas externos (p. ej.,...
- Extensibilidad** ¿En qué medida se pueden añadir nuevas funcionalidades (validadores, reportes, integraciones) sin rediseñ...
- Modularidad** ¿En qué medida la arquitectura está organizada en módulos cohesivos y con bajo acoplamiento entre sí?
- Complejidad de despliegue** ¿En qué medida el proceso de instalación, configuración y puesta en marcha del sistema es...



Figura 5.4: Evaluación calidad de la arquitectura. Fuente: Análisis resultados *Microsoft forms*

Respecto al **ajuste al contexto colombiano**, se destacaron la adecuación regulatoria y la tolerancia a fallos, ambas con mediana de 5.0. La latencia fue el atributo con mayor variabilidad (mediana 3.5), lo que sugiere realizar pruebas de carga adicionales. Esta categoría obtuvo una media general de 4.51 ($\sigma = 0.57$).

La **evaluación global** del prototipo arrojó una media de 4.54 y mediana de 5.0, con una desviación estándar mayor ($\sigma = 0.74$), lo que indica una percepción positiva pero con mayor dispersión que las demás secciones, como se observa en la figura 5.5.

18. Evaluación Global

Recoge una valoración final sobre la adoptabilidad y recomendación de la arquitectura en un entorno real de producción, así como observaciones abiertas para capturar sugerencias de mejora en diagramas, procesos o documentación.

[More details](#)

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación Arquitectónica** definida anteriormente.

● Desalineación total ● Alineación básica ● Alineación parcial ● Alineación adecuada ● Alineación completa

Adoptabilidad en un entorno real ¿En qué medida el prototipo puede integrarse y operar eficazmente en proyectos de...
Recomendación de uso en producción ¿En qué grado se considera idóneo este diseño para su despliegue y mantenimien...
Tolerancia a fallos ¿En qué medida el sistema continúa operando y se recupera de manera automática ante la caída de alguno de...

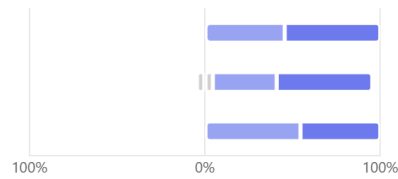


Figura 5.5: Evaluación global del prototipo. Fuente: Análisis resultados *Microsoft forms*

Finalmente, la categoría de **alineación climática** recibió valoraciones de 4 o 5 en más del 80% de las respuestas (véase figura 5.6). La media fue de 4.55, con mediana de 5.0 y una desviación estándar baja ($\sigma = 0.50$), lo que confirma que la propuesta se percibe como fuertemente alineada con los objetivos climáticos nacionales.

20. Alineación con los Objetivos de Cambio Climático de Colombia

MRV hace referencia a los procesos de Medición, Reporte y Verificación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), fundamentales para asegurar la integridad de los bonos de carbono. Esta sección busca evaluar qué tan alineada está la propuesta de una solución basada en blockchain con las metas climáticas del país.

[More details](#)

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación** definida anteriormente.

● Desalineación total ● Alineación básica ● Alineación parcial ● Alineación adecuada ● Alineación completa

¿Qué tan relevante considera que es mejorar los procesos de MRV y la trazabilidad del mercado de bonos de carbono para que...
¿En qué medida considera que una solución basada en blockchain para MRV en generación eléctrica puede aumentar la credibili...
¿Qué nivel de alineación percibe entre el uso de blockchain para trazabilidad y verificación de bonos de carbono, y el...
¿Qué tan consistente considera que es una solución de MRV auditable e inmutable mediante blockchain con los estándares...

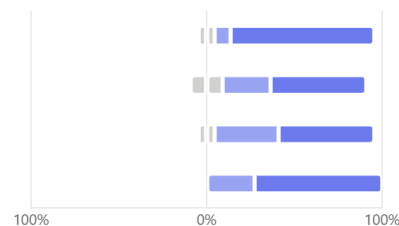


Figura 5.6: Evaluación alineación objetivos climaticos Colombia. Fuente: Análisis resultados *Microsoft forms*

Por su parte, la **contribución a la transición energética** también

obtuvo más del 80, % de respuestas en los niveles 4 o 5 (véase figura 5.7). Con una media de 4.61, la misma mediana de 5.0 y una desviación estándar igualmente baja, se refuerza la conclusión de que el sistema tiene alto potencial para fortalecer los procesos de *MRV* y atraer inversión a proyectos renovables.

22. Alineación con la Transición Energética en Colombia

Colombia está avanzando en su proceso de transición energética, priorizando el desarrollo de **Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER)** y su integración en el sistema eléctrico y los mercados asociados. Esta sección busca evaluar cómo la propuesta de una plataforma basada en blockchain para la gestión de bonos de carbono se alinea con este proceso. [More details](#)

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación** definida anteriormente.

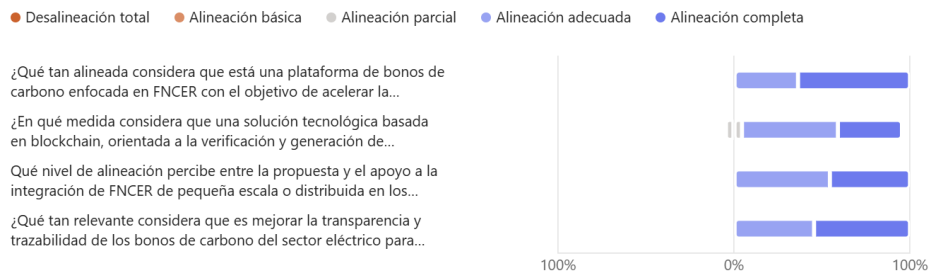


Figura 5.7: Evaluación objetivos transición energética Colombia. Fuente: Análisis resultados *Microsoft forms*

5.4 Acciones derivadas

Las recomendaciones del panel se tradujeron en tres mejoras sustanciales. En primer lugar, se incorporó un diagrama de secuencia que recorre el ciclo de vida completo de un bono de carbono, desde su registro inicial hasta su eventual redención o retiro. Este recurso visual expone con claridad los mensajes, validaciones y puntos de auditoría que intervienen en cada etapa, facilitando tanto el análisis técnico como la comunicación con actores no especializados.

En segundo lugar, se amplió la descripción de la arquitectura para explicitar los mecanismos de interoperabilidad con plataformas externas. El texto revisado detalla los contratos de API, los protocolos de mensajería y las convenciones de formato que permiten la integración con sistemas regulatorios, bases de datos sectoriales y mercados voluntarios internacionales. Esta aclaración refuerza la trazabilidad de las dependencias, delimita con precisión las responsabilidades de cada servicio y allana el camino para futuras extensiones del ecosistema.

En tercer lugar, se efectuó un análisis comparativo de costos en Amazon Web Services, Microsoft Azure y Google Cloud Platform. Para ello se establecieron supuestos apoyados en datos oficiales del mercado eléctrico colombiano y se elaboraron cuadros con comparativos de cada componente en cada escenario. Con estos resultados se desarrolló el *Análisis de retorno de inversión* presentado en la Subsección 4.6.1, el cual proyecta un ROI mensual cercano al 195 %; estas cifras confirman la factibilidad económica de la solución y su capacidad para generar beneficios proporcionales al crecimiento del volumen transaccional.

5.5 Conclusión de la validación

El panel consideró que la solución es técnicamente sólida y práctica para el mercado eléctrico colombiano, con un nivel de alineación general situado entre *adecuada* y *completa*. Su adopción, de acuerdo con los expertos, podría mejorar la transparencia, reducir el riesgo de doble conteo y facilitar la auditoría de bonos de carbono, contribuyendo así a los objetivos de descarbonización del país.

La validación se realizó en dos rondas: en la primera se evaluaron los componentes conceptuales y técnicos del prototipo, y en la segunda se presentó una versión ajustada tras incorporar las observaciones del panel. Esta retroalimentación permitió refinar tanto los elementos funcionales como los atributos arquitectónicos, lo que refuerza la madurez y robustez del artefacto.

Los expertos señalaron que el modelo, concebido para el sistema energético colombiano, es replicable en otros contextos: su lógica de trazabilidad y verificación permite integrar pequeños generadores distribuidos mediante procesos de afiliación, validación y pago ágiles, y resulta igualmente útil en proyectos de reforestación u otras iniciativas de mitigación que exigen control estricto de las reducciones de emisiones, consolidando así su aporte a la transición energética.

Asimismo, dada la vocación exportadora de Colombia en el mercado voluntario de carbono, una plataforma basada en blockchain que genere confianza en organismos certificadores internacionales podría consolidar el posicionamiento del país como proveedor confiable de activos climáticos. Esto abre oportunidades para integrar el sistema con estándares internacionales y entidades verificadoras, fortaleciendo la interoperabilidad y el respaldo institucional de los bonos transados.

6. Conclusiones y Recomendaciones

En este capítulo se consolidan los hallazgos obtenidos a lo largo del trabajo sustentados en los marcos teórico y metodológico expuestos en las secciones 3.1 y 3.2 y se formulan recomendaciones dirigidas a la academia, la industria y pasos a seguir para trabajos futuros.

6.1 Conclusiones

La evidencia reunida confirma que la tecnología *blockchain* fortalece los mecanismos de medición, reporte y verificación (MRV) en el Mercado de Bonos de Carbono colombiano. El prototipo —una red permissionada *Hyperledger Besu* con consenso IBFT2 y contratos inteligentes en Solidity— demostró que es posible automatizar la verificación, preservar la inmutabilidad de los registros y mitigar el riesgo de doble conteo de emisiones, validando la hipótesis principal planteada en la sección 2.4.

A lo largo de este trabajo se diseñó y evaluó un prototipo de plataforma *blockchain* basada en *smart contracts* con el propósito de mejorar los MRV de las reducciones de emisiones de la generación eléctrica en Colombia, facilitar la emisión y garantizar la trazabilidad de los bonos de carbono, y validar su adecuación mediante la evaluación de expertos. La evaluación experta confirmó que se ha alcanzado este objetivo general, obteniendo medianas de 4 o superiores en todas las dimensiones y un alto nivel de consenso entre los especialistas.

En relación con la pregunta de investigación el prototipo demostró mejoras concretas, entre las que destacan la automatización de la verificación de cada evento en el ciclo de vida de un bono, la garantía de inmutabilidad mediante registros criptográficamente seguros y la reducción de los tiempos de confirmación a menos de cuatro segundos, superando así la dependencia de procesos manuales tradicionales.

De igual manera, la hipótesis inicial —que la adopción de tecnologías *blockchain* en las transacciones del Mercado de Bonos de Carbono de Colombia potenciaría el monitoreo, reporte y verificación de las reducciones de

emisiones y fortalecería la confiabilidad del mercado— fue validada. Las evaluaciones de expertos alcanzaron medianas iguales o superiores a cuatro en todas las dimensiones evaluadas, con desviaciones estándar inferiores a uno, lo que respalda la aceptación de la hipótesis.

El modelo arquitectónico propuesto resultó técnica y regulatoriamente viable. Cubrió los requisitos funcionales de registro, validación y auditoría, así como los no funcionales de seguridad, escalabilidad y eficiencia energética. Además, su diseño es plenamente compatible con la Ley 1819/2016, la Ley 1931/2018 y el Decreto 446/2020, lo que respalda su adecuación al marco normativo nacional (Gobierno de Colombia, 2016, 2020).

La investigación corroboró la pertinencia del enfoque de *Design Science Research* (DSR) para abordar problemas sociotécnicos complejos. Las iteraciones entre diseño y evaluación con usuarios permitieron refinar los requisitos y demostrar la utilidad práctica de la solución, reforzando la idoneidad del DSR en estudios aplicados de ingeniería de software y mercados ambientales (Hevner, March, Park, y Ram, 2004).

La plataforma desarrollada crea un puente entre la transición energética y los instrumentos de carbono: al vincular la generación renovable (medida en MW h) con la emisión de bonos tokenizados, habilita un flujo financiero transparente que puede acelerar proyectos solares y eólicos, especialmente en Zonas No Interconectadas.

No obstante, la implementación y el despliegue de redes *Hyperledger Besu* plantean retos significativos. Configurar nodos IBFT2, gestionar permisos y orquestar contenedores exige conocimientos avanzados en redes P2P, criptografía aplicada y administración de infraestructura en la nube. La escasez de documentación y de casos industriales publicados incrementa la curva de aprendizaje y puede desincentivar la adopción en organizaciones con capacidades técnicas limitadas.

Aun con estos resultados promisorios, el estudio presenta limitaciones que acotan su alcance y perfilan la agenda de trabajo futuro. En primer lugar, el prototipo elaborado corresponde a una prueba de concepto académica: demuestra la viabilidad técnica del modelo *blockchain*, pero no incorpora todas las funcionalidades previstas ni ha sido sometido a casos reales de operación. Será indispensable ejecutar pilotos en entornos productivos para contrastar su desempeño, interoperabilidad y aceptación entre los actores del mercado.

Adicionalmente, los nodos se desplegaron de forma co-localizada dentro de un único dominio administrativo. Si bien esta configuración simplifica la experimentación y reduce costos, no reproduce la complejidad de una red federada donde cada entidad gestiona su propia infraestructura. Escalar hacia

múltiples nodos independientes implicará retos de coordinación, gobernanza y ciberseguridad, así como mayores exigencias de ancho de banda y latencia inter-organizacional.

El crecimiento histórico del *ledger* representa otra restricción. El volumen de datos aumenta linealmente con los bloques registrados; sin mecanismos de *pruning*, archivado o externalización de historial, los requisitos de almacenamiento pueden tornarse prohibitivos. El diseño futuro deberá contemplar soluciones de almacenamiento elástico y políticas de consolidación de datos fríos.

La sostenibilidad operativa también merece atención. Incrementar el número de nodos conlleva costos adicionales de hardware, licenciamiento, monitoreo y soporte; dichas partidas no se incluyeron en la estimación económica inicial y deberán cuantificarse para un presupuesto completo. Finalmente, aunque la cadena garantiza inmutabilidad una vez que los datos ingresan, la calidad y veracidad de la información dependen de auditorías externas y verificadores independientes; sin estos controles, errores o fraudes podrían perpetuarse en el registro distribuido.

Desde la perspectiva económica, la **Fase 5** demostró que el modelo de comisiones sobre un token ERC-20 es potencialmente rentable: incluso tras triplicar los costos de infraestructura, el escenario de adopción plena arroja un ROI mensual del 195 %. Aunque esta proyección no contempla aún gastos de personal —equipo de desarrollo, soporte y operaciones— ni contingencias regulatorias, sí muestra que la estructura de incentivos basada en tokens puede financiar el funcionamiento de la red y, al mismo tiempo, motivar a generadores, comercializadores y verificadores MRV a participar activamente. De confirmarse estos supuestos en una prueba piloto, el sistema de tokens se perfila como un catalizador para acelerar la adopción de soluciones *blockchain* en el sector eléctrico colombiano.

Los resultados muestran, en suma, que la adopción nacional e internacional depende de una arquitectura flexible, escalable y persistentemente segura. La flexibilidad permite adaptarse a cambios regulatorios y a la incorporación de nuevos actores mediante contratos inteligentes modulares y APIs estables, mientras que la escalabilidad garantiza que los aumentos de transacciones y nodos no degraden la latencia ni la seguridad, requisito esencial para participar en mercados voluntarios internacionales como los del Artículo 6 del Acuerdo de París.

Asimismo, la persistencia —resultado de replicar el estado completo en cada nodo— proporciona resiliencia frente a fallos y ataques, lo que genera confianza entre inversores, verificadores y organismos multilaterales. Estos atributos, en conjunto, reducen los costos de integración, minimizan el riesgo

de obsolescencia y favorecen la interoperabilidad con otras plataformas.

La validación por expertos también evidenció que el prototipo puede trascender el mercado eléctrico nacional y operar como un *web-service* interoperable con otros esquemas de certificados de carbono. Dado que Colombia es exportadora neta de bonos, contar con una plataforma confiable —capaz de exponer servicios API estandarizados y trazables hacia registros internacionales— refuerza la credibilidad frente a compradores extranjeros y simplifica la integración con organismos certificadores como Verra o Gold Standard. Para afianzar ese posicionamiento será necesario suscribir convenios de cooperación con dichas entidades, de modo que los bonos tokenizados hereden el respaldo metodológico y la aceptación del mercado voluntario global.

Los evaluadores subrayaron, además, la oportunidad de habilitar la participación de pequeños generadores mediante un esquema de *agregadores* de bonos. Tal modelo exige procesos de afiliación y verificación extremadamente simples —*on-boarding* digital, tarifas transparentes y liquidación automática— para que proyectos de baja potencia (kW–MW) resulten económicamente viables.

Finalmente, este trabajo ofrece una base sólida para investigaciones futuras. La arquitectura, los contratos inteligentes y la metodología de validación constituyen un marco replicable que otros investigadores pueden ampliar para explorar consensos alternativos, incorporar técnicas de *machine learning* en la detección de anomalías o analizar el impacto socioeconómico de la tokenización en distintos sectores, impulsando así la evolución del conocimiento sobre mercados ambientales soportados por *blockchain*.

6.2 Recomendaciones

Para consolidar la viabilidad técnica y socio-económica del sistema, se proponen las siguientes líneas de acción:

En primer lugar, resulta prioritario adoptar **dispositivos IoT calibrados y certificados** que automaticen la recolección de datos y minimicen la intervención humana. De este modo se refuerza la confiabilidad de los registros MRV y se reduce el sesgo operativo durante la captura de información en campo.

En segundo término, se recomienda implementar **contratos inteligentes modulares**. Una arquitectura basada en módulos y bibliotecas compartidas permite ajustar políticas de negocio—por ejemplo, nuevos incentivos o reglas de verificación—sin necesidad de migrar ni reinicializar todo el despliegue on-chain, lo que reduce tiempos de inactividad y costos de mantenimiento.

Con la misma importancia, es fundamental **capacitar al personal** en ciberseguridad y gobernanza de claves. Talleres prácticos sobre gestión de identidades, uso seguro de hardware wallets y procedimientos de recuperación disminuirán el riesgo de pérdida o manipulación de credenciales, uno de los vectores de ataque más comunes en sistemas distribuidos.

Asimismo, conviene profundizar en **métricas de sostenibilidad de redes blockchain**; en particular, medir la huella de carbono y el consumo energético real del consenso frente a dos mecanismos de referencia: *Proof of Stake* (PoS)¹ y *Practical Byzantine Fault Tolerance* (pBFT)². Dichas métricas facilitarán la comparación objetiva entre alternativas de despliegue y respaldarán decisiones regulatorias.

En paralelo, deben impulsarse **estudios de caso longitudinales** que evalúen el impacto socio-económico de la tokenización de bonos en territorios específicos. Estos estudios permitirán contrastar beneficios proyectados—reducción de costos de transacción, acceso a nuevos mercados—con resultados empíricos a mediano plazo.

Desde el ángulo normativo, se sugiere **crear incentivos tributarios**, tales como deducciones adicionales por inversiones en infraestructura MRV digital, que aceleren la migración desde sistemas tradicionales hacia registros distribuidos, especialmente entre pequeños generadores y comercializadores.

En cuanto a la escalabilidad, es clave planificar un **escalado a redes públicas híbridas**. Probar la interoperabilidad con cadenas públicas—por ejemplo, Ethereum—mediante puentes seguros facilitará la participación en mercados voluntarios internacionales y la liquidez de los tokens de carbono.

Complementariamente, se recomienda la **integración de herramientas de inteligencia artificial** orientadas a la detección temprana de anomalías en los reportes de emisiones. Modelos de aprendizaje automático sobre flujos de datos en tiempo real pueden identificar comportamientos atípicos y emitir alertas proactivas.

Por último, la **implementación de esquemas de identidad autosoberana (SSI)** reforzará el control de los participantes sobre sus credenciales, garantizará el cumplimiento de estándares de privacidad y simplificará la interoperabilidad con plataformas de verificación externa.

¹Esquema en el que la probabilidad de proponer y validar bloques se asigna según la cantidad de tokens que cada nodo “apuesta” o inmoviliza, eliminando la minería competitiva y reduciendo drásticamente el consumo energético.

²Algoritmo de consenso basado en votaciones entre un conjunto limitado de nodos; tolera hasta f nodos maliciosos de $3f + 1$ y ofrece finalidad casi instantánea con un gasto energético comparable al de unos pocos servidores.

6.3 Trabajo futuro

Partiendo de la base establecida por esta investigación, se abren varias líneas que profundizarán su aporte técnico, regulatorio y socioeconómico sin fijar plazos estrictos.

El primer paso consistirá en un piloto industrial con generadores y comercializadoras representativos del Sistema Interconectado Nacional. Además de medir latencia y costos en condiciones reales, dicho piloto incorporará **dispositivos IoT certificados** para automatizar la captura MRV y contrastar su desempeño frente a los registros manuales empleados en el prototipo.

Una vez evaluada la operación a gran escala, el sistema debería enlazarse con el Registro Nacional de Bonos de Carbono mediante un *oráculo regulatorio* que publique certificados oficiales y reporte los retiros, evitando así el doble conteo. En paralelo se revisará el esquema de comisiones, explorando tarifas variables indexadas a indicadores de mercado o sostenibilidad que equilibren mejor los incentivos.

En el ámbito analítico se propone entrenar modelos de aprendizaje automático capaces de inspeccionar, en tiempo real, los flujos IoT y generar alertas *on-chain* ante anomalías de consumo o posibles fraudes. A la par, se profundizará en la cuantificación de la huella de carbono de los algoritmos de consenso evaluados, para fundamentar futuras decisiones de eficiencia energética.

Por último, se impulsarán estudios socioeconómicos longitudinales que midan el impacto de la tokenización sobre empleo local, inversión en energías limpias y percepción de transparencia. Estos análisis completarán la valoración integral de la plataforma y ofrecerán evidencia para orientar su evolución.

Como proyección avanzada, se plantea incorporar **agentes de inteligencia artificial autónomos** que participen activamente en la validación, verificación y liquidación de transacciones de bonos, aprendiendo de patrones históricos y adaptándose a las condiciones del mercado. Estos agentes podrán operar sobre arquitecturas orientadas a eventos, evaluando datos en tiempo real y colaborando entre sí bajo principios de coordinación multiagente.

Finalmente, se propone explorar el uso de **gemelos digitales** del ecosistema energético y de los proyectos registrados en el mercado de carbono. Estos modelos virtuales permitirán simular escenarios de comportamiento, evaluar impactos regulatorios antes de su implementación y optimizar decisiones de despacho, inversión y sostenibilidad. Su integración con la blockchain proporcionará trazabilidad y verificabilidad adicionales, fortaleciendo la gobernanza algorítmica del sistema.

Epílogo: una reflexión personal sobre el camino recorrido

Este trabajo representó un gran desafío para mí, pues era la primera vez que me enfrentaba al rigor de la investigación académica. Más allá del componente técnico, la motivación fue profundamente personal: el deseo de aportar, desde el desarrollo de software, a uno de los retos más urgentes de nuestro tiempo—la crisis climática.

La chispa surgió a finales de 2022, cuando la conciencia colectiva sobre la necesidad de conservar el planeta crecía día a día. También respondía a una inquietud íntima: ¿qué mundo dejaremos a las futuras generaciones? Recuerdo un documental de *DW* titulado *¿Qué significa climáticamente neutral?*, donde se exponían los retos de la trazabilidad de los bonos de carbono. Aquella idea resonó con mi trabajo en plataformas *blockchain* para el mercado eléctrico colombiano: ¿y si una red permissionada pudiera certificar reducciones de emisiones con transparencia y confianza?

Me embarqué en el proyecto con cierta inocencia, sin anticipar por completo el esfuerzo que implicaba generarlo mientras equilibraba responsabilidades laborales, familiares y emocionales. Hubo altibajos, pero el respaldo de mis tutores y la convicción de que el trabajo tenía un propósito mayor mantuvieron el rumbo.

Hoy, al cerrar esta etapa, me invade una mezcla de gratitud y orgullo. La investigación no solo fortaleció mis habilidades técnicas; también me hizo más resiliente y consciente de mi capacidad para contribuir, aunque sea modestamente, a la lucha contra el cambio climático. Este epílogo es un recordatorio de que, desde nuestras disciplinas, podemos sumar impacto y transformación. Ojalá inspire a otros—como a mí me inspiraron— a creer que la tecnología, guiada por un propósito ético, puede servir al bienestar de todos los seres que comparten este planeta.

Referencias

- The american carbon registry standard (v7.0) [Manual de software informático]. (2020, diciembre). Descargado de <https://acrcarbon.org/wp-content/uploads/2023/07/ACR-Standard-v7.0-Dec-2020.pdf> (Accessed 2025-05-05)
- Androulaki, E., Barger, A., Bortnikov, V., Cachin, C., Christidis, K., De Caro, A., ... Yellick, J. (2018). Hyperledger Fabric: A distributed operating system for permissioned blockchains. *arXiv preprint arXiv:1801.10228*.
- Avgerinopoulou, D.-T., Hadjichristofi, G., y cols. (2021). Blockchain applications in the energy sector. *EUR 30895 EN, Publications Office of the European Union*. Descargado de <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/78894b08-bc4d-11eb-a925-01aa75ed71a1/language-en> doi: 10.2760/02589
- Awesso, D. E. T., Marke, A., Mehling, M., y Correa, F. d. A. (2022). The carbon offsetting and reduction scheme for international aviation (corsia). En A. Marke, M. Mehling, y F. d. A. Correa (Eds.), *Governing carbon markets with distributed ledger technology* (pp. 137–157). Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781108919166.010
- Banga, J. (2018). The green bond market: a potential source of climate finance for developing countries. *Journal of Sustainable Finance & Investment*, 9, 17 - 32. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:169134085>
- Bass, L., Clements, P., y Kazman, R. (2022). *Software architecture in practice* (4th ed.). Addison-Wesley Professional.
- Basu, P., Deb, P., y Singh, A. (2023). Blockchain and the carbon credit ecosystem: sustainable management of the supply chain. *Journal of Business Strategy, ahead-of-print*. doi: 10.1108/JBS-09-2022-0157/FULL/XML
- Betz, R., Michaelowa, A., Castro, P., Kotsch, R., Mehling, M. A., Michaelowa, K., y Baranzini, A. (2022). The carbon market challenge.. Descar-

- gado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:252240292>
- BloombergNEF. (2025, 25 de febrero). *Issuance of voluntary carbon offsets fell 4% in 2024 on weaker demand*. Descargado 2025-05-04, de <https://www.bloomberg.com/news/articles/2025-02-25/carbon-credits-needed-for-hard-to-curb-emissions-woodside-says> (Accessed 4 May 2025)
- Braun, A., y Kousky, C. (2021, July). *Catastrophe bonds*. Wharton Risk Center Primer, University of Pennsylvania. Descargado de <https://riskcenter.wharton.upenn.edu/wp-content/uploads/2021/07/Cat-Bond-Primer-July-2021.pdf> (Accessed May 4 2025)
- Cadman, T., y Hales, R. (2022, 6). Cop26 and a framework for future global agreements on carbon market integrity. *International Journal of Social Quality(United States)*, 12, 76-99. doi: 10.3167/IJSQ.2022.120105
- Camilleri, M. A., Cricelli, L., Mauriello, R., y Strazzullo, S. (2023). Consumer perceptions of sustainable products: A systematic literature review. *Sustainability*, 15(11). Descargado de <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/11/8923> doi: 10.3390/su15118923
- Chen, C., Loft, L., Sattler, C., y Matzdorf, B. (2023). Developing regional voluntary carbon markets for peatlands: innovation processes and influencing factors. *Climate Policy*, 23. Descargado de <https://www.scopus-com.dbcientificas.udemedellin.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85144732416&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Developing+regional+voluntary+carbon+markets+for+peatlands%3a+innovation+processes+and+influencing+factors&sid=69372ab29fd2b95f2509c6d248f16a97&sot=b&sdt=b&sl=111&s=TITLE%28Developing+regional+voluntary+carbon+markets+for+peatlands%3a+innovation+processes+and+influencing+factors%29&relpos=0&citeCnt=0&searchTerm=>
- Chen, J., Cui, H., Xu, Y., y Ge, Q. (2021). Long-term temperature and sea-level rise stabilization before and beyond 2100: estimating the additional climate mitigation contribution from china's recent 2060 carbon neutrality pledge. *Environmental Research Letters*, 16, 074032. doi: 10.1088/1748-9326/ac0cac
- Chen, X., y Lloyd, A. D. (2021, 1). Understanding the challenges of blockchain technology adoption: Evidence from china's developing carbon markets. *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2020-January*, 5646-5655. Descargado de <http://hdl.handle.net/10125/71305> doi: 10.24251/HICSS.2021.685
- Chuenjitwongsa, S. (2017). How to conduct a delphi study [Manual de software informático]. Cardiff, United Kingdom. Descargado de <https://meded.walesdeanery.org/how-to-guides> (Categoría: Educational

- Research)
- Chung, A. W. L., y To, W. M. (2023). A bibliometric study of carbon neutrality: 2001-2022. *HKIE Transactions*. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:259012319>
- Colombia, E. (2024). *Mercado no regulado, ¿qué es y cómo funciona?* Descargado 2025-05-10, de <https://www.enel.com.co/es/historias/a202408-que-es-el-mercado-no-regulado-de-energia.html>
- Consensus. (2019, 18 de febrero). *Another day, another consensus algorithm. why ibft 2.0?* Descargado de <https://consensus.io/blog/another-day-another-consensus-algorithm-why-ibft-2-0> (Consultado el 25 de abril de 2025)
- Consensus. (2019). *quorum-kubernetes: Helm charts for hyperledger besu and goquorum*. GitHub repository. Descargado de <https://github.com/Consensus/quorum-kubernetes> (Consultado el 25 de abril de 2025)
- Dai, H., Xie, Y., Liu, J.-Y., y Masui, T. (2018). Aligning renewable energy targets with carbon emissions trading to achieve china's indcs: A general equilibrium assessment. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 82, 4121-4131. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:158597724>
- David, A. (2022). Carbon emission trading as a climate change mitigation tool. *Cognitive Sustainability*. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:252823248>
- de Boer, Z., van Tilburg, D. D., Kamburg, J., Kronenberg, K., Kuppens, M., Takács, E., y Abcouwer, A. (2022, 8). Reconsidering higher education organizations via ecosystem thinking: Some initial thoughts. *European Conference on Knowledge Management*, 23, 297-306. Descargado de <https://papers.academic-conferences.org/index.php/eckm/article/view/752> doi:10.34190/ECKM.23.1.752
- del SIN, X. O. (2024, 3 de julio). *En el primer semestre de 2024 ingresaron 40 proyectos nuevos que fortalecen la capacidad del sistema*. Descargado 2025-05-04, de <https://www.xm.com.co/noticias/7028-en-el-primer-semestre-del-2024-con-el-ingreso-de-40-proyectos-nuevos-se-fortalece-la> (514MW solares y 32MW eólicos en pruebas)
- de Servicios Públicos Domiciliarios, S. (2023a). *Boletín de seguimiento al mercado mayorista de energía eléctrica - sep-nov 2023*. Descargado 2025-05-10, de <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/documentos/2023-12/Boletin-Mercado-Mayorista-Q4-2023.pdf>
- de Servicios Públicos Domiciliarios, S. (2023b). *Boletín tarifario q4 2023 - segmentación y clasificación de usuarios no regulados*. Descargado

- 2025-05-10, de <https://www.superservicios.gov.co>
- Dietzenbacher, E., Cazcarro, I., y Arto, I. (2020, 12). Towards a more effective climate policy on international trade. *Nature Communications*, 11. doi: 10.1038/s41467-020-14837-5
- Doumenis, Y., Izadi, J., Dhamdhere, P., Katsikas, E., y Koufopoulos, D. (2021, 11). A critical analysis of volatility surprise in bitcoin cryptocurrency and other financial assets. *Risks* 2021, Vol. 9, Page 207, 9, 207. Descargado de <https://www.mdpi.com/2227-9091/9/11/207/html><https://www.mdpi.com/2227-9091/9/11/207> doi: 10.3390/RISKS9110207
- Enejison, M., Ejide, O., y Nemanic, C. (2022). Blocks and credits: A sustainability lens on blockchain technology in voluntary carbon markets. Descargado de <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:bth-23431>
- Enriken, W., Shirley, D., Evans, J., y Sachs, N. (2018). *EIP-721: ERC-721 non-fungible token standard*. <https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-721>. (Ethereum Improvement Proposals)
- E.S.P., X. S. (2023). *Usuarios no regulados del sistema interconectado nacional por nivel de tensión*. Descargado 2025-05-10, de <https://www.xm.com.co/Paginas/Estadisticas/Usuarios-no-regulados.aspx>
- E.S.P., X. S. (2024a). *Boletín del mercado de energía mayorista – julio 2024*. Descargado 2025-05-10, de <https://www.xm.com.co/mercado/boletines/boletin-julio-2024.pdf>
- E.S.P., X. S. (2024b). *En el primer semestre del 2024, con el ingreso de 40 proyectos nuevos, se fortalece la capacidad de generación del sin*. Descargado 2025-05-10, de <https://www.xm.com.co/noticias/7028-en-el-primer-semester-del-2024-con-el-ingreso-de-40-proyectos-nuevos-se-fortalece-la>
- E.S.P., X. S. (2024c). *Estructura del mercado eléctrico colombiano*. Descargado 2025-05-10, de <https://www.xm.com.co/transacciones/registros/registro-agentes-y-contactos/estructura-del-mercado>
- E.S.P., X. S. (2024d). *Informe de generación por fuente – julio 2024*. Descargado 2025-05-10, de <https://www.xm.com.co/Paginas/Estadisticas/Generacion-Julio-2024.pdf>
- for Technical Standards, C. I., y Certification-ICONTEC. (2017). *Redd projectresguardo indigena unificado –selva de matavin* (Inf. Téc.). Autor. Descargado de www.icontec.org
- Foundation, E. W. (2019). *Energy web chain: Overview and technical whitepaper*. Descargado de <https://www.energyweb.org/technology/energy-web-chain/>

- Foundation, P. V. (2024, November). *Developing voluntary carbon market projects in yucatán: Best practices guide* (Inf. Téc.). Descargado 2025-05-04, de <https://vcmintegrity.org/wp-content/uploads/2024/11/20241113-Best-Practices-Guide-VCM-Yucatan-FV.pdf> (Highlights SanCrisanto mangrove restoration: 13,400 credits issued and four new projects in validation)
- Freeburn, L., y Ramsay, I. (2020). Green bonds: Legal and policy issues. *Capital Markets Law Journal*, 15(4), 418–441. Descargado de <https://academic.oup.com/cmlj/article/15/4/418/5917371> (Accessed May 4 2025) doi: 10.1093/cmlj/kmab015
- García-Vera, Y. E., Dufo-López, R., y Bernal-Agustín, J. L. (2020, 1). Optimization of isolated hybrid microgrids with renewable energy based on different battery models and technologies. *Energies 2020, Vol. 13, Page 581, 13*, 581. Descargado de <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/3/581/html><https://www.mdpi.com/1996-1073/13/3/581> doi: 10.3390/EN13030581
- Gattuso, J. P., Hoegh-Guldberg, O., y Pörtner, H. O. (2015, 1). Coral reefs. *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects*, 97-166. doi: 10.1017/CBO9781107415379.005
- Gerbeti, A. (2021, 12). Market mechanisms for reducing emissions and the introduction of a flexible consumption tax. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 22, 161-178. doi: 10.1007/s40171-021-00283-9
- Gitman, L. J. (1982). *Principles of managerial finance*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Glims database advances glacier monitoring from space*. (2025, abril). Descargado 2025-05-04, de <https://www.earthdata.nasa.gov/news/feature-articles/glims-database-advances-glacier-monitoring-from-space>
- Global carbon council program manual (v4.0) [Manual de software informático]. (2024, enero). Descargado de <https://www.globalcarboncouncil.com/wp-content/uploads/2024/01/GCC-program-manual-v4.pdf> (Accessed 2025-05-05)
- Global carbon exchange — market data 2024*. (2024). Descargado 2025-05-04, de <https://www.xpansiv.com>
- Gobierno de Colombia. (2016, diciembre). *Ley 1819 de 2016*. Gestor Normativo – Función Pública, <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=79140>.
- Gobierno de Colombia. (2018, julio). *Ley 1931 de 2018*. Gestor Normativo – Función Pública, <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=87765>.

- Gobierno de Colombia. (2020). *Decreto 446 de 2020*. Gestor Normativo – Función Pública, <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=110798>.
- Gold standard impact registry*. (2025). Descargado 2025-05-04, de <https://registry.goldstandard.org>
- Gorain, S., Malakar, A., y Chanda, S. (2021). An analysis of carbon market and carbon credits in india. *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics Amp; Sociology*, 40-49. doi: 10.9734/ajaees/2021/v39i230528
- Group, W. B. (2022). *Climate action data trust*. <https://www.theclimatewarehouse.org/work/climate-action-data-trust>. (Accessed: 2025-05-04)
- Harris, B. (2024, agosto). *Brazil warns of fraud risks as carbon credit boom faces scrutiny*. Descargado 2025-05-04, de <https://www.ft.com/content/brazil-carbon-credit-fraud-warning> (Accessed 4 May 2025)
- Hassan, A., Ali, M. I., Ahammed, R., Khan, M. M., Alsufyani, N., y Alsufyani, A. (2021). Secured insurance framework using blockchain and smart contract. *Scientific Programming, 2021*. doi: 10.1155/2021/6787406
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., y Ram, S. (2004). Design science in information systems research. *MIS Quarterly: Management Information Systems*, 28, 75-105. doi: 10.2307/25148625
- Horngrén, C. T., Foster, G., y Datar, S. M. (2000). *Cost accounting: A managerial emphasis* (11th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Hu, K., y Chen, Y. (2019, 2). Equilibrium fuel supply and carbon credit pricing under market competition and environmental regulations: A california case study. *Applied Energy*, 236, 815-824. doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.12.041
- Hu, Y., Ren, S., Wang, Y., y Chen, X. (2020). Can carbon emission trading scheme achieve energy conservation and emission reduction? evidence from the industrial sector in china. *Energy Economics*, 85, 104590. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:214429135>
- Hunt, J. P. (2024). Green bond reporting. *Columbia Business Law Review*(1), 202–309. Descargado de <https://journals.library.columbia.edu/index.php/CBLR/article/view/13004> (Accessed May 4 2025) doi: 10.52214/cblr.v2024i1.13004
- Hyperledger Besu. (2024). *Hyperledger besu documentation*. Descargado de <https://besu.hyperledger.org/> (Consultado el 14 de octubre de 2024)

- Hyperledger Besu Community. (2023). *Create a private network using ibft 2.0 – hyperledger besu*. Descargado de <https://besu.hyperledger.org/stable/private-networks/tutorials/ibft> (Consultado el 25 de abril de 2025)
- Hyperledger Besu Community. (2025). *Configure ibft 2.0 consensus – hyperledger besu documentation*. Descargado de <https://besu.hyperledger.org/private-networks/how-to/configure/consensus/ibft> (Consultado el 25 de abril de 2025)
- Hyperledger Fabric Documentation. (2024). *What is hyperledger fabric?* Descargado de <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release-2.5/whatis.html> (Consultado el 14 de octubre de 2024)
- Idrees, R., y Maiti, A. (2024). A blockchain-driven smart broker for data quality assurance in iot systems. *Applied Sciences*, 14(13), 5907. doi: 10.3390/app14135907
- Ini, L. (2019, 1 de marzo). *Colombia asigna 1.39 gw de solar y eólica en la subasta de cargo por confiabilidad*. Descargado 2025-05-04, de <https://www.pv-magazine-latam.com/2019/03/01/colombia-asigna-139-gw-de-solar-y-eolica-en-la-subasta-de-cargo-por-confiabilidad/> (Acceso 4 may 2025)
- Ini, L. (2025, 30 de abril). *Colombia approaches 2 gw solar capacity milestone*. Descargado 2025-05-04, de <https://www.pv-magazine.com/2025/04/30/colombia-approaches-2-gw-solar-capacity-milestone/> (1.34GW operativos y 700MW en pruebas)
- Inouye, D. W. (2022). Climate change and phenology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 13. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:246597357>
- International, S. (2020). *How can blockchain support the energy transition?* <https://www.shell.com/what-we-do/digitalisation/blockchain/blockchain-building-trust-to-enable-the-energy-transition.html>. (Accessed: 2025-05-04)
- International Organization of Securities Commissions. (2022, November). *Voluntary carbon markets: Discussion paper* (Consultation Report n.º CR/06/22). IOSCO. Descargado de <https://www.iosco.org/library/pubdocs/pdf/IOSCO718.pdf> (Accessed May 4 2025)
- Jia, H., Fan, S., y Xia, M. (2023). The impact of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from countries along the belt and road. *Sustainability*, 15(11). Descargado de <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/11/8644> doi: 10.3390/su15118644
- Jones Day. (2024, 4 de junio). *Uk net-zero rollback: Legal implications for green finance and carbon markets*. Descargado 2025-05-04, de <https://www.jonesday.com/en/insights/2024/06/uk-net-zero>

- rollback-implications (Accessed 4 May 2025)
- Joseph, S., Herold, M., Sunderlin, W. D., y Verchot, L. V. (2013, 9). Redd+ readiness: early insights on monitoring, reporting and verification systems of project developers. *Environmental Research Letters*, 8, 034038. Descargado de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/3/034038><https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/3/034038/meta> doi: 10.1088/1748-9326/8/3/034038
- Kalesná, K. (2023). Relevant market - digital challenges. *Bratislava Law Review*, 7, 77-88. doi: 10.46282/blr.2023.7.1.371
- Kila, K. O. (2018). Green bonds and the role of the financial sector in tackling global climate change. *Environmental Justice & Sustainability eJournal*. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:159172107>
- Kim, S. K., y Huh, J. H. (2020, 5). Blockchain of carbon trading for un sustainable development goals. *Sustainability 2020, Vol. 12, Page 4021, 12*, 4021. Descargado de <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/10/4021/htm><https://www.mdpi.com/2071-1050/12/10/4021> doi: 10.3390/SU12104021
- Kiradoo, M. R. (2009). Cost-volume-profit analysis: Managerial applications. *International Journal of Management and Decision Making*, 10(2), 120-135. doi: 10.1504/IJMDM.2009.027826
- Kitchenham, B., y Charters, S. M. (2007). *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering*. Descargado de <https://www.researchgate.net/publication/302924724>
- KlimaDAO. (2024). *Klimadao documentation*. <https://docs.klimadao.finance/>. (Accessed: 2025-05-04)
- Kotha, S., y Patel, P. (2020, 5). Blockchain in depth. *International Journal of Engineering and Computer Science*, 9, 25029-25038. Descargado de <http://ijecs.in/index.php/ijecs/article/view/4482> doi: 10.18535/IJECS/V9I05.4482
- Kotsialou, G., Kuralbayeva, K., y Laing, T. (2022, 9). Blockchain's potential in forest offsets, the voluntary carbon markets and redd+. *Environmental Conservation*, 49, 137-145. Descargado de <https://www.cambridge.org/core/journals/environmental-conservation/article/blockchains-potential-in-forest-offsets-the-voluntary-carbon-markets-and-redd/017A8D2DD8B13CDB3A59EAEC2AC114E9> doi: 10.1017/S0376892922000157
- kyu Kim, S., y Huh, J.-H. (2020). Blockchain of carbon trading for un sustainable development goals. *Sustainability*. Descargado de <https://>

- api.semanticscholar.org/CorpusID:219424190
- Leal, F., Chis, A. E., y González-Vélez, H. (2020, 9). Performance evaluation of private ethereum networks. *SN Computer Science*, 1, 1-17. Descargado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s42979-020-00289-7> doi: 10.1007/S42979-020-00289-7/TABLES/9
- Lee, D., hwan Kim, D., y il Kim, S. (2018). Characteristics of forest carbon credit transactions in the voluntary carbon market. *Climate Policy*, 18, 235 - 245. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:157798081>
- Ley 1715 de 2014: Por medio de la cual se regula la integración de las fuentes no convencionales de energía al sistema energético nacional. (2014, mayo). Descargado 2025-05-04, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353> (Acceso 4 may 2025)
- Li, C., Yu, Y., Yao, A. C. C., Zhang, D., y Zhang, X. (2022). An authenticated and secure accounting system for international emissions trading. <https://doi.org/10.1080/14693062.2022.2107474>, 22, 1333-1342. Descargado de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14693062.2022.2107474> doi: 10.1080/14693062.2022.2107474
- Lo, A., y Cong, R. (2022). Emission reduction targets and outcomes of the clean development mechanism (2005–2020). *PLOS Climate*, 1, e0000046. doi: 10.1371/journal.pclm.0000046
- Ltd, P. L. P. (2019). *Power ledger whitepaper v10*. Descargado de <https://www.powerledger.io/whitepaper>
- Luo, Y., Shen, J., Liang, H., Sun, L., y Dong, L. (2024). Supporting building life cycle carbon monitoring, reporting and verification: A traceable and immutable blockchain-empowered information management system and application in hong kong. *Resources, Conservation and Recycling*, 208, 107736. doi: 10.1016/j.resconrec.2024.107736
- Mandaroux, R., Dong, C., y Li, G. (2021, 2). A european emissions trading system powered by distributed ledger technology: An evaluation framework. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 2106, 13*, 2106. Descargado de <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2106/html><https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2106> doi: 10.3390/SU13042106
- Marchant, G. E., Cooper, Z., y Gough-Stone, P. J. (2022). Bringing technological transparency to tenebrous markets: The case for using blockchain to validate carbon credit trading markets. *NATURAL RESOURCES JOURNAL*, 62. Descargado de <https://medium.com/nori-carbon-removal/why-a-carbon-removal-market-belongs-on-the->
- Markard, J. (2018, 5). The next phase of the energy transition and its

- implications for research and policy. *Nature Energy* 2018 3:8, 3, 628-633. Descargado de <https://www.nature.com/articles/s41560-018-0171-7> doi: 10.1038/s41560-018-0171-7
- Marketplace, F. T. E. (2024). *State of the voluntary carbon market 2024 — on the path to maturity* (Inf. Téc.). Descargado 2025-05-04, de <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/2024-state-of-the-voluntary-carbon-markets-sovcm/>
- Mheiri, W. A., y Nobanee, H. (2020). Green bonds: A mini-review. *SRPN: Green Investment (Topic)*. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:219133259>
- Milman, O. (2025, 1 de mayo). *Us climate policy reversal sparks global concern over carbon markets*. Descargado 2025-05-04, de <https://www.theguardian.com/environment/2025/may/01/us-climate-policy-reversal-carbon-markets> (Accessed 4 May 2025)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024). *Abierta convocatoria para el programa nacional de carbono neutralidad*. Descargado de <https://www.minambiente.gov.co/abierta-convocatoria-para-el-programa-nacional-de-carbono-neutralidad/#:~:text=Abierta%20convocatoria%20para%20el%20Programa%20Nacional%20de,de%20GEI%20para%20alcanzar%20la%20carbono%20neutralidad.> (Consultado el 14 de octubre de 2024)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2017, julio). *Ley 1844 de 2017*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/12.-Ley-1844-de-2017.pdf>.
- Ministerio de Minas y Energía. (2018). *Transición energética: Avances 2018*. Descargado 2025-05-04, de https://www.minenergia.gov.co/documents/7235/Informe_GRI_2021_VF.pdf (Sección “Balance 2018”, p. 4: 30MW FNCER operativos)
- Mukundan, D., Alekhya, B., Professor, A., Scholar, R., Engineer, I., College, R. E., ... Nadu, T. (2020). A survey on consensus algorithms used in blockchain platforms. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 9, 9155-9162. Descargado de <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/323952020> doi: 10.30534/ijatcse/2020/323952020
- Mungroo, Z. B. A., Tupsee, R. S., y Pierre, J. D. (2024). *Case study of technology adoption in carbon market mrv systems* (Technical Report). Bonn, Germany: United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Descargado de https://unfccc.int/sites/default/files/resource/MEP004_CfI_Addressing_Leakage_Mungroo.pdf
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. Des-

- cargado de www.bitcoin.org
- Oliveira, T. D., Gurgel, A. C., y Tonry, S. (2020). The effects of a linked carbon emissions trading scheme for latin america. *Climate Policy*, 20, 1 - 17. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:204422000>
- Organization, I. C. A. (2023). *Icao blockchain sandbox*. <https://www.icao.int/about-icao/partnerships/Pages/Blockchain-Sandbox.aspx>. (Accessed: 2025-05-04)
- Osborne, T., y Shapiro-Garza, E. (2017, 1). Embedding carbon markets: Complicating commodification of ecosystem services in mexico's forests. <https://doi.org/10.1080/24694452.2017.1343657>, 108, 88-105. Descargado de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/24694452.2017.1343657> doi: 10.1080/24694452.2017.1343657
- Park, J., Jeong, S., y Yeom, K. (2023). Smart contract broker: Improving smart contract reusability in a blockchain environment. *Sensors*, 23(13), 6149. doi: 10.3390/s23136149
- Pateria, A., y Anyanwu, K. (2021, jun). Towards event-driven decentralized marketplaces on the blockchain. En *Proceedings of the 15th acm international conference on distributed and event-based systems (debs '21)*. ACM. doi: 10.1145/3465480.3466921
- Patro, P. K., Jayaraman, R., Acquaye, A., y Salah, K. (2024). Blockchain-based solution to enhance carbon footprint traceability, accounting, and offsetting in the passenger aviation industry. *International Journal of Production Research*, 1-34. (Advance online publication) doi: 10.1080/00207543.2024.2441450
- Perez, A., Carabali, J., y Benavides-Franco, J. (2022, 1). Competition and merit order effect in the colombian electricity market. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12, 144-155. Descargado de <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/11852> doi: 10.32479/IJEEP.11852
- Planvivo climate methodologies*. (2022). Descargado de <https://www.planvivo.org/pv-climate-methodologies> (Accessed 2025-05-05)
- Poon, J. (2018, 9 de febrero). *Using helm to deploy blockchain to kubernetes*. DevBlogs Microsoft ISE Developer Blog. Descargado de <https://devblogs.microsoft.com/ise/using-helm-deploy-blockchain-kubernetes/> (Consultado el 25 de abril de 2025)
- Pradhan, B. B., Shrestha, R. M., Pandey, A., y Limmeechokchai, B. (2018). Strategies to achieve net zero emissions in nepal. *Carbon Management*, 9, 533 - 548. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:159333175>
- Project, H. F. (2023). Writing your first chaincode – hyperledger fa-

- bric documentation [Manual de software informático]. Descargado de <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release-2.5/chaincode4ade.html> (Accessed: 2025-05-17)
- Protocol, T. (2024). *Toucan protocol documentation*. <https://docs.toucan-earth/>. (Accessed: 2025-05-04)
- Pukite, P., Coyne, D., y Challou, D. (2018). Energy transition. *Geophysical Monograph Series*, 241, 157-166. Descargado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/9781119434351.ch10><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119434351.ch10><https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119434351.ch10> doi: 10.1002/9781119434351.CH10
- Quadriz. (2023, March). *Flagship redd+ project 'corazón verde del chaco' completes first vcs + ccb verification*. Descargado 2025-05-04, de <https://quadriz.com/flagship-redd-carbon-project-in-paraguay-corazon-verde-del-chaco-project-completes-first-vcs-ccb-verification/> (Details validation at Verra Registry and estimated 5.6MtCO₂e over 10 years)
- Ramirez Villegas, G. M., Collazos Ordóñez, C. A., Moreira, F., y Fardoun, H. (2018). Relación entre el u-learning, aprendizaje conectivo y el estándar xapi: Revisión sistemática. *Campus Virtuales*, 7(1), 51–62. Descargado de <http://hdl.handle.net/11328/2685>
- República, L. (2023). *Más de 36 comercializadoras eléctricas están en riesgo, según xm*. Descargado 2025-05-10, de <https://www.larepublica.co/empresas/mas-de-36-comercializadoras-electricas-estan-en-riesgo-segun-xm-3739021>
- Reserve offset program manual, version 9.1 [Manual de software informático]. (2024, marzo). Descargado de <https://climateactionreserve.org/wp-content/uploads/2024/03/ROPM-November-2023-revised-9.1-3.1.24-FINAL.pdf> (Accessed 2025-05-05)
- Reuters. (2025, 29 de April). *Brazil reforestation startup mombak raises \$30 million in usv-led round*. Descargado 2025-05-04, de <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/brazil-reforestation-startup-mombak-raises-30-million-usv-led-round-2025-04-29/> (Reports 45,000acres restored, 5million trees planted and \$150million in offtake contracts (Google, Microsoft, Meta))
- Rodríguez, A., y Gouritin, A. (2020). Carbon-offset networks in mexico: the heterogeneity of regulation and its effects on the national carbon market. *Sociedad Y Ambiente*, 1-30. doi: 10.31840/sya.vi23.2198

- S., S. (2024, 22 de September). *Google to buy 50,000 mts of nature-based carbon credits from brazil startup mombak*. Descargado 2025-05-04, de <https://carboncredits.com/google-to-buy-50000-mts-of-nature-based-carbon-credits-from-brazil-startup-mombak/>
- Sadai, S., Spector, R. A., DeConto, R., y Gomez, N. (2022, 12). The paris agreement and climate justice: Inequitable impacts of sea level rise associated with temperature targets. *Earth's Future*, 10. doi: 10.1029/2022EF002940
- Sadawi, A. A., Madani, B., Saboor, S., Ndiaye, M., y Abu-Lebdeh, G. (2020, 11). A hierarchical blockchain of things network for unified carbon emission trading (hbuets):a conceptual framework. *2020 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions, ICTMOD 2020*. doi: 10.1109/ICTMOD49425.2020.9380610
- Saltini, R., y Hyland-Wood, D. (2019). Ibft 2.0: A safe and live variation of the ibft blockchain consensus protocol for eventually synchronous networks. *arXiv preprint arXiv:1909.10194*. Descargado de <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.10194> (Consultado el 25 de abril de 2025) doi: 10.48550/arXiv.1909.10194
- Salvatore, D. (1982). *Managerial economics: Principles and worldwide applications*. New York: Macmillan.
- Salzman, J., y Weisbach, D. (2024). The additionality double standard. *Harvard Environmental Law Review*, 48(1), 117–147. Descargado de https://journals.law.harvard.edu/elr/wp-content/uploads/sites/79/2024/04/03_HLE_48_1_Salzman-Weisbach.pdf (Accesed 4 May 2025)
- Sanclemente Fernández Abogados S.A. (2024). *Renewable energy 2024 – colombia: Trends and developments*. Descargado 2025-05-04, de <https://practiceguides.chambers.com/practice-guides/renewable-energy-2024/colombia/trends-and-developments> (Capacidad operativa FNCER 1.3GW en 2024)
- Sanderson, O. (2018, 6). How to trust green bonds: Blockchain, climate, and the institutional bond markets. blockchain, climate, and the institutional bond markets. *Transforming Climate Finance and Green Investment with Blockchains*, 273-288. doi: 10.1016/B978-0-12-814447-3.00020-3
- Saraji, S., y Borowczak, M. (2021). A blockchain-based carbon credit ecosystem. *ArXiv*, abs/2107.00185. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:235694581>
- Sax, S. (2024, junio). *Verra suspends suspected redd+ projects in brazil amid fraud probe*. Descargado 2025-05-04, de <https://news.mongabay.com/2024/06/verra-suspends-redd-projects-brazil> (Accessed

4 May 2025)

- Schletz, M., Franke, L. A., y Salomo, S. (2020, 6). Blockchain application for the paris agreement carbon market mechanism-a decision framework and architecture. *Sustainability (Switzerland)*, 12. doi: 10.3390/su12125069
- Schneider, H. (2019). Blockchain, double counting, and the paris agreement. *FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON CARBON PRICING*, 64-78.
- Schneider, L., Duan, M., Stavins, R., Kizzier, K., Broekhoff, D., Jotzo, F., ... Hood, C. (2019). Double counting and the paris agreement rulebook. *Science*, 366, 180 - 183. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:220329266>
- Science Based Targets initiative. (2023). *Evidence synthesis report part 1: Carbon credits*. <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/Evidence-Synthesis-Report-Part-1-Carbon-Credits.pdf>. (Version 1, accessed May 4 2025)
- Shaydurova, A., Panova, S. V., Fedosova, R., y Zlotnikova, G. (2018). Investment attractiveness of “green” financial instruments. *Journal of Reviews on Global Economics*. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:170016671>
- Singh, N. (2022). India’s strategy for achieving net zero. *SSRN Electronic Journal*. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:250122562>
- Sipthorpe, A., Brink, S., Leeuwen, T. V., y Staffell, I. (2022, 7). Blockchain solutions for carbon markets are nearing maturity. *One Earth*, 5, 779-791. doi: 10.1016/J.ONEEAR.2022.06.004
- Soto, J., Zhang, Y., y Morales, J. M. (2020). Platform business models in the energy sector. *Energy Policy*, 142, 111520. doi: 10.1016/j.enpol.2020.111520
- Spalek, A. (2022). Voluntary carbon market. *BWK ENERGIE*. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:249299046>
- Stanciu, A. (2017, 7). Blockchain based distributed control system for edge computing. *Proceedings - 2017 21st International Conference on Control Systems and Computer, CSCS 2017*, 667-671. doi: 10.1109/CSCS.2017.102
- State and trends of carbon pricing 2023. (2023, 5). *State and Trends of Carbon Pricing 2023*. Descargado de <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/39796> doi: 10.1596/39796
- Tan, X., Sirichand, K., Vivian, A., y Wang, X. (2020). How connected is the carbon market to energy and financial markets? a systematic analysis of spillovers and dynamics. *Energy Economics*, 90. Descargado

- de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:225356940> doi:
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104870>
- Tang, D. Y., y Zhang, Y. (2018). Do shareholders benefit from green bonds? *Energy Finance*. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:216274186>
- Team, S. D. (2023). Solidity documentation (v0.8.30) [Manual de software informático]. Descargado de <https://docs.soliditylang.org/> (Accesado: 2025-05-17)
- The Helm Authors. (2024). *Helm documentation*. Descargado de <https://helm.sh/docs/> (Consultado el 25 de abril de 2025)
- The Kubernetes Authors. (2024). *Statefulsets – kubernetes documentation*. Descargado de <https://kubernetes.io/docs/concepts/workloads/controllers/statefulset/> (Consultado el 25 de abril de 2025)
- Thew, H., Martin, L. S., Ford, R., Hale, T. N., y Omukuti, J. (2021). Strategies for net zero.. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:237849187>
- Thompson, R. (2015, 12). Climate sensitivity. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 106, 1-10. Descargado de <https://www.cambridge.org/core/journals/earth-and-environmental-science-transactions-of-royal-society-of-edinburgh/article/abs/climate-sensitivity/5FFF37C02923D92C3054B87448FB512A> doi: 10.1017/S1755691015000213
- Trenberth, K. E., y Hurrell, J. W. (2019). Climate change. *Effects of Climate Change on Birds*. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:241968860>
- Trencher, G., Nick, S., Carlson, J., y Johnson, M. (2024). Demand for low-quality offsets by major companies undermines climate integrity of the voluntary carbon market. *Nature Communications*, 15, 6863. Descargado de <https://www.nature.com/articles/s41467-024-51151-w> (Published 10 Aug 2024; highlights additionality risks) doi: 10.1038/s41467-024-51151-w
- UNFCCC. (1998). *Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change*. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>. (Accedido: 21 may 2025)
- UNFCCC. (2015). *Paris agreement*. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf. (Accedido: 21 may 2025)
- Verified carbon standard (vcs) registry*. (2025). Descargado 2025-05-04, de <https://verra.org/programs/verified-carbon-standard>
- Vogelsteller, F., y Buterin, V. (2015). *EIP-20: ERC-20 token standard*. <https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-20>. (Ethereum Improvement

Proposals)

- Wang, S., Wang, X., y Chen, S. (2022, 11). Global value chains and carbon emission reduction in developing countries: Does industrial upgrading matter? *Environmental Impact Assessment Review*, 97, 106895. doi: 10.1016/J.EIAR.2022.106895
- Wittman, H., Powell, L. J., y Corbera, E. (2015). Financing the agrarian transition? the clean development mechanism and agricultural change in latin america. *Environment and Planning A*, 47, 2031 - 2046. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:155375875>
- Woo, J., Fatima, R., Kibert, C. J., Newman, R. E., Tian, Y., y Srinivasan, R. S. (2021, 11). Applying blockchain technology for building energy performance measurement, reporting, and verification (mrv) and the carbon credit market: A review of the literature. *Building and Environment*, 205, 108199. Descargado de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132321006004> doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108199
- World Bank. (2024). *State and trends of carbon pricing 2024* (Inf. Téc.). World Bank. Descargado 2025-05-04, de <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/41814>
- World Meteorological Organization. (2025, marzo). *State of the global climate 2024* (Inf. Téc. n.ºs WMO No.1368). WMO. Descargado 2025-05-04, de <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024>
- Zappa, W., Junginger, M., y van den Broek, M. (2021, 2). Can liberalised electricity markets support decarbonised portfolios in line with the paris agreement? a case study of central western europe. *Energy Policy*, 149. doi: 10.1016/J.ENPOL.2020.111987
- Zhang, D., Mohsin, M., y Taghizadeh-Hesary, F. (2022, 9). Does green finance counteract the climate change mitigation: Asymmetric effect of renewable energy investment and r+d. *Energy Economics*, 113. doi: 10.1016/j.eneco.2022.106183
- Zhang, D., Zhang, Q., Qi, S., Huang, J.-L., Karplus, V. J., y Zhang, X. (2019). Integrity of firms' emissions reporting in china's early carbon markets. *Nature Climate Change*, 9, 164-169. Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:91316849>
- Zhang, Z., Yang, M., Su, R., y Wen, J. (2022, 12). Blockchain-based data sharing scheme for internet of vehicles. <https://doi.org/10.1117/12.2662710>, 12500, 1161-1166. Descargado de <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12500/125004S/Blockchain-based-data-sharing-scheme-for-Internet-of-Vehicles/10.1117/>

12.2662710.full[https://www.spiedigitallibrary.org/
conference-proceedings-of-spie/12500/125004S/Blockchain
-based-data-sharing-scheme-for-Internet-of-Vehicles/
10.1117/12.2662710.short](https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12500/125004S/Blockchain-based-data-sharing-scheme-for-Internet-of-Vehicles/10.1117/12.2662710.short) doi: 10.1117/12.2662710

Zhao, F., y Chan, W. K. (2020, 4). When is blockchain worth it? a case study of carbon trading. *Energies*, 13. doi: 10.3390/en13081980

Zhou, Q., y Zhang, Q. (2022, 1). Predictions of carbon emission intensity based on factor analysis and an improved extreme learning machine from the perspective of carbon emission efficiency. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 30, 1-12. doi: 10.3846/jeelm.2022.15107

Anexos

.1 Declaración de Propiedad Intelectual del Prototipo

En el marco del desarrollo del presente trabajo de grado, titulado *Prototipo de Plataforma Blockchain para la Gestión de Transacciones de Bonos de Carbono: Mercado Eléctrico*, se validó e implementó un prototipo tecnológico con base en una línea tecnológica preexistente, propiedad de la empresa **Global MVM S.A.S.**, identificada con NIT 811.003.890-4, titular de los derechos patrimoniales correspondientes.

Dado mi vínculo laboral con dicha compañía, certifico que el prototipo desarrollado en el presente proyecto de investigación es propiedad de **Global MVM S.A.S.** en lo que respecta a los derechos patrimoniales, conforme a lo estipulado en mi contrato de trabajo, el cual establece la cesión de estos derechos a favor de la empresa.

Sin embargo, en mi calidad de autor, conservo los derechos morales sobre el prototipo, conforme a lo establecido por la legislación vigente en materia de propiedad intelectual. Estos derechos incluyen, entre otros, el reconocimiento de mi autoría, el respeto por la integridad de la obra, y el derecho a decidir sobre su divulgación.

Cabe señalar que los derechos morales son inalienables, irrenunciables e imprescriptibles, lo cual significa que no pueden ser transferidos ni cedidos, y se mantienen vigentes independientemente de la titularidad de los derechos patrimoniales. No obstante, el ejercicio de estos derechos no podrá interferir con la explotación legítima del prototipo por parte de **Global MVM S.A.S.**, conforme a lo pactado contractualmente.

.2 Código fuente de los contratos inteligentes

Nota general de similitud. Turnitin marca coincidencias en fragmentos que forman parte de la estructura obligatoria de los contratos Solidity y en las `import` de la librería OpenZeppelin. Estos bloques —licencia SPDX, directiva `pragma`, activación de `ABIEncoderV2` y las interfaces de OpenZeppelin— son estándares públicos necesarios para compilar y asegurar los contratos, por lo que no constituyen plagio.

Nota aclaratoria – BonoCarbono

El contrato `BonoCarbono.sol` implementa la interfaz definida por el estándar ERC-721 para tokens no fungibles (Entriiken, Shirley, Evans, y Sachs, 2018). Las funciones y eventos reproducen la especificación oficial y, por tanto, pueden coincidir con otras implementaciones públicas.

Listing 1: Contrato `BonoCarbono.sol`

```
1 // SPDX-License-Identifier: MIT
2 pragma solidity >=0.4.22 <0.9.0;
3
4 import "@openzeppelin/contracts/token/ERC721/ERC721.sol";
5 import "../TokenErc20/ERC20.sol";
6 import "../models/BonoStruct.sol";
7
8 contract BonoCarbono is ERC721 {
9     uint256 public nextId;
10    ERC20Basic public token;
11
12    mapping(uint256 => Bono) public bonos;
13    mapping(address => uint256[]) private bonosPorOwner;
14
15    event BonoGenerado(
16        uint256 indexed id,
17        address indexed generador,
18        uint256 timestamp,
19        uint256 toneladasCO2,
20        string fuenteEnergia
21    );
22    event BonoVendido(
23        uint256 indexed id,
24        address indexed vendedor,
25        address indexed comprador,
26        uint256 timestamp,
27        uint256 precio
28    );
29
```

```

30     constructor(address _token) ERC721("BonoCarbono", "
        CO2B") {
31         token = ERC20Basic(_token);
32     }
33
34     function generarBono(
35         address to,
36         string memory nombreGenerador,
37         uint256 toneladasCO2,
38         string memory fuenteEnergia
39     ) external returns (uint256) {
40         // require(msg.sender == admin, "Solo admin");
41
42         uint256 bonoId = nextId++;
43         bonos[bonoId] = Bono(
44             bonoId,
45             to,
46             to,
47             nombreGenerador,
48             block.timestamp,
49             toneladasCO2,
50             fuenteEnergia,
51             false,
52             address(0),
53             "",
54             0
55         );
56         _mint(to, bonoId);
57         emit BonoGenerado(
58             bonoId,
59             to,
60             block.timestamp,
61             toneladasCO2,
62             fuenteEnergia
63         );
64         return bonoId;
65     }
66
67     function comprarBono(
68         uint256 bonoId,
69         string memory nombreComprador
70     ) external {
71         Bono storage b = bonos[bonoId];
72         require(!b.vendido, "Bono ya vendido");
73
74         address vendedor = ownerOf(bonoId);
75         require(msg.sender != vendedor, "No puedes
            comprarte tu propio bono");
76

```

```

77         uint256 precio = b.toneladasCO2;
78
79         require(
80             token.transferFrom(msg.sender, vendedor,
81                 precio),
82             "Pago fallido"
83         );
84
85         b.vendido = true;
86         b.owner = msg.sender;
87         b.comprador = msg.sender;
88         b.nombreComprador = nombreComprador;
89         b.timestampVenta = block.timestamp;
90         _transfer(vendedor, msg.sender, bonoId);
91
92         emit BonoVendido(bonoId, vendedor, msg.sender,
93             block.timestamp, precio);
94     }
95
96     function _update(
97         address to,
98         uint256 tokenId,
99         address auth
100     ) internal virtual override returns (address) {
101         // Llama al comportamiento base (balance, owner,
102         // Transfer event)
103         address from = super._update(to, tokenId, auth);
104
105         // Si no es mint, quita de la lista del antiguo
106         // due o
107         if (from != address(0)) {
108             uint256[] storage fromList = bonosPorOwner[
109                 from];
110             for (uint256 i = 0; i < fromList.length; i++)
111             {
112                 if (fromList[i] == tokenId) {
113                     fromList[i] = fromList[fromList.
114                         length - 1];
115                     fromList.pop();
116                     break;
117                 }
118             }
119         }
120
121         // Si no es burn, aade al nuevo due o
122         if (to != address(0)) {
123             bonosPorOwner[to].push(tokenId);
124         }
125         return from;
126     }
127 }

```

```

119
120     function getOtherBonos() external view returns (Bono
121         [] memory) {
122         uint256 count = 0;
123         // Contamos cu ntos bonos NO pertenecen a msg.
124         sender
125         for (uint256 i = 0; i < nextId; i++) {
126             if (bonos[i].owner != msg.sender) {
127                 count++;
128             }
129         }
130         // Creamos el array con el tama o exacto
131         Bono[] memory result = new Bono[](count);
132         uint256 idx = 0;
133         for (uint256 i = 0; i < nextId; i++) {
134             if (bonos[i].owner != msg.sender) {
135                 result[idx] = bonos[i];
136                 idx++;
137             }
138         }
139         return result;
140     }
141
142     function getBono(uint256 bonoId) external view
143     returns (Bono memory) {
144         return bonos[bonoId];
145     }
146
147     function getBonosByOwner(
148         address owner_
149     ) external view returns (Bono[] memory) {
150         uint256[] storage ids = bonosPorOwner[owner_];
151         Bono[] memory result = new Bono[](ids.length);
152         for (uint256 i = 0; i < ids.length; i++) {
153             result[i] = bonos[ids[i]];
154         }
155     }
156 }

```

Nota aclaratoria – ERC20Basic

ERC20Basic.sol replica la interfaz mínima exigida por el estándar ERC-20 (Vogelsteller y Buterin, 2015); las coincidencias detectadas corresponden al cumplimiento de sus seis funciones obligatorias y eventos **Transfer** y **Approval**.

Listing 2: Contrato ERC20Basic.sol

```
1 // SPDX-License-Identifier: MIT
2 pragma solidity >=0.4.22 <0.9.0;
3
4 import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/IERC20.sol";
5 import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/extensions/
  IERC20Metadata.sol";
6
7 contract ERC20Basic is IERC20, IERC20Metadata {
8     // E R C 20 metadata
9     string private _name = "ERC20_MVM";
10    string private _symbol = "MVM";
11    uint8 private _decimals = 2;
12
13    // E R C 20 state
14    uint256 private _totalSupply;
15    mapping(address => uint256) private _balances;
16    mapping(address => mapping(address => uint256))
17        private _allowances;
18
19    constructor(uint256 initialSupply) {
20        _totalSupply = initialSupply;
21        _balances[msg.sender] = initialSupply;
22        emit Transfer(address(0), msg.sender,
23            initialSupply);
24    }
25
26    // === IERC20Metadata ===
27    function name() public view override returns (string
28        memory) {
29        return _name;
30    }
31
32    function symbol() public view override returns (
33        string memory) {
34        return _symbol;
35    }
36
37    function decimals() public view override returns (
38        uint8) {
39        return _decimals;
40    }
41
42    // === IERC20 ===
43    function totalSupply() public view override returns (
44        uint256) {
45        return _totalSupply;
46    }
47
48 }
```

```

42     function balanceOf(address account) public view
43         override returns (uint256) {
44         return _balances[account];
45     }
46
47     function allowance(
48         address owner,
49         address spender
50     ) public view override returns (uint256) {
51         return _allowances[owner][spender];
52     }
53
54     function transfer(
55         address to,
56         uint256 amount
57     ) public override returns (bool) {
58         require(
59             _balances[msg.sender] >= amount,
60             "ERC20: transfer amount exceeds balance"
61         );
62         _balances[msg.sender] -= amount;
63         _balances[to] += amount;
64         emit Transfer(msg.sender, to, amount);
65         return true;
66     }
67
68     function approve(
69         address spender,
70         uint256 amount
71     ) public override returns (bool) {
72         require(
73             _balances[msg.sender] >= amount,
74             "ERC20: approve amount exceeds balance"
75         );
76         _allowances[msg.sender][spender] = amount;
77         emit Approval(msg.sender, spender, amount);
78         return true;
79     }
80
81     // 1) La versión estándar ERC 20 (3 argumentos),
82     // necesaria para cumplir IERC20:
83     function transferFrom(
84         address from,
85         address to,
86         uint256 amount
87     ) public override returns (bool) {
88         require(_balances[from] >= amount, "ERC20:
89             balance insuficiente");
90         require(

```

```

88         _allowances[from][msg.sender] >= amount,
89         "ERC20: allowance insuficiente"
90     );
91
92     _balances[from] -= amount;
93     _allowances[from][msg.sender] -= amount;
94     _balances[to] += amount;
95
96     emit Transfer(from, to, amount);
97     return true;
98 }
99
100 // 2) Tu versi n      4args      para aplicar reglas
      de negocio con intermediario:
101 function transferFrom(
102     address owner,
103     address intermediary,
104     address buyer,
105     uint256 numTokens
106 ) public returns (bool) {
107     require(_balances[owner] >= numTokens, "ERC20:
      balance insuficiente");
108     require(
109         _allowances[owner][intermediary] >= numTokens
110         ,
111         "ERC20: allowance insuficiente para
      intermediary"
112     );
113
114     // consumes the allowance otorgada a '
      intermediary '
115     _allowances[owner][intermediary] -= numTokens;
116     _balances[owner] -= numTokens;
117     _balances[buyer] += numTokens;
118
119     emit Transfer(owner, buyer, numTokens);
120     return true;
121 }
122
123 function mint(address to, uint256 amount) public {
124     _totalSupply += amount;
125     _balances[to] += amount;
126     emit Transfer(address(0), to, amount);
127 }
128
129 function disapprove(
130     address spender,
131     uint256 subtractedValue
132 ) public returns (bool) {

```

```

132         uint256 current = _allowances[msg.sender][spender
133             ];
134         require(
135             current >= subtractedValue,
136             "ERC20: decreased allowance below zero"
137         );
138         _allowances[msg.sender][spender] = current -
139             subtractedValue;
140         emit Approval(msg.sender, spender, _allowances[
141             msg.sender][spender]);
142         return true;
143     }
144 }

```

Listing 3: Contrato RegulatorMercadoService.sol

```

1 // SPDX-License-Identifier: MIT
2 pragma solidity >=0.4.22 <0.9.0;
3 pragma experimental ABIEncoderV2;
4
5 import "../TokenErc20/ERC20.sol";
6 import "../models/InfoContrato.sol";
7 import "../BonoCarbono.sol";
8 import "../libraries/Validations.sol";
9
10 contract RegulatorMercadoService {
11     ERC20Basic private token;
12
13     // Propiedades que pediste conservar
14     string public name;
15     address public owner;
16     address public dirContrato;
17
18     uint256 public cantidadTokens = 1_000_000;
19
20     // Solicitudes de registro
21     bytes32[] private solicitudIds;
22     mapping(bytes32 => SolicitudContrato) private
23         solicitudes;
24     mapping(address => bytes32) private
25         solicitudesPorDireccion;
26
27     // Token NFT de bonificaci n
28     BonoCarbono public bonoCarbono;
29
30     // Eventos
31     event ComprandoTokens(uint256 indexed numTokens,
32         address indexed comprador);
33     event tokensDevueltos(uint256 indexed numTokens,

```

```

        address indexed cliente);
31 event EnviarTokensEvent(
32     uint256 indexed numTokens,
33     address indexed from,
34     address indexed to
35 );
36 event SolicitudDeRegistro(SolicitudContrato sol);
37 event ContratoDiligenciado(address dirContract);
38
39 constructor(string memory _name) {
40     name = _name;
41     owner = msg.sender;
42     dirContrato = address(this);
43
44     token = new ERC20Basic(cantidadTokens);
45     bonoCarbono = new BonoCarbono(address(token));
46 }
47
48 // -----
49 // Modificador de acceso nico
50 // -----
51 modifier onlyOwner() {
52     require(msg.sender == owner, "No tienes permisos
53         ");
54 }
55
56 // -----
57 // Helpers internos para DRY
58 // -----
59
60 /// @dev Calcula el coste en wei
61 function PrecioTokens(uint256 numTokens) private pure
62     returns (uint256) {
63     return numTokens * 1e15;
64 }
65
66 /// @dev Hash nico a partir del NIT
67 function _getSolicitudId(
68     string memory nit
69 ) internal pure returns (bytes32) {
70     return keccak256(abi.encodePacked(nit));
71 }
72
73 /// @dev Requiere que 'from' tenga al menos '
74     numTokens '
75 function _requireSufficient(uint256 numTokens,
76     address from) internal view {
77     require(numTokens <= token.balanceOf(from), "

```

```

75         Tokens insuficientes");
76     }
77     /// @dev Transfiere del contrato al destino, tras
78     validar saldo
79     function _transferFromContract(uint256 numTokens,
80     address to) internal {
81         _requireSufficient(numTokens, dirContrato);
82         token.transfer(to, numTokens);
83     }
84     // -----
85     // M todos de tokens
86     // -----
87     function getBonoCarbonoAddress() public view returns
88     (address) {
89         return address(bonoCarbono);
90     }
91     function getTokenAddress() public view returns (
92     address) {
93         return address(token);
94     }
95     function GenerarTokens(uint256 numTokens) external
96     onlyOwner {
97         token.mint(dirContrato, numTokens);
98     }
99     function TokensDisponibles() public view returns (
100    uint256) {
101         return token.balanceOf(dirContrato);
102     }
103     function ComprarTokens(uint256 numTokens) external {
104         _transferFromContract(numTokens, msg.sender);
105         emit ComprandoTokens(numTokens, msg.sender);
106     }
107
108     function transferirTokensInyeccion(
109     uint256 numTokens,
110     address _ownerGenerador
111     ) external onlyOwner {
112         _transferFromContract(numTokens, _ownerGenerador)
113         ;
114     }
115     function intercambioDirectoTokens(

```

```

116         uint256 numTokens,
117         address address1,
118         address address2
119     ) external {
120         require(numTokens > 0, "Numero invalido");
121         _requireSufficient(numTokens, address1);
122         token.transferFrom(address1, address2, numTokens)
123         ;
124     }
125
126     function IntercambiarTokens(
127         address _dir1,
128         address _dir2,
129         address _dir3,
130         uint256 numTokens
131     ) external {
132         token.transferFrom(_dir1, _dir2, _dir3, numTokens
133         );
134         emit EnviarTokensEvent(numTokens, _dir1, _dir2);
135     }
136
137     function MisTokens(address _direction) public view
138     returns (uint256) {
139         return token.balanceOf(_direction);
140     }
141
142     function DevolverTokens(uint256 numTokens) external {
143         require(numTokens > 0, "Numero invalido");
144         _requireSufficient(numTokens, msg.sender);
145         token.transferFrom(msg.sender, dirContrato,
146         numTokens);
147         emit tokensDevueltos(numTokens, msg.sender);
148     }
149
150     function delegarTokens(address delegate, uint256
151     numTokens) external {
152         token.approve(delegate, numTokens);
153     }
154
155     function retornarDelegacion(address delegate, uint256
156     numTokens) external {
157         uint256 allowed = token.allowance(msg.sender,
158         delegate);
159         require(numTokens <= allowed, "Excede delegacion
160         ");
161         token.approve(delegate, allowed - numTokens);
162     }
163
164     function getTokensDelegados(

```

```

157     address delegate
158 ) external view returns (uint256) {
159     return token.allowance(msg.sender, delegate);
160 }
161
162 function getTokensDelegadosByAddress(
163     address _ownerAddr,
164     address delegate
165 ) external view returns (uint256) {
166     return token.allowance(_ownerAddr, delegate);
167 }
168
169 // -----
170 // Gestio n de solicitudes
171 // -----
172
173 function getSolicitudes()
174     external
175     view
176     returns (SolicitudContrato[] memory)
177 {
178     uint256 count = solicitudIds.length;
179     SolicitudContrato[] memory list = new
180         SolicitudContrato[](count);
181     for (uint256 i = 0; i < count; i++) {
182         list[i] = solicitudes[solicitudIds[i]];
183     }
184     return list;
185 }
186
187 function getRegistros() external view returns (
188     SolicitudContrato[] memory) {
189     uint256 total = solicitudIds.length;
190     uint256 aprobadosCount;
191
192     // Cuenta aprobadas
193     for (uint256 i = 0; i < total; i++) {
194         if (
195             solicitudes[solicitudIds[i]].
196             estadoSolicitud ==
197             EstadoSolicitud.aprobada
198         ) {
199             aprobadosCount++;
200         }
201     }
202
203     // Recoge solo aprobadas
204     SolicitudContrato[] memory resultados = new
205         SolicitudContrato[](

```

```

202         aprobadosCount
203     );
204     uint256 idx;
205     for (uint256 i = 0; i < total; i++) {
206         SolicitudContrato storage sol = solicitudes[
                solicitudIds[i]];
207         if (sol.estadoSolicitud == EstadoSolicitud.
                aprobada) {
208             resultados[idx++] = sol;
209         }
210     }
211     return resultados;
212 }
213
214 function registrarSolicitud(
215     InfoContrato memory _infoContrato,
216     uint256 _tipoContrato
217 ) external returns (bytes32) {
218     bytes32 id = _getSolicitudId(_infoContrato.nit);
219     require(solicitudes[id].fechaSolicitud == 0, "Ya
        existe");
220
221     SolicitudContrato memory sol = SolicitudContrato
        ({
222         idSolicitud: id,
223         infoContrato: _infoContrato,
224         tipoContrato: TiposContratos(_tipoContrato),
225         estadoSolicitud: EstadoSolicitud.pendiente,
226         fechaSolicitud: block.timestamp,
227         fechaAprobacion: 0
228     });
229
230     solicitudes[id] = sol;
231     solicitudesPorDireccion[msg.sender] = id;
232
233     solicitudIds.push(id);
234     emit SolicitudDeRegistro(sol);
235     return id;
236 }
237
238 function diligenciarSolicitud(
239     bytes32 idSolicitud,
240     InfoContrato calldata infoContrato,
241     EstadoSolicitud _estado
242 ) external {
243     SolicitudContrato storage sol = solicitudes[
        idSolicitud];
244     require(sol.fechaSolicitud != 0, "No existe");
245     require(

```

```

246         sol.estadoSolicitud == EstadoSolicitud.
           pendiente,
247         "No pendiente"
248     );
249     sol.infoContrato = infoContrato;
250     sol.estadoSolicitud = _estado;
251     sol.fechaAprobacion = block.timestamp;
252     emit ContratoDiligenciado(sol.infoContrato.
           dirContrato);
253 }
254
255 function existeSolicitud(string calldata nit)
           external view returns (bool) {
256     return solicitudes[_getSolicitudId(nit)].
           fechaSolicitud != 0;
257 }
258
259 function getSolicitudIdByNit(
           string calldata nit
260 ) external view returns (bytes32) {
261     bytes32 id = _getSolicitudId(nit);
262     require(solicitudes[id].fechaSolicitud != 0, "No
           encontrada");
263     return id;
264 }
265
266
267 function getInfoRegulador() external view returns (
           InfoRegulador memory) {
268     return
269         InfoRegulador(
270             owner,
271             dirContrato,
272             TokensDisponibles(),
273             token.name(),
274             token.symbol(),
275             PrecioTokens(1)
276         );
277 }
278
279 function registrarInyeccionEnergia(
           address generador,
280     string memory nombreGenerador,
281     uint256 cantidad,
282     string memory tipoEnergia,
283     string memory metadata
284 ) external {
285     bonoCarbono.generarBono(
286         generador,
287         nombreGenerador,
288

```

```

289         cantidad,
290         tipoEnergia
291     );
292 }
293
294 function getOwner() public view returns (address) {
295     return owner;
296 }
297
298 function validarUsuario()
299     public
300     view
301     returns (bool, address, string memory,
302             TiposContratos)
303     {
304         if (msg.sender == owner) {
305             return (true, dirContrato, "", TiposContratos
306                 .ReguladorMercadoService);
307         }
308
309         bytes32 idSolicitud = solicitudesPorDireccion[msg
310             .sender];
311         if (idSolicitud == bytes32(0)) {
312             return (false, address(0), "", TiposContratos
313                 .NullContract);
314         }
315
316         SolicitudContrato memory sol = solicitudes[
317             idSolicitud];
318
319         return Validations.validarUsuario(sol);
320     }
321 }

```

Listing 4: Contrato Generador.sol

```

1 // SPDX-License-Identifier: MIT
2 pragma solidity >=0.4.22 <0.9.0;
3 pragma experimental ABIEncoderV2;
4
5 import "./libraries/StringLibrary.sol";
6 import "./models/TipoEnergia.sol";
7 import "./models/InfoContrato.sol";
8 import "./models/Agente.sol";
9 import "./BancoEnergia.sol";
10 import "./models/PlantaEnergia.sol";
11 import "./helpers/GeneradorTransactionsHelper.sol";
12 import "./Comercializador.sol";
13

```

```

14 contract Generador is Agente {
15     using StringLibrary for string;
16
17     address public generadorTransactionsHelper;
18     InfoPlanta[] private plantasEnergia;
19     mapping(address => bool) private existenPlantas;
20     InfoCompraEnergia[] private ComprasRealizadas;
21     TipoEnergia[] private energiaDeBolsa;
22
23     uint256 private acumuladoVenta;
24     uint256 private precioVentaEnergia;
25     uint256 private counterEnergiaDespacho;
26
27     // Eventos
28     event compraEnergia(uint256, string, address);
29     event creacionPlanta();
30     event inyeccionEnergia();
31     event inyeccionEnergiaEnBolsa();
32     event acuerdoConCliente();
33     event actualizacionContrato();
34     event liquidacionInyeccion();
35     event liquidacionContrato();
36     event DebugUint(string message, uint256 value);
37     event DebugString(string message, string value);
38
39     constructor(
40         InfoContrato memory _infoContrato,
41         address _generadorTransactionsHelper
42     ) {
43         infoContrato = InfoContrato(
44             address(this),
45             _infoContrato.owner,
46             _infoContrato.nit,
47             _infoContrato.empresa,
48             _infoContrato.contacto,
49             _infoContrato.telefono,
50             _infoContrato.correo,
51             _infoContrato.departamento,
52             _infoContrato.ciudad,
53             _infoContrato.direccion,
54             nullAddress,
55             _infoContrato.tipoContrato
56         );
57         generadorTransactionsHelper =
58             _generadorTransactionsHelper;
59     }
60
61     modifier onlyComercializador() {
62         address ownerC = Comercializador(msg.sender).

```

```

62         getInfoContrato().owner;
63     require(
64         ownerC != nullAddress,
65         "El tipo de contrato no es comercializador"
66     );
67     -;
68 }
69 // --- Helpers internos para l gica repetida ---
70
71 function _findBolsaIndex(
72     string memory tipo
73 ) internal view returns (uint256) {
74     for (uint256 i = 0; i < energiaDeBolsa.length; i
75         ++ ) {
76         if (energiaDeBolsa[i].getNombreTipoEnergia().
77             equals(tipo)) {
78             return i;
79         }
80     }
81     revert("TipoEnergia no encontrada en bolsa");
82 }
83
84 function updateAcuerdoDeCompra() public {
85     emit actualizacionContrato();
86 }
87
88 function _totalEnergiaPlantas(
89     string memory tipo
90 ) internal view returns (uint256 suma) {
91     for (uint256 i = 0; i < plantasEnergia.length; i
92         ++ ) {
93         InfoEnergia memory te = PlantaEnergia(
94             plantasEnergia[i].dirPlanta)
95             .getTipoEnergia();
96         if (te.nombre.equals(tipo)) suma += te.
97             cantidadEnergia;
98     }
99 }
100 // --- M todos p blicos (sin cambios de firma) ---
101
102 function crearPlantaEnergia(
103     InfoPlanta memory _infoPlanta
104 ) public authorize(msg.sender) {
105     GeneradorTransactionsHelper(
106         generadorTransactionsHelper)
107         .crearPlantaEnergia(_infoPlanta, infoContrato
108             .dirContrato);

```

```

103         emit creacionPlanta();
104     }
105
106     function setPrecioEnergia(
107         uint256 _precioEnergia
108     ) public authorize(msg.sender) {
109         precioVentaEnergia = _precioEnergia;
110     }
111
112     function getPrecioEnergia() public view returns (
113         uint256) {
114         return precioVentaEnergia;
115     }
116
117     function setEnergiasBolsa() public {
118         GeneradorTransactionsHelper(
119             generadorTransactionsHelper)
120             .setEnergiasBolsa(infoContrato.dirContrato);
121     }
122
123     function addEnergiaBolsa(
124         TipoEnergia _tipoEnergia
125     ) public onlyHelper(generadorTransactionsHelper) {
126         energiaDeBolsa.push(_tipoEnergia);
127     }
128
129     function getAcuerdosDeCompraGenerador()
130         public
131         view
132         returns (AcuerdoEnergia[] memory)
133     {
134         return
135             GeneradorTransactionsHelper(
136                 generadorTransactionsHelper)
137                 .getAcuerdosDeCompraGenerador();
138     }
139
140     function setPlantasEnergias(
141         InfoPlanta memory _infoPlanta,
142         address _dirPlanta
143     ) public {
144         plantasEnergia.push(_infoPlanta);
145         existenPlantas[_dirPlanta] = true;
146     }
147
148     function resetProduccionPlanta(
149         address _dirPlanta
150     ) public authorize(msg.sender) {
151         GeneradorTransactionsHelper(

```

```

149         generadorTransactionsHelper)
150         .resetProduccionPlanta(_dirPlanta);
151     }
152     function existePlanta(address _dirPlanta) public view
153     returns (bool) {
154         return existenPlantas[_dirPlanta];
155     }
156     function getPlantasEnergia() public view returns (
157     InfoPlanta[] memory) {
158         InfoPlanta[] memory temp = new InfoPlanta[](
159         plantasEnergia.length);
160         for (uint256 i = 0; i < plantasEnergia.length; i
161         ++ ) {
162             temp[i] = PlantaEnergia(plantasEnergia[i].
163             dirPlanta)
164             .getInfoPlanta();
165         }
166         return temp;
167     }
168     function inyectarEnergiaPlanta(
169     address _dirPlanta,
170     string memory _tipoEnergia,
171     uint256 _cantidadGenerador,
172     uint256 _cantidadBolsa
173     ) public {
174         emit DebugString("Entrando a
175         inyectarEnergiaPlanta", "Debug");
176         uint256 total = _cantidadGenerador +
177         _cantidadBolsa;
178         emit DebugUint("Cantidad de energia a inyectar",
179         total);
180
181         GeneradorTransactionsHelper(
182         generadorTransactionsHelper)
183         .inyectarEnergiaPlanta(
184         infoContrato.dirContrato,
185         _dirPlanta,
186         _tipoEnergia,
187         total
188         );
189
190         if (_cantidadBolsa > 0) {
191             inyectarEnergiaEnBolsa(_dirPlanta,
192             _cantidadBolsa);
193         }
194
195         if (_cantidadGenerador > 0) {

```

```

187         _addBolsa(_tipoEnergia, _cantidadGenerador);
188     }
189
190     emit inyeccionEnergia();
191 }
192
193 function inyectarEnergiaEnBolsa(
194     address _dirPlanta,
195     uint256 _cantidad
196 ) public authorize(msg.sender) {
197     GeneradorTransactionsHelper(
198         generadorTransactionsHelper)
199         .inyectarEnergiaBolsa(_dirPlanta, _cantidad);
200     emit inyeccionEnergiaEnBolsa();
201 }
202
203 function getCantidadEnergiaPlantas(
204     string memory tipo
205 ) public view returns (uint256) {
206     return _totalEnergiaPlantas(tipo);
207 }
208
209 function getCantidadEnergiaBolsaByName(
210     string memory tipo
211 ) public view returns (uint256) {
212     uint256 idx = _findBolsaIndex(tipo);
213     return energiaDeBolsa[idx].getCantidadEnergia();
214 }
215
216 function compraEnergiaBolsa(
217     uint256 _cantidad,
218     string memory tipo
219 ) public authorize(msg.sender) {
220     GeneradorTransactionsHelper(
221         generadorTransactionsHelper)
222         .compraEnergiaBolsa(infoContrato.owner,
223             _cantidad, tipo);
224     _addBolsa(tipo, _cantidad);
225     emit compraEnergia(_cantidad, tipo, msg.sender);
226 }
227
228 // Extra do de inyeccionEnergiaBolsaGenerador y
229 compraEnergiaBolsa
230 function _addBolsa(string memory tipo, uint256
231     cantidad) internal {
232     energiaDeBolsa[_findBolsaIndex(tipo)].
233         addCantidadEnergia(cantidad);
234 }

```

```

230     function inyectarEnergiaContratos(
231         address _dirCliente,
232         string memory tipo,
233         uint256 cantidad,
234         uint256 indexGlobal
235     ) public authorize(msg.sender) {
236         uint256 idx = _findBolsaIndex(tipo);
237         require(
238             energiaDeBolsa[idx].getCantidadEnergia() >=
                cantidad,
239             "No puede gastar mas energia que la
                disponible"
240         );
241
242         GeneradorTransactionsHelper(
                generadorTransactionsHelper)
243             .inyectarEnergiaContratos(_dirCliente,
                cantidad, indexGlobal);
244
245         energiaDeBolsa[idx].restarCantidadEnergia(
                cantidad);
246         emit inyeccionEnergia();
247         emit actualizacionContrato();
248     }
249
250     function setCounterDespacho(uint256 _cantidadEnergia)
        external {
251         counterEnergiaDespacho += _cantidadEnergia;
252     }
253
254     function getCounterDespacho() public view returns (
        uint256) {
255         return counterEnergiaDespacho;
256     }
257
258     function resetCounterDespacho() external {
259         counterEnergiaDespacho = 0;
260     }
261
262     function getCapacidadNominalTotal() public view
        returns (uint256) {
263         uint256 totalCap = 0;
264         for (uint256 i = 0; i < plantasEnergia.length; i
            ++ ) {
265             totalCap += plantasEnergia[i].
                capacidadNominal;
266         }
267         return totalCap;
268     }

```

```

269
270     function getInfoEnergiaPlanta(
271         address _dirPlanta
272     ) public view returns (InfoEnergia memory) {
273         return PlantaEnergia(_dirPlanta).getTipoEnergia()
274         ;
275     }
276
277     function getAcumuladoVenta() public view returns (
278         uint256) {
279         return acumuladoVenta;
280     }
281
282     function addCompraCliente(InfoCompraEnergia memory
283         info) external {
284         ComprasRealizadas.push(info);
285     }
286
287     function liquidarInyeccion() external {
288         emit liquidacionInyeccion();
289     }
290
291     function liquidarContrato() external {
292         emit liquidacionContrato();
293     }
294
295     function getComprasRealizadas()
296     public
297     view
298     returns (InfoCompraEnergia[] memory)
299     {
300         return ComprasRealizadas;
301     }

```

.3 Configuración de la red blockchain en Kubernetes

Aquí se presentan los archivos que sirvieron de configuración para la red blockchain utilizando Kubernetes en el entorno de despliegue del prototipo.

Listing 5: Archivo configmap.yaml

```

1  apiVersion: v1
2  kind: ConfigMap
3  metadata:
4    name: genesis-config-files
5    namespace: {{ .Values.namespace }}
6    annotations:

```

```

7     "helm.sh/hook": pre-install, pre-upgrade
8     "helm.sh/hook-weight": "-1"
9 data:
10    initialGenesis.json: |
11      {{ .Values.configData.initialGenesis | nindent 4 }}
12
13    config.toml: |
14      {{ .Values.configData.configToml | nindent 4 }}
15
16    permissions_config.toml: |
17      {{ .Values.configData.permissionsConfig | nindent 4
18        }}
19
20    rename_folders.py: |
21      {{ .Values.configData.renameScript | nindent 4 }}
22
23    copyFilesScript.sh: |
24      {{ .Values.configData.copyFilesScript | nindent 4 }}

```

Listing 6: Archivo ingress.yaml

```

1  {{- if .Values.ingress.enabled }}
2  apiVersion: networking.k8s.io/v1
3  kind: Ingress
4  metadata:
5    name: {{ .Release.Name }}-besu-node-ingress
6    namespace: {{ .Values.ingress.namespace }}
7    annotations:
8      kubernetes.io/ingress.class: {{ .Values.ingress.
9        className | quote }}
9  spec:
10    {{- if .Values.ingress.className }}
11    ingressClassName: {{ .Values.ingress.className | quote
12      }}
12    {{- end }}
13    rules:
14    {{- range .Values.ingress.rules }}
15    - host: {{ .host | quote }}
16      http:
17        paths:
18        {{- range .http.paths }}
19        - path: {{ .path | quote }}
20          pathType: {{ .pathType | quote }}
21          backend:
22            service:
23              name: {{ .backend.service.name }}
24              port:
25                number: {{ .backend.service.port.number }}
26    {{- end }}

```

```

27  {{- end }}
28  {{- if .Values.ingress.tls }}
29  tls:
30    {{- range .Values.ingress.tls }}
31      - hosts:
32        {{- range .hosts }}
33          - {{ . | quote }}
34        {{- end }}
35        secretName: {{ .secretName | quote }}
36      {{- end }}
37    {{- end }}
38  {{- end }}

```

Listing 7: Archivo job.yaml

```

1  apiVersion: batch/v1
2  kind: Job
3  metadata:
4    name: {{ .Release.Name }}-genesis-generator
5    namespace: {{ .Values.JobConfig.namespace }}
6    annotations:
7      "helm.sh/hook": pre-install, pre-upgrade
8      "helm.sh/hook-weight": "2"
9      "helm.sh/hook-delete-policy": "before-hook-creation,
10     hook-succeeded"
11 spec:
12   template:
13     metadata:
14       labels:
15         app: genesis-generator
16     spec:
17       restartPolicy: {{ .Values.JobConfig.restartPolicy }}
18       initContainers:
19         - name: init-copy-config
20           image: {{ .Values.JobConfig.initContainer.image }}
21           command:
22             [
23               "sh",
24               "-c",
25               "{{ .Values.JobConfig.initContainer.command }}"
26             ]
27       volumeMounts:
28         - name: config-files
29           mountPath: /config
30         - name: generate-network-files
31           mountPath: /mnt/besu-config

```

```

31
32     containers:
33         - name: genesis-generator
34           image: "{{ .Values.JobConfig.genesisContainer.
35             image }}"
36           imagePullPolicy: "{{ .Values.JobConfig.
37             genesisContainer.imagePullPolicy }}"
38           resources:
39             limits:
40               cpu: "{{ .Values.JobConfig.genesisContainer
41                 .resources.limits.cpu }}"
42               memory: "{{ .Values.JobConfig.
43                 genesisContainer.resources.limits.memory
44                 }}"
45             requests:
46               cpu: "{{ .Values.JobConfig.genesisContainer
47                 .resources.requests.cpu }}"
48               memory: "{{ .Values.JobConfig.
49                 genesisContainer.resources.requests.
50                 memory }}"
51           securityContext:
52             runAsUser: 0
53           command:
54             [
55               "/bin/bash",
56               "-c",
57               "{{ .Values.JobConfig.genesisContainer.
58                 command }}"
59             ]
60           volumeMounts:
61             - name: generate-network-files
62               mountPath: /besu-config
63
64         - name: rename-keys
65           image: "{{ .Values.JobConfig.renameContainer.
66             image }}"
67           imagePullPolicy: "{{ .Values.JobConfig.
68             renameContainer.imagePullPolicy }}"
69           resources:
70             limits:
71               cpu: "{{ .Values.JobConfig.renameContainer.
72                 resources.limits.cpu }}"
73               memory: "{{ .Values.JobConfig.
74                 renameContainer.resources.limits.memory
75                 }}"
76             requests:
77               cpu: "{{ .Values.JobConfig.renameContainer.
78                 resources.requests.cpu }}"
79               memory: "{{ .Values.JobConfig.

```

```

        renameContainer.resources.requests.
        memory }}"
65     command:
66     [
67     "/bin/bash",
68     "-c",
69     "{{ .Values.JobConfig.renameContainer.
        command }}"
70     ]
71     volumeMounts:
72     - name: generate-network-files
73       mountPath: /besu-config
74     - name: rename-script-vol
75       mountPath: /scripts
76
77     volumes:
78     - name: generate-network-files
79       persistentVolumeClaim:
80         claimName: {{ .Release.Name }}-genesis-
        network-pvc
81     - name: config-files
82       configMap:
83         name: {{ .Values.JobConfig.volumes.
        configFiles.configMap }}
84     - name: rename-script-vol
85       configMap:
86         name: {{ .Values.JobConfig.volumes.
        renameScriptVol.configMap }}

```

Listing 8: Archivo pvc.yaml

```

1  apiVersion: v1
2  kind: PersistentVolumeClaim
3  metadata:
4    name: {{ .Release.Name }}-genesis-network-pvc
5    namespace: {{ .Values.namespace }}
6    annotations:
7      "helm.sh/hook": pre-install, pre-upgrade
8      "helm.sh/hook-weight": "1"
9  spec:
10   accessModes:
11     - {{ .Values.pvc.accessMode }}
12   resources:
13     requests:
14       storage: {{ .Values.pvc.storage }}
15     storageClassName: {{ .Values.pvc.storageClassName }}

```

Listing 9: Archivo services.yaml

```

1  apiVersion: v1
2  kind: Service
3  metadata:
4    name: {{ .Release.Name }}-besu-node-svc
5    namespace: {{ .Values.ServiceConfig.namespace }}
6  spec:
7    # Headless Service
8    clusterIP: None
9    selector:
10     app: {{ .Release.Name }}-besu-node
11   ports:
12     - name: {{ (index .Values.ServiceConfig.ports 0).name
13       }}
14       port: {{ (index .Values.ServiceConfig.ports 0).port
15         }}
16       targetPort: {{ (index .Values.ServiceConfig.ports
17         0).targetPort }}
18     - name: {{ (index .Values.ServiceConfig.ports 1).name
19       }}
20       port: {{ (index .Values.ServiceConfig.ports 1).port
21         }}
22       targetPort: {{ (index .Values.ServiceConfig.ports
23         1).targetPort }}
24
25 ---
26 apiVersion: v1
27 kind: Service
28 metadata:
29   name: {{ .Release.Name }}-besu-node-lb
30   namespace: {{ .Values.ServiceConfig.namespace }}
31 spec:
32   type: LoadBalancer
33   selector:
34     app: {{ .Release.Name }}-besu-node
35   ports:
36     - name: {{ (index .Values.ServiceConfig.ports 0).name
37       }} # peer
38       port: {{ (index .Values.ServiceConfig.ports 0).port
39         }}
40       targetPort: {{ (index .Values.ServiceConfig.ports
41         0).targetPort }}
42       protocol: TCP
43     - name: {{ (index .Values.ServiceConfig.ports 1).name
44       }} # rpc
45       port: {{ (index .Values.ServiceConfig.ports 1).port
46         }}
47       targetPort: {{ (index .Values.ServiceConfig.ports
48         1).targetPort }}
49       protocol: TCP

```

Listing 10: Archivo statefulset.yaml

```

1  apiVersion: apps/v1
2  kind: StatefulSet
3  metadata:
4    name: {{ .Release.Name }}-besu-node
5    namespace: {{ .Values.nodesConfig.namespace }}
6  spec:
7    serviceName: "{{ .Release.Name }}-besu-node"
8    replicas: {{ .Values.nodesConfig.replicas }}
9    selector:
10     matchLabels:
11       app: {{ .Release.Name }}-besu-node
12  template:
13     metadata:
14       labels:
15         app: {{ .Release.Name }}-besu-node
16     spec:
17       securityContext:
18         fsGroup: 0
19         runAsUser: 0
20       initContainers:
21         - name: init-copy-keys
22           image: {{ .Values.nodesConfig.initContainer.
23             image }}
24           command: {{ toYaml .Values.nodesConfig.
25             initContainer.command | nindent 12 }}
26
27       volumeMounts:
28         - name: copy-files-script-vol
29           mountPath: /script
30         - name: genesis-shared
31           mountPath: /besu-config
32           readOnly: true
33         - name: besu-data
34           mountPath: /besu-node
35
36     containers:
37       - name: besu-node
38         workingDir: /besu-node
39
40         image: {{ .Values.nodesConfig.besuContainer.
41           image }}
42         command: {{ toYaml .Values.nodesConfig.
43           besuContainer.command | nindent 12 }}
44
45         ports:
46           - name: rpc
47             containerPort: {{ .Values.nodesConfig.
48               besuContainer.ports.rpc }}
49           - name: peer
50             containerPort: {{ .Values.nodesConfig.

```



```

25         d2B00318eD562931614edc6fCF1B5bF239a2a6
26         ": {
27         "balance":
28             "90000000000000000000000000000000"
29     },
30     "102
31     DB1828698E14DCD5E1b37A16E919Fe5e469F0
32     ": {
33     "balance":
34         "90000000000000000000000000000000"
35     }
36     }
37     },
38     "blockchain": {
39         "nodes": {
40             "generate": true,
41             "count": 4
42         }
43     }
44     }
45
46     configToml: |
47     genesis-file="./genesis.json"
48     data-path="./data"
49     host-allowlist=["*"]
50     min-gas-price=0
51
52     # Peers
53     p2p-port=30000
54     max-peers=42
55
56     # Mining
57     miner-enabled=false
58     miner-coinbase="0
59         x23d2B00318eD562931614edc6fCF1B5bF239a2a6"
60
61     # RPC
62     rpc-http-enabled=true
63     rpc-http-port=8540
64     rpc-http-cors-origins=["*"]
65     rpc-http-api=['ADMIN', 'ETH', 'NET', 'WEB3', '
66         CLIQUE', 'IBFT', 'PERM', 'DEBUG', 'MINER', '
67         EEA', 'PRIV', 'TXPOOL']
68     rpc-ws-enabled=true
69     rpc-ws-port="6174"
70     rpc-ws-api=['ADMIN', 'ETH', 'NET', 'WEB3', '
71         CLIQUE', 'IBFT', 'PERM', 'DEBUG', 'MINER', '
72         EEA', 'PRIV', 'TXPOOL']

```

```

63     # Permissions
64     permissions-nodes-config-file-enabled=true
65     permissions-accounts-config-file-enabled=true
66     permissions-nodes-config-file="./data/
        permissions_config.toml"
67     permissions-accounts-config-file="./data/
        permissions_config.toml"
68
69     permissionsConfig: |
70         accounts-allowlist=["0
            x23d2B00318eD562931614edc6fCF1B5bF239a2a6", "0
            x102DB1828698E14DCD5E1b37A16E919Fe5e469F0"]
71         nodes-allowlist=[]
72
73     renameScript: |
74         #!/usr/bin/env python3
75         import json
76         import rlp
77         import os
78
79         # 1. Leer el genesis.json
80         with open('/besu-config/networkFiles/genesis.json
            ', 'r') as f:
81             genesis = json.load(f)
82
83         extradata_hex = genesis["extraData"]
84
85         extradata_bytes = bytes.fromhex(extradata_hex
            [2:])
86
87         decoded = rlp.decode(extradata_bytes)
88
89         validators_rlp = decoded[1]
90
91         validators = []
92         for val in validators_rlp:
93             validators.append("0x" + val.hex())
94
95         print(validators)
96
97         for i, address in enumerate(validators):
98             old_folder = f"/besu-config/networkFiles/keys
                /{address}"
99             new_folder = f"/besu-config/networkFiles/keys
                /{i}-{address}"
100             os.rename(old_folder, new_folder)
101
102     copyFilesScript: |
103         # Obtiene el nombre del pod (ejemplo: besu-node

```

```

104         -0)
105     POD_NAME=$(hostname)
106     echo "Pod name is $POD_NAME"
107
108     # Extrae el ordinal del pod
109     ORDINAL=$(echo $POD_NAME | awk -F '-' '{print $NF
110         }')
111     echo "Ordinal: $ORDINAL"
112
113     # Buscar la carpeta que comienza con "<ORDINAL>-"
114     KEY_FOLDER=$(find /besu-config/networkFiles/keys
115         -type d -name "$ORDINAL-*")
116
117     if [ -z "$KEY_FOLDER" ]; then
118         echo "No se encontr carpeta para el ordinal
119             $ORDINAL"
120         exit 1
121     fi
122
123     echo "Usando carpeta de claves: $KEY_FOLDER"
124
125     # Crear la estructura de directorios y copiar
126     # archivos necesarios
127     mkdir -p /besu-node
128     cp /besu-config/networkFiles/genesis.json /besu-
129     node/genesis.json
130     cp /besu-config/config.toml /besu-node/config.
131     toml
132
133     # Crear el directorio data (si no existe)
134     mkdir -p /besu-node/data
135
136     # Copiar los archivos (y subdirectorios) que
137     # est n dentro de KEY_FOLDER hacia /besu-node/
138     # data
139     cp -r "$KEY_FOLDER"/* /besu-node/data/
140
141     cp /besu-config/permissions_config.toml /besu-
142     node/data/permissions_config.toml
143
144 pvc:
145     accessMode: ReadWriteMany
146     storage: 1Gi
147     storageClassName: azurefile-csi
148     # storageClassName: standard
149
150 JobConfig:
151     namespace: besu-network
152     restartPolicy: OnFailure

```

```

143
144   initContainer:
145     image: busybox:latest
146     command: "cp /config/*.json /mnt/besu-config/ && cp /
147               config/*.toml /mnt/besu-config/"
148
149   genesisContainer:
150     image: hyperledger/besu:22.10.0-RC2
151     imagePullPolicy: IfNotPresent
152     resources:
153       limits:
154         cpu: "500m"
155         memory: "512Mi"
156       requests:
157         cpu: "250m"
158         memory: "256Mi"
159     command: "besu operator generate-blockchain-config --
160               config-file=/besu-config/initialGenesis.json --to
161               =/besu-config/networkFiles --private-key-file-name
162               =key"
163
164   renameContainer:
165     image: python:3.11-slim
166     imagePullPolicy: IfNotPresent
167     resources:
168       limits:
169         cpu: "200m"
170         memory: "256Mi"
171       requests:
172         cpu: "100m"
173         memory: "128Mi"
174     command: "pip install rlp && python /scripts/
175               rename_folders.py"
176
177   volumes:
178     configFiles:
179       configMap: genesis-config-files
180     renameScriptVol:
181       configMap: genesis-config-files
182
183   ServiceConfig:
184     name: "besu-node-service"
185     ports:
186       - name: peer
187         port: 30000
188         targetPort: peer
189       - name: rpc
190         port: 8540
191         targetPort: rpc

```

```

187
188 ingress:
189   enabled: true
190   namespace: besu-network
191   className: nginx
192   rules:
193     - host: ""
194       http:
195         paths:
196           - path: /
197             pathType: Prefix
198             backend:
199               service:
200                 name: besu-network-app-besu-node-lb
201                 port:
202                   number: 8540
203
204 nodesConfig:
205   namespace: besu-network
206   replicas: 4
207
208   initContainer:
209     image: busybox:latest
210     command: ["/bin/sh", "-c", "/script/copyFilesScript.sh"]
211
212   besuContainer:
213     image: hyperledger/besu:22.10.0-RC2
214     command:
215       - /bin/bash
216       - -c
217       - |
218         besu --config-file=/besu-config/config.toml
219     ports:
220       rpc: 8540
221       peer: 30000
222
223   volumes:
224     copyFilesScriptVol:
225       configMap: genesis-config-files

```

.4 Formulario de validación de expertos

A continuación se presenta el formulario aplicado a los expertos para la validación del modelo propuesto, como parte de la metodología Delphi.

Validación de Expertos- Arquitectura para la gestión de transacciones de Bonos de carbono

En desarrollo está la tesis "**Modelo informático basado en tecnologías Blockchain para la Gestión de Transacciones de Bonos de Carbono: Mercado Eléctrico colombiano**", por parte del **Magister (c) Santiago Vásquez Gómez** y bajo la dirección del **PhD Gabriel Mauricio Ramírez Villegas** y codirección del **PhD (c) Ricardo Alonso Gallego Burgos**, en la Maestría en Ingeniería de Software de la Universidad de Medellín. Esta investigación propone un sistema transparente, eficiente y confiable para la gestión de bonos de carbono mediante tecnologías blockchain.

Considerando el enfoque cuantitativo de esta investigación, la encuesta servirá como instrumento de recolección de datos para obtener información directamente asociada al objeto de estudio, a través de las apreciaciones de arquitectos de software con experiencia en soluciones distribuidas. Se solicitará valorar, de forma numérica, los atributos de calidad del prototipo (claridad, coherencia, escalabilidad, rendimiento, seguridad, mantenibilidad, trazabilidad, entre otros). La contribución de profesionales con trayectoria en el diseño e implementación de arquitecturas distribuidas resultará fundamental para:

- Confirmar la hipótesis de la tesis: *La implementación de tecnologías blockchain en las transacciones del mercado de bonos de carbono de Colombia, específicamente en el contexto de las energías renovables, potenciará el monitoreo, reporte y verificación de las reducciones de emisiones, y fortalecerá la confiabilidad en dicho mercado.*
- Evaluar la pertinencia y adherencia de la arquitectura propuesta.

Una vez concluido el análisis, se remitirá a todos los participantes un resumen de los hallazgos y las conclusiones generadas.

Agradecimiento

Se agradecerá confirmar el interés en participar y completar la encuesta a la mayor brevedad.

nequrieu

Participación Encuesta: Validación - Arquitectura Trabajo Bonos carbono

Los datos suministrados en esta investigación serán tratados con confidencialidad y se mantendrá la reserva de los mismos por parte del **Magister (c) Santiago Vásquez Gómez**. El tiempo estimado para responder este cuestionario es de máximo 20 minutos. Agradecemos su participación en esta encuesta

1. ¿Esta de acuerdo a participar en la recolección de datos de esta investigación a través de esta encuesta?

Sí, estoy de acuerdo

No.

2. Por favor indique su correo electrónico, el cual sera utilizado para compartir los resultados de la presente investigación *

Bloque 1: Datos del profesional encuestado

Las siguientes preguntas tiene como propósito conocer al profesional encuestado, a través de sus datos personales, formación académica, trayectoria profesional y experiencia laboral.

3. Indique por favor su nombre completo *

4. Indique por favor los estudios académicos realizados *

- Técnico
- Tecnológico
- Pregrado
- Postgrado (Especialización)
- Postgrado (Maestría)
- Postgrado (Doctorado)
- Ninguna de las anteriores
- Otra

5. Indique por favor los años de experiencia laboral *

- Entre 1 y 5 años
- Entre 6 y 10 años
- Más de 10 años

6. De sus años de experiencia laboral. ¿Cuántos años ha trabajado en la industria o sector del software, analítica de datos o tecnología? *

- Entre 1 y 5 años
- Entre 6 y 10 años
- Más de 10 años

7. Indique porfavor cual ha sido el sector principal en el cual se ha desempeñado en los ultimos años (p. ej., finanzas, e-commerce, IoT, salud...) *

8. Dada su experiencia laboral, por favor indique si ha tenido experiencia en el diseño o desarrollo de arquitecturas de soluciones empresariales. *

Si

No

9. Si su respuesta a la pregunta 8 es afirmativa. Por favor indique el rol que ha tenido en el campo del desarrollo y diseño de software a lo largo de su experiencia laboral

Arquitecto de soluciones

Arquitecto de datos

Líder técnico

Desarrollador de software

Científico de datos

Ingeniero de Machine Learning

Ingeniero de calidad (QA Engineer)

Analista de negocio TI

Gestor de proyectos TI / Project Manager

Administrador de sistemas

Otro

10. Ha participado en el desarrollo de software para el sector energético *

Si

No

Propósito e Hipótesis de la Investigación

Propósito: Proponer y validar un modelo informático basado en tecnologías Blockchain para la gestión de transacciones de bonos de carbono en el mercado eléctrico colombiano, de modo que se garantice la verificación, trazabilidad y confiabilidad de cada operación, al tiempo que se evalúa su adherencia a los principales atributos de calidad (claridad, coherencia, escalabilidad, rendimiento, seguridad y mantenibilidad).

Hipótesis: La implementación de tecnologías blockchain en las transacciones del MBC de Colombia, específicamente en el contexto de las energías renovables, potenciará el monitoreo, reporte y verificaciones de las reducciones de emisiones y fortalecerá la confiabilidad en dicho mercado.

Pregunta de investigación

¿Como la implementación de la tecnología blockchain y los contratos inteligentes en el mercado de bonos de carbono en Colombia podría mejorar los mecanismos de medición, reporte y verificación de las reducciones de emisiones, en comparación con los métodos actuales?

Objetivo general de la investigación

Diseñar e implementar un prototipo de plataforma blockchain —basada en contratos inteligentes— que mejore los procesos de medición, reporte y verificación (MRV) de las reducciones de emisiones asociadas a la generación eléctrica en Colombia, facilitando la emisión y trazabilidad de bonos de carbono dentro del mercado eléctrico y validando su pertinencia y alineación con los requerimientos del sector mediante la evaluación de expertos.

Escala de Valoración de la Alineación Arquitectónica

Al diligenciar la encuesta, seleccione un valor del 1 al 5 para cada afirmación, según el grado en que la arquitectura propuesta satisface los requisitos de **validación y trazabilidad de las transacciones de bonos de carbono**.

La arquitectura evaluada se basa en el patrón **Service-Oriented Distributed Broker**, descrito por Bass, Clements y Kazman (2022) en *Software Architecture in Practice*, el cual promueve una organización modular, distribuida y orientada a servicios, facilitando la interoperabilidad, escalabilidad y trazabilidad en sistemas complejos como los del mercado de bonos de carbono.

1. **Desalineación total:** La arquitectura no incluye ningún mecanismo de validación ni trazabilidad. Faltan componentes clave y controles necesarios para asegurar la integridad y el seguimiento de las operaciones.
2. **Alineación básica:** La arquitectura cuenta con algunos mecanismos aislados de validación y trazabilidad, pero no están completos. Faltan elementos esenciales, como registros inmutables o verificaciones automáticas, lo que impide un seguimiento efectivo.
3. **Alineación parcial:** La arquitectura cubre aspectos clave de validación y trazabilidad, como contratos inteligentes o logs de transacciones, pero aún necesita mejoras importantes. Se requiere más consistencia en los datos y mayor automatización en las auditorías para mejorar el control y la confiabilidad.
4. **Alineación adecuada:** La arquitectura incluye todos los componentes necesarios de validación y trazabilidad, como registros distribuidos y verificación criptográfica. Los flujos de datos permiten un seguimiento adecuado, aunque algunos ajustes menores pueden ser necesarios para mejorar el rendimiento.
5. **Alineación completa:** La arquitectura está completamente integrada, con mecanismos de validación y trazabilidad a lo largo de todo el ciclo de vida de la transacción. Incluye registros inmutables, validación automática y auditorías detalladas. No se requieren cambios importantes para cumplir con los requisitos establecidos.

11. Visión General del Prototipo

Pretende evaluar el grado en que la descripción global de la arquitectura resulta clara y comprensible: si facilita la identificación rápida de objetivos, componentes y relaciones, y si el diagrama de flujo de transacciones refleja fielmente el proceso de gestión de bonos de carbono.

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación Arquitectónica** definida anteriormente.

	Desalineación total	Alineación básica	Alineación parcial	Alineación adecuada	Alineación completa
¿En qué medida la descripción de alto nivel de la arquitectura facilita la comprensión inicial del propósito y permite identificar sin ambigüedades los roles de cada componente?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
¿En qué medida el nivel de detalle de los diagramas y la documentación asociada resulta suficiente para entender la función y alcance de cada elemento sin requerir aclaraciones externas?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
¿En qué medida las relaciones y dependencias entre los bloques principales se presentan de forma coherente y completa?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
¿En qué medida la arquitectura propuesta satisface adecuadamente los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

12. ¿Tiene alguna sugerencia u opinion relacionada con la visión general del prototipo?

13. **Componentes Principales**

Busca validar la definición y rol de cada bloque arquitectónico: su claridad, cobertura de funciones clave, calidad de las interfaces de comunicación y nivel de desacoplamiento entre módulos.

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación Arquitectónica** definida anteriormente.

	Desalineación total	Alineación completa	Alineación parcial	Alineación adecuada	Alineación completa
¿En qué medida la función de cada bloque está claramente definida, permitiendo entender su responsabilidad en la validación y trazabilidad de bonos de carbono?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
¿En qué medida la arquitectura cubre todas las funcionalidades necesarias para la validación y trazabilidad de bonos de carbono, sin omitir componentes esenciales?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
¿En qué medida la interacción entre componentes (mensajes, APIs) soporta de forma fluida y confiable los procesos de validación y trazabilidad?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
¿En qué medida los bloques se presentan desacoplados, permitiendo autonomía de cada módulo sin crear dependencias innecesarias?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

14. ¿Tiene alguna sugerencia u opinion relacionada con como esta definido cada componente en la arquitectura propuesta?

15. **Calidad Arquitectónica**

Mide los atributos técnicos críticos de la solución: flexibilidad, escalabilidad, rendimiento, fiabilidad, seguridad, mantenibilidad, interoperabilidad, extensibilidad, modularidad y simplicidad de despliegue, según .

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación Arquitectónica** definida anteriormente.

	Desalineación total	Alineación básica	Alineación parcial	Alineación adecuada	Alineación completa
<p>Flexibilidad ¿En qué medida la arquitectura permite adaptarse a cambios en requisitos o componentes sin afectar el funcionamiento global?</p>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<p>Escalabilidad ¿En qué medida el diseño soporta un crecimiento de usuarios y volumen de transacciones de bonos sin degradar su desempeño?</p>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<p>Rendimiento ¿En qué medida la arquitectura garantiza tiempos de respuesta y latencias adecuadas bajo condiciones de carga realistas?</p>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<p>Fiabilidad ¿En qué medida el sistema mantiene la continuidad operativa y se recupera automáticamente de fallos o errores?</p>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<p>Seguridad ¿En qué medida la arquitectura protege la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los datos de los bonos de carbono?</p>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

	Desalineación total	Alineación básica	Alineación parcial	Alineación adecuada	Alineación completa
Mantenibilidad ¿En qué medida es sencillo localizar, corregir y actualizar componentes o servicios sin introducir nuevos errores?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Interoperabilidad ¿En qué medida los módulos pueden intercambiar información y trabajar con sistemas externos (p. ej., APIs de terceros, bases de datos) de forma nativa?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Extensibilidad ¿En qué medida se pueden añadir nuevas funcionalidades (validadores, reportes, integraciones) sin rediseñar la arquitectura existente?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Modularidad ¿En qué medida la arquitectura está organizada en módulos cohesivos y con bajo acoplamiento entre sí?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Complejidad de despliegue ¿En qué medida el proceso de instalación, configuración y puesta en marcha del sistema es sencillo y automatizable?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

16. ¿Tiene alguna sugerencia u opinión relacionada con los atributos de calidad previamente definidos?

17. **Ajuste al Contexto y Requisitos**

Verifica la adecuación del diseño al dominio del mercado eléctrico colombiano y su capacidad para cumplir requisitos no funcionales esenciales: latencia, tolerancia a fallos, auditoría y monitorización, y versionado de servicios.

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación Arquitectónica** definida anteriormente.

	Desalineación total	Alineación básica	Alineación parcial	Alineación adecuada	Alineación completa
<p>Adecuación al dominio y volúmenes del mercado eléctrico colombiano ¿En qué medida el prototipo se ajusta a las características operativas, regulatorias y al volumen de transacciones previsto en el mercado eléctrico colombiano?</p>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<p>Latencia aceptable ¿En qué medida la arquitectura garantiza tiempos de respuesta que cumplen con los acuerdos de nivel de servicio (SLAs) del sector eléctrico?</p>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<p>Tolerancia a fallos ¿En qué medida el sistema continúa operando y se recupera de manera automática ante la caída de alguno de sus componentes?</p>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<p>Auditoría y monitorización ¿En qué medida los mecanismos de registro de eventos, trazas y métricas soportan las necesidades de seguimiento y control de transacciones?</p>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

18. **Evaluación Global**

Recoge una valoración final sobre la adoptabilidad y recomendación de la arquitectura en un entorno real de producción, así como observaciones abiertas para capturar sugerencias de mejora en diagramas, procesos o documentación.

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación Arquitectónica** definida anteriormente.

*

	Desalineación total	Alineación básica	Alineación parcial	Alineación adecuada	Alineación completa
<p>Adoptabilidad en un entorno real ¿En qué medida el prototipo puede integrarse y operar eficazmente en proyectos de producción del mercado eléctrico colombiano, considerando procesos, herramientas y equipos existentes?</p>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<p>Recomendación de uso en producción ¿En qué grado se considera idóneo este diseño para su despliegue y mantenimiento continuos en un entorno productivo real?</p>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<p>Tolerancia a fallos ¿En qué medida el sistema continúa operando y se recupera de manera automática ante la caída de alguno de sus componentes?</p>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

19. ¿Tiene alguna sugerencia u observación general sobre la adaptabilidad, robustez o viabilidad del prototipo en un entorno real de producción? Puede incluir recomendaciones sobre diagramas, procesos, documentación o cualquier otro aspecto que considere relevante.

Escala de Valoración de la Alineación del prototipo con lo objetivos climáticos de Colombia

Al diligenciar la encuesta, responder cada afirmación con un valor del 1 al 5 según la siguiente guía. Cada nivel describe el grado en que el prototipo propuesto satisface los **requisitos de validación y trazabilidad** de las transacciones de bonos de carbono

(MRV: procesos de medición, reporte y verificación de emisiones)

1. **Desalineación total:** Considera que la propuesta basada en blockchain para MRV y bonos de carbono es innecesaria o perjudicial, ya que entorpece los esfuerzos climáticos del país.
2. **Alineación básica:** Cree que la propuesta tendría un impacto nulo o meramente teórico sobre las metas de mitigación y no aporta valor real.
3. **Alineación parcial:** Reconoce un aporte limitado, pero considera que no aborda los desafíos clave del sistema MRV o que su implementación sería poco efectiva.
4. **Alineación adecuada:** Percibe que la propuesta mejora razonablemente los procesos de MRV y la trazabilidad, apoyando los objetivos climáticos de manera pertinente.
5. **Alineación completa:** Cree que la solución es estratégica y altamente efectiva para fortalecer la transparencia, credibilidad e integridad del mercado de carbono en Colombia.

20. **Alineación con los Objetivos de Cambio Climático de Colombia**

MRV hace referencia a los procesos de Medición, Reporte y Verificación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), fundamentales para asegurar la integridad de los bonos de carbono. Esta sección busca evaluar qué tan alineada está la propuesta de una solución basada en blockchain con las metas climáticas del país.

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación** definida anteriormente.

	Desalineación total	Alineación básica	Alineación parcial	Alineación adecuada	Alineación completa
¿Qué tan relevante considera que es mejorar los procesos de MRV y la trazabilidad del mercado de bonos de carbono para que Colombia alcance sus metas climáticas?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
¿En qué medida considera que una solución basada en blockchain para MRV en generación eléctrica puede aumentar la credibilidad de las reducciones de emisiones de GEI en Colombia?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
¿Qué nivel de alineación percibe entre el uso de blockchain para trazabilidad y verificación de bonos de carbono, y el fortalecimiento del mercado colombiano como herramienta efectiva de acción climática?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
¿Qué tan consistente considera que es una solución de MRV auditable e inmutable mediante blockchain con los estándares internacionales en mercados de carbono, como los definidos en el Artículo 6 del Acuerdo de París?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

13/5/25, 20:14

Validación de Expertos- Arquitectura para la gestión de transacciones de Bonos de carbono

21. ¿Tiene alguna sugerencia, observación o comentario adicional sobre la alineación del prototipo con los objetivos climáticos de Colombia o con los procesos de MRV y trazabilidad para bonos de carbono?

22. **Alineación con la Transición Energética en Colombia**

Colombia está avanzando en su proceso de transición energética, priorizando el desarrollo de **Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER)** y su integración en el sistema eléctrico y los mercados asociados. Esta sección busca evaluar cómo la propuesta de una plataforma basada en blockchain para la gestión de bonos de carbono se alinea con este proceso.

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación** definida anteriormente.

	Desalineación total	Alineación básica	Alineación parcial	Alineación adecuada	Alineación completa
¿Qué tan alineada considera que está una plataforma de bonos de carbono enfocada en FNCER con el objetivo de acelerar la inversión y el despliegue de energías renovables en Colombia?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
¿En qué medida considera que una solución tecnológica basada en blockchain, orientada a la verificación y generación de confianza en los bonos de carbono, contribuye a superar barreras de financiamiento y auditoría para proyectos de energía renovable en el país?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
¿Qué nivel de alineación percibe entre la propuesta y el apoyo a la integración de FNCER de pequeña escala o distribuida en los mercados eléctrico y de carbono?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

13/5/25, 20:14

Validación de Expertos- Arquitectura para la gestión de transacciones de Bonos de carbono

	Desalineación total	Alineación básica	Alineación parcial	Alineación adecuada	Alineación completa
¿Qué tan relevante considera que es mejorar la transparencia y trazabilidad de los bonos de carbono del sector eléctrico para fomentar la inversión en la transición energética en Colombia?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

23. ¿Desea compartir alguna sugerencia, comentario o recomendación adicional sobre cómo la propuesta podría apoyar mejor el proceso de transición energética en Colombia?

24. **Beneficios Potenciales para el Mercado de Energía en Colombia**

La propuesta de una solución basada en blockchain para MRV y trazabilidad en el mercado de bonos de carbono podría tener impactos significativos en la dinámica y sostenibilidad del mercado eléctrico colombiano. Esta sección busca evaluar dichos beneficios desde una perspectiva técnica y estratégica.

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación** definida anteriormente.

	Desalineación total	Alineación básica	Alineación parcial	Alineación adecuada	Alineación completa
¿Qué tan alineada considera que está una plataforma blockchain para MRV y trazabilidad con el objetivo de aumentar la transparencia y confianza entre los actores del mercado energético colombiano interesados en bonos de carbono?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
¿En qué medida considera que la propuesta puede contribuir a mejorar la eficiencia de los procesos de MRV y emisión de bonos de carbono para generadores de FNCER en Colombia?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
¿Qué nivel de alineación percibe entre la propuesta y la mejora de la viabilidad económica de proyectos eléctricos mediante ingresos adicionales por bonos de carbono en el contexto colombiano?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

13/5/25, 20:14

Validación de Expertos- Arquitectura para la gestión de transacciones de Bonos de carbono

	Desalineación total	Alineación básica	Alineación parcial	Alineación adecuada	Alineación completa
¿Qué tan alineada está la propuesta con el objetivo de atraer inversión y nuevos actores al mercado eléctrico colombiano a través de un esquema de bonos de carbono más transparente y confiable?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

25. ¿Tiene alguna sugerencia o comentario sobre cómo la propuesta podría mejorar su contribución al funcionamiento, sostenibilidad o atractivo del mercado eléctrico colombiano mediante el uso de bonos de carbono?

This content is neither created nor endorsed by Microsoft. The data you submit will be sent to the form owner.



.5 Resultados validación de expertos

A continuación se presenta los resultados del formulario aplicado a los expertos para la validación del modelo propuesto, como parte de la metodología Delphi.

Responses Overview Active

Responses 11	Average Time 67:05	Duration 15 Days
------------------------	------------------------------	----------------------------

1. ¿Esta de acuerdo a participar en la recolección de datos de esta investigación a través de esta encuesta?



2. Por favor indique su correo electrónico, el cual sera utilizado para compartir los resultados de la presente investigación

11 Responses

Latest Responses
"giovani.romero@globalmvm.com"
"michel.cespedes@globalmvm.com"
"liseth.campo@globalmvm.com"
...

9 respondents (82%) answered globalmvm for this question.



3. Indique por favor su nombre completo

11
Responses

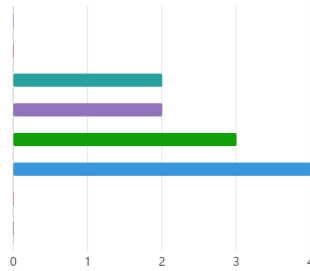
Latest Responses
"Esteban Romero"
"Michel Esteven Cespedes Medina"
"Liseth Campo"
...

1 respondents (9%) answered Esteban Romero for this question.

Edgar Alexander Camargo Contreras **RICHARD ALEXANDER RUIZ PATIÑO**
Santiago Cortés González **Esteban Romero** **Liseth Campo** **Juan José Llano**
Santiago Vasquez
Juan Harvey Henao **Michel Esteven Cespedes Medina**
Alejandro Rizo **Brayan Mesa Rendón** **Patricia Elena Gómez Muñoz**

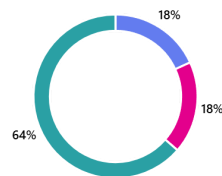
4. Indique por favor los estudios académicos realizados

- Técnico 0
- Tecnológico 0
- Pregrado 2
- Postgrado (Especialización) 2
- Postgrado (Maestría) 3
- Postgrado (Doctorado) 4
- Ninguna de las anteriores 0
- Otra 0



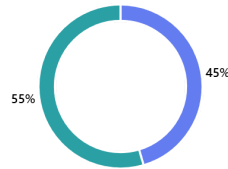
5. Indique por favor los años de experiencia laboral

- Entre 1 y 5 años 2
- Entre 6 y 10 años 2
- Más de 10 años 7



6. De sus años de experiencia laboral. ¿Cuántos años ha trabajado en la industria o sector del software, analítica de datos o tecnología?

● Entre 1 y 5 años	5
● Entre 6 y 10 años	0
● Más de 10 años	6



7. Indique por favor cual ha sido el sector principal en el cual se ha desempeñado en los ultimos años (p. ej., finanzas, e-commerce, IoT, salud...)

11
Responses

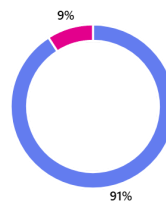
Latest Responses
"tecnología, transporte, logística, energetico"
"finanzas y energia"
"Energia y agricultura"
...

4 respondents (36%) answered Energía for this question.

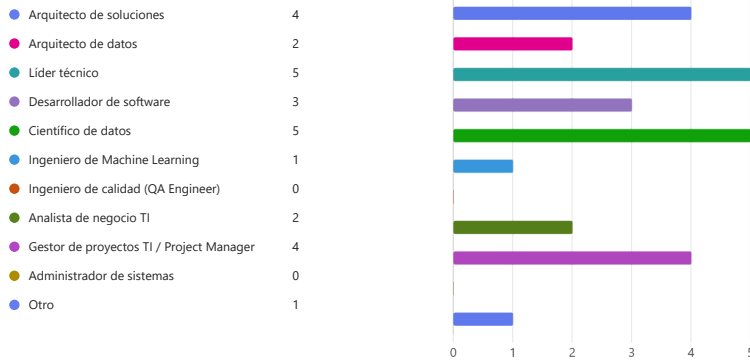


8. Dada su experiencia laboral, por favor indique si ha tenido experiencia en el diseño o desarrollo de arquitecturas de soluciones empresariales.

● Si	10
● No	1

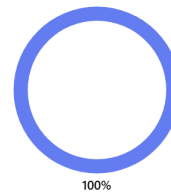


9. Si su respuesta a la pregunta 8 es afirmativa. Por favor indique el rol que ha tenido en el campo del desarrollo y diseño de software a lo largo de su experiencia laboral



10. Ha participado en el desarrollo de software para el sector energético

Si 11
No 0



11. Visión General del Prototipo

Pretende evaluar el grado en que la descripción global de la arquitectura resulta clara y comprensible: si facilita la identificación rápida de objetivos, componentes y relaciones, y si el diagrama de flujo de transacciones refleja fielmente el proceso de gestión de bonos de carbono.

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación Arquitectónica** definida anteriormente.

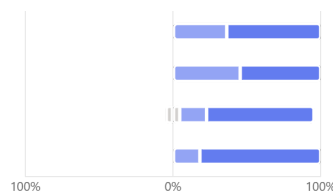
Desalineación total Alineación básica Alineación parcial Alineación adecuada Alineación completa

¿En qué medida la descripción de alto nivel de la arquitectura facilita la comprensión inicial del propósito y permite identificar...

¿En qué medida el nivel de detalle de los diagramas y la documentación asociada resulta suficiente para entender la...

¿En qué medida las relaciones y dependencias entre los bloques principales se presentan de forma coherente y completa?

¿En qué medida la arquitectura propuesta satisface adecuadamente los **requerimientos funcionales y no...**



12. ¿Tiene alguna sugerencia u opinion relacionada con la visión general del prototipo?

8
Responses

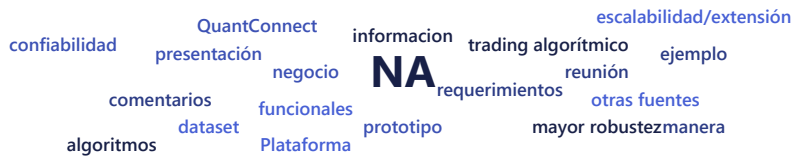
Latest Responses

"ninguna"

"Los requerimientos de negocio y funcionales no fueron explícitamente descritos"

...

6 respondents (75%) answered NA for this question.



13. Componentes Principales

Busca validar la definición y rol de cada bloque arquitectónico: su claridad, cobertura de funciones clave, calidad de las interfaces de comunicación y nivel de desacoplamiento entre módulos.

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación Arquitectónica** definida anteriormente.

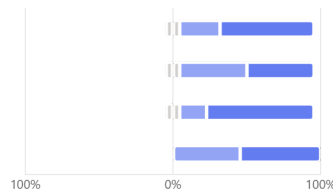
- Desalineación total
- Alineación completa
- Alineación parcial
- Alineación adecuada
- Alineación completa

¿En qué medida la función de cada bloque está claramente definida, permitiendo entender su responsabilidad en la validaci...

¿En qué medida la arquitectura cubre todas las funcionalidades necesarias para la validación y trazabilidad de bonos de carbono...

¿En qué medida la interacción entre componentes (mensajes, APIs) soporta de forma fluida y confiable los procesos de...

¿En qué medida los bloques se presentan desacoplados, permitiendo autonomía de cada módulo sin crear dependencias...



14. ¿Tiene alguna sugerencia u opinion relacionada con como esta definido cada componente en la arquitectura propuesta?

8
Responses

Latest Responses

"ninguna"

"La trazabilidad quizá no es interpretable para usuario no técnico"

...

4 respondents (50%) answered NA for this question.



15. Calidad Arquitectónica

Mide los atributos técnicos críticos de la solución: flexibilidad, escalabilidad, rendimiento, fiabilidad, seguridad, mantenibilidad, interoperabilidad, extensibilidad, modularidad y simplicidad de despliegue, según .

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación Arquitectónica** definida anteriormente.

- Desalineación total
- Alineación básica
- Alineación parcial
- Alineación adecuada
- Alineación completa

- Flexibilidad** ¿En qué medida la arquitectura permite adaptarse a cambios en requisitos o componentes sin afectar el...
- Escalabilidad** ¿En qué medida el diseño soporta un crecimiento de usuarios y volumen de transacciones de bonos sin degradar s...
- Rendimiento** ¿En qué medida la arquitectura garantiza tiempos de respuesta y latencias adecuadas bajo condiciones de carga...
- Fiabilidad** ¿En qué medida el sistema mantiene la continuidad operativa y se recupera automáticamente de fallos o errores?
- Seguridad** ¿En qué medida la arquitectura protege la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los datos de los bonos de...
- Mantenibilidad** ¿En qué medida es sencillo localizar, corregir y actualizar componentes o servicios sin introducir nuevos errores?
- Interoperabilidad** ¿En qué medida los módulos pueden intercambiar información y trabajar con sistemas externos (p. ej....
- Extensibilidad** ¿En qué medida se pueden añadir nuevas funcionalidades (validadores, reportes, integraciones) sin rediseñ...
- Modularidad** ¿En qué medida la arquitectura está organizada en módulos cohesivos y con bajo acoplamiento entre sí?
- Complejidad de despliegue** ¿En qué medida el proceso de instalación, configuración y puesta en marcha del sistema es...



16. ¿Tiene alguna sugerencia u opinión relacionada con los atributos de calidad previamente definidos?

8 Responses

Latest Responses

"ninguna"

"Quizá la característica de mantenibilidad se sale de proyecto académico"

...

3 respondents (38%) answered NA for this question.

tiempo real datos presentación componentes
 sensores IoT característica **NA** proyecto académico arquitectura
 otras tecnologías reunión mantenimiento futuro
 comentarios drones

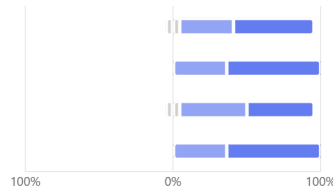
17. Ajuste al Contexto y Requisitos

Verifica la adecuación del diseño al dominio del mercado eléctrico colombiano y su capacidad para cumplir requisitos no funcionales esenciales: latencia, tolerancia a fallos, auditoría y monitorización, y versionado de servicios.

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación Arquitectónica** definida anteriormente.

- Desalineación total
- Alineación básica
- Alineación parcial
- Alineación adecuada
- Alineación completa

- Adecuación al dominio y volúmenes del mercado eléctrico colombiano** ¿En qué medida el prototipo se ajusta a las...
- Latencia aceptable** ¿En qué medida la arquitectura garantiza tiempos de respuesta que cumplen con los acuerdos de nivel de...
- Tolerancia a fallos** ¿En qué medida el sistema continúa operando y se recupera de manera automática ante la caída de alguno de...
- Auditoría y monitorización** ¿En qué medida los mecanismos de registro de eventos, trazas y métricas soportan las necesidades d...



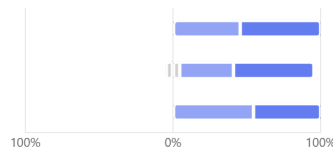
18. Evaluación Global

Recoge una valoración final sobre la adoptabilidad y recomendación de la arquitectura en un entorno real de producción, así como observaciones abiertas para capturar sugerencias de mejora en diagramas, procesos o documentación.

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación Arquitectónica** definida anteriormente.

- Desalineación total
- Alineación básica
- Alineación parcial
- Alineación adecuada
- Alineación completa

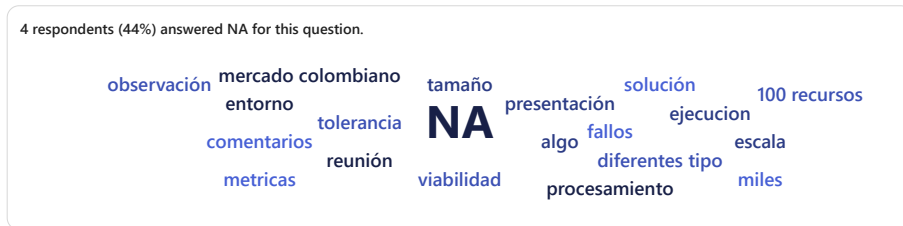
- Adoptabilidad en un entorno real** ¿En qué medida el prototipo puede integrarse y operar eficazmente en proyectos de...
- Recomendación de uso en producción** ¿En qué grado se considera idóneo este diseño para su despliegue y mantenimiento...
- Tolerancia a fallos** ¿En qué medida el sistema continúa operando y se recupera de manera automática ante la caída de alguno de...



19. ¿Tiene alguna sugerencia u observación general sobre la adaptabilidad, robustez o viabilidad del prototipo en un entorno real de producción? Puede incluir recomendaciones sobre diagramas, procesos, documentación o cualquier otro aspecto que considere relevante.

9 Responses

Latest Responses
 "ninguna"
 "No fue posible comprobar algo como tolerancia a fallos"
 ...



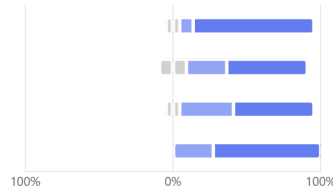
20. Alineación con los Objetivos de Cambio Climático de Colombia

MRV hace referencia a los procesos de Medición, Reporte y Verificación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), fundamental es para asegurar la integridad de los bonos de carbono. Esta sección busca evaluar qué tan alineada está la propuesta de una solución basada en blockchain con las metas climáticas del país.

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación** definida anteriormente.

- Desalineación total
- Alineación básica
- Alineación parcial
- Alineación adecuada
- Alineación completa

- ¿Qué tan relevante considera que es mejorar los procesos de MRV y la trazabilidad del mercado de bonos de carbono para que...
- ¿En qué medida considera que una solución basada en blockchain para MRV en generación eléctrica puede aumentar la credibilidad...
- ¿Qué nivel de alineación percibe entre el uso de blockchain para trazabilidad y verificación de bonos de carbono, y el...
- ¿Qué tan consistente considera que es una solución de MRV auditable e inmutable mediante blockchain con los estándares...



21. ¿Tiene alguna sugerencia, observación o comentario adicional sobre la alineación del prototipo con los objetivos climáticos de Colombia o con los procesos de MRV y trazabilidad para bonos de carbono?

9
Responses

Latest Responses
"ninguna"
"Ninguna"
...

3 respondents (33%) answered bonos for this question.



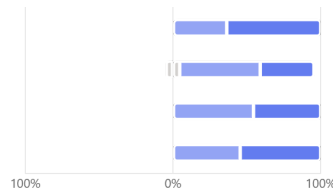
22. Alineación con la Transición Energética en Colombia

Colombia está avanzando en su proceso de transición energética, priorizando el desarrollo de **Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER)** y su integración en el sistema eléctrico y los mercados asociados. Esta sección busca evaluar cómo la propuesta de una plataforma basada en blockchain para la gestión de bonos de carbono se alinea con este proceso.

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación** definida anteriormente.

- Desalineación total
- Alineación básica
- Alineación parcial
- Alineación adecuada
- Alineación completa

- ¿Qué tan alineada considera que está una plataforma de bonos de carbono enfocada en FNCER con el objetivo de acelerar la...
- ¿En qué medida considera que una solución tecnológica basada en blockchain, orientada a la verificación y generación de...
- ¿Qué nivel de alineación percibe entre la propuesta y el apoyo a la integración de FNCER de pequeña escala o distribuida en los...
- ¿Qué tan relevante considera que es mejorar la transparencia y trazabilidad de los bonos de carbono del sector eléctrico para...



23. ¿Desea compartir alguna sugerencia, comentario o recomendación adicional sobre cómo la propuesta podría apoyar mejor el proceso de transición energética en Colombia?

9
Responses

Latest Responses
"ninguna"
"Ninguna"
...

2 respondents (22%) answered plataforma for this question.



24. Beneficios Potenciales para el Mercado de Energía en Colombia

La propuesta de una solución basada en blockchain para MRV y trazabilidad en el mercado de bonos de carbono podría tener impactos significativos en la dinámica y sostenibilidad del mercado eléctrico colombiano. Esta sección busca evaluar dichos beneficios desde una perspectiva técnica y estratégica.

Para cada enunciado, seleccione un valor de 1 a 5 según la **Escala de Alineación** definida anteriormente.

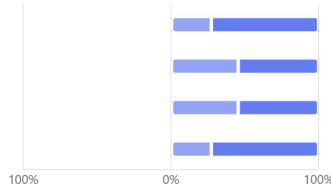
● Desalineación total ● Alineación básica ● Alineación parcial ● Alineación adecuada ● Alineación completa

¿Qué tan alineada considera que está una plataforma blockchain para MRV y trazabilidad con el objetivo de aumentar la...

¿En qué medida considera que la propuesta puede contribuir a mejorar la eficiencia de los procesos de MRV y emisión de bonos...

¿Qué nivel de alineación percibe entre la propuesta y la mejora de la viabilidad económica de proyectos eléctricos mediante ingres...

¿Qué tan alineada está la propuesta con el objetivo de atraer inversión y nuevos actores al mercado eléctrico colombiano a...

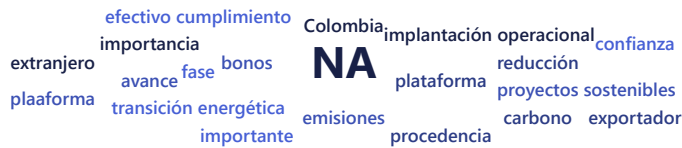


25. ¿Tiene alguna sugerencia o comentario sobre cómo la propuesta podría mejorar su contribución al funcionamiento, sostenibilidad o atractivo del mercado eléctrico colombiano mediante el uso de bonos de carbono?

9
Responses

Latest Responses
"ninguna"
"Ninguna"
...

8 respondents (89%) answered NA for this question.



.6 Grabación reunión validación de expertos

La grabación documenta los comentarios, sugerencias y discusiones clave que permitieron realizar los ajustes finales al sistema propuesto.

https://mvmingenieriadessoftware-my.sharepoint.com/:v:/r/personal/ricardo_gallego_globalmvm_com/Documents/Grabaciones/Validaci%C3%B3n%20Arquitectura%20Proyecto%20de%20Investigaci%C3%B3n%20Bonos%20de%20Carbono-20250508_150418-Grabaci%C3%B3n%20de%20la%20reuni%C3%B3n.mp4?csf=1&web=1&e=n7BVFP&nav=eyJyZWZlcnJhbEluZm8iOmsicmVmZXJyYWxBcHAI0iJTdHJlYW1XZWJBcHAI0iLCJyZWZlcnJhbFZpZXci3D