

Arquitectura Blockchain para Plataformas Descentralizadas: Revisión Técnica Estructurada, Taxonomía, Métricas y Marco de Múltiples Capas

Blockchain Architecture for Decentralized Platforms: Structured Technical Review, Taxonomy, Metrics, and Multi-Layer Framework

Esmeide Leal¹, Nallig Leal², Fabián Ramos³, Danilo Torres⁴, Carlos Díaz-Sáenz⁵

¹PhD, Profesor, Universidad Autónoma del Caribe, Grupo SINT, Barranquilla, Colombia

 <https://orcid.org/0000-0003-2468-370X>

²PhD, Profesor, Universidad Autónoma del Caribe, Grupo SINT, Barranquilla, Colombia.

 <https://orcid.org/0000-0002-4913-8540>

³Msc, Profesor, Universidad Autónoma del Caribe, Grupo SINT, Barranquilla, Colombia.

 <https://orcid.org/0000-0003-1678-7533>

⁴Msc, Profesor, Universidad Autónoma del Caribe, Grupo GIGI, Barranquilla, Colombia.

 <https://orcid.org/0000-0002-6795-6061>

⁵Msc, Profesor, Universidad Autónoma del Caribe, Grupo GIIM, Barranquilla, Colombia.

 <https://orcid.org/0009-0009-7778-3799>

esmeide.leal@uac.edu.co

Cite this article as: E. Leal, N. Leal, F. Ramos, D. Torres, C. Díaz "Arquitectura Blockchain para Plataformas Descentralizadas: Revisión Técnica Estructurada, Taxonomía, Métricas y Marco de Referencia Multicapa", Prospectiva, Vol. 24 N° 2 2026

Recibido: 26/03/2026 / Aceptado: 23/06/2026

RESUMEN

La adopción de tecnologías blockchain ha impulsado el desarrollo de plataformas descentralizadas orientadas a la gestión de activos digitales, contratos inteligentes, aplicaciones Web3 y mercados basados en tokens no fungibles (NFT). Sin embargo, el diseño arquitectónico de estas plataformas continúa representando un desafío debido a la necesidad de equilibrar propiedades frecuentemente contrapuestas como descentralización, seguridad, escalabilidad, interoperabilidad y costo operativo. Aunque la literatura científica ha abordado de manera extensa aspectos particulares relacionados con mecanismos de consenso, almacenamiento distribuido, contratos inteligentes o soluciones de escalabilidad, persiste una fragmentación conceptual que dificulta la construcción de marcos arquitectónicos integrales para el desarrollo de sistemas descentralizados. Este artículo presenta una revisión técnica estructurada orientada a sintetizar el conocimiento existente sobre arquitecturas blockchain y proponer un marco de referencia multicapa para plataformas descentralizadas. La metodología empleada se fundamenta en principios de revisión técnica y análisis comparativo, organizando la literatura en torno a cinco dimensiones arquitectónicas:

almacenamiento de datos, infraestructura de ejecución, seguridad, interoperabilidad y experiencia de usuario. Como resultado, se desarrolla una taxonomía de modelos arquitectónicos, una comparación de plataformas blockchain relevantes y una arquitectura de referencia que integra componentes de presentación, servicios, persistencia, contratos inteligentes e integraciones externas. Adicionalmente, se propone un conjunto de métricas para evaluar escalabilidad, descentralización, interoperabilidad y costos operativos, acompañado de una función formal de costos aplicable a plataformas blockchain. Finalmente, se presenta un caso ilustrativo para demostrar la aplicación del marco propuesto en el diseño conceptual de una plataforma de activos digitales. Los resultados sugieren que las arquitecturas híbridas constituyen actualmente el enfoque más adecuado para equilibrar requisitos técnicos y operacionales en aplicaciones descentralizadas de propósito general.

Palabras Clave — Blockchain, Arquitectura de Software, Web3, NFT, Contratos Inteligentes, Escalabilidad, Interoperabilidad, Almacenamiento Descentralizado.

Abstract — The adoption of blockchain technologies has fostered the development of decentralized platforms aimed at managing digital assets, smart contracts, Web3 applications, and markets based on non-fungible tokens (NFTs). However, the architectural design of these platforms remains a significant challenge due to the need to balance often conflicting properties such as decentralization, security, scalability, interoperability, and operational cost. Although the scientific literature has extensively addressed specific aspects related to consensus mechanisms, distributed storage, smart contracts, and scalability solutions, a conceptual fragmentation persists, hindering the construction of comprehensive architectural frameworks for the development of decentralized systems. This article presents a structured technical review aimed at synthesizing existing knowledge on blockchain architectures and proposing a multi-layer reference framework for decentralized platforms. The adopted methodology is based on technical review principles and comparative analysis, organizing the literature around five architectural dimensions: data storage, execution infrastructure, security, interoperability, and user experience. As a result, a taxonomy of architectural models, a comparison of relevant blockchain platforms, and a reference architecture integrating presentation, service, persistence, smart contract, and external integration components are developed. Additionally, a set of metrics is proposed to evaluate scalability, decentralization, interoperability, and operational costs, accompanied by a formal cost function applicable to blockchain platforms. Finally, an illustrative case is presented to demonstrate the application of the proposed framework in the conceptual design of a digital asset platform. The results suggest that hybrid architectures currently represent the most suitable approach for balancing technical and operational requirements in general-purpose decentralized applications.

Keywords — Blockchain Architecture, NFT, Smart Contracts, Decentralized Storage, Scalability, Interoperability, Security.

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología blockchain ha evolucionado significativamente desde la publicación de Bitcoin por Nakamoto en 2008 [1], transformándose de una infraestructura destinada exclusivamente a soportar sistemas monetarios descentralizados en una plataforma de propósito general para la construcción de aplicaciones distribuidas. La incorporación de contratos inteligentes programables introducida por Ethereum [2], [3], [9] permitió extender las capacidades de blockchain hacia escenarios más complejos, incluyendo mercados digitales, sistemas de identidad, aplicaciones financieras descentralizadas (DeFi), cadenas de suministro y plataformas de gobernanza distribuida. Diversos autores han destacado que blockchain evolucionó rápidamente hacia una infraestructura de propósito general aplicable a múltiples sectores industriales y organizacionales [10].

En los últimos años, el crecimiento del ecosistema Web3 y la popularización de los tokens no fungibles (NFT) [11], [12] han incrementado el interés por las arquitecturas descentralizadas capaces de gestionar activos digitales de forma segura, transparente y verificable. No obstante, el diseño de estas plataformas implica enfrentar múltiples desafíos relacionados con la selección de mecanismos de consenso, estrategias de almacenamiento, modelos de interoperabilidad, seguridad de contratos inteligentes y experiencia de usuario. La combinación adecuada de estos componentes determina la viabilidad técnica y económica de una solución blockchain.

A pesar de la abundante literatura existente [4]-[7], gran parte de las investigaciones se enfocan en componentes específicos del ecosistema blockchain. Algunos trabajos analizan protocolos de consenso, otros estudian mecanismos de almacenamiento descentralizado, mientras que diversas investigaciones se concentran en soluciones de escalabilidad o estándares de tokenización. Esta fragmentación dificulta la identificación de principios arquitectónicos generales que permitan diseñar plataformas descentralizadas de manera sistemática y fundamentada.

Adicionalmente, una parte importante de los estudios reportados en la literatura describe implementaciones particulares o casos de uso específicos, sin establecer criterios comparativos que faciliten la selección de tecnologías para nuevos proyectos. Como consecuencia, arquitectos de software y desarrolladores suelen enfrentar dificultades al momento de decidir qué componentes tecnológicos adoptar, especialmente cuando deben equilibrar propiedades como descentralización, seguridad, costo, rendimiento e interoperabilidad.

En este contexto, surge la necesidad de disponer de marcos de referencia que integren las principales alternativas arquitectónicas disponibles y permitan comprender sus ventajas, limitaciones y compromisos inherentes. Este tipo de aproximaciones resulta particularmente relevante debido a la rápida evolución del ecosistema blockchain, caracterizado por la aparición constante de nuevas plataformas, protocolos y mecanismos de escalabilidad.

El objetivo de este artículo es presentar una revisión técnica estructurada sobre arquitecturas blockchain para plataformas descentralizadas y proponer un marco de referencia multicapa que facilite el análisis y diseño de este tipo de sistemas. A diferencia de los trabajos centrados exclusivamente en una tecnología específica, la presente investigación adopta una perspectiva arquitectónica integral que considera simultáneamente aspectos de almacenamiento, ejecución, interoperabilidad, seguridad y costos operativos.

Las principales contribuciones de este trabajo son las siguientes:

1. Presentar una revisión técnica estructurada de los principales modelos arquitectónicos utilizados en plataformas blockchain contemporáneas.
2. Proponer una taxonomía de arquitecturas basada en estrategias de almacenamiento, ejecución y gobernanza.
3. Comparar las principales plataformas blockchain empleadas en aplicaciones descentralizadas, incluyendo Ethereum, Polygon, Hyperledger Fabric, Cosmos y Polkadot.
4. Definir una arquitectura de referencia multicapa para plataformas descentralizadas de propósito general.
5. Proponer un conjunto de métricas e indicadores para la evaluación arquitectónica de soluciones blockchain.
6. Ilustrar la aplicación del marco mediante un caso conceptual orientado a la gestión de activos digitales.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. La Sección 2 describe la metodología de revisión técnica utilizada. La Sección 3 presenta el estado del arte. Las Secciones 4 y 5 desarrollan la taxonomía arquitectónica y la comparación de plataformas blockchain. La Sección 6 introduce la arquitectura de referencia propuesta. La Sección 7 presenta el modelo formal de evaluación. La Sección 8 describe un caso ilustrativo de aplicación. Finalmente, las Secciones 9 y 10 presentan la discusión, conclusiones y líneas futuras de investigación.

2. METODOLOGÍA DE REVISIÓN TÉCNICA ESTRUCTURADA

El presente trabajo se desarrolla como una revisión técnica estructurada orientada al análisis de arquitecturas blockchain para plataformas descentralizadas. A diferencia de los estudios experimentales, cuyo propósito consiste en validar hipótesis mediante pruebas empíricas o mediciones controladas, esta investigación busca sintetizar, organizar y comparar el conocimiento disponible en la literatura científica y técnica especializada con el fin de construir un marco de referencia arquitectónico aplicable a sistemas blockchain contemporáneos.

La metodología adoptada toma como referencia los principios propuestos por Kitchenham et al. [16] para revisiones de literatura en ingeniería de software, los estudios de mapeo sistemático descritos por Petersen et al. [17] y las recomendaciones metodológicas para revisiones integradoras planteadas por Snyder [18]. Estas aproximaciones permiten estructurar el análisis de manera transparente, identificar tendencias tecnológicas y construir modelos conceptuales a partir de múltiples fuentes de información.

2.1 Alcance de la revisión

La revisión se concentra en arquitecturas blockchain utilizadas para soportar aplicaciones descentralizadas (dApps), plataformas de activos digitales, mercados NFT y ecosistemas Web3. El análisis incluye componentes relacionados con:

- Infraestructuras blockchain de capa base (Layer 1).
- Soluciones de escalabilidad (Layer 2).
- Sistemas de almacenamiento descentralizado.
- Contratos inteligentes.
- Interoperabilidad entre cadenas.
- Prácticas de seguridad y DevSecOps.
- Modelos arquitectónicos híbridos.

Por el contrario, se excluyen sistemas blockchain orientados exclusivamente a criptomonedas sin capacidad de ejecución de contratos inteligentes, aplicaciones financieras altamente especializadas y estudios centrados únicamente en aspectos criptográficos sin implicaciones arquitectónicas.

2.2 Proceso metodológico

La construcción del marco de referencia se desarrolló en cinco fases consecutivas:

Fase 1. Delimitación del problema: Se identificó como problema central la ausencia de modelos arquitectónicos integradores capaces de relacionar almacenamiento, consenso, ejecución, interoperabilidad, seguridad y experiencia de usuario dentro de una misma estructura conceptual.

Fase 2. Identificación de dimensiones de análisis: A partir de la revisión preliminar se seleccionaron cinco dimensiones arquitectónicas consideradas críticas para el diseño de plataformas descentralizadas:

almacenamiento de datos, infraestructura de ejecución, seguridad, interoperabilidad y costos operativos. Estas dimensiones fueron utilizadas posteriormente como criterios de clasificación y comparación.

Fase 3. Clasificación de tecnologías: Las tecnologías identificadas fueron agrupadas según su función dentro de la arquitectura general del sistema. Este proceso permitió construir taxonomías relacionadas con modelos de almacenamiento, plataformas blockchain, soluciones de escalabilidad y mecanismos de interoperabilidad.

Fase 4. Construcción del marco arquitectónico: Con base en los patrones identificados se formuló una arquitectura de referencia multicapa orientada a plataformas descentralizadas de propósito general. Esta arquitectura integra componentes recurrentes observados en la literatura y en implementaciones ampliamente adoptadas por la industria.

Fase 5. Definición de métricas de evaluación: Finalmente, se definió un conjunto de métricas destinadas a evaluar atributos de calidad arquitectónica tales como escalabilidad, descentralización, seguridad, interoperabilidad y costo total de operación.

2.3 Limitaciones metodológicas

La metodología utilizada presenta algunas limitaciones inherentes. En primer lugar, no corresponde a una revisión sistemática con protocolo PRISMA ni incluye procedimientos de metaanálisis cuantitativo. En segundo lugar, el estudio no realiza validación experimental de las arquitecturas analizadas. Por tanto, los resultados deben interpretarse como un marco conceptual y comparativo destinado a apoyar la toma de decisiones arquitectónicas y no como evidencia empírica definitiva sobre el desempeño de tecnologías específicas.

3. ESTADO DEL ARTE

La evolución de las arquitecturas blockchain ha dado origen a un ecosistema tecnológico diverso en el que convergen mecanismos de consenso, contratos inteligentes, sistemas de almacenamiento distribuido, plataformas de interoperabilidad y soluciones de escalabilidad. Comprender esta evolución resulta fundamental para identificar las tendencias arquitectónicas que sustentan las aplicaciones descentralizadas contemporáneas.

3.1 Evolución de las arquitecturas blockchain

La primera generación de blockchain surge con Bitcoin, propuesto por Nakamoto en 2008 [1] como un sistema monetario electrónico descentralizado basado en una cadena de bloques protegida mediante Proof-of-Work (PoW). Aunque Bitcoin demostró la viabilidad de los registros distribuidos inmutables, su capacidad de programación resultaba limitada para aplicaciones complejas. La aparición de nuevas aplicaciones evidenció el potencial de blockchain más allá de los sistemas monetarios electrónicos [10].

La segunda generación aparece con Ethereum [2], [3], plataforma que incorpora contratos inteligentes programables y una máquina virtual capaz de ejecutar lógica arbitraria. Esta evolución consolidó la visión de blockchain como infraestructura para una nueva generación de aplicaciones distribuidas y economías digitales [9]. También permitió la construcción de aplicaciones descentralizadas sobre una infraestructura compartida y dio origen al ecosistema Web3.

Diversos estudios [4], [5], [6] han señalado que la evolución posterior de blockchain se encuentra condicionada por el denominado trilema blockchain, concepto que describe la dificultad de maximizar simultáneamente descentralización, seguridad y escalabilidad [4], [8]. Este problema ha motivado el

surgimiento de nuevas arquitecturas y mecanismos de consenso destinados a mejorar el rendimiento sin comprometer la integridad del sistema.

3.2 Arquitecturas para activos digitales y NFT

Los tokens no fungibles representan uno de los casos de uso más relevantes de blockchain en la actualidad. Los estándares ERC-721 y ERC-1155 [14], [15] introdujeron mecanismos interoperables para representar activos digitales únicos o semifungibles mediante contratos inteligentes.

Investigaciones recientes [11], [13] han mostrado que el valor de los NFT no depende únicamente de la tokenización de un activo, sino también de la capacidad de demostrar autenticidad, procedencia y propiedad verificable. En consecuencia, las arquitecturas NFT modernas combinan contratos inteligentes, almacenamiento descentralizado e interfaces de usuario especializadas.

Nadini et al. [12] identificaron la consolidación de mercados digitales basados en NFT como uno de los fenómenos más significativos dentro del ecosistema blockchain reciente, destacando la importancia de mecanismos interoperables y arquitecturas escalables para soportar el crecimiento de estas plataformas.

3.3 Almacenamiento descentralizado

Uno de los principales desafíos de las plataformas blockchain radica en el almacenamiento eficiente de información. Debido al elevado costo del almacenamiento on-chain, diversas investigaciones proponen modelos híbridos que combinan blockchain con sistemas externos de persistencia.

IPFS [22] constituye actualmente una de las soluciones más utilizadas. Su modelo de direccionamiento por contenido permite verificar la integridad de la información mediante identificadores criptográficos únicos. Sin embargo, diversos estudios han señalado que la disponibilidad del contenido depende de mecanismos complementarios de persistencia.

Filecoin [23] incorpora incentivos económicos para garantizar almacenamiento distribuido, mientras que Arweave [24] propone un modelo de permanencia basado en pagos únicos. Estas tecnologías han contribuido a consolidar arquitecturas híbridas donde blockchain conserva únicamente referencias verificables y los contenidos se almacenan fuera de la cadena.

3.4 Escalabilidad y soluciones Layer 2

La limitada capacidad transaccional de las redes blockchain tradicionales ha impulsado el desarrollo de mecanismos de escalabilidad. Las soluciones Layer 2 [28], [29] constituyen actualmente una de las líneas de investigación más activas dentro del ecosistema.

Los optimistic rollups [30] permiten ejecutar transacciones fuera de la cadena principal y publicar únicamente resúmenes verificables en Ethereum. Por su parte, los ZK-rollups [29], [31] emplean pruebas criptográficas de conocimiento cero para demostrar la validez de las transacciones sin necesidad de ejecutar nuevamente el proceso completo.

Diversos estudios sugieren que los rollups representan una de las estrategias más prometedoras para aumentar el rendimiento manteniendo niveles elevados de seguridad.

3.5 Interoperabilidad entre cadenas

La proliferación de ecosistemas blockchain ha generado la necesidad de mecanismos que permitan intercambiar activos e información entre redes heterogéneas. Este problema ha impulsado el desarrollo de soluciones de interoperabilidad como Cosmos [20], Polkadot [21] y diversos protocolos de puentes blockchain [19].

Cosmos propone una arquitectura basada en zonas independientes conectadas mediante el protocolo Inter-Blockchain Communication (IBC). Polkadot adopta un modelo de cadena de relevo que permite compartir seguridad entre múltiples parachains especializadas.

Aunque estas propuestas han ampliado significativamente las posibilidades de comunicación entre ecosistemas, la interoperabilidad continúa siendo uno de los principales desafíos abiertos de la industria debido a problemas relacionados con seguridad, gobernanza y complejidad operativa.

3.6 DevSecOps y seguridad en blockchain

La seguridad constituye un requisito fundamental para cualquier arquitectura blockchain. Las vulnerabilidades en contratos inteligentes [25], [26], [27], [30] han ocasionado pérdidas económicas significativas, motivando el desarrollo de metodologías DevSecOps especializadas para sistemas descentralizados.

Las prácticas más utilizadas incluyen análisis estático de código, auditorías externas, pruebas de integración, análisis de dependencias y monitoreo continuo de vulnerabilidades. Herramientas como Slither, MythX y OpenZeppelin [25] se han convertido en componentes habituales dentro de los procesos de aseguramiento de calidad para contratos inteligentes.

La literatura reciente coincide en que la seguridad debe abordarse desde una perspectiva integral que considere simultáneamente infraestructura, contratos inteligentes, almacenamiento externo y componentes de integración.

4. TAXONOMÍA DE ARQUITECTURAS BLOCKCHAIN PARA PLATAFORMAS DESCENTRALIZADAS

La diversidad de tecnologías blockchain disponibles actualmente ha generado un ecosistema caracterizado por múltiples enfoques arquitectónicos, cada uno diseñado para resolver problemas específicos relacionados con escalabilidad, descentralización, interoperabilidad, seguridad y costo operativo. Como consecuencia, la selección de una arquitectura adecuada representa una de las decisiones más relevantes durante el diseño de plataformas descentralizadas.

A partir de la revisión realizada en las secciones anteriores, se propone una taxonomía arquitectónica tomando como base trabajos previos sobre clasificación de arquitecturas blockchain [6], [7] y basada en tres dimensiones fundamentales: 1) Estrategia de almacenamiento de datos, 2) Infraestructura de ejecución y consenso y 3) Modelo de gobernanza y confianza. Estas dimensiones permiten clasificar las principales arquitecturas blockchain utilizadas en aplicaciones contemporáneas y facilitan la comparación entre alternativas tecnológicas.

4.1 Taxonomía según la estrategia de almacenamiento

La ubicación de los datos dentro de una plataforma blockchain determina directamente aspectos relacionados con costo, rendimiento, privacidad y verificabilidad. Desde esta perspectiva, pueden identificarse tres modelos arquitectónicos principales.

Arquitecturas On-Chain: Las arquitecturas on-chain almacenan la totalidad de la información relevante directamente dentro de la blockchain [6], [22]. Tanto los estados de la aplicación como los datos asociados a las transacciones permanecen protegidos por los mecanismos de consenso de la red. Este enfoque proporciona el máximo nivel de verificabilidad e inmutabilidad, aunque presenta importantes limitaciones relacionadas con costos de almacenamiento, rendimiento y privacidad.

Arquitecturas Off-Chain: Las arquitecturas off-chain almacenan la información principal fuera de la blockchain utilizando sistemas externos de persistencia [22], [23], [24]. Estos sistemas pueden ser centralizados (AWS S3, Google Cloud Storage) o descentralizados (IPFS, Filecoin, Arweave). La blockchain conserva únicamente referencias o identificadores necesarios para verificar la integridad de los datos almacenados externamente. Este modelo reduce significativamente los costos operativos y mejora la escalabilidad.

Arquitecturas Híbridas: Las arquitecturas híbridas combinan almacenamiento on-chain y off-chain [7], [22]. Este modelo constituye actualmente el patrón predominante en aplicaciones Web3 debido a que permite equilibrar verificabilidad, rendimiento y costos. En una implementación típica, la blockchain almacena propiedad y reglas críticas, los metadatos se almacenan en IPFS, los archivos multimedia permanecen en sistemas descentralizados de almacenamiento y una base de datos tradicional indexa la información para acelerar búsquedas.

Tabla 1: Clasificación de arquitecturas según el almacenamiento.

Table 1: Classification of architectures according to storage.

Modelo	Ubicación de datos	Verificabilidad	Escalabilidad	Costo	Complejidad
On-Chain	Blockchain	Muy alta	Baja	Muy alto	Baja
Off-Chain	Sistemas externos	Media	Alta	Bajo	Media
Híbrido	Blockchain + almacenamiento externo	Alta	Alta	Medio	Alta

Fuente: elaboración propia.

4.2 Taxonomía según la infraestructura de ejecución

La segunda dimensión de clasificación corresponde a la infraestructura responsable de ejecutar contratos inteligentes y procesar transacciones.

Layer 1: Constituyen blockchains independientes que poseen mecanismo de consenso propio, validadores propios, modelo económico propio y seguridad autónoma [2], [3]. Ejemplos: Ethereum, Solana, Avalanche y Flow. Su principal ventaja es la independencia operativa. Sin embargo, suelen enfrentar limitaciones relacionadas con escalabilidad y costos.

Layer 2: Las soluciones Layer 2 buscan incrementar la capacidad transaccional utilizando la seguridad de una blockchain base. Las principales categorías son Optimistic Rollups (Arbitrum y Optimism) y ZK-Rollups (zkSync, StarkNet y Polygon zkEVM). Estas arquitecturas permiten aumentar significativamente el throughput manteniendo altos niveles de seguridad.

Sidechains: Las sidechains operan como redes independientes conectadas a una blockchain principal mediante puentes. Ejemplos: Polygon PoS y Gnosis Chain. Su principal ventaja es el bajo costo operativo, aunque la seguridad depende de su propio conjunto de validadores.

Arquitecturas Modulares: Las arquitecturas modulares separan funciones tradicionalmente integradas en una blockchain monolítica [29], [31]. Estas funciones incluyen consenso, disponibilidad de datos, ejecución y liquidación. Ejemplos: Celestia, EigenLayer y Rollups soberanos. Diversos autores consideran que este enfoque representa una de las principales direcciones futuras de evolución del ecosistema blockchain.

4.3 Taxonomía según el modelo de confianza

Desde la perspectiva de gobernanza y control de acceso, las arquitecturas blockchain pueden clasificarse como públicas, permissioned o híbridas.

Blockchain pública: Permite la participación abierta de cualquier usuario [1], [2]. Ejemplos: Ethereum, Bitcoin y Solana. Ventajas: alta descentralización y resistencia a censura. Desventajas: menor control institucional y costos variables.

Blockchain permissioned: Suelen emplear mecanismos de consenso basados en replicación tolerante a fallos bizantinos (BFT), priorizando rendimiento y control organizacional sobre descentralización abierta [32], [33], [34]. Ejemplos: Hyperledger Fabric y Quorum. Ventajas: mayor privacidad y control organizacional. Desventajas: menor descentralización.

Blockchain híbrida: Combina componentes públicos y privados. Los datos sensibles permanecen en entornos controlados mientras los eventos críticos se registran en redes públicas. Este modelo resulta especialmente atractivo para organizaciones que deben cumplir regulaciones de privacidad sin renunciar completamente a la verificabilidad blockchain.

Tabla 2. Clasificación según modelo de confianza

Tabla 2. Classification according to trust model

Tipo	Participación	Descentralización	Privacidad	Casos de uso
Pública	Abierta	Alta	Baja	NFT, DeFi, Web3
Permissioned	Restringida	Media-Baja	Alta	Consortios empresariales
Híbrida	Mixta	Media	Media-Alta	Gobierno, salud, trazabilidad

Fuente: elaboración propia.

4.4 Síntesis de la taxonomía propuesta

La taxonomía desarrollada permite observar que las plataformas blockchain modernas no pueden caracterizarse adecuadamente mediante una única dimensión. Una misma solución puede combinar almacenamiento híbrido, ejecución sobre Layer 2 y mecanismos de gobernanza parcialmente permissioned.

Por esta razón, el diseño arquitectónico debe entenderse como un proceso de selección y combinación de componentes, más que como la adopción de una tecnología específica.

5. COMPARACIÓN DE PLATAFORMAS BLOCKCHAIN PARA APLICACIONES DESCENTRALIZADAS

La selección de una plataforma blockchain constituye una de las decisiones arquitectónicas más importantes durante el diseño de aplicaciones descentralizadas. Esta decisión condiciona aspectos fundamentales como el modelo de seguridad, la capacidad de escalabilidad, la interoperabilidad, los costos operativos, la experiencia de usuario y la complejidad de desarrollo.

Aunque frecuentemente se busca identificar una plataforma superior a las demás, la evidencia reportada en la literatura indica que no existe una solución universalmente óptima. Cada tecnología ha sido diseñada bajo supuestos, prioridades y modelos de gobernanza diferentes. En consecuencia, la elección de una infraestructura blockchain debe responder a los requisitos específicos del sistema que se desea construir.

5.1 Criterios de comparación

La comparación se realiza utilizando seis dimensiones consideradas críticas para el diseño de plataformas descentralizadas:

Seguridad: Capacidad de la infraestructura para resistir ataques, preservar la integridad de los datos y garantizar la correcta ejecución de contratos inteligentes.

Descentralización: Grado en que el control de la red se distribuye entre múltiples participantes independientes. La relación entre seguridad, descentralización y rendimiento depende en gran medida del mecanismo de consenso adoptado por cada plataforma [8].

Escalabilidad: Capacidad para procesar transacciones y ejecutar contratos inteligentes de manera eficiente bajo condiciones de alta demanda.

Interoperabilidad: Facilidad para intercambiar activos, información y servicios con otros ecosistemas blockchain.

Costo Operativo: Costos asociados al despliegue y ejecución de contratos inteligentes, almacenamiento y procesamiento de transacciones.

Complejidad Arquitectónica: Esfuerzo requerido para diseñar, desplegar y mantener aplicaciones sobre la infraestructura seleccionada.

5.2 Comparación de plataformas blockchain

Ethereum: Constituye actualmente la plataforma de referencia para aplicaciones descentralizadas. Su ecosistema posee la mayor cantidad de desarrolladores, herramientas, estándares y aplicaciones desplegadas [2], [3], [4]. Las principales fortalezas de Ethereum son: alto nivel de descentralización, amplio ecosistema de herramientas, compatibilidad con estándares ampliamente adoptados y seguridad respaldada por una gran comunidad de validadores. Sin embargo, presenta limitaciones relacionadas con costos de transacción

elevados durante períodos de congestión, capacidad limitada de procesamiento y latencias mayores respecto a redes especializadas.

Hyperledger Fabric: Adopta un enfoque completamente diferente al de las blockchains públicas. Se trata de una plataforma permissioned diseñada para entornos empresariales donde los participantes son conocidos y autorizados [32], [33], [34]. Sus principales ventajas incluyen privacidad de datos, control organizacional, alto rendimiento transaccional y ausencia de costos asociados a criptomonedas públicas. No obstante, presenta limitaciones significativas para aplicaciones abiertas como menor descentralización, dependencia de entidades administradoras, escasa integración con ecosistemas Web3 públicos y menor compatibilidad con mercados NFT y aplicaciones DeFi.

Cosmos: Propone un enfoque basado en soberanía blockchain. Cada aplicación puede desplegar su propia cadena especializada utilizando Cosmos SDK y conectarse a otras cadenas mediante el protocolo Inter-Blockchain Communication (IBC) [20]. Las ventajas más relevantes son alta flexibilidad arquitectónica, interoperabilidad nativa, capacidad de personalización y escalabilidad horizontal. Sin embargo, esta libertad implica desafíos importantes como mayor complejidad operacional, necesidad de gestionar seguridad propia, costos de mantenimiento superiores y requerimientos especializados de infraestructura.

Polkadot: Introduce una arquitectura basada en una Relay Chain compartida y múltiples parachains especializadas [21]. Este modelo permite compartir seguridad entre cadenas, facilitar interoperabilidad y optimizar casos de uso específicos. No obstante, el desarrollo de una parachain implica complejidad técnica elevada, dependencia de la infraestructura del ecosistema y procesos de gobernanza más sofisticados.

Polygon PoS: Surge como una alternativa orientada a mejorar la experiencia de usuario dentro del ecosistema Ethereum [29]. Sus fortalezas principales son compatibilidad total con la EVM, costos de transacción reducidos, confirmaciones rápidas y amplia adopción en mercados NFT. Sin embargo, la seguridad depende de un conjunto de validadores propio y no directamente del consenso principal de Ethereum.

Rollups (Optimistic y ZK): Los rollups constituyen una de las estrategias más prometedoras para escalar Ethereum manteniendo niveles elevados de seguridad [28], [29], [31]. Sus ventajas incluyen herencia parcial o total de la seguridad de Ethereum, reducción significativa de costos y mayor capacidad de procesamiento. Las principales limitaciones se relacionan con complejidad técnica, dependencia de infraestructura adicional y madurez desigual entre implementaciones

Tabla 3: Comparación arquitectónica de plataformas blockchain.

Table 3: Architectural comparison of blockchain platforms.

Plataforma	Seguridad	Descentralización	Escalabilidad	Interoperabilidad	Costo	Complejidad
Ethereum	Muy alta	Muy alta	Media	Alta	Alto	Media
Hyperledger Fabric	Alta	Baja	Alta	Baja	Bajo	Media
Cosmos	Alta	Media	Alta	Muy alta	Medio	Alta
Polkadot	Alta	Media-Alta	Alta	Muy alta	Medio	Alta
Polygon PoS	Alta	Media	Alta	Alta	Bajo	Baja
Optimistic Rollups	Muy alta	Alta	Muy alta	Alta	Bajo	Alta
ZK-Rollups	Muy alta	Alta	Muy alta	Alta	Bajo	Muy alta

Fuente: elaboración propia.

5.3 Discusión arquitectónica

La comparación realizada permite concluir que la elección de una infraestructura blockchain no debe fundamentarse únicamente en métricas de rendimiento o costos operativos. Aspectos como gobernanza, seguridad, interoperabilidad y complejidad de mantenimiento tienen un impacto directo sobre la sostenibilidad del sistema a largo plazo. Desde esta perspectiva, Ethereum continúa representando la referencia principal para aplicaciones que priorizan seguridad y adopción. Hyperledger Fabric resulta apropiado para entornos corporativos controlados. Cosmos y Polkadot ofrecen elevados niveles de flexibilidad e interoperabilidad, aunque a costa de una mayor complejidad operacional. Por su parte, Polygon PoS y las soluciones Layer 2 constituyen alternativas particularmente atractivas para aplicaciones orientadas a usuarios finales.

6. ARQUITECTURA DE REFERENCIA MULTICAPA PARA PLATAFORMAS DESCENTRALIZADAS

A partir de la revisión de la literatura, la taxonomía propuesta y la comparación de infraestructuras blockchain desarrolladas en las secciones anteriores, se plantea una arquitectura de referencia multicapa orientada al diseño de plataformas descentralizadas de propósito general. El objetivo de esta arquitectura no es definir una implementación específica ni establecer una solución única para todos los escenarios. Por el contrario, se propone como un marco conceptual que permita organizar responsabilidades, identificar componentes críticos y facilitar la toma de decisiones arquitectónicas durante el desarrollo de aplicaciones basadas en blockchain.

6.1 Principios arquitectónicos

La arquitectura propuesta se fundamenta en patrones arquitectónicos identificados en investigaciones previas sobre sistemas blockchain [6], [7]:

Separación de responsabilidades: Cada capa debe encargarse de funciones claramente definidas, reduciendo el acoplamiento entre componentes y facilitando la evolución independiente de cada módulo.

Descentralización selectiva: No toda la información requiere almacenarse en blockchain. Los elementos que representan propiedad, autenticidad o reglas de negocio críticas deben mantenerse on-chain, mientras que los datos de alto volumen pueden almacenarse mediante mecanismos externos verificables [22], [23], [24].

Interoperabilidad: La arquitectura debe permitir la integración con diferentes redes blockchain, proveedores de almacenamiento descentralizado y servicios externos sin depender exclusivamente de una tecnología específica [19], [20], [21].

Seguridad por diseño: La seguridad debe incorporarse desde las etapas iniciales del diseño arquitectónico, incluyendo contratos inteligentes, infraestructura, almacenamiento y procesos operacionales [25], [26], [27].

Escalabilidad modular: Los componentes deben poder evolucionar independientemente para responder a incrementos en volumen de usuarios, transacciones o contenido almacenado.

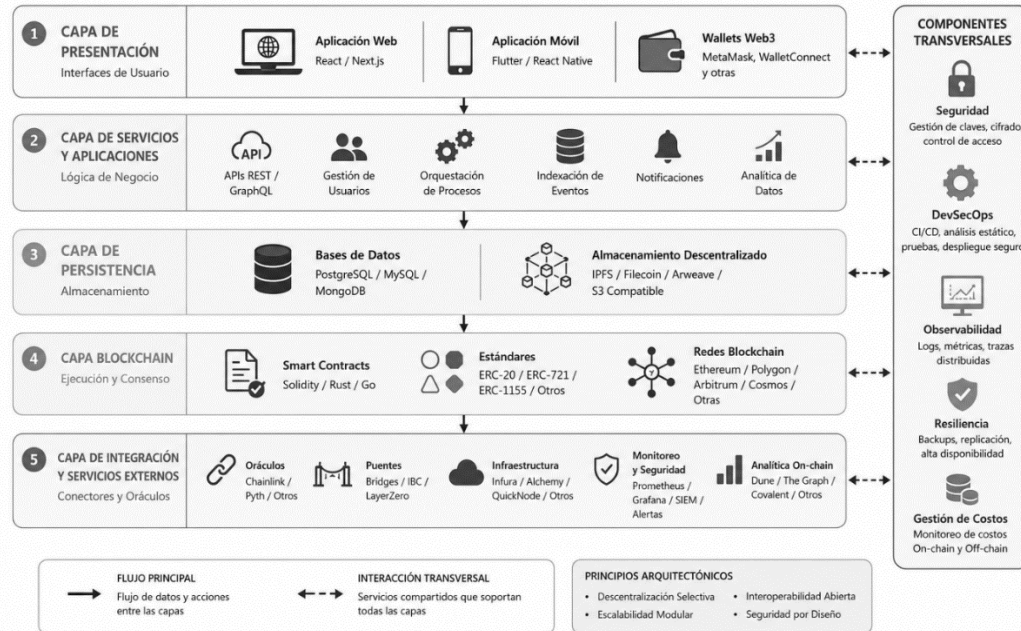
6.2 Vista general de la arquitectura

La arquitectura se organiza en cinco capas principales:

1. Capa de Presentación
2. Capa de Servicios y Aplicaciones
3. Capa de Persistencia
4. Capa Blockchain
5. Capa de Integración y Servicios Externos

Figura 1: Arquitectura de referencia multicapa para plataformas descentralizadas.

Figure 1: Multi-layered reference architecture for decentralized platforms.



Fuente: Elaboración propia.

6.3 Capa de Presentación

La capa de presentación constituye el punto de interacción entre los usuarios y la plataforma descentralizada. Su objetivo principal consiste en abstraer la complejidad técnica inherente a blockchain y proporcionar una experiencia de usuario comparable a la de aplicaciones web tradicionales. Las responsabilidades de esta capa incluyen registro y autenticación de usuarios, conexión de billeteras digitales, visualización de activos digitales, gestión de formularios, firma de transacciones y seguimiento del estado de operaciones blockchain. Las tecnologías comúnmente utilizadas incluyen React, Next.js, Vue.js, Angular, Flutter y React Native, así como bibliotecas especializadas como Ethers.js, Web3.js, WalletConnect y MetaMask SDK.

6.4 Capa de Servicios y Aplicaciones

La capa de servicios actúa como intermediaria entre la interfaz de usuario y la infraestructura descentralizada. Su propósito consiste en coordinar procesos, gestionar autenticación complementaria, optimizar consultas y facilitar la integración con sistemas externos. Entre sus responsabilidades se encuentran gestión de usuarios, orquestación de flujos de negocio, validación de solicitudes, indexación de eventos blockchain, exposición de APIs REST o GraphQL, y caché y optimización de consultas. Las tecnologías más utilizadas son Node.js, Express, NestJS, FastAPI, Spring Boot y Go.

6.5 Capa de Persistencia

La capa de persistencia gestiona el almacenamiento permanente de información. Debido a las limitaciones de costo y rendimiento del almacenamiento on-chain, esta capa suele combinar múltiples tecnologías:

Persistencia operacional: Incluye bases de datos relacionales o documentales utilizadas para perfiles de usuario, índices de búsqueda, registros operativos y analítica. Ejemplos: PostgreSQL, MySQL y MongoDB.

Persistencia descentralizada: Destinada a metadatos NFT, documentos digitales, imágenes, audio y video. Las tecnologías más utilizadas son IPFS, Filecoin y Arweave.

Persistencia verificable: La blockchain conserva únicamente referencias criptográficas que permiten validar la integridad de los contenidos almacenados externamente.

6.6 Capa Blockchain

La capa blockchain constituye el núcleo descentralizado de la arquitectura. Su función consiste en garantizar propiedad digital, trazabilidad, transparencia, inmutabilidad y ejecución confiable de reglas de negocio. Esta capa puede desplegarse sobre diferentes infraestructuras como Ethereum, Polygon, Arbitrum, Optimism, zkSync, Cosmos y Polkadot. Dependiendo de los requisitos del proyecto, los componentes principales incluyen contratos inteligentes (que implementan reglas de negocio, gestión de activos, mecanismos de transferencia, gobernanza y regalías), tokens (que pueden seguir estándares como ERC-20, ERC-721, ERC-1155 y EIP-2981) y eventos blockchain que permiten sincronizar componentes externos mediante mecanismos de indexación.

6.7 Capa de Integración y Servicios Externos

Las plataformas descentralizadas modernas rara vez operan de forma aislada. Por ello, la arquitectura incorpora una capa destinada a integraciones externas. Entre las más frecuentes se encuentran oráculos (Chainlink, API3), servicios RPC (Infura, Alchemy, QuickNode), sistemas de monitoreo y bridges para interoperabilidad entre ecosistemas blockchain.

6.8 Consideraciones de seguridad

La seguridad debe abordarse transversalmente en todas las capas de la arquitectura. Las principales prácticas recomendadas incluyen auditorías de contratos inteligentes, análisis estático de código, gestión segura de secretos, cifrado de comunicaciones, monitoreo continuo, control de acceso basado en roles, protección contra ataques de denegación de servicio y validación de dependencias externas. Adicionalmente, se recomienda adoptar principios DevSecOps para integrar controles de seguridad dentro del ciclo completo de desarrollo.

6.9 Ventajas del enfoque multicapa

La arquitectura propuesta ofrece varias ventajas respecto a diseños monolíticos o completamente centralizados: permite separar claramente responsabilidades, facilita la sustitución de tecnologías específicas, reduce costos operativos mediante almacenamiento híbrido, mejora la experiencia de usuario, incrementa la interoperabilidad, permite adoptar nuevas soluciones Layer 2 sin rediseñar completamente la plataforma y facilita la evolución futura hacia arquitecturas modulares.

7. MODELO FORMAL DE EVALUACIÓN ARQUITECTÓNICA

La selección de una arquitectura blockchain involucra múltiples criterios que frecuentemente entran en conflicto. Con el propósito de proporcionar una base objetiva para el análisis comparativo de arquitecturas blockchain, se propone un modelo de evaluación fundamentado en cinco dimensiones principales: escalabilidad, rendimiento, descentralización, interoperabilidad y costos operativos.

7.1 Evaluación de Escalabilidad

La escalabilidad representa la capacidad de una infraestructura blockchain para procesar un número creciente de transacciones sin degradar significativamente su desempeño. Uno de los indicadores más utilizados es el número de transacciones procesadas por unidad de tiempo:

$$TPS = \frac{N_{tx}}{\Delta t}$$

donde TPS representa las transacciones por segundo, N_{tx} corresponde al número total de transacciones procesadas y Δt representa el intervalo de tiempo analizado [28], [29].

7.2 Evaluación de Latencia

La latencia mide el tiempo requerido para que una transacción sea confirmada por la red y considerada irreversible. Puede expresarse mediante:

$$L = t_{submit} + t_{confirm}$$

donde t_{submit} corresponde al instante de envío, $t_{confirm}$ representa el momento de confirmación. La reducción de la latencia constituye un objetivo prioritario en aplicaciones orientadas a usuarios finales.

7.3 Evaluación del Costo Transaccional

Uno de los factores más relevantes para la adopción de plataformas blockchain es el costo asociado a la ejecución de contratos inteligentes y transacciones [28].

El costo individual de una transacción puede estimarse mediante:

$$C_{tx} = C_{used} \times C_{price} \times P_t^{USD}$$

donde C_{tx} es el costo monetario de una transacción blockchain, C_{used} es la cantidad de gas consumido, C_{price} es el precio del gas en el token nativo de la red y P_t^{USD} es el precio del token en dólares estadounidenses.

7.4 Función de Costo Total de Operación

Las plataformas descentralizadas modernas dependen de múltiples servicios complementarios además de la propia blockchain. La función propuesta es:

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_{tx,i} + C_{storage} + C_{rpc} + C_{backend} + C_{security} + C_{maintenance}$$

donde, C_{total} costo total de operación de la plataforma, C_{tx} costos asociados a las transacciones blockchain (gas), $C_{storage}$ costos de almacenamiento descentralizado (IPFS, Filecoin, Arweave), C_{rpc} costos de proveedores RPC (Infura, Alchemy, QuickNode), $C_{backend}$ costos de infraestructura backend y bases de datos, $C_{security}$ costos de auditorías, monitoreo y herramientas de seguridad, $C_{maintenance}$ costos de mantenimiento, actualizaciones y soporte.

Tabla 4: Dimensiones de evaluación arquitectónica.

Tabla 4: Dimensions of architectural evaluation.

Dimensión	Indicador principal	Objetivo
Escalabilidad	TPS	Maximizar
Rendimiento	Latencia	Minimizar
Costos	Costo total	Minimizar

Fuente: elaboración propia.

7.9 Discusión del modelo

El modelo propuesto no pretende reemplazar procedimientos experimentales ni metodologías formales de benchmarking. Su objetivo consiste en proporcionar un marco conceptual que facilite la comparación preliminar de alternativas arquitectónicas durante etapas tempranas de diseño.

8. Caso Ilustrativo de Aplicación

Con el propósito de demostrar la utilidad práctica del marco arquitectónico propuesto, se presenta un caso ilustrativo orientado al diseño conceptual de una plataforma descentralizada para la gestión de activos digitales.

8.1 Descripción del escenario

Se considera una plataforma digital destinada a gestionar activos digitales únicos asociados a contenidos multimedia, certificados electrónicos, documentos verificables o representaciones digitales de bienes físicos. Los usuarios pueden registrar activos, consultar información asociada, transferir propiedad y verificar autenticidad mediante mecanismos basados en blockchain. Los requisitos funcionales principales incluyen registro de activos digitales, gestión de metadatos, verificación de autenticidad, transferencia de propiedad, consulta de historial de transacciones e integración con billeteras digitales.

8.2 Aplicación de la arquitectura de referencia

Utilizando el marco arquitectónico definido en la Sección 6, la solución puede estructurarse mediante cinco capas principales:

Capa de Presentación: La interacción con los usuarios se realiza mediante una aplicación web desarrollada utilizando tecnologías modernas de frontend. Esta capa permite visualizar activos digitales, consultar información histórica y firmar transacciones utilizando billeteras compatibles con estándares Web3.

Capa de Servicios: La lógica de aplicación se implementa mediante servicios encargados de coordinar autenticación, indexación de eventos blockchain, validación de solicitudes y exposición de interfaces de programación para clientes externos.

Capa de Persistencia: Los metadatos y contenidos multimedia asociados a los activos digitales pueden almacenarse utilizando una combinación de bases de datos tradicionales e infraestructura descentralizada basada en IPFS o tecnologías equivalentes.

Capa Blockchain: La propiedad digital y las reglas de negocio críticas se implementan mediante contratos inteligentes desplegados sobre una red blockchain compatible con la Máquina Virtual de Ethereum (EVM).

Capa de Integración: La arquitectura incorpora servicios RPC, mecanismos de monitoreo y proveedores de infraestructura necesarios para facilitar la operación continua de la plataforma.

8.3 Selección de infraestructura blockchain

A partir de la comparación presentada en la Sección 5, una organización podría considerar distintas alternativas de despliegue. Si la prioridad principal corresponde a la seguridad y adopción del ecosistema, Ethereum constituye una opción adecuada. En escenarios donde el costo de transacción representa una restricción significativa, redes compatibles como Polygon o soluciones Layer 2 pueden ofrecer una mejor relación entre costo y rendimiento. Organizaciones que requieren mayores niveles de privacidad podrían optar por infraestructuras permissioned como Hyperledger Fabric, mientras que aplicaciones multicadena podrían beneficiarse de arquitecturas basadas en Cosmos o Polkadot.

8.4 Evaluación conceptual mediante el modelo propuesto

El modelo de evaluación desarrollado en la Sección 7 permite analizar distintas alternativas arquitectónicas antes de iniciar procesos de implementación. Por ejemplo, una organización puede comparar varias infraestructuras utilizando criterios relacionados con capacidad transaccional (TPS), latencia de confirmación, costo total de operación, nivel de descentralización, interoperabilidad y controles de seguridad. La utilización de estos indicadores facilita la toma de decisiones arquitectónicas fundamentadas y reduce el riesgo asociado a la adopción de tecnologías emergentes.

8.5 Lecciones derivadas del caso ilustrativo

El análisis realizado permite identificar tres conclusiones relevantes. En primer lugar, las arquitecturas híbridas ofrecen actualmente el mejor equilibrio entre verificabilidad, escalabilidad y costo operativo para aplicaciones descentralizadas de propósito general. En segundo lugar, la selección de la infraestructura blockchain debe responder a los requisitos específicos de cada organización y no únicamente a métricas aisladas de rendimiento. Finalmente, la incorporación de mecanismos de evaluación arquitectónica desde las etapas tempranas de diseño contribuye a mejorar la sostenibilidad técnica y económica de las soluciones blockchain a largo plazo.

9. DISCUSIÓN

La evolución de las tecnologías blockchain durante la última década ha dado lugar a un ecosistema altamente heterogéneo caracterizado por múltiples paradigmas arquitectónicos, mecanismos de consenso, estrategias de almacenamiento y modelos de interoperabilidad. Como consecuencia, la selección de una infraestructura

adecuada para aplicaciones descentralizadas se ha convertido en una tarea considerablemente más compleja que durante las primeras etapas de adopción de blockchain.

Los resultados obtenidos en esta revisión evidencian que no existe una arquitectura universalmente superior para todos los escenarios de aplicación. Por el contrario, cada alternativa tecnológica presenta fortalezas y limitaciones que deben analizarse en función de los requisitos funcionales y no funcionales del sistema.

Uno de los hallazgos más relevantes es la consolidación de arquitecturas híbridas como patrón predominante en aplicaciones descentralizadas modernas [7], [22], [23], [24]. Mientras que las primeras generaciones de sistemas blockchain perseguían modelos completamente on-chain, las limitaciones asociadas al costo de almacenamiento, escalabilidad y experiencia de usuario han impulsado la adopción de enfoques que combinan blockchain con componentes tradicionales de software e infraestructuras de almacenamiento descentralizado.

9.1 Seguridad versus rendimiento

Uno de los principales compromisos arquitectónicos identificados corresponde a la relación entre seguridad y rendimiento [4], [28], [29]. Las redes blockchain altamente descentralizadas, como Ethereum, ofrecen elevados niveles de seguridad gracias a la participación masiva de validadores y a la robustez de sus mecanismos de consenso. Sin embargo, esta seguridad implica costos operativos superiores y una capacidad transaccional limitada en comparación con infraestructuras más especializadas. Plataformas diseñadas para maximizar rendimiento pueden alcanzar miles de transacciones por segundo, aunque frecuentemente introducen supuestos adicionales relacionados con gobernanza, centralización parcial o dependencia de componentes externos.

9.2 Descentralización versus experiencia de usuario

Otro hallazgo relevante corresponde al conflicto existente entre descentralización y experiencia de usuario. Las aplicaciones completamente descentralizadas suelen requerir que los usuarios gestionen billeteras, claves criptográficas y procesos de firma digital. Aunque este modelo maximiza el control individual sobre los activos, también introduce barreras significativas para usuarios no especializados. Como consecuencia, muchas plataformas adoptan soluciones híbridas que incorporan servicios de autenticación, indexación y recuperación de información ejecutados fuera de la blockchain.

9.3 Interoperabilidad versus complejidad arquitectónica

La interoperabilidad ha emergido como uno de los principales desafíos de la siguiente generación de aplicaciones blockchain [19], [20], [21]. La proliferación de ecosistemas independientes ha impulsado el desarrollo de protocolos multcadena, bridges y soluciones especializadas para intercambio de activos entre redes heterogéneas. No obstante, cada componente adicional de interoperabilidad incrementa la complejidad arquitectónica y amplía la superficie de ataque del sistema. Diversos incidentes de seguridad ocurridos durante los últimos años han demostrado que los puentes blockchain representan uno de los componentes más vulnerables dentro de las arquitecturas multcadena.

9.4 Implicaciones para arquitectos de software

Los resultados obtenidos sugieren que el diseño de plataformas blockchain requiere una aproximación diferente a la utilizada tradicionalmente en sistemas empresariales convencionales. Mientras que las arquitecturas de software tradicionales suelen optimizar atributos como rendimiento, mantenibilidad y

disponibilidad, las aplicaciones blockchain deben incorporar además consideraciones relacionadas con descentralización, gobernanza distribuida, incentivos económicos y verificabilidad criptográfica. El modelo de evaluación propuesto en este trabajo constituye un primer paso en esa dirección, proporcionando una estructura conceptual para analizar arquitecturas blockchain desde múltiples dimensiones.

9.5 Limitaciones del estudio

A pesar de las contribuciones presentadas, esta investigación presenta algunas limitaciones. En primer lugar, el estudio se fundamenta en una revisión técnica estructurada y no incluye validación experimental de las arquitecturas analizadas. En segundo lugar, el ecosistema blockchain evoluciona rápidamente, por lo que nuevas tecnologías podrían modificar algunas de las conclusiones presentadas. Finalmente, los indicadores propuestos para la evaluación arquitectónica deben interpretarse como herramientas de apoyo conceptual y no como sustitutos de procedimientos formales de benchmarking o auditorías especializadas.

10. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Este artículo presentó una revisión técnica estructurada sobre arquitecturas blockchain para plataformas descentralizadas, integrando resultados provenientes de la literatura científica, estándares tecnológicos y documentación especializada con el propósito de construir un marco de referencia para el análisis y diseño de aplicaciones basadas en blockchain.

La revisión realizada permitió identificar una evolución progresiva desde arquitecturas monolíticas centradas exclusivamente en blockchain hacia modelos híbridos que combinan contratos inteligentes, almacenamiento descentralizado, servicios de integración y componentes tradicionales de software. Esta tendencia refleja la necesidad de equilibrar atributos frecuentemente contrapuestos como seguridad, escalabilidad, descentralización y costo operativo.

Como primera contribución, se desarrolló una taxonomía arquitectónica basada en estrategias de almacenamiento, infraestructura de ejecución y modelos de confianza. Esta clasificación facilita la comprensión de las principales alternativas tecnológicas disponibles y proporciona una base conceptual para comparar diferentes enfoques de diseño.

Como segunda contribución, se realizó un análisis comparativo de plataformas blockchain representativas, incluyendo Ethereum, Hyperledger Fabric, Cosmos, Polkadot, Polygon y diversas soluciones Layer 2. Los resultados muestran que ninguna infraestructura resulta óptima para todos los escenarios, confirmando que la selección tecnológica debe realizarse en función de los requisitos específicos de cada aplicación.

Como tercera contribución, se propuso una arquitectura de referencia multicapa orientada a plataformas descentralizadas de propósito general. Esta arquitectura organiza responsabilidades en capas especializadas e integra principios de descentralización selectiva, interoperabilidad, seguridad por diseño y escalabilidad modular.

Como cuarta contribución, se formuló un modelo conceptual de evaluación arquitectónica que incorpora métricas relacionadas con rendimiento, costos, descentralización, interoperabilidad y seguridad. Este modelo permite apoyar procesos de toma de decisiones durante etapas tempranas de diseño y facilita comparaciones preliminares entre alternativas arquitectónicas.

Los resultados obtenidos sugieren que las arquitecturas híbridas representan actualmente la alternativa más adecuada para aplicaciones descentralizadas de propósito general, debido a su capacidad para combinar verificabilidad blockchain con niveles aceptables de rendimiento, usabilidad y sostenibilidad económica.

Líneas futuras de investigación

Existen múltiples oportunidades para extender los resultados presentados en este trabajo. Una primera línea consiste en realizar validaciones experimentales del modelo de evaluación arquitectónica mediante estudios de caso reales y pruebas de rendimiento sobre diferentes infraestructuras blockchain.

Una segunda línea corresponde al análisis de arquitecturas modulares emergentes, incluyendo ecosistemas basados en disponibilidad de datos desacoplada, rollups soberanos y mecanismos de restaking.

Asimismo, resulta de interés investigar el impacto de tecnologías como pruebas de conocimiento cero (Zero-Knowledge Proofs), account abstraction, identidad descentralizada (DID) y organizaciones autónomas descentralizadas (DAO) sobre las arquitecturas blockchain de próxima generación.

Finalmente, la convergencia entre inteligencia artificial y blockchain constituye una de las áreas con mayor potencial de crecimiento, especialmente en aplicaciones relacionadas con trazabilidad de modelos, gobernanza algorítmica, gestión de activos digitales inteligentes y sistemas autónomos distribuidos.

En consecuencia, se espera que las futuras generaciones de plataformas descentralizadas evolucionen hacia arquitecturas más interoperables, modulares y adaptativas, capaces de integrar múltiples tecnologías emergentes dentro de ecosistemas digitales cada vez más complejos.

REFERENCIAS

- [1] S. Nakamoto, "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System," 2008.
- [2] V. Buterin, "A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform," Ethereum White Paper, 2014.
- [3] G. Wood, "Ethereum: A Secure Decentralised Generalised Transaction Ledger," Ethereum Yellow Paper, 2014.
- [4] Z. Zheng, S. Xie, H. Dai, X. Chen and H. Wang, "Blockchain Challenges and Opportunities: A Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 4, pp. 3007-3053, 2018.
- [5] F. Casino, T. K. Dasaklis and C. Patsakis, "A Systematic Literature Review of Blockchain-Based Applications," Telematics and Informatics, vol. 36, pp. 55-81, 2019.
- [6] X. Xu et al., "A Taxonomy of Blockchain-Based Systems for Architecture Design," Future Generation Computer Systems, vol. 95, pp. 243-257, 2019.
- [7] F. Alzhrani, K. Saeedi and L. Zhao, "Architectural Patterns for Blockchain Systems and Application Design," Applied Sciences, vol. 13, no. 20, 2023.
- [8] A. Baliga, "Understanding Blockchain Consensus Models," Persistent Systems White Paper, 2017.

- [9] M. Swan, *Blockchain: Blueprint for a New Economy*. O'Reilly Media, 2015.
- [10] M. Crosby, P. Pattanayak, S. Verma and V. Kalyanaraman, "Blockchain Technology: Beyond Bitcoin," *Applied Innovation Review*, vol. 2, pp. 6-19, 2016.
- [11] W. Wang, Q. Li, R. Wang and S. Chen, "Non-Fungible Token (NFT): Overview, Evaluation, Opportunities and Challenges," *arXiv:2105.07447*, 2021.
- [12] M. Nadini et al., "Mapping the NFT Revolution: Market Trends, Trade Networks and Visual Features," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, 2021.
- [13] F. Regner, A. Schweizer and N. Urbach, "NFTs in Practice: Non-Fungible Tokens as Core Component of a Blockchain-based Event Ticketing Application," *ICIS Proceedings*, 2019.
- [14] Ethereum Foundation, "ERC-721 Non-Fungible Token Standard," 2018.
- [15] Ethereum Foundation, "ERC-1155 Multi Token Standard," 2019.
- [16] B. Kitchenham, O. P. Brereton, D. Budgen, M. Turner, J. Bailey and S. Linkman, "Systematic literature reviews in software engineering -- A systematic literature review," *Information and Software Technology*, vol. 51, no. 1, pp. 7-15, 2009.
- [17] K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba and M. Mattsson, "Systematic Mapping Studies in Software Engineering," in *Proceedings of the 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE)*, Bari, Italy, 2008, pp. 68-77.
- [18] H. Snyder, "Literature review as a research methodology: An overview and guidelines," *Journal of Business Research*, vol. 104, pp. 333-339, 2019.
- [19] A. Zamyatin, M. Al-Bassam, D. Zindros, E. Kokoris-Kogias, P. Moreno-Sanchez, A. Kiayias and W. J. Knottenbelt, "SoK: Communication Across Distributed Ledgers," in *Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, San Francisco, CA, USA, 2021, pp. 807-830.
- [20] J. Kwon and E. Buchman, *Cosmos: A Network of Distributed Ledgers*, Cosmos White Paper, 2019.
- [21] G. Wood, *Polkadot: Vision for a Heterogeneous Multi-Chain Framework*, Web3 Foundation, 2020.
- [22] J. Benet, "IPFS: Content Addressed, Versioned, Peer-to-Peer File System," *arXiv preprint arXiv:1407.3561*, 2014.
- [23] J. Benet and N. Greco, "Filecoin: A Decentralized Storage Network," Protocol Labs, White Paper, 2017.
- [24] S. Williams, W. George, J. Nicholls and T. Jones, "Arweave: A Protocol for Economically Sustainable Information Permanence," *arXiv preprint arXiv:1911.12436*, 2019.
- [25] R. Yasaweerasinghelage, M. Staples, I. Weber and P. Rimba, "Systematic Literature Review of Smart Contract Security," *ACM Computing Surveys*, vol. 54, no. 10s, pp. 1-38, 2021.

- [26] N. Atzei, M. Bartoletti and T. Cimoli, "A Survey of Attacks on Ethereum Smart Contracts (SoK)," in Proceedings of the International Conference on Principles of Security and Trust (POST), 2017, pp. 164-186.
- [27] L. Luu, D.-H. Chu, H. Olickel, P. Saxena and A. Hobor, "Making Smart Contracts Smarter," in Proceedings of the ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS), Vienna, Austria, 2016, pp. 254-269.
- [28] Y. Wang, J. Han and P. Beynon-Davies, "Understanding Blockchain Scalability: A Survey of Layer-2 Technologies," IEEE Access, vol. 11, pp. 14648-14673, 2023.
- [29] X. Xu, C. Li, Z. Wang and H. Zhao, "A Survey on Ethereum Layer-2 Scaling Solutions," ACM Computing Surveys, vol. 57, no. 2, pp. 1-34, 2024.
- [30] K. Alharby and A. van Moorsel, "Blockchain-Based Smart Contracts: A Systematic Mapping Study," Computer Science & Information Technology, vol. 6, no. 2, pp. 125-140, 2018.
- [31] E. Ben-Sasson, I. Bentov, Y. Horesh and M. Riabzev, "Scalable, Transparent, and Post-Quantum Secure Computational Integrity," IACR Cryptology ePrint Archive, 2018.
- [32] E. Androulaki, A. Barger, V. Bortnikov, C. Cachin, K. Christidis, A. De Caro, D. Enyeart, C. Ferris, G. Laventman, Y. Manevich, S. Muralidharan, C. Murthy, B. Nguyen, M. Sethi and G. Singh, "Hyperledger Fabric: A Distributed Operating System for Permissioned Blockchains," in Proceedings of EuroSys 2018, Porto, Portugal, 2018.
- [33] C. Cachin, "Architecture of the Hyperledger Blockchain Fabric," in Workshop on Distributed Cryptocurrencies and Consensus Ledgers, Chicago, USA, 2016.
- [34] M. Vukolić, "The Quest for Scalable Blockchain Fabric: Proof-of-Work vs. BFT Replication," in Open Problems in Network Security, Springer, 2016, pp. 112-125.