Guía de buenas prácticas

Blockchain e IA sostenible

Financiado por la Unión Europea
NextGenerationEU

MINISTERIO
PARA LA TRANSFORMACIÓN DIGITAL
Y DE LA FUNCIÓN PÚBLICA

Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia

ENIA
ESTRATEGIA NACIONAL DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

España | digital 2026

Financiado por la Unión Europea - NextGenerationEU. Sin embargo, los puntos de vista y las opiniones expresadas son únicamente los del autor o autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea o la Comisión Europea. Ni la Unión Europea ni la Comisión Europea pueden ser consideradas responsables de las mismas

Índice

1. Intersección entre blockchain e inteligencia artificial

La combinación de blockchain e inteligencia artificial (IA) puede transformar la manera en que se gestionan los recursos, se optimizan procesos y se promueve la sostenibilidad en diversos sectores. Estas tecnologías, al integrarse, ofrecen soluciones innovadoras para abordar desafíos ambientales y sociales, desde la trazabilidad en cadenas de valor hasta la creación de economías circulares digitales. Blockchain, con su capacidad para proporcionar una infraestructura descentralizada, segura y transparente, se posiciona como una herramienta clave para registrar y verificar datos de manera inmutable. Por su parte, la IA, con su capacidad para analizar grandes volúmenes de datos y generar predicciones, complementa a blockchain al optimizar procesos y proporcionar insights que mejoran la toma de decisiones.

Blockchain permite registrar cada etapa de la cadena de suministro, garantizando la transparencia y la integridad de los datos, mientras que la IA analiza esta información para identificar patrones y optimizar procesos. Esto es especialmente relevante en sectores como la agricultura, la energía y la gestión de residuos, donde la trazabilidad de productos y recursos es fundamental para garantizar prácticas sostenibles. Proyectos financiados por la Unión Europea han demostrado cómo estas tecnologías pueden integrarse para mejorar la trazabilidad y sostenibilidad en sectores clave, promoviendo la economía circular y reduciendo el impacto ambiental de las actividades humanas.

Las redes blockchain, especialmente aquellas basadas en mecanismos de consenso como Proof of Work (PoW), son conocidas por su elevado consumo energético. Sin embargo, la IA puede ser utilizada para optimizar estos procesos, reduciendo significativamente el consumo de energía. Algoritmos avanzados de IA pueden gestionar dinámicamente los nodos de la red, ajustando los recursos necesarios en tiempo real y minimizando el impacto ambiental.
La gestión de recursos y la eficiencia se benefician de la integración de blockchain e IA. La tokenización, habilitada por blockchain, puede transformar la manera en que se incentivan comportamientos sostenibles. Los tokens pueden ser utilizados para recompensar el consumo responsable de energía, el reciclaje de materiales o la adopción de prácticas sostenibles. Estos sistemas, combinados con IA, permiten analizar el impacto de estas iniciativas y ajustar las estrategias para maximizar su efectividad.

Blockchain puede también actuar como un registro inmutable de métricas ESG (ambientales, sociales y de gobernanza), proporcionando una base confiable para la auditoría de impacto ambiental. La IA, por su parte, puede interpretar estos datos y anticipa patrones de impacto, permitiendo a las organizaciones tomar decisiones informadas y proactivas. Estas tecnologías pueden utilizarse para garantizar la transparencia y la rendición de cuentas en la gestión ambiental.

La creación de economías circulares digitales es otra área prometedora. Blockchain e IA están facilitando la creación de mercados verdes, donde se pueden intercambiar créditos de carbono, certificados energéticos y otros activos relacionados con la sostenibilidad. Blockchain asegura la transparencia y la trazabilidad de estas transacciones, mientras que la IA optimiza los procesos y

analiza el impacto de estas iniciativas. Estas tecnologías no solo buscan reducir el impacto ambiental de las actividades humanas, sino también fomentar la transparencia y la responsabilidad en la gestión de recursos.

2. Impacto ambiental

El impacto ambiental de las tecnologías emergentes, como blockchain e inteligencia artificial (IA), ha generado un creciente interés debido a su elevado consumo energético y las emisiones de carbono asociadas. Estas tecnologías, aunque fundamentales para la innovación y la transformación digital, presentan desafíos significativos en términos de sostenibilidad. Desde los mecanismos de consenso intensivos en recursos, como el Proof-of-Work (PoW), hasta el entrenamiento de modelos de IA que requieren infraestructuras computacionales avanzadas, su uso intensivo de energía plantea interrogantes sobre su viabilidad ambiental. Además, los centros de datos y las redes distribuidas que soportan estas tecnologías contribuyen de manera importante a la huella de carbono global. En esta sección, se analizarán tres aspectos clave: el consumo energético de blockchain e IA, la comparativa de protocolos de consenso desde una perspectiva de eficiencia energética, y la huella de carbono de las infraestructuras que las sustentan, proponiendo estrategias y recomendaciones para mitigar su impacto ambiental.

2.1. Consumo energético

El consumo energético asociado a las tecnologías emergentes como blockchain y la inteligencia artificial (IA) ha generado un debate significativo en el ámbito de la sostenibilidad. Ambas tecnologías, aunque prometen avances disruptivos en múltiples sectores, presentan retos importantes en términos de eficiencia energética y huella ambiental. Este apartado analiza el impacto energético de estas tecnologías, destacando los mecanismos de consenso en blockchain y los procesos de entrenamiento de modelos de IA, así como sus puntos de intersección.

El mecanismo de consenso Proof-of-Work (PoW), utilizado por redes como Bitcoin, ha sido objeto de críticas debido a su elevado consumo energético. PoW requiere que los nodos participantes resuelvan complejos problemas matemáticos para validar transacciones y añadir bloques a la cadena, un proceso que consume grandes cantidades de electricidad. Según el Observatorio Europeo de Blockchain, el consumo energético de Bitcoin supera al de algunos países pequeños, lo que plantea serias preocupaciones sobre su sostenibilidad.

Además de PoW, existen otros protocolos de consenso que presentan variaciones significativas en su consumo energético. Estos incluyen:

- **Proof-of-Stake (PoS)**: Reduce el consumo energético al eliminar la necesidad de cálculos intensivos, utilizando en su lugar la participación de los nodos en función de la cantidad de tokens que poseen.
- **Proof-of-Authority (PoA)**: Utiliza nodos validados previamente para garantizar la seguridad de la red, lo que disminuye el uso de recursos computacionales.

- **Delegated Proof-of-Stake (DPoS)**: Similar al PoS, pero con nodos delegados que representan a los participantes de la red.
- **Proof-of-Space-Time (PoST)**: Combina almacenamiento y tiempo como recursos para validar transacciones, siendo más eficiente energéticamente.
- **Hybrid Consensus Mechanisms**: Combinan varios enfoques para optimizar el consumo energético y la seguridad de la red.

Estos protocolos serán evaluados en el siguiente apartado para determinar su eficiencia energética y su adecuación a diferentes casos de uso.

En respuesta a las críticas hacia PoW, mecanismos como PoS han demostrado ser más eficientes energéticamente. Por ejemplo, la transición de Ethereum de PoW a PoS resultó en una disminución del 99.95% en su huella energética [Ethereum Merge Trend Report, Observatorio Europeo de Blockchain]. Sin embargo, estos mecanismos alternativos también presentan desafíos. Aunque son más eficientes en términos de consumo energético, pueden comprometer la descentralización y la seguridad de la red. Por ejemplo, PoS podría favorecer a los nodos con mayores recursos financieros, mientras que PoA depende de un número limitado de validadores confiables, lo que podría generar riesgos de centralización.

El entrenamiento de modelos de inteligencia artificial, especialmente los modelos de lenguaje extenso (LLMs) como GPT, requiere una cantidad significativa de recursos computacionales y energéticos. Según la OCDE, el entrenamiento de un modelo de IA puede consumir tanta energía como la que utiliza una ciudad pequeña durante varios días. Este consumo energético se debe principalmente a la necesidad de procesar grandes volúmenes de datos y realizar cálculos complejos en hardware especializado, como GPUs, TPUs y ASICs.

A pesar de estos retos, ambas tecnologías tienen el potencial de contribuir a la sostenibilidad. Blockchain puede ser utilizada para impulsar la producción y el consumo de las energías renovables (GreenLedger, la apuesta blockchain por las renovables – BLOCKCHAIN SERVICES), mientras que la IA puede optimizar la utilización de los recursos, reducir los residuos y ahorrar energía. Estas sinergias representan una oportunidad para desarrollar soluciones tecnológicas que sean tanto innovadoras como sostenibles.

El consumo energético de blockchain y la inteligencia artificial plantea desafíos significativos para la sostenibilidad global. Aunque se están desarrollando mecanismos de consenso más eficientes y estrategias de optimización energética, es fundamental continuar investigando y adoptando medidas que promuevan prácticas sostenibles. La colaboración entre organismos internacionales y entidades que usen estas tecnologías, será clave para garantizar que estas tecnologías puedan desarrollarse de manera responsable y con un impacto ambiental reducido.

2.2. Comparativa de protocolos de consenso

Consumo energético por transacción

El consumo energético por transacción es una métrica clave para evaluar la sostenibilidad de los protocolos de consenso en blockchain. Esta dimensión no solo refleja la eficiencia operativa de

cada protocolo, sino también su impacto ambiental y viabilidad para aplicaciones a gran escala. A continuación, se analiza el consumo energético de los principales mecanismos de consenso, destacando sus diferencias y las implicaciones para la sostenibilidad.

Proof-of-Work (PoW)

Proof-of-Work (PoW) es el protocolo de consenso más conocido y utilizado, especialmente en redes como Bitcoin y Ethereum antes de su transición a Proof-of-Stake (PoS). PoW requiere que los nodos participantes resuelvan complejos problemas matemáticos para validar transacciones y añadir bloques a la cadena. Este proceso, conocido como minería, consume grandes cantidades de energía debido a la necesidad de realizar cálculos intensivos en hardware especializado, como ASICs.

Según el Observatorio Europeo de Blockchain, el consumo energético de Bitcoin se estima en aproximadamente 707 kWh por transacción, lo que equivale al consumo promedio de un hogar europeo durante varias semanas [Energy Efficiency of Blockchain Technologies, Observatorio Europeo de Blockchain]. Este alto consumo energético se debe a la competencia entre los mineros para resolver los problemas matemáticos, lo que genera una redundancia en el uso de recursos computacionales. Además, el Banco Central Europeo (BCE) señala que el impacto ambiental de PoW es uno de los principales factores que limitan su adopción en aplicaciones sostenibles [Mining the Environment, BCE].

Proof-of-Stake (PoS)

Proof-of-Stake (PoS) elimina la necesidad de cálculos intensivos al basar la validación de bloques en la cantidad de criptomonedas que un nodo posee y está dispuesto a "apostar". Este enfoque reduce significativamente el consumo energético, ya que no requiere la competencia entre nodos para resolver problemas matemáticos. Según el Observatorio Europeo de Blockchain, la transición de Ethereum de PoW a PoS resultó en una disminución del 99.95% en su huella energética, reduciendo el consumo por transacción a menos de 0.05 kWh [Ethereum Merge Trend Report, Observatorio Europeo de Blockchain].

Aunque PoS es mucho más eficiente energéticamente que PoW, enfrenta críticas relacionadas con la centralización, ya que los nodos con mayores recursos financieros tienen una ventaja inherente en el proceso de validación. Sin embargo, desde una perspectiva de sostenibilidad, PoS es una opción mucho más viable para aplicaciones empresariales y redes privadas [Impact of PoW-Based Blockchain, MDPI].

Delegated Proof-of-Stake (DPoS)

Delegated Proof-of-Stake (DPoS) es una variante de PoS que delega la validación de bloques a un conjunto reducido de nodos representativos. Este enfoque optimiza el rendimiento y reduce el consumo energético, ya que solo un número limitado de nodos participa activamente en el proceso de consenso. Según estudios de SpringerOpen, el consumo energético por transacción en redes basadas en DPoS es significativamente menor que en PoW, aunque depende de la

cantidad de nodos delegados y la frecuencia de validación [Evolution of Blockchain Consensus Algorithms, SpringerOpen].

Sin embargo, DPoS también enfrenta críticas relacionadas con la descentralización, ya que la delegación de nodos puede concentrar el poder en un grupo reducido de participantes. Esto limita su adopción en redes públicas donde la descentralización es un requisito crítico.

Proof-of-Authority (PoA)

Proof-of-Authority (PoA) utiliza nodos validados previamente para garantizar la seguridad de la red, lo que disminuye el uso de recursos computacionales y, por ende, el consumo energético. Este protocolo es especialmente adecuado para redes privadas y empresariales, donde la descentralización no es un requisito fundamental. Según el Fondo Monetario Internacional (FMI), el consumo energético por transacción en redes basadas en PoA es uno de los más bajos entre los protocolos de consenso, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones sostenibles [Blockchain Consensus Mechanisms, FMI].

Sin embargo, PoA enfrenta críticas relacionadas con la centralización y la confianza en los validadores preseleccionados, lo que puede limitar su adopción en redes públicas.

Protocolos emergentes: Proof-of-History (PoH)

Proof-of-History (PoH) y los protocolos basados en grafos acíclicos dirigidos (DAG) representan enfoques innovadores para mejorar la eficiencia energética y la escalabilidad. PoH utiliza marcas de tiempo criptográficas para validar transacciones, lo que reduce la necesidad de cálculos intensivos y optimiza el consumo energético. Según estudios de MDPI, el consumo energético por transacción en redes basadas en PoH es comparable al de PoS, aunque su adopción aún es limitada.

Latencia y escalabilidad

La latencia y la escalabilidad son dimensiones críticas para evaluar la viabilidad de los protocolos de consenso en blockchain, especialmente en aplicaciones empresariales y públicas que requieren un alto rendimiento y capacidad para manejar grandes volúmenes de transacciones. Mientras que la latencia mide el tiempo necesario para validar y confirmar una transacción, la escalabilidad evalúa la capacidad de la red para procesar un número creciente de transacciones sin comprometer su rendimiento. A continuación, se analizan los principales mecanismos de consenso en función de estas dimensiones.

Proof-of-Work (PoW)

En redes basadas en Proof-of-Work (PoW), como Bitcoin, el tiempo promedio para validar un bloque es de aproximadamente 10 minutos, lo que limita la capacidad de la red para procesar transacciones en tiempo real. No obstante, existen variantes y optimizaciones de PoW que han logrado reducir significativamente esta latencia, mediante ajustes en la dificultad, menor tiempo de bloque o enfoques híbridos.

En cuanto a la sincronización entre nodos, este proceso es inherente a cualquier red blockchain; sin embargo, en sistemas PoW puede generar cierta ineficiencia temporal debido a la necesidad de propagar y validar nuevos bloques a escala global, especialmente cuando surgen bifurcaciones temporales o bloques huérfanos que deben resolverse para alcanzar consenso.

Por otro lado, la competencia entre mineros —donde múltiples participantes buscan simultáneamente resolver el mismo problema criptográfico— refuerza la seguridad y descentralización del sistema, aunque introduce una cierta redundancia en el uso de recursos computacionales. Este diseño implica que solo uno de los mineros aprovechará efectivamente su trabajo para añadir el bloque, lo que, si bien es una característica esencial del modelo, puede limitar la eficiencia y escalabilidad en escenarios que demandan alta capacidad transaccional.

Proof-of-Stake (PoS)

Proof-of-Stake (PoS) mejora significativamente la latencia y la escalabilidad en comparación con PoW. Al eliminar la necesidad de cálculos intensivos, PoS permite validar bloques en segundos, lo que reduce la latencia y mejora la capacidad de la red para procesar transacciones en tiempo real. Según el Observatorio Europeo de Blockchain, la transición de Ethereum de PoW a PoS resultó en una mejora notable en la latencia y la escalabilidad de la red.

Sin embargo, la escalabilidad de PoS depende de la cantidad de nodos participantes y la eficiencia del algoritmo de consenso. PoS enfrenta desafíos relacionados con la centralización, que pueden limitar su capacidad para manejar grandes volúmenes de transacciones en redes públicas.

Delegated Proof-of-Stake (DPoS)

Delegated Proof-of-Stake (DPoS) optimiza la latencia y la escalabilidad al delegar la validación de bloques a un conjunto reducido de nodos representativos. Este enfoque permite validar bloques en segundos y manejar un mayor volumen de transacciones en comparación con PoW y PoS. Según Springer Open: Evolution of blockchain consensus algorithms: a review on the latest milestones of blockchain consensus algorithms , DPoS es uno de los protocolos más escalables, con capacidad para procesar miles de transacciones por segundo en redes empresariales.

Sin embargo, la dependencia de un número limitado de validadores puede comprometer la descentralización y la seguridad de la red, especialmente en aplicaciones públicas donde la transparencia y la confianza son fundamentales.

Proof-of-Authority (PoA)

Proof-of-Authority (PoA) es uno de los protocolos más eficientes en términos de latencia y escalabilidad. Al utilizar nodos validados previamente para garantizar la seguridad de la red, PoA elimina la necesidad de cálculos intensivos y sincronización entre nodos, lo que reduce significativamente la latencia. Según el Fondo Monetario Internacional (FMI), PoA es ideal para aplicaciones empresariales y redes privadas que requieren un alto rendimiento y capacidad para manejar grandes volúmenes de transacciones.

Sin embargo, PoA enfrenta críticas relacionadas con la centralización y la confianza en los validadores preseleccionados, lo que puede limitar su adopción en redes públicas.

Protocolos emergentes: Proof-of-History (PoH) y DAG

Proof-of-History (PoH) y los protocolos basados en grafos acíclicos dirigidos (DAG) representan enfoques innovadores para mejorar la latencia y la escalabilidad. PoH utiliza marcas de tiempo criptográficas para validar transacciones, lo que reduce la necesidad de cálculos intensivos y optimiza la latencia. Según estudios de MDPI, PoH es capaz de procesar miles de transacciones por segundo, lo que lo convierte en una opción prometedora para aplicaciones empresariales y redes públicas.

Por otro lado, los protocolos DAG eliminan la necesidad de bloques y permiten transacciones paralelas, lo que mejora la escalabilidad y reduce la latencia. Según Springer Open: Evolution of blockchain consensus algorithms: a review on the latest milestones of blockchain consensus algorithms, DAG es uno de los protocolos más escalables, con capacidad para manejar millones de transacciones por segundo en redes distribuidas. Sin embargo, su complejidad técnica y la falta de adopción generalizada limitan su impacto en el mercado actual.

Seguridad y descentralización

La seguridad y la descentralización son pilares fundamentales de los protocolos de consenso en blockchain. La seguridad garantiza la integridad de las transacciones y la resistencia frente a ataques, mientras que la descentralización asegura que el control de la red no recaiga en un grupo reducido de participantes, promoviendo la transparencia y la confianza. Sin embargo, cada protocolo de consenso presenta características únicas que afectan estas dimensiones, lo que influye en su adopción y viabilidad para diferentes casos de uso.

Proof-of-Work (PoW)

Proof-of-Work (PoW) es ampliamente reconocido como uno de los protocolos más seguros debido a su resistencia a ataques del 51%. En este tipo de ataque, un actor malicioso necesitaría controlar más de la mitad de la potencia computacional de la red para alterar transacciones o manipular bloques. La alta seguridad de PoW se debe a la competencia entre los mineros y la dificultad inherente de los cálculos matemáticos necesarios para validar bloques.

Proof-of-Stake (PoS)

Proof-of-Stake (PoS) ofrece una alternativa más eficiente energéticamente a PoW, pero enfrenta desafíos relacionados con la seguridad y la descentralización. Aunque PoS elimina la necesidad de cálculos intensivos, su seguridad depende de la cantidad de criptomonedas que los nodos poseen y están dispuestos a "apostar". Esto crea un incentivo para que los nodos actúen de manera honesta, ya que cualquier comportamiento malicioso podría resultar en la pérdida de sus activos.

Sin embargo, PoS enfrenta riesgos de centralización, ya que los nodos con mayores recursos financieros tienen una ventaja inherente en el proceso de validación. Según estudios de MDPI, esta concentración de poder puede limitar la transparencia y la confianza en redes públicas, aunque es menos problemática en redes privadas y empresariales.

Delegated Proof-of-Stake (DPoS)

Delegated Proof-of-Stake (DPoS) optimiza la eficiencia energética y la escalabilidad al delegar la validación de bloques a un conjunto reducido de nodos representativos. Este enfoque mejora la seguridad al reducir la cantidad de nodos que participan activamente en el proceso de consenso, lo que minimiza el riesgo de ataques. Sin embargo, DPoS enfrenta críticas significativas en términos de descentralización, ya que la delegación de nodos puede concentrar el poder en un grupo reducido de participantes.

En redes públicas, esta concentración de poder puede comprometer la transparencia y la confianza, lo que limita la adopción de DPoS en aplicaciones donde la descentralización es un requisito crítico.

Proof-of-Authority (PoA)

Proof-of-Authority (PoA) utiliza nodos validados previamente para garantizar la seguridad de la red, lo que elimina la necesidad de cálculos intensivos y mejora la eficiencia energética. Este protocolo es especialmente adecuado para redes privadas y empresariales, donde la descentralización no es un requisito fundamental. Según el Fondo Monetario Internacional (FMI), PoA ofrece una alta seguridad al depender de validadores confiables, pero enfrenta críticas relacionadas con la centralización y la confianza en los validadores preseleccionados.

En redes públicas, la dependencia de validadores preseleccionados puede limitar la transparencia y la confianza, lo que restringe la adopción de PoA en aplicaciones donde la descentralización es esencial.

Protocolos emergentes: Proof-of-History (PoH)

Proof-of-History (PoH) y los protocolos basados en grafos acíclicos dirigidos (DAG) representan enfoques innovadores para mejorar la seguridad y la descentralización. PoH utiliza marcas de tiempo criptográficas para validar transacciones, lo que reduce la necesidad de cálculos intensivos y optimiza la seguridad. Según estudios de MDPI, PoH ofrece una alta resistencia frente a ataques, pero enfrenta desafíos relacionados con la descentralización debido a su dependencia de nodos confiables.

Viabilidad para casos de uso sostenibles

La viabilidad de los protocolos de consenso para casos de uso sostenibles depende de su capacidad para minimizar el impacto ambiental y alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). PoS y PoA son más adecuados para aplicaciones sostenibles debido a su menor consumo energético. Además, los protocolos híbridos que combinan tolerancia a faltas

bizantinas (BFT) y DAG ofrecen soluciones innovadoras para mejorar la eficiencia energética y la escalabilidad, lo que los hace ideales para aplicaciones empresariales y redes privadas.

Tabla comparativa de protocolos

Protocolo	Ventajas	Desventajas
Proof-of-Work (PoW)	• Alta seguridad y resistencia a ataques del 51%. • Descentralización robusta en redes públicas • Amplia adopción y madurez tecnológicas	• Consumo energético extremadamente alto • Baja escalabilidad debido a la necesidad de cálculo intensivos
Proof-of-Work (PoS)	• Menor consumo energético en comparación con PoW. • Mejor escalabilidad y menor latencia. • Adecuado para aplicaciones empresariales y redes privadas.	• Riesgos de centralización debido a la ventaja de nodos con mayores recursos financieros. • Dependencia de la cantidad de criptomonedas apostadas para garantizar la seguridad. • Vulnerabilidad a ataques de "nada en juego" si no se implementan medidas de seguridad adicionales.
Delegated Proof-of-Work (DPoS)	• Alta eficiencia energética y escalabilidad. • Validación rápida de bloques, ideal para aplicaciones empresariales. • Capacidad para manejar miles de transacciones por segundo.	• Dependencia de un número limitado de validadores, lo que compromete la descentralización. • Riesgo de concentración de poder en los nodos delegados. • Menor transparencia en redes públicas.
Proof-of-Authority (PoA)	• Baja latencia y consumo energético. • Alta seguridad en redes privadas y empresariales. • Ideal para aplicaciones donde la descentralización no es crítica.	• Centralización debido a la dependencia de validadores preseleccionados. • Limitada adopción en redes públicas debido a la falta de descentralización. • Confianza en los validadores preseleccionados, lo que puede generar riesgos de manipulación.
Proof-of-History (PoH)	• Alta eficiencia energética y capacidad para procesar miles de transacciones por segundo.	• Menor adopción y falta de estudios extensivos sobre su impacto ambiental.

	• Optimización de la latencia mediante marcas de tiempo criptográficas. • Prometedor para aplicaciones empresariales y redes públicas.	• Dependencia de nodos confiables, lo que puede limitar la descentralización. • Complejidad técnica en su implementación.
DAG (Grafo Acíclico Dirigido)	• Escalabilidad casi ilimitada al permitir transacciones paralelas. • Alta descentralización al distribuir el control entre múltiples nodos. • Ideal para aplicaciones que requieren un alto rendimiento y capacidad.	• Complejidad técnica y menor adopción en el mercado actual. • Riesgos de seguridad en redes públicas debido a la falta de bloques tradicionales. • Menor madurez tecnológica en comparación con otros protocolos.

2.3. Huella de carbono de centros de datos y redes distribuidas

La huella de carbono de los centros de datos y las redes distribuidas en el ámbito del blockchain representa un desafío significativo para la sostenibilidad global. Estas infraestructuras, esenciales para el funcionamiento de redes descentralizadas, son responsables de un consumo energético elevado y de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Sin embargo, existen estrategias y pautas que pueden ser adoptadas para mitigar su impacto ambiental y avanzar hacia un modelo más sostenible.

Adopción de mecanismos de consenso eficientes

Priorizar el uso de algoritmos como Proof-of-Stake (PoS) y Proof-of-Authority (PoA) en redes blockchain es una de las estrategias más efectivas para reducir la huella de carbono. PoS elimina la necesidad de cálculos intensivos al basar la validación de bloques en la cantidad de criptomonedas que un nodo posee y está dispuesto a "apostar". Este enfoque reduce significativamente el consumo energético, como se evidenció en la transición de Ethereum de Proof-of-Work (PoW) a PoS, que resultó en una disminución del 99.95% en su huella energética PoA, por su parte, utiliza nodos validados previamente para garantizar la seguridad de la red, lo que disminuye el uso de recursos computacionales y, por ende, el consumo energético y la huella de carbono.

Diseño de infraestructuras sostenibles

La implementación de tecnologías avanzadas en los centros de datos puede mejorar significativamente su eficiencia energética. Entre estas tecnologías se incluyen la refrigeración líquida, que reduce el consumo energético asociado con la refrigeración de equipos, y la reutilización de calor, que permite aprovechar el calor generado por los servidores para otros usos. Estas medidas son esenciales para reducir la huella de carbono de los centros de datos que soportan redes blockchain.

Certificación de sostenibilidad

Blockchain puede ser utilizada para certificar el uso de energías renovables y garantizar la transparencia en las operaciones de los centros de datos. Por ejemplo, las redes blockchain pueden registrar y verificar el origen de la energía utilizada en los centros de datos, asegurando que provenga de fuentes renovables. Estas certificaciones pueden fomentar la adopción de prácticas sostenibles en el sector TIC y aumentar la confianza en las operaciones de las redes distribuidas.

Optimización de redes distribuidas

La optimización de redes distribuidas es un aspecto clave para reducir la huella de carbono en el ámbito del blockchain. Estas redes, que dependen de nodos distribuidos para validar transacciones y mantener la seguridad, presentan desafíos significativos en términos de consumo energético y sostenibilidad. Las redes blockchain tradicionales, como las basadas en PoW, son altamente intensivas en cómputo debido a la necesidad de cálculos matemáticos complejos para validar transacciones. Este enfoque genera una redundancia en el uso de recursos computacionales, ya que múltiples nodos compiten simultáneamente para resolver los mismos problemas. Según la OCDE, esta redundancia es uno de los principales factores que contribuyen al alto consumo energético de las redes blockchain.

Para abordar este desafío, se están adoptando algoritmos de consenso más eficientes, como PoS y PoA. Además de estos algoritmos, los protocolos híbridos y emergentes están ganando relevancia como soluciones para optimizar las redes distribuidas. Los algoritmos basados en grafos acíclicos dirigidos (DAG) eliminan la necesidad de bloques y permiten transacciones paralelas, lo que mejora la escalabilidad y reduce la redundancia en el uso de recursos computacionales. Los protocolos DAG son capaces de manejar millones de transacciones por segundo, lo que los convierte en una opción prometedora para aplicaciones empresariales y redes públicas. Sin embargo, su complejidad técnica y la falta de adopción generalizada limitan su impacto en el mercado actual.

Otra estrategia para optimizar las redes distribuidas es la implementación de técnicas de aprendizaje federado en el ámbito del blockchain. El aprendizaje federado permite entrenar modelos de inteligencia artificial de manera distribuida, minimizando la transferencia de datos entre nodos y reduciendo el consumo energético asociado. Esta técnica, combinada con algoritmos de consenso eficientes, puede mejorar significativamente la sostenibilidad de las redes blockchain.

Desde una perspectiva de huella de carbono, la optimización de redes distribuidas también incluye la migración hacia infraestructuras sostenibles. Alimentar los nodos blockchain con fuentes de energía renovable, como solar y eólica, es una estrategia clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Según la Comisión Europea, esta transición es fundamental para alcanzar la neutralidad de carbono en un futuro próximo. Además, tecnologías como la refrigeración líquida y la reutilización de calor están siendo implementadas

para mejorar la eficiencia energética de los nodos y centros de datos que soportan las redes blockchain.

3. Ejecución distribuida de modelos de inteligencia artificial

3.1. Aprendizaje federado sobre blockchain

El aprendizaje federado (FL, por sus siglas en inglés) es una técnica emergente en el campo de la inteligencia artificial (IA) que permite entrenar modelos de aprendizaje automático sin necesidad de centralizar los datos. En lugar de transferir grandes volúmenes de información a un servidor central, los datos permanecen en los dispositivos locales, y solo se comparten las actualizaciones de los modelos. Esta metodología no solo mejora la privacidad y la seguridad de los datos, sino que también tiene implicaciones significativas en términos de sostenibilidad y eficiencia energética. Cuando se combina con blockchain, el aprendizaje federado adquiere un nuevo nivel de transparencia, trazabilidad y descentralización, lo que lo convierte en una solución prometedora para abordar los desafíos ambientales y éticos de las tecnologías digitales.

Qué es y por qué importa en sostenibilidad

El aprendizaje federado se basa en la idea de distribuir el entrenamiento de modelos de IA entre múltiples nodos, como dispositivos móviles, sensores o servidores locales. Cada nodo entrena el modelo utilizando sus propios datos y envía únicamente los parámetros actualizados al servidor central o a una red distribuida, en lugar de los datos originales. Este enfoque tiene dos beneficios clave desde la perspectiva de la sostenibilidad:

1. **Reducción del consumo energético**: Al evitar la transferencia masiva de datos a centros de datos centralizados, se minimiza el uso de ancho de banda y la energía asociada a las comunicaciones. Esto es especialmente relevante en aplicaciones que involucran grandes volúmenes de datos, como imágenes médicas o datos de sensores industriales.
2. **Mejora de la privacidad**: Al mantener los datos en su origen, se reduce el riesgo de violaciones de privacidad, lo que es crucial en sectores como la salud, las finanzas y la educación. Esto también elimina la necesidad de costosos mecanismos de seguridad adicionales para proteger los datos en tránsito.

En términos de sostenibilidad, el aprendizaje federado contribuye a reducir la dependencia de grandes centros de datos, que son responsables de una parte significativa de las emisiones de carbono del sector tecnológico. Según el informe de la OCDE sobre el impacto ambiental de la IA, las tecnologías descentralizadas como el aprendizaje federado tienen el potencial de disminuir la huella de carbono asociada al procesamiento de datos masivos.

Cómo se integra con blockchain

La integración de blockchain con el aprendizaje federado añade una capa de confianza y transparencia al proceso de entrenamiento distribuido. Blockchain actúa como un registro inmutable y descentralizado donde se almacenan las actualizaciones de los modelos y las contribuciones de cada nodo. Esto permite auditar el proceso de entrenamiento y garantizar que los datos y los modelos no han sido manipulados.

Además, blockchain puede utilizarse para implementar esquemas de incentivos que recompensen a los nodos que contribuyen de manera eficiente y sostenible al entrenamiento del modelo. Por ejemplo, los nodos que utilizan energía renovable o que optimizan el uso de recursos computacionales podrían recibir tokens como recompensa. Este enfoque no solo fomenta la participación en el sistema, sino que también alinea los incentivos económicos con los objetivos de sostenibilidad.

Un caso práctico de esta integración es el proyecto "Fedchain" ([2308.15095] FedChain: An Efficient and Secure Consensus Protocol based on Proof of Useful Federated Learning for Blockchain), que utiliza blockchain para gestionar el aprendizaje federado en sistemas de riego sostenible. En este proyecto, blockchain asegura la trazabilidad de las actualizaciones del modelo y facilita la colaboración entre múltiples partes interesadas, como agricultores, investigadores y gobiernos locales.

Beneficios en clave verde

La combinación de aprendizaje federado y blockchain ofrece varios beneficios desde una perspectiva ambiental:

- **Menor dependencia de grandes centros de datos**: Al distribuir el procesamiento entre nodos locales, se reduce la necesidad de infraestructuras centralizadas, que suelen ser intensivas en consumo energético.
- **Ahorro energético en comunicaciones y almacenamiento**: Al minimizar la transferencia de datos y utilizar blockchain solo para registrar actualizaciones, se optimiza el uso de recursos.
- **Mayor descentralización de recursos computacionales**: Al aprovechar dispositivos edge, como sensores y dispositivos IoT, se reduce la carga en infraestructuras centralizadas y se promueve un uso más equitativo de los recursos tecnológicos.

Estos beneficios están alineados con los objetivos del Pacto Verde Europeo, que busca reducir las emisiones de carbono en todos los sectores, incluida la tecnología digital.

Retos a considerar

A pesar de sus ventajas, la implementación de aprendizaje federado sobre blockchain enfrenta varios desafíos:

- **Complejidad técnica y coste inicial**: La configuración de sistemas distribuidos y descentralizados requiere una inversión significativa en infraestructura y conocimientos técnicos.

- **Consumo energético de la propia blockchain**: Si no se utilizan protocolos de consenso eficientes, como Proof of Stake (PoS), el consumo energético de la blockchain podría contrarrestar los beneficios del aprendizaje federado.
- **Coordinación en entornos heterogéneos**: La diversidad de dispositivos y redes puede dificultar la sincronización y la eficiencia del sistema.

Estos retos subrayan la importancia de diseñar soluciones cuidadosamente y de seleccionar casos de uso donde los beneficios superen los costos y las complejidades asociadas.

Buenas prácticas recomendadas

Para maximizar los beneficios y minimizar los desafíos, se recomiendan las siguientes buenas prácticas:

- **Priorizar protocolos de consenso energéticamente eficientes**: Utilizar blockchain con mecanismos como PoS o Delegated Proof of Stake (DPoS) para reducir el consumo energético.
- **Usar blockchain solo para trazabilidad**: Evitar almacenar datasets pesados en la blockchain y limitar su uso a registrar actualizaciones y metadatos.
- **Diseñar esquemas de incentivos sostenibles**: Alinear las recompensas económicas con la reducción de la huella de carbono, incentivando el uso de energía renovable y la optimización de recursos.
- **Seleccionar casos de uso con impacto directo**: Priorizar aplicaciones en sectores como la salud, la energía y la agricultura sostenible, donde los beneficios sociales y ambientales son evidentes.

3.2. Infraestructura distribuida y edge computing

El edge computing, o computación en el borde, es una arquitectura informática que permite procesar datos cerca de donde se generan, como en sensores, dispositivos móviles o gateways, en lugar de enviarlos a centros de datos centralizados o a la nube. Este enfoque descentralizado reduce la latencia, optimiza el uso del ancho de banda y disminuye el consumo energético asociado al transporte de datos. En el contexto de blockchain, el edge computing se complementa perfectamente con las redes distribuidas, ya que ambos paradigmas promueven la descentralización y la eficiencia en el uso de recursos. Además, su integración tiene un impacto significativo en la sostenibilidad, al reducir la huella de carbono de las infraestructuras tecnológicas.

El edge computing es especialmente relevante en un mundo donde el volumen de datos generados por dispositivos conectados, como los del Internet de las Cosas (IoT), está creciendo exponencialmente. Según la Estrategia Digital de la Unión Europea, la transición hacia

arquitecturas de computación en el borde es esencial para reducir la dependencia de grandes centros de datos y para habilitar aplicaciones más sostenibles y eficientes (European Commission, 2022). Este enfoque no solo optimiza el procesamiento de datos, sino que también permite aprovechar dispositivos ya existentes, como teléfonos móviles y sensores, en lugar de depender exclusivamente de infraestructuras dedicadas.

La relación entre el edge computing y blockchain es particularmente interesante desde el punto de vista de la sostenibilidad. Blockchain puede actuar como una capa de confianza que coordina los dispositivos distribuidos en el borde, validando sus contribuciones y asegurando la integridad de los datos procesados. Por ejemplo, en un sistema de edge computing, los dispositivos pueden procesar datos localmente y enviar solo los resultados relevantes a la blockchain, donde se registran de manera inmutable. Esto no solo reduce el volumen de datos que necesitan ser transferidos, sino que también garantiza la trazabilidad y la transparencia del sistema.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el edge computing ofrece varios beneficios clave. En primer lugar, reduce la necesidad de utilizar grandes centros de datos, que son intensivos en consumo energético y responsables de una parte significativa de las emisiones de carbono del sector tecnológico. Según el World Economic Forum (Este es el estado actual de la 'fiebre del oro' global de los centros de datos | Foro Económico Mundial), los centros de datos representan aproximadamente el 1% del consumo energético global. En segundo lugar, al procesar los datos localmente, se optimiza el uso del ancho de banda y se minimiza el consumo energético asociado a las comunicaciones. Esto es especialmente importante en aplicaciones que generan grandes volúmenes de datos, como los sistemas de videovigilancia o los sensores industriales. Por último, el edge computing permite aprovechar dispositivos ya existentes, como teléfonos móviles y sensores, en lugar de depender exclusivamente de infraestructuras dedicadas, lo que reduce el impacto ambiental asociado a la fabricación y el transporte de nuevos equipos.

Blockchain desempeña un papel crucial en la coordinación de los dispositivos distribuidos en el borde. Al actuar como un registro confiable y transparente, blockchain puede validar las aportaciones de cada nodo y garantizar que los datos procesados sean auténticos y no hayan sido manipulados. Además, los contratos inteligentes (smart contracts) pueden utilizarse para orquestar tareas de inteligencia artificial (IA) en el borde, como la asignación de recursos o la programación de tareas (task scheduling).

Otro beneficio importante de la integración de blockchain y edge computing es la capacidad de registrar de manera auditable el consumo energético o las contribuciones verdes de cada nodo. Esto permite implementar esquemas de incentivos que recompensen a los nodos que operan de manera sostenible, como aquellos que utilizan energía renovable o que optimizan el uso de recursos computacionales. Este enfoque no solo fomenta la sostenibilidad, sino que también alinea los incentivos económicos con los objetivos ambientales, creando un sistema más equilibrado y eficiente.

Sin embargo, la implementación de edge computing y blockchain en entornos distribuidos no está exenta de desafíos. Uno de los principales retos es la complejidad de gestionar sistemas

heterogéneos, donde los dispositivos pueden variar significativamente en términos de capacidad de procesamiento, consumo energético y conectividad. Además, existe el riesgo de que la sobrecarga del blockchain, en términos de consumo energético y capacidad de almacenamiento, supere los beneficios del edge computing si no se diseña adecuadamente. Por ejemplo, el uso de protocolos de consenso intensivos en energía, como Proof of Work (PoW), podría contrarrestar los ahorros energéticos logrados mediante el procesamiento local de datos. Por esta razón, es fundamental seleccionar protocolos de consenso de bajo consumo, como Proof of Stake (PoS) o Delegated Proof of Stake (DPoS), que sean más eficientes desde el punto de vista energético.

Otro desafío importante es la necesidad de estandarizar las mediciones de consumo energético y huella de carbono en entornos distribuidos. Sin estándares claros, puede ser difícil evaluar el impacto ambiental de los sistemas de edge computing y blockchain, lo que limita la capacidad de optimizar su diseño y operación.

Para maximizar los beneficios y minimizar los desafíos, se recomiendan varias buenas prácticas de diseño sostenible. En primer lugar, es importante minimizar el peso de los modelos de IA que se ejecutan en el borde, utilizando enfoques como el aprendizaje automático ligero (tinyML). Esto no solo reduce el consumo energético de los dispositivos, sino que también mejora su rendimiento y prolonga su vida útil. En segundo lugar, se deben seleccionar protocolos blockchain de bajo consumo para coordinar los nodos, priorizando aquellos que sean eficientes desde el punto de vista energético. Por último, es crucial utilizar hardware energéticamente eficiente en el borde, como sensores de bajo consumo y microchips optimizados, que reduzcan el impacto ambiental del sistema en su conjunto.

En conclusión, la integración de edge computing y blockchain representa una oportunidad única para desarrollar sistemas tecnológicos más sostenibles y eficientes. Al procesar los datos localmente y utilizar blockchain como una capa de confianza, estas tecnologías pueden reducir significativamente la huella de carbono de las infraestructuras digitales, al tiempo que mejoran la transparencia y la trazabilidad. Sin embargo, para aprovechar plenamente su potencial, es esencial abordar los desafíos técnicos y adoptar buenas prácticas de diseño sostenible que prioricen la eficiencia energética y la reducción del impacto ambiental.

3.3. Diseño de soluciones de IA de bajo impacto en blockchain

El diseño de soluciones de inteligencia artificial (IA) de bajo impacto en blockchain es un enfoque que combina la optimización de recursos, la sostenibilidad ambiental y la eficiencia energética. En esta sección ampliada, se exploran principios fundamentales, buenas prácticas y ejemplos prácticos que ilustran cómo estas tecnologías pueden integrarse de manera responsable y efectiva.

Principios de bajo impacto en IA

El diseño de modelos de IA más ligeros y eficientes es esencial para reducir el consumo energético y la huella de carbono. Esto se logra mediante técnicas avanzadas de optimización y el uso de hardware especializado.

- **Modelos compactos y optimizados**:
  Las técnicas como pruning (poda de redes neuronales) y quantization (cuantización) permiten reducir el tamaño y la complejidad de los modelos de IA. Por ejemplo, la poda elimina conexiones innecesarias en las redes neuronales, mientras que la cuantización reduce la precisión de los pesos y activaciones, disminuyendo el consumo energético sin comprometer significativamente la precisión del modelo. Frameworks como TensorFlow Lite y PyTorch Mobile están diseñados específicamente para implementar modelos ligeros en dispositivos edge.
- **Evitar entrenamientos intensivos innecesarios**:
  Los algoritmos complejos deben emplearse únicamente cuando aporten un valor claro y justificado. Por ejemplo, en aplicaciones de predicción climática, donde los beneficios sociales y ambientales superan los costos energéticos, el uso de modelos avanzados puede estar justificado. Sin embargo, en tareas más simples, los modelos ligeros son preferibles.
- **Hardware eficiente**:
  El uso de hardware optimizado, como microchips diseñados específicamente para tareas de aprendizaje automático (por ejemplo, Google Edge TPU o NVIDIA Jetson Nano), puede reducir significativamente el consumo energético en comparación con las GPU tradicionales.

Ejemplo práctico: En dispositivos médicos portátiles, los modelos de IA comprimidos permiten realizar diagnósticos en tiempo real sin necesidad de enviar datos a la nube, reduciendo el consumo energético y mejorando la privacidad.

Uso inteligente de blockchain

Blockchain puede ser una herramienta poderosa para garantizar la transparencia y la trazabilidad, pero su implementación debe ser cuidadosamente diseñada para minimizar su impacto ambiental.

- **Almacenamiento eficiente**:
  En lugar de almacenar datasets completos en la blockchain, se recomienda registrar solo hashes o referencias a los datos. Esto reduce significativamente el consumo de espacio y energía, ya que los datos completos se almacenan fuera de la cadena.

Al **almacenar los datos fuera de la blockchain** y registrar solo los *hashes* o referencias:

1. **Impacto en consumo y eficiencia**
   - **Menor consumo energético y de almacenamiento**: la blockchain guarda únicamente un identificador criptográfico (hash), que pesa pocos bytes en vez de gigabytes o terabytes.
   - **Menor huella ambiental**: al reducir las operaciones de cómputo y el tamaño de la cadena, se evita replicar información pesada en todos los nodos.

- **Mayor escalabilidad**: la blockchain puede crecer más lentamente y seguir siendo operativa con costes razonables.

2. **Impacto en seguridad y trazabilidad**
    - Los datos completos permanecen en repositorios externos (bases de datos distribuidas, almacenamiento en la nube, IPFS, etc.), pero su **integridad está garantizada** por el hash registrado en la blockchain.
    - Esto asegura que, aunque los datos no estén dentro de la cadena, se pueda verificar su autenticidad en cualquier momento.
3. **Comparación con almacenarlos en la cadena**
    - **En la cadena**: cada nodo debe guardar una copia exacta de los datos → seguridad máxima, pero consumo energético y de almacenamiento muy alto, además de baja eficiencia.
    - **Fuera de la cadena**: se reduce drásticamente la redundancia y el impacto ambiental, aunque se depende de sistemas externos para la disponibilidad de los datos.
4. **Caso con datos distribuidos (Federated Learning – FL)**
    - En **aprendizaje federado**, los datos permanecen localmente en cada nodo (por ejemplo, hospitales, móviles o empresas), y solo se comparten modelos entrenados o gradientes.
    - La blockchain puede almacenar **hashes de los modelos parciales o actualizaciones**, no los datasets.
    - Ventajas:
        - Respeta la privacidad y soberanía de los datos.
        - La trazabilidad de las contribuciones queda en la blockchain (qué nodo entrenó, cuándo, con qué versión).
        - Impacto ambiental menor, ya que no hay necesidad de replicar los datasets completos ni en blockchain ni en un repositorio centralizado.

- **Capa de confianza y auditoría**:
  Blockchain debe utilizarse principalmente como una capa de confianza para garantizar la integridad de los datos y las transacciones. Por ejemplo, en cadenas de suministro, blockchain puede registrar los hashes de los certificados de autenticidad de los productos, mientras que los datos completos se almacenan en servidores externos.

El uso de blockchain como **capa de confianza y auditoría** puede considerarse **sostenible** si se diseña con ciertos principios:

1. **Minimización del consumo en la cadena**
    - En lugar de guardar todos los datos, la blockchain solo registra *pruebas criptográficas* (hashes, firmas digitales, "proofs"), que pesan muy poco.
    - Esto evita replicar información pesada en cada nodo y reduce tanto el almacenamiento como el cómputo.
2. **Uso de mecanismos de consenso más eficientes**
    - En vez de *Proof of Work* (muy costoso energéticamente), se pueden usar *Proof of Stake* o variantes más ligeras (*Proof of Authority*, *Delegated PoS*).
    - Estas alternativas reducen drásticamente el gasto energético de la red sin perder seguridad.
3. **Auditoría sostenible en la práctica**
    - La blockchain funciona como un **registro inmutable de referencias** (ej. hash de un certificado de autenticidad).
    - Los datos completos se almacenan en servidores, repositorios distribuidos o sistemas como IPFS, que pueden estar optimizados energéticamente y con políticas de sostenibilidad (ej. data centers verdes).
    - El impacto ambiental directo de la blockchain se limita a guardar y validar pequeñas entradas, no datasets masivos.
4. **Escalabilidad y trazabilidad sin exceso de recursos**
    - Cada transacción en la blockchain actúa como un **sello de tiempo verificable**.
    - Esto permite que la auditoría sea transparente y verificable sin necesidad de que múltiples actores guarden duplicados completos de los documentos.

- **Protocolos de consenso sostenibles**:
  Protocolos como Proof of Stake (PoS), Proof of Authority (PoA) y Directed Acyclic Graphs (DAG) son alternativas más sostenibles al tradicional Proof of Work (PoW). Estos protocolos reducen el consumo energético al eliminar la necesidad de cálculos intensivos para validar las transacciones.

Ejemplo práctico: En proyectos de trazabilidad de alimentos, blockchain registra únicamente los hashes de los datos de origen y transporte, mientras que los detalles completos se almacenan en bases de datos externas.

Diseño eco-eficiente en la integración IA–Blockchain

La integración de IA y blockchain debe optimizarse para minimizar el consumo energético y maximizar la eficiencia.

- **Minimizar transacciones on-chain**:
  Agrupar múltiples transacciones en una sola (batching) reduce el número total de operaciones en la cadena, disminuyendo el consumo energético.
- **Externalizar cálculos intensivos**:
  Los cálculos complejos deben realizarse fuera de la blockchain (off-chain computing), utilizando la cadena solo para registrar resultados clave o verificaciones. Frameworks como Chainlink y TrueBit permiten implementar este enfoque de manera eficiente.
- **Uso de nodos verdes**:
  Implementar nodos alimentados por fuentes de energía renovable, como paneles solares o turbinas eólicas, puede reducir la huella de carbono de la red. Además, los nodos verdes pueden recibir incentivos adicionales en forma de tokens para fomentar su adopción.

Ejemplo práctico: En microgrids energéticas, los modelos de predicción de demanda se ejecutan localmente en nodos edge, mientras que blockchain registra las transacciones de energía entre los usuarios.

Buenas prácticas en el ciclo de vida

Para garantizar la sostenibilidad a lo largo del ciclo de vida de las soluciones de IA y blockchain, se deben adoptar las siguientes prácticas:

- **Monitorización del consumo energético**:
  Herramientas como Green Algorithms y Carbontracker permiten evaluar el impacto ambiental durante el entrenamiento, la validación y el despliegue de los modelos.
- **Métricas ambientales**:
  Establecer indicadores como la huella de carbono, el Power Usage Effectiveness (PUE) y la eficiencia computacional permite medir y optimizar el impacto ambiental.
- **Escalabilidad sostenible**:
  Diseñar sistemas que puedan crecer en número de usuarios sin aumentar exponencialmente el consumo energético. Esto puede lograrse mediante la adopción de arquitecturas distribuidas y la optimización de los recursos computacionales.

Ejemplo práctico: En sistemas de movilidad urbana, los algoritmos de optimización de rutas procesan datos en dispositivos edge, mientras que blockchain registra solo los resultados clave, como las emisiones evitadas.

Ejemplos prácticos

1. **Trazabilidad en cadenas de suministro sostenibles**:
   La IA certifica el origen y la autenticidad de los productos, mientras que blockchain registra únicamente los hashes de los certificados, garantizando la trazabilidad con un consumo mínimo de recursos.

2. **Predicción energética en microgrids**:
   Los modelos de IA predicen la demanda energética localmente, y blockchain audita las transacciones de energía entre los usuarios, asegurando la transparencia y la eficiencia.
3. **Movilidad urbana sostenible**:
   Algoritmos verdes procesan datos en dispositivos edge para optimizar rutas y reducir emisiones, mientras que blockchain registra las métricas clave de sostenibilidad.

Checklist de guía (DOs & DON'Ts)

DOs:

- Usar modelos compactos y optimizados.
- Adoptar protocolos de consenso energéticamente eficientes.
- Medir y reportar el impacto ambiental en cada fase del ciclo de vida.
- Priorizar el uso de nodos alimentados por energía renovable.

DON'Ts:

- Almacenar datos pesados en la blockchain.
- Entrenar modelos complejos sin una justificación clara de su valor social o ambiental.
- Ignorar el impacto ambiental de las transacciones on-chain.

4. Recomendaciones

La sostenibilidad en la intersección de blockchain e inteligencia artificial (IA) requiere un enfoque integral que abarque aspectos técnicos, ambientales, regulatorios y de aplicación. Estas recomendaciones están diseñadas para guiar a desarrolladores, reguladores y usuarios hacia la implementación de soluciones responsables y sostenibles.

4.1. Recomendaciones técnicas

1. **Selección de protocolos de consenso eficientes**
   Los protocolos de consenso son el núcleo de las redes blockchain, ya que determinan cómo se validan las transacciones y se asegura la integridad de la red. Sin embargo, su impacto ambiental varía significativamente.
   - **Proof of Work (PoW)**: Aunque es el protocolo más conocido, utilizado por Bitcoin, su consumo energético es extremadamente alto debido a la necesidad de resolver problemas computacionales complejos.
     - **Impacto**: Bitcoin consume aproximadamente 127 TWh al año, comparable al consumo energético de países como Noruega.

- **Proof of Stake (PoS)**: Este protocolo elimina la necesidad de cálculos intensivos, reduciendo el consumo energético en más del 99%. Ethereum, al migrar de PoW a PoS, logró este ahorro significativo

2. **Minimización de datos y transacciones en blockchain**
   Reducir el tamaño de las transacciones y los datos almacenados en blockchain puede disminuir significativamente el consumo energético.
   - **Técnicas recomendadas**:
     - **Almacenamiento off-chain**: Guardar datos grandes fuera de la cadena y solo almacenar referencias en blockchain.
     - **Compresión de datos**: Reducir el tamaño de los datos antes de almacenarlos.
   - **Ejemplo**: zk-SNARKs, una tecnología de pruebas de conocimiento cero, permite realizar transacciones más ligeras y eficientes.

4.2. Recomendaciones de sostenibilidad y buenas prácticas verdes

1. **Migración hacia infraestructuras alimentadas con energías renovables**
   Los centros de datos y nodos de blockchain deben utilizar fuentes de energía renovable para reducir su huella de carbono.
   - **Estrategias**:
     - Acuerdos de compra de energía (PPA) con proveedores de energía renovable.
     - Instalación de paneles solares y turbinas eólicas en instalaciones propias.
   - **Ejemplo**: Google y Microsoft ya operan centros de datos 100% renovables, estableciendo un estándar para la industria.
2. **Inclusión de métricas ambientales**
   Es crucial medir y reportar el impacto ambiental de las tecnologías.
   - **Métricas clave**:
     - **Huella de carbono**: Emisiones de CO_2 generadas por la infraestructura.
     - **Power Usage Effectiveness (PUE)**: Relación entre la energía total consumida por un centro de datos y la energía utilizada por su equipo de TI.
     - **Eficiencia energética**: Relación entre el trabajo útil realizado y la energía consumida.

- **Normas aplicables**: ISO 14001 sobre gestión ambiental.

3. **Incentivos para nodos y participantes**
   Implementar mecanismos de recompensa para nodos que utilicen energía renovable o reduzcan su impacto ambiental.
   - **Ejemplo**: Redes como Chia incentivan el uso de almacenamiento eficiente en lugar de minería intensiva.
4. **Promoción de economías circulares digitales**
   Fomentar la reutilización de hardware y la optimización de recursos digitales puede reducir el impacto ambiental.
   - **Caso de uso**: Proyectos de reciclaje de hardware blockchain en la UE.

4.3. Recomendaciones regulatorias y de gobernanza

1. **Alineación con normativas y estándares internacionales**
   Las soluciones deben cumplir con marcos como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), la Taxonomía de la UE y la CSRD.
   - **Ejemplo**: La Taxonomía de la UE clasifica actividades sostenibles, incluyendo blockchain y IA.
2. **Transparencia y trazabilidad en el reporte ambiental**
   Blockchain puede utilizarse para registrar y verificar datos ambientales, mejorando la transparencia.
   - **Caso de uso**: Proyectos de trazabilidad de emisiones de carbono en la UE.
3. **Establecimiento de marcos éticos**
   Es fundamental desarrollar principios éticos para el uso de blockchain e IA, asegurando que estas tecnologías no comprometan la sostenibilidad.
   - **Normas aplicables**: Directrices éticas de la UE para la IA.

5. Ejemplos de blockchain e IA

5.1. Energía y sostenibilidad

Redes eléctricas inteligentes (smart grids)

Las redes eléctricas inteligentes son sistemas avanzados que integran tecnologías digitales, como sensores IoT, inteligencia artificial (IA) y blockchain, para gestionar de manera eficiente la generación, distribución y consumo de energía. Estas redes permiten una comunicación bidireccional entre los proveedores de energía y los consumidores, optimizando el uso de recursos y reduciendo el desperdicio.

Ejemplo práctico:
En Alemania, el proyecto "Enerchain" utiliza blockchain para registrar transacciones de energía renovable entre productores y consumidores. La IA, por su parte, analiza patrones de consumo en tiempo real para ajustar la distribución de energía, evitando sobrecargas y maximizando la eficiencia. Este enfoque también permite a los consumidores vender el excedente de energía generado por paneles solares o turbinas eólicas directamente a otros usuarios, eliminando intermediarios.
Beneficios esperados:

- Reducción de pérdidas energéticas en la distribución.
- Mayor transparencia en el origen de la energía consumida.
- Fomento del uso de energías renovables.
  Desafíos:
- Garantizar la interoperabilidad entre diferentes sistemas de blockchain.
- Proteger la privacidad de los datos de consumo.

Microgrids comunitarias y aprendizaje federado

Las microgrids son redes eléctricas locales que pueden operar de manera independiente o conectadas a la red principal. Estas redes permiten a las comunidades generar, almacenar y compartir energía de manera autónoma. El aprendizaje federado, una técnica de IA que entrena modelos sin compartir datos sensibles, puede equilibrar la producción y la demanda en estas microgrids.

Ejemplo práctico:
En los Países Bajos, el proyecto "Powerpeers" permite a los hogares compartir energía renovable generada localmente. Los datos de consumo y generación se procesan localmente mediante edge computing, mientras que el aprendizaje federado optimiza el balance energético sin comprometer la privacidad de los usuarios.
Beneficios esperados:

- Reducción de la dependencia de redes centrales.
- Mayor resiliencia energética en comunidades locales.
- Optimización del uso de recursos energéticos.
  Desafíos:
- Escalabilidad de las microgrids a nivel regional o nacional.
- Regulaciones locales que limiten el intercambio de energía.

5.2. Supply chain verde

Trazabilidad del origen de materias primas sostenibles

La trazabilidad en las cadenas de suministro es esencial para garantizar que los productos cumplen con estándares de sostenibilidad. Blockchain permite registrar cada etapa del ciclo de vida de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su distribución, proporcionando un registro inmutable y transparente.

Ejemplo práctico:
En la industria alimentaria, el proyecto "IBM Food Trust" utiliza blockchain para rastrear el origen de los ingredientes en productos alimenticios. Por ejemplo, los consumidores pueden escanear un código QR en un paquete de café para verificar que los granos provienen de cultivos sostenibles certificados.
Beneficios esperados:

- Mayor confianza del consumidor en productos sostenibles.
- Reducción del fraude en certificaciones de sostenibilidad.
- Mejora en la eficiencia de auditorías y controles regulatorios.
  Desafíos:
- Costos iniciales de implementación de blockchain.
- Necesidad de estandarización en los datos registrados.

Optimización logística con IA

La IA puede analizar datos históricos y en tiempo real para identificar ineficiencias en la cadena de suministro, optimizando rutas de transporte, reduciendo tiempos de entrega y minimizando emisiones de carbono.

Ejemplo práctico:
En Francia, la empresa "Geodis" utiliza IA para predecir retrasos en la entrega debido a condiciones climáticas adversas. Esto permite ajustar las rutas de transporte y consolidar envíos, reduciendo el consumo de combustible y las emisiones de CO2.
Beneficios esperados:

- Reducción de costos operativos.
- Disminución de la huella de carbono en el transporte.
- Mejora en la satisfacción del cliente.
  Desafíos:
- Integración de IA con sistemas logísticos existentes.
- Acceso a datos de calidad para entrenar los modelos de IA.

5.3. Agricultura y gestión de recursos naturales

Sensores IoT y edge computing

Los sensores IoT instalados en campos agrícolas recopilan datos sobre humedad, temperatura, calidad del suelo y otros parámetros clave. Estos datos se procesan localmente mediante edge computing, reduciendo la latencia y el consumo energético.

Ejemplo práctico:
En España, el proyecto "SmartAgriHubs" utiliza sensores IoT para monitorear el riego en tiempo real. Los datos procesados localmente permiten ajustar el uso de agua según las necesidades específicas de cada parcela, reduciendo el desperdicio y mejorando la sostenibilidad.
Beneficios esperados:

- Uso más eficiente de recursos naturales como agua y fertilizantes.
- Incremento en la productividad agrícola.
- Reducción del impacto ambiental de la agricultura.
  Desafíos:
- Costos de instalación y mantenimiento de sensores IoT.
- Conectividad en áreas rurales.

Blockchain para certificaciones

Blockchain registra certificaciones relacionadas con el uso eficiente de recursos, como agua y fertilizantes, asegurando la transparencia y la confianza en los productos agrícolas.

Ejemplo práctico:
En Italia, el proyecto "Wine Blockchain" certifica que los viñedos cumplen con estándares de agricultura ecológica. Esto facilita la exportación de vinos a mercados internacionales que exigen altos estándares de sostenibilidad.
Beneficios esperados:

- Acceso a mercados internacionales con altos estándares de sostenibilidad.
- Reducción del fraude en certificaciones agrícolas.
- Mejora en la reputación de los productores.
  Desafíos:
- Educación y capacitación de los agricultores en el uso de blockchain.
- Regulaciones locales sobre certificaciones digitales.

5.4. Ciudades inteligentes y movilidad

Gestión de tráfico y calidad del aire con IA

En las ciudades inteligentes, los sensores urbanos equipados con IA ligera recopilan datos en tiempo real sobre el flujo de tráfico, la calidad del aire y otros indicadores clave. Estos datos se procesan localmente mediante edge computing, lo que permite tomar decisiones rápidas y reducir la congestión vehicular y las emisiones contaminantes.

Ejemplo práctico:
En Copenhague, Dinamarca, se ha implementado un sistema de gestión de tráfico basado en IA que ajusta los semáforos en tiempo real según el flujo vehicular. Además, sensores distribuidos por la ciudad monitorean la calidad del aire, proporcionando datos que ayudan a identificar áreas con altos niveles de contaminación. Estos datos se utilizan para diseñar políticas de movilidad sostenible, como la creación de zonas de bajas emisiones.
Beneficios esperados:

- Reducción de la congestión vehicular.
- Mejora en la calidad del aire urbano.
- Optimización del transporte público y privado.
  Desafíos:
- Garantizar la privacidad de los datos recopilados por los sensores.
- Integrar sistemas de IA con infraestructuras urbanas existentes.

Transparencia en datos de movilidad con blockchain

Blockchain puede garantizar la integridad y transparencia de los datos relacionados con la movilidad urbana, como el uso de bicicletas compartidas, vehículos eléctricos y transporte público. Esto fomenta la confianza de los ciudadanos y facilita la implementación de políticas basadas en datos.

Ejemplo práctico:
En Estonia, se utiliza blockchain para registrar el uso de vehículos eléctricos y estaciones de carga. Los ciudadanos pueden acceder a esta información para verificar el impacto ambiental de sus decisiones de movilidad. Además, los datos recopilados se utilizan para optimizar la ubicación de nuevas estaciones de carga.
Beneficios esperados:

- Mayor confianza en los datos de movilidad urbana.
- Fomento del uso de transporte sostenible.
- Transparencia en la implementación de políticas públicas.
  Desafíos:
- Costos iniciales de implementación de blockchain.
- Necesidad de estandarización en los datos de movilidad.

5.5. Salud y datos sensibles

Aprendizaje federado y blockchain

El aprendizaje federado permite entrenar modelos de IA utilizando datos distribuidos en diferentes instituciones de salud, sin necesidad de centralizar los historiales médicos. Blockchain

asegura la integridad y privacidad de estos datos, proporcionando un registro inmutable de las transacciones realizadas durante el entrenamiento de los modelos.

Ejemplo práctico:
El proyecto europeo "MELLODDY" utiliza aprendizaje federado y blockchain para desarrollar modelos predictivos en oncología. Los datos clínicos permanecen en los hospitales participantes, pero los modelos se entrenan colectivamente, garantizando la privacidad de los pacientes.
Beneficios esperados:

- Protección de la privacidad de los datos clínicos.
- Colaboración entre instituciones de salud sin compartir datos sensibles.
- Desarrollo de modelos de IA más robustos y representativos.
  Desafíos:
- Complejidad técnica en la implementación de aprendizaje federado.
- Regulaciones estrictas sobre el uso de datos de salud.

Reducción de costes energéticos asociados al transporte y duplicación de datos

El uso de blockchain y aprendizaje federado reduce la necesidad de transferir grandes volúmenes de datos entre instituciones, disminuyendo los costos energéticos asociados al transporte de datos y la duplicación de información.

Ejemplo práctico:
En un proyecto piloto en Alemania, hospitales y laboratorios utilizan blockchain para registrar el acceso a datos clínicos y aprendizaje federado para entrenar modelos de diagnóstico. Esto elimina la necesidad de transferir datos entre instituciones, reduciendo significativamente el consumo energético.
Beneficios esperados:

- Reducción de la huella de carbono en el sector salud.
- Mayor eficiencia en el uso de recursos tecnológicos.
- Cumplimiento con regulaciones de privacidad como el GDPR.
  Desafíos:
- Necesidad de infraestructura tecnológica avanzada.
- Resistencia al cambio en instituciones tradicionales.

5.6. Finanzas sostenibles

Tokenización de créditos de carbono

La tokenización de créditos de carbono mediante blockchain permite crear activos digitales que representan una cantidad específica de emisiones de carbono compensadas. Estos tokens pueden ser comercializados en mercados digitales, facilitando la inversión en proyectos sostenibles.

Ejemplo práctico:
En Suecia, la plataforma "Chooose" utiliza blockchain para tokenizar créditos de carbono generados por proyectos de reforestación y energías renovables. Las empresas pueden adquirir estos tokens para compensar sus emisiones, mientras que los registros en blockchain garantizan la transparencia y la trazabilidad de las transacciones.
Beneficios esperados:

- Mayor transparencia en el comercio de créditos de carbono.
- Acceso a mercados globales para proyectos sostenibles.
- Fomento de la inversión en iniciativas de mitigación del cambio climático.
  Desafíos:
- Regulaciones inconsistentes sobre créditos de carbono en diferentes países.
- Necesidad de estándares globales para la tokenización.

IA para verificar el cumplimiento de criterios ESG

La IA puede analizar grandes volúmenes de datos financieros y no financieros para verificar en tiempo real el cumplimiento de criterios ambientales, sociales y de gobernanza (ESG) en inversiones.

Bibliografía

· **Comisión Europea. *Blockchain para la acción climática*.**

· Comisión Europea. *Fomentar un planteamiento europeo en materia de inteligencia artificial*.

· Comisión Europea. *Sector digital ecológico.*

· CORDIS. *Innovative blockchain traceability technology and Stakeholders' Engagement Strategy*. .

· Sector digital ecológico.

· Fomentar un planteamiento europeo en materia de inteligencia artificial.

· Innovative blockchain traceability technology.

Energy Efficiency of Blockchain Technologies, Observatorio Europeo de Blockchain

· Environmental Impact of Digital Assets, OCDE.

· Measuring the Environmental Impacts of Artificial Intelligence, OCDE.

· AI for Sustainability, IEC

· Observatorio Europeo de Blockchain. *Energy Efficiency of Blockchain Technologies*.

· Fondo Monetario Internacional. *Blockchain Consensus Mechanisms: A Primer for Supervisors*.

· Banco Central Europeo. *Mining the Environment – Is Climate Risk Priced into Crypto-Assets?*.

· SpringerOpen. *Evolution of Blockchain Consensus Algorithms: A Review on the Latest Developments*.

MDPI. *Blockchain Integration and Its Impact on Renewable Energy*.

OECD. (2022). *Measuring the Environmental Impacts of Artificial Intelligence*.

· European Commission. (2021). *European Industrial Technology Roadmap for Cloud and Edge Computing*.

· IEEE Standards Association. (2025). *IEEE 3127-2025: Blockchain-Based Federated Machine Learning*.

· IEEE Xplore. (2024). *Fedchain: Decentralized Federated Learning and Blockchain-Assisted System for Sustainable Irrigation*.

· **EU Blockchain Observatory & Forum. (2024). *Comprehensive report highlighting sustainable and energy-efficient blockchain solutions***.

· **OCDE. (2022). *Environmental impact of digital assets***.

· **OCDE. (2023). *Measuring the environmental impact of AI compute and applications*.**

· **Parlamento Europeo. (2019). *EU guidelines on ethics in artificial intelligence***.

· **ITU**. (2024). *AI and the Environment - International Standards for AI and the Environment*.

· **SSRN**. (2023). *Blockchain Innovation for Sustainable Supply Chain Management under EU CSRD Regulation*.

· **UNEP**. (2022). *How artificial intelligence is helping tackle environmental challenges*.