



Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales
ICADE

Sostenibilidad y Eficiencia Energética en Criptomonedas: Evaluación de Mecanismos de Consenso y Marcos Regulatorios

Autor: Borja Muñoz Espinosa
Director: Francisco Javier Rivas Compains

MADRID | Junio 2025

Resumen:

Este trabajo analiza la sostenibilidad ambiental de las tecnologías blockchain, con especial atención al consumo energético y la huella de carbono asociada al uso de criptomonedas. En un contexto de creciente preocupación global por el cambio climático y la necesidad urgente de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, el estudio examina críticamente el impacto ambiental de los principales mecanismos de consenso utilizados en blockchain, especialmente Proof of Work (PoW) y Proof of Stake (PoS). A través de un análisis comparativo detallado, se pone de relieve el elevado coste energético y climático del modelo PoW, así como las mejoras significativas en eficiencia y sostenibilidad alcanzadas mediante PoS, tras la transición de Ethereum en 2022.

La investigación adopta un enfoque multidisciplinar que integra perspectivas técnicas, medioambientales, regulatorias y económicas. Incluye una revisión exhaustiva de la literatura científica, el análisis de datos empíricos sobre consumo energético y el estudio de casos reales de minería alimentada por energías renovables en regiones como Islandia, Texas y Quebec. Asimismo, se evalúa el potencial de mecanismos de consenso emergentes -como DPoS, PoH o PBFT- y se examinan los marcos regulatorios vigentes y en desarrollo, destacando el papel del Reglamento MiCA de la Unión Europea y sus exigencias de divulgación ambiental.

Los resultados indican que la sostenibilidad del ecosistema cripto es técnicamente viable, pero exige una acción coordinada entre desarrolladores, legisladores y actores del mercado. El trabajo concluye con una serie de recomendaciones estratégicas para compatibilizar el desarrollo de criptoactivos con los objetivos climáticos globales, subrayando la necesidad de establecer metodologías estandarizadas para evaluar su impacto ambiental y de avanzar hacia una trazabilidad energética en tiempo real.

Summary:

This thesis explores the environmental sustainability of blockchain technologies, focusing particularly on the energy consumption and carbon footprint of cryptocurrencies. In a context of increasing global concern about climate change and the need to reduce greenhouse gas emissions, this study critically examines the environmental impact of different blockchain consensus mechanisms, especially Proof of Work (PoW) and Proof of Stake (PoS). The work presents an in-depth comparative analysis of both models, highlighting the significant energy demands and carbon emissions associated with PoW, as well as the notable improvements in

efficiency and sustainability achieved through PoS, particularly following Ethereum's transition in 2022.

The research adopts a multidisciplinary approach, combining technical, environmental, regulatory and economic perspectives. It includes an extensive review of the scientific literature, empirical energy consumption data, and case studies of mining operations powered by renewable energy in regions such as Iceland, Texas and Quebec. Furthermore, the study assesses the potential of emerging consensus mechanisms -such as Delegated Proof of Stake (DPoS), Proof of History (PoH), and Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT)- and examines current and forthcoming regulations, with special attention to the EU's MiCA framework and its environmental disclosure requirements.

The findings suggest that blockchain sustainability is technically achievable but requires coordinated efforts from developers, regulators, and market participants. The study concludes by proposing strategic recommendations for reconciling crypto-asset development with climate goals, while recognizing the need for future research on standardized methodologies for environmental impact assessment and real-time energy traceability.

Índice

ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	6
GLOSARIO DE ABREVIATURAS.....	6
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 CONTEXTO Y PROBLEMÁTICA INICIAL	7
1.2 OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	9
<i>Objetivos específicos:</i>	9
<i>Preguntas de investigación:</i>	10
1.3 LIMITACIONES	10
1.4 METODOLOGÍA.....	11
<i>Procedimiento de Investigación</i>	12
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1 INTRODUCCIÓN TECNOLÓGICA A LAS CRIPTOMONEDAS Y MECANISMOS DE CONSENSO.....	12
2.2 BITCOIN Y PROOF OF WORK.....	13
<i>Seguridad y Resistencia a Ataques</i>	13
<i>Desarrollo y Aplicaciones del PoW en la Industria Blockchain</i>	14
<i>Limitaciones y Desafíos del PoW</i>	14
2.3 PROOF OF STAKE (POS) Y CARACTERÍSTICAS	15
<i>Funcionamiento del PoS</i>	15
<i>Ventajas y Desafíos del PoS</i>	16
<i>Implementación y Expansión de PoS en el Ecosistema Blockchain</i>	17
2.4 COMPARATIVA TÉCNICA ENTRE POW Y POS.....	17
<i>Método de consenso y validación de bloques</i>	17
<i>Seguridad y resistencia a ataques</i>	18
<i>Escalabilidad y rendimiento</i>	18
<i>Adopción y Tendencias en la Industria Blockchain</i>	19
3. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DE LA TECNOLOGÍA BLOCKCHAIN	19
3.1 SOSTENIBILIDAD DEL PROOF OF WORK (POW).....	19
<i>Consumo energético de PoW</i>	19

<i>Factores que contribuyen al consumo energético de PoW</i>	21
3.2 CASOS DE ESTUDIO PRINCIPALES.....	23
<i>Casos de Minería Alimentada por Energías Renovables</i>	23
<i>Nuevas Sinergias entre Minería y Energías Renovables</i>	25
3.3 DESAFÍOS EN LA TRAZABILIDAD ENERGÉTICA Y VERIFICACIÓN DEL USO DE RENOVABLES	25
3.4 IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DE PROOF OF STAKE (PoS)	26
<i>Reducción del consumo energético en PoS</i>	26
<i>Factores que contribuyen a la sostenibilidad de PoS</i>	26
3.5 COMPARACIÓN DE EMISIONES DE CO ₂ ENTRE POW Y POS	27
<i>Limitaciones metodológicas y necesidad de evaluación específica</i>	28
4. MECANISMOS DE CONSENSO ALTERNATIVOS Y CONSUMO ENERGÉTICO	29
4.1 INTRODUCCIÓN A LOS MECANISMOS ALTERNATIVOS	29
4.2 DELEGATED PROOF OF STAKE (DPoS)	31
<i>Limitaciones DPoS</i>	32
4.3 PROOF OF HISTORY (PoH)	32
<i>Limitaciones de PoH</i>	33
4.4 PROOF OF AUTHORITY (PoA).....	33
<i>Limitaciones de PoA</i>	34
4.5 FEDERATED BYZANTINE AGREEMENT (FBA)	34
<i>Limitaciones de FBA</i>	35
4.6 PRACTICAL BYZANTINE FAULT TOLERANCE (PBFT)	35
<i>Limitaciones de PBFT</i>	36
4.7 TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN Y LIMITACIONES PARA IMPLEMENTAR UNA BLOCKCHAIN SOSTENIBLE	36
5. MARCO REGULATORIO EN MATERIA DE SOSTENIBILIDAD DE CRIPTOACTIVOS	37
5.1 INICIATIVAS REGULATORIAS PIONERAS: UNIÓN EUROPEA (UE)	37
5.2 INDICADORES OBLIGATORIOS Y OPCIONALES EN LA DIVULGACIÓN SOSTENIBLE.....	38
5.3 RETOS EN LA IMPLEMENTACIÓN EFECTIVA DE LAS REGULACIONES DE SOSTENIBILIDAD	39
<i>Cooperación internacional y selección de estándares regulatorios</i>	40
6. CONCLUSIONES.....	41
6.1 SÍNTESIS DE LOS HALLAZGOS PRINCIPALES	41

6.2 VALORACIÓN CRÍTICA.....	42
<i>Limitaciones del estudio</i>	42
6.3 APORTES DEL TRABAJO	43
6.4 PERSPECTIVAS FUTURAS	44
7. BIBLIOGRAFÍA.....	45

Índice de Tablas

Tabla 1: Comparativa General PoW y PoS.....	17
Tabla 2: Uso Aproximado de Energía Renovable en Minería de Bitcoin	22
Tabla 3: Comparativa de Consumo Energético entre PoW y PoS.....	27

Índice de Gráficas

Figura 1: Transacciones por Segundo (TPS) de Diferentes Redes PoS.....	18
Figura 2: TWh Países vs Bitcoin 2024	20
Figura 3: Comparativa Consumo anual en TWh Bitcoin y Ethereum.....	28
Figura 4: Comparativa Capitalización de Mercado top 3 Criptomonedas.....	30

Glosario de Abreviaturas

ASIC: *Application-Specific Integrated Circuit* (Circuito Integrado de Aplicación Específica)

BA: *Bachelor of Administration*

CBECI: *Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index*

CPU: *Central Processing Unit* (Unidad Central de Procesamiento)

DPoS: *Delegated Proof of Stake* (Prueba Delegada de Participación)

ESMA: *European Securities and Markets Authority* (Autoridad Europea de Valores y Mercados)

ETH: *Ethereum*

FBA: *Federated Byzantine Agreement* (Acuerdo Bizantino Federado)

FPGA: *Field-Programmable Gate Array* (Matriz de Puertas Programables en Campo)

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GPU: *Graphics Processing Unit* (Unidad de Procesamiento Gráfico)

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático)

MiCA: *Markets in Crypto-Assets Regulation* (Reglamento sobre Mercados de Criptoactivos)

MtCO₂: Millones de toneladas de dióxido de carbono

PoA: *Proof of Authority* (Prueba de Autoridad)

PoH: *Proof of History* (Prueba de Historia)

PoS: *Proof of Stake* (Prueba de Participación)

PoW: *Proof of Work* (Prueba de Trabajo)

P2P: *Peer-to-Peer* (De Igual a Igual)

PBFT: *Practical Byzantine Fault Tolerance* (Tolerancia Práctica a Fallos Bizantinos)

RECs: *Renewable Energy Certificates* (Certificados de Energía Renovable)

SOL: *Solana*

TIC: Tecnologías de la Información y la Comunicación

TPS: *Transactions Per Second* (Transacciones Por Segundo)

TWh: Teravatio-hora

UE: Unión Europea

VDF: *Verifiable Delay Function* (Función de Retardo Verificable)

1. Introducción

1.1 Contexto y Problemática Inicial

El cambio climático es uno de los mayores desafíos ambientales de la actualidad, con un incremento sostenido en los niveles atmosféricos de gases de efecto invernadero (GEI). Desde

1960, aproximadamente 584 gigatoneladas (Gt) de CO₂ han sido emitidas a la atmósfera debido al uso de combustibles fósiles, cambios en el uso del suelo y actividades industriales, lo que ha resultado en un aumento de la temperatura global en 0.9 °C (Mora, Spirandelli, et al., 2018). Se estima que los niveles de CO₂ han pasado de 250 partes por millón (ppm) en 1960 a 424 ppm en 2023, con una proyección de incremento de la temperatura global entre 3 y 5.7 °C para el año 2100, según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021). Este fenómeno ha tenido impactos tangibles, como el alargamiento de los veranos y la reducción de las estaciones frías en las latitudes medias y altas. En respuesta a esta crisis climática, el Acuerdo de París de 2015 estableció el objetivo de mantener el calentamiento global por debajo de los 2 °C (Rogelj et al., 2016). Sin embargo, este desafío se agrava con el crecimiento poblacional, el aumento del consumo de energía y la falta de políticas ambientales efectivas en muchos países.

Dentro de este contexto, el desarrollo de nuevas tecnologías ha jugado un papel crucial en la economía y en la evolución del sector financiero. Una de estas innovaciones es la tecnología *blockchain*, la cual ha permitido la aparición de criptomonedas como Bitcoin y Ethereum. Desde la introducción de Bitcoin en 2008 por Satoshi Nakamoto, la tecnología *blockchain* ha crecido exponencialmente, alcanzando una capitalización de mercado de aproximadamente 2.75 billones de dólares (trillones americanos) en marzo de 2025, con más de 11.000 criptomonedas en circulación (CoinMarketCap, 2025). No obstante, a pesar de su potencial disruptivo, las criptomonedas también presentan retos significativos en términos de sostenibilidad debido a su alto consumo energético y su impacto ambiental.

El proceso de minería de criptomonedas, fundamental para el funcionamiento de redes basadas en Prueba de Trabajo (*Proof of Work*, PoW), es altamente intensivo en energía. Se estima que el consumo eléctrico de Bitcoin en 2025 osciló entre 100 y 175 TWh (Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index, 2025). Estas cifras contrastan con otros sistemas de transacciones electrónicas: en enero 2025, una sola transacción de Bitcoin consume aproximadamente 1214 kWh, mientras que 100 transacciones de Visa requieren solo 148.63 kWh, evidenciando una diferencia de consumo de energía significativa (Statista, 2025). Además, el consumo de energía de las criptomonedas ha mostrado una correlación con la volatilidad de los mercados energéticos, generando efectos indirectos en la demanda de electricidad y combustibles fósiles.

El impacto ambiental del uso masivo de criptomonedas no solo se limita al consumo de energía, sino también a la emisión de carbono asociada a su minería. Se ha estimado que, en 2024, la huella de carbono de Bitcoin fue de aproximadamente 60 - 97 MtCO₂, una cifra comparable

con la de países enteros como Grecia, Austria o Finlandia (*Our World Data, 2025*). Estas emisiones representan un problema ambiental significativo, ya que la mayor parte de la minería de criptomonedas se concentra en países donde la electricidad proviene de fuentes no renovables, como el carbón y el gas natural (*University of Cambridge, 2025*).

A pesar de estos desafíos, la tecnología *blockchain* también presenta oportunidades para mejorar la sostenibilidad ambiental. Algunas soluciones propuestas incluyen la transición de mecanismos de consenso energéticamente ineficientes, como PoW, a alternativas más sostenibles como la Prueba de Participación (Proof of Stake, PoS) (Shinde & Upadhyay, 2024). Ethereum, por ejemplo, completó su transición a PoS con la implementación de Ethereum 2.0, lo que ha reducido drásticamente su consumo energético. Adicionalmente, el desarrollo de minería de criptomonedas basada en energías renovables podría mitigar significativamente su impacto ambiental. Estudios sugieren que, en 2020, un promedio del 29% de la energía utilizada para la minería de criptomonedas provenía de fuentes renovables (Blandin et al., 2020).

En este contexto, el presente trabajo analizará la sostenibilidad de la tecnología cripto y su impacto ambiental, explorando tanto sus implicaciones negativas como las oportunidades para su mitigación. A lo largo del estudio, se examinarán los factores clave que determinan el consumo energético y las emisiones de carbono de las criptomonedas, comparando su impacto con otros sistemas financieros tradicionales. Asimismo, se discutirán posibles soluciones tecnológicas y políticas para reducir la huella ecológica del ecosistema cripto, considerando los avances recientes en energías renovables y en la eficiencia de los algoritmos de consenso.

1.2 Objetivos y Preguntas de Investigación

Objetivos específicos:

- a) Analizar el impacto ambiental estimado de las criptomonedas, con especial atención al consumo energético derivado de los mecanismos de consenso y su relación con la huella de carbono global, teniendo en cuenta la falta de trazabilidad energética y los márgenes de incertidumbre existentes.
- b) Estudiar las innovaciones tecnológicas orientadas a mejorar la sostenibilidad de las redes *blockchain*, incluyendo mecanismos de consenso alternativos, técnicas de optimización de red y el uso de energías renovables en actividades de validación y minería.

- c) Examinar el panorama regulatorio actual en materia de sostenibilidad y criptoactivos, con énfasis en los nuevos requerimientos de divulgación ambiental (como los del Reglamento MiCA en la UE) y su posible impacto en la evolución de tecnologías y modelos de negocio más sostenibles.
- d) Proponer medidas y recomendaciones estratégicas, basadas en la evidencia, para conciliar el desarrollo del ecosistema cripto con los compromisos globales de sostenibilidad y descarbonización.

Preguntas de investigación:

- ¿Cuáles son las principales fuentes de impacto ambiental asociadas al consumo energético y las emisiones de carbono en redes *blockchain*, y cómo varían según el mecanismo de consenso empleado?
- ¿Qué mecanismos de consenso alternativos y qué técnicas de optimización permiten reducir el consumo energético sin comprometer la seguridad y descentralización de las redes?
- ¿Qué grado de fiabilidad existe en las estimaciones sobre el uso de energías renovables en la minería de criptomonedas, y cuáles son los principales retos de trazabilidad energética?
- ¿Qué papel están jugando las políticas regulatorias —en especial en la UE— en la transición hacia criptomonedas más sostenibles, y hasta qué punto están influyendo en el desarrollo tecnológico?

1.3 Limitaciones

a) Incertidumbre en los datos energéticos y de emisiones:

La estimación del consumo energético y de la huella de carbono de las criptomonedas, especialmente en redes que utilizan Proof of Work (PoW), presenta un alto grado de incertidumbre debido a la falta de trazabilidad energética, la opacidad sobre la localización geográfica de los mineros y la diversidad de metodologías utilizadas en los estudios existentes. Por tanto, muchas cifras deben interpretarse como aproximaciones sujetas a revisión.

b) Enfoque en tecnologías con implementación real:

El análisis se ha centrado principalmente en mecanismos de consenso y soluciones tecnológicas que presentan un grado significativo de adopción o madurez, como PoW, PoS, DPoS o PoH. Por ello, se excluyen del estudio propuestas emergentes aún en fase experimental, a pesar de su potencial futuro.

c) Alcance geográfico generalista:

Aunque se consideran marcos regulatorios internacionales relevantes —como el Reglamento MiCA en la Unión Europea—, el estudio no aborda en profundidad las particularidades normativas de cada jurisdicción. Esto puede limitar la aplicabilidad directa de algunas conclusiones en contextos nacionales o locales específicos.

d) Carácter interdisciplinar con enfoque técnico-ambiental:

El trabajo adopta un enfoque transversal que combina perspectivas tecnológicas, medioambientales, económicas y regulatorias. No obstante, se ha optado por no profundizar en dimensiones éticas, sociales o filosóficas relacionadas con el uso de tecnologías descentralizadas, las cuales podrían enriquecer futuros trabajos complementarios.

e) Condicionantes de actualidad y ritmo tecnológico:

Debido a la velocidad con la que evoluciona el ecosistema *blockchain*, algunas conclusiones podrían quedar obsoletas a corto plazo. La continua innovación en mecanismos de consenso, mejoras en eficiencia energética y cambios en el marco normativo hacen necesario considerar este trabajo como una foto del estado actual del sector, sujeta a revisión futura.

1.4 Metodología

Este trabajo adopta un enfoque cualitativo y cuantitativo, combinando el análisis teórico de los mecanismos de consenso con una evaluación empírica de su impacto ambiental. Se ha realizado una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica, considerando fuentes recientes y de alto impacto, como estudios de la Universidad de Cambridge (CBECI), Digiconomist, Ethereum Foundation, y artículos publicados en bases de datos como IEEE, Elsevier y Springer.

El estudio se centra en comparar Proof of Work (PoW) y Proof of Stake (PoS) en términos de consumo energético, emisiones de CO₂, descentralización y eficiencia operativa. Para ello, se han recopilado y contrastado datos de diversas fuentes, incluyendo herramientas especializadas como el Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI). También se han analizado las iniciativas recientes para mitigar el impacto ambiental de PoW, como el uso de energías renovables y la optimización del hardware de minería. Paralelamente, se ha evaluado la evolución de PoS y su potencial como estándar en *blockchain*, considerando casos como la transición de Ethereum a este modelo en 2022.

Procedimiento de Investigación

El desarrollo del estudio ha seguido una progresión estructurada en diversas fases.

- Fase exploratoria: Se llevó a cabo una búsqueda inicial de literatura académica y técnica sobre el impacto medioambiental de las criptomonedas, estableciendo criterios de selección de fuentes con énfasis en datos empíricos actualizados.
- Fase de análisis y síntesis: Se clasificaron las fuentes recopiladas según los siguientes temas clave: impacto energético de PoW, ventajas de PoS, evolución de *blockchain* y alternativas sostenibles. Posteriormente, se extrajeron y compararon datos cuantitativos sobre consumo energético, emisiones de CO₂ y eficiencia transaccional.
- Fase de redacción y estructuración del contenido: Se organizaron los hallazgos en secciones bien diferenciadas dentro del marco teórico y el análisis del impacto ambiental, presentando una comparativa fundamentada en datos científicos y teóricos.
- Fase de revisión y conclusiones: Se llevó a cabo una revisión crítica del estudio, identificando posibles limitaciones y estableciendo conclusiones fundamentadas sobre la sostenibilidad de los diferentes mecanismos de consenso en la *blockchain*.

2. Marco Teórico

2.1 Introducción Tecnológica a las Criptomonedas y Mecanismos de Consenso

Las criptomonedas son activos digitales basados en la tecnología *blockchain*, cuyo propósito es permitir transacciones descentralizadas sin la necesidad de intermediarios financieros tradicionales. Su surgimiento se dio en 2008 con la publicación del *whitepaper* de Bitcoin, desarrollado por el pseudónimo Satoshi Nakamoto (Nakamoto, 2008). Desde entonces, las criptomonedas han evolucionado hasta convertirse en una parte significativa de los mercados financieros digitales, generando debates sobre su impacto económico, tecnológico y ambiental.

La *blockchain* es un tipo de tecnología de registro distribuido (DLT, por sus siglas en inglés) que almacena transacciones en bloques enlazados criptográficamente, formando una cadena inmutable y transparente. Cada participante de la red mantiene una copia actualizada de esta cadena, lo que garantiza redundancia, descentralización y resistencia a manipulaciones (Z. Zheng et al., 2017). Sin embargo, para que esta tecnología funcione de manera segura y

confiable, es esencial que los nodos de la red lleguen a un consenso sobre el estado actual de las transacciones registradas.

A lo largo de los años, se han desarrollado varios mecanismos de consenso para asegurar la integridad de la *blockchain*. Estos mecanismos varían en términos de seguridad, consumo energético, escalabilidad y descentralización. Los dos más utilizados actualmente son Proof of Work (PoW) y Proof of Stake (PoS), aunque han surgido otros enfoques más eficientes en términos energéticos, como IOTA, Solana y Hedera (Lashkari & Musilek, 2021).

A continuación, se analizan los mecanismos de consenso más relevantes, haciendo énfasis en su impacto ambiental y su papel en la evolución tecnológica de las criptomonedas.

2.2 Bitcoin y Proof of Work

El mecanismo de Proof of Work (PoW) fue el primer algoritmo de consenso utilizado en *blockchain* y sigue siendo una de las bases tecnológicas más relevantes dentro del ecosistema de las criptomonedas. PoW fue introducido por Bitcoin en 2008 como un método para garantizar la seguridad, integridad y descentralización de un sistema financiero basado en *blockchain* (Nakamoto, 2008).

PoW opera mediante un proceso denominado minería, en el que los nodos de la red, llamados mineros, compiten para resolver problemas matemáticos criptográficos extremadamente complejos. El primer minero que logra resolver el problema obtiene el derecho a añadir un nuevo bloque a la *blockchain* y recibe una recompensa en criptomonedas (Lashkari & Musilek, 2021). Este mecanismo no solo permite la validación de transacciones, sino que también introduce un incentivo económico para los participantes de la red, asegurando su operatividad continua.

Seguridad y Resistencia a Ataques

El diseño de PoW hace que cualquier intento de modificar los datos de la *blockchain* sea prácticamente inviable sin una capacidad de cómputo inmensa. Esto se debe a que cada bloque está vinculado criptográficamente al anterior, de modo que, para alterar una transacción pasada, un atacante necesitaría recalcular todos los bloques posteriores en la cadena, un proceso que requeriría un nivel de potencia computacional prácticamente inalcanzable (Nakamoto, 2008).

Uno de los principales desafíos de seguridad en *blockchain* es el ataque del 51%, en el que un actor malintencionado obtiene más del 50% del poder de cómputo de la red y puede potencialmente modificar transacciones, censurar operaciones o realizar ataques de doble gasto

(Md Rohul Amin, 2020). Aunque este tipo de ataque es teóricamente posible en PoW, la cantidad de recursos necesarios para llevarlo a cabo en redes como Bitcoin lo convierte en un escenario poco probable en la práctica.

Otro aspecto clave de PoW es su modelo de consenso descentralizado, en el que la verificación de las transacciones no depende de una autoridad centralizada, sino de una red global de mineros independientes (Sedlmeir et al., 2020). No obstante, la descentralización de PoW ha ocasionado numerosos debates debido al aumento de concentración del poder computacional en grandes pools de minería, lo que ha reducido la participación de mineros más pequeños y ha planteado dudas sobre la descentralización real del sistema (Zohar, 2015).

Desarrollo y Aplicaciones del PoW en la Industria Blockchain

A lo largo de los años, PoW ha servido como base para numerosas criptomonedas, entre ellas Ethereum, Litecoin y Monero, cada una con variaciones en sus algoritmos de minería y en sus políticas de emisión. Sin embargo, Ethereum ha dejado de utilizar PoW desde su transición a Proof of Stake (PoS) en 2022, marcando una tendencia hacia la adopción de modelos de consenso más eficientes y escalables (Vangoor et al., 2020).

Además de su uso en criptomonedas, el modelo de PoW también ha encontrado aplicaciones en otros ámbitos tecnológicos, como sistemas de identidad digital, seguridad en redes y prevención de ataques de denegación de servicio (DDoS) (Lim et al., 2024). No obstante, a medida que surgen alternativas como PoS y otros mecanismos de consenso más eficientes, el uso de PoW está siendo cuestionado en términos de viabilidad a largo plazo dentro del ecosistema *blockchain*.

Limitaciones y Desafíos del PoW

A pesar de sus ventajas en términos de seguridad y resistencia a la censura, PoW presenta diversas limitaciones que han impulsado la búsqueda de mecanismos alternativos. Entre los principales desafíos se encuentran los siguientes:

- a) Escalabilidad limitada: PoW requiere que cada transacción sea validada y añadida a la *blockchain* mediante un proceso de minería que consume mucho tiempo y recursos, lo que se traduce en bajas tasas de transacciones por segundo (TPS) en comparación con sistemas de pago tradicionales como Visa o Mastercard (Kohli et al., 2023).
- b) Accesibilidad y costes: La minería en redes PoW se ha vuelto cada vez más cara, ya que la creciente competencia por las recompensas ha impulsado el uso de hardware especializado

(ASICs) y ha incrementado significativamente los gastos en electricidad, lo que limita la participación de usuarios sin acceso a estos recursos (Bonneau et al., 2015; Kohli et al., 2023).

- c) **Riesgo de centralización:** Aunque PoW fue diseñado como un sistema descentralizado, en la práctica la minería se ha concentrado en grandes pools de minería situados en regiones con electricidad barata. Esto ha generado preocupaciones sobre la posible centralización del poder computacional y la influencia que unos pocos actores pueden ejercer sobre la red (Sedlmeir et al., 2020).

Dado estos desafíos, muchas redes *blockchain* han comenzado a explorar alternativas a PoW, con el objetivo de mejorar la eficiencia y reducir las barreras de entrada para los participantes. Uno de los mecanismos que ha ganado mayor popularidad es Proof of Stake (PoS), el cual será analizado en la siguiente sección.

2.3 Proof of Stake (PoS) y Características

El mecanismo de Proof of Stake (PoS) surge como una alternativa al Proof of Work (PoW) con el objetivo de mejorar la eficiencia y escalabilidad de las redes *blockchain*, al tiempo que reduce la dependencia de la minería intensiva en recursos. PoS fue propuesto por primera vez en 2012 como un método que reemplaza la necesidad de potencia computacional con un sistema de validación basado en la posesión y bloqueo de criptomonedas por parte de los participantes de la red (King & Nadal, 2012).

En PoS, los usuarios llamados validadores son seleccionados para verificar y añadir nuevos bloques en función de la cantidad de criptomonedas que poseen y mantienen en *staking*. Cuanto mayor sea la cantidad de criptomonedas en *staking*, mayor será la probabilidad de que un usuario sea elegido para validar un bloque (Lashkari & Musilek, 2021). Este modelo no solo reduce drásticamente el consumo energético, sino que también elimina la necesidad de competir en términos de capacidad de cálculo, como ocurre en PoW.

Funcionamiento del PoS

El proceso de consenso en PoS sigue varios pasos clave:

- **Selección de validadores:** Los nodos que desean participar en la validación de bloques deben bloquear una cantidad determinada de criptomonedas como garantía o *stake*.

- Verificación de transacciones: Un validador es elegido de forma aleatoria (ponderada según el *stake*) para confirmar y añadir un nuevo bloque a la *blockchain*.
- Recompensas y penalizaciones: Los validadores reciben recompensas en forma de criptomonedas por validar correctamente las transacciones. Sin embargo, si un validador actúa de manera deshonesto o intenta manipular la red, puede perder parte o la totalidad de su *stake* en un proceso conocido como *slashing* (Shinde & Upadhyay, 2024; Vangoor et al., 2020).

A diferencia de PoW, donde la competencia por la validación de bloques es abierta y basada en la capacidad computacional, en PoS la red incentiva la honestidad y la estabilidad mediante un sistema en el que los participantes tienen un interés financiero en la integridad del sistema (Sedlmeir et al., 2020).

Ventajas y Desafíos del PoS

PoS ha ganado una adopción creciente en la industria *blockchain* debido a sus múltiples ventajas respecto a PoW:

- Mayor eficiencia energética: Al no depender de un consumo intensivo de electricidad, PoS es mucho más sostenible a largo plazo (Shinde & Upadhyay, 2024).
- Mayor escalabilidad: PoS permite un mayor número de transacciones por segundo en comparación con PoW, facilitando la adopción de *blockchain* en aplicaciones comerciales y financieras (Shinde & Upadhyay, 2024).
- Menor barrera de entrada: No requiere hardware especializado como los ASICs, permitiendo que más usuarios participen en el proceso de consenso (Kohli et al., 2023).

No obstante, PoS también presenta ciertos desafíos:

- Centralización del poder de validación: En PoS, los validadores con mayor cantidad de criptomonedas en *staking* tienen mayor probabilidad de ser seleccionados para validar bloques, lo que puede derivar en una concentración de poder en manos de un número reducido de actores. Además, dicha acumulación de influencia plantea riesgos económicos, ya que entidades con un alto volumen de participación pueden abrir la puerta a posibles manipulaciones y afectar negativamente la seguridad y resiliencia del sistema (Sedlmeir et al., 2020).
- Resistencia a la adopción en Bitcoin y otras criptomonedas PoW: A pesar de sus beneficios, PoS enfrenta resistencia por parte de las comunidades de Bitcoin y otras criptomonedas

basadas en PoW, donde la transición a este modelo es técnicamente compleja y controvertida (Kapengut & Mizrach, 2022).

Implementación y Expansión de PoS en el Ecosistema Blockchain

Uno de los hitos más importantes en la adopción de PoS fue la transición de Ethereum de PoW a PoS en 2022, un proceso conocido como “The Merge”. Este cambio marcó un antes y un después en la evolución de la tecnología blockchain, demostrando que es posible migrar de un sistema basado en minería intensiva a un modelo más sostenible (Buterin, 2013; Kapengut & Mizrach, 2022).

Actualmente, muchas de las nuevas blockchains adoptan PoS o sus variantes como estándar, consolidándolo como el mecanismo de consenso preferido para proyectos que buscan escalabilidad y eficiencia energética. Sin embargo, el debate sobre sus implicaciones en términos de centralización y seguridad sigue en curso, y continúa siendo un área clave de investigación dentro del sector.

2.4 Comparativa técnica entre PoW y PoS

Método de consenso y validación de bloques

En PoW, los mineros validan transacciones resolviendo complejos problemas matemáticos mediante potencia computacional elevada (hardware ASIC y GPU), lo que implica altos costes energéticos (Bublyk et al., 2023). Por el contrario, PoS selecciona validadores según la cantidad de criptomonedas bloqueadas en *staking*, evitando así el esfuerzo computacional intensivo y reduciendo significativamente el consumo energético (Shinde & Upadhyay, 2024).

Tabla 1: Comparativa General PoW y PoS

Característica	Proof of Work (PoW)	Proof of Stake (PoS)
Validación	Competición mediante minería computacional	Selección ponderada según cantidad de tokens
Incentivos	Recompensas por minería y comisiones	Recompensas por <i>staking</i> y comisiones
Tiempo por bloque	Variable según dificultad (Bitcoin ~10 min)	Estable y corto (Ethereum PoS ~12 s)

Fuente: Elaboración Propia

Seguridad y resistencia a ataques

PoW es resistente frente a manipulaciones debido al gran coste computacional que se necesita para atacar la red. Sin embargo, es vulnerable al ataque del 51% si un actor controla más de la mitad de la potencia minera, riesgo reducido en redes establecidas como Bitcoin por los elevados costes económicos (Bach et al., 2018). Además, existe el peligro de centralización en pools mineros.

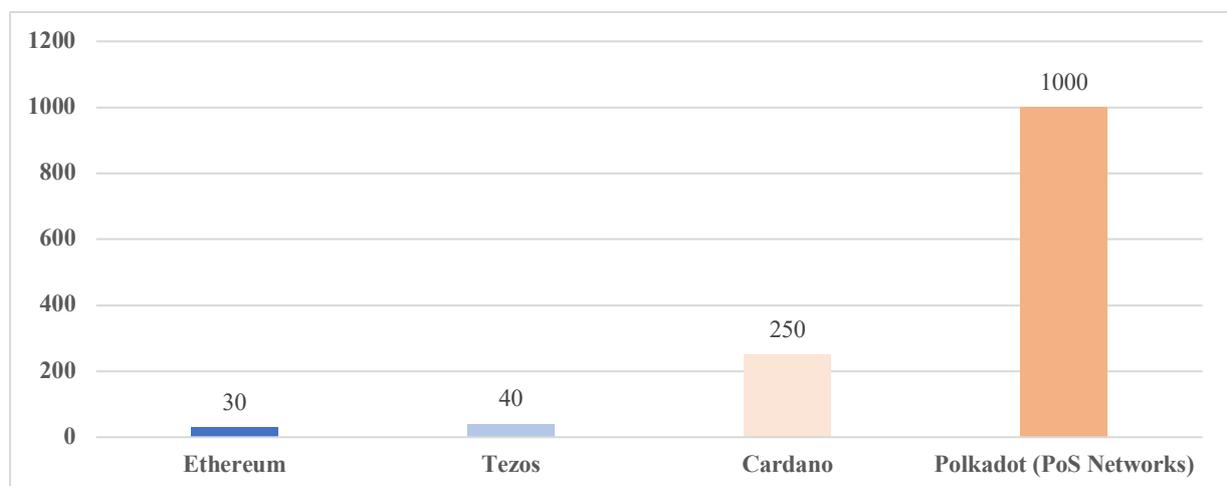
PoS reduce significativamente el riesgo de ataques basados en potencia computacional, pero podría favorecer la centralización económica debido a que validadores con mayores *stakes* concentran influencia (Sedlmeir et al., 2020).

Escalabilidad y rendimiento

En términos de escalabilidad, PoW presenta claras limitaciones, dado que el proceso intensivo de minería restringe el número de transacciones por segundo (TPS). Bitcoin procesa entre 3 y 7 TPS, resultando insuficiente para aplicaciones con grandes volúmenes de transacciones.

Ethereum, tras su transición a PoS, alcanza alrededor de 30 TPS, mientras que redes como Cardano o Polkadot superan los 250 y 1.000 TPS respectivamente (Shinde & Upadhyay, 2024), mostrando así el mayor potencial de PoS para aplicaciones descentralizadas a gran escala. Cabe destacar que existen redes todavía más eficientes como Algorand o Solana, basada en el mecanismo de consenso PoH (explicado más adelante en el apartado 4.3) que pueden realizar hasta 10.000 y 65.000 transacciones por segundo respectivamente (Chen & Micali, 2017; Yakovenko, 2018).

Figura 1: Transacciones por Segundo (TPS) de Diferentes Redes PoS



Fuente: (Shinde & Upadhyay, 2024)

Adopción y Tendencias en la Industria Blockchain

Históricamente, PoW ha sido el mecanismo predominante en *blockchain*, con Bitcoin como su principal exponente. Sin embargo, la creciente necesidad de mayor eficiencia energética y escalabilidad ha llevado a la industria a adoptar PoS como estándar en nuevas redes.

El caso más relevante ha sido la transición de Ethereum de PoW a PoS en 2022, con la implementación de The Merge. Este cambio ha consolidado a PoS como el mecanismo preferido para proyectos que buscan una mayor sostenibilidad y escalabilidad.

No obstante, Bitcoin sigue utilizando PoW y no ha mostrado intención de migrar a otro modelo, principalmente debido a la resistencia de su comunidad y la robustez de su infraestructura actual.

En conclusión, PoW sigue siendo el estándar en redes donde la seguridad y la inmutabilidad son prioritarias, mientras que PoS ha demostrado ser una solución más eficiente para *blockchains* que requieren escalabilidad y sostenibilidad. La evolución futura de la tecnología *blockchain* dependerá de cómo la comunidad y los reguladores aborden estos desafíos y busquen optimizar la eficiencia sin comprometer la seguridad.

3. Impacto Medioambiental de la Tecnología Blockchain

3.1 Sostenibilidad del Proof of Work (PoW)

El mecanismo de consenso Proof of Work (PoW) ha sido ampliamente adoptado en diversas criptomonedas desde la creación de Bitcoin. Si bien este sistema ha demostrado ser altamente seguro y resistente a ataques malintencionados, su operatividad conlleva un consumo energético extremadamente elevado, generando preocupaciones sobre su impacto ambiental. La naturaleza competitiva de la minería PoW ha derivado en un consumo eléctrico comparable al de naciones enteras y en la emisión de grandes cantidades de gases de efecto invernadero (GEI), lo que ha suscitado un intenso debate sobre su sostenibilidad a largo plazo (Malone & O'Dwyer, 2014; Mora, Rollins, et al., 2018).

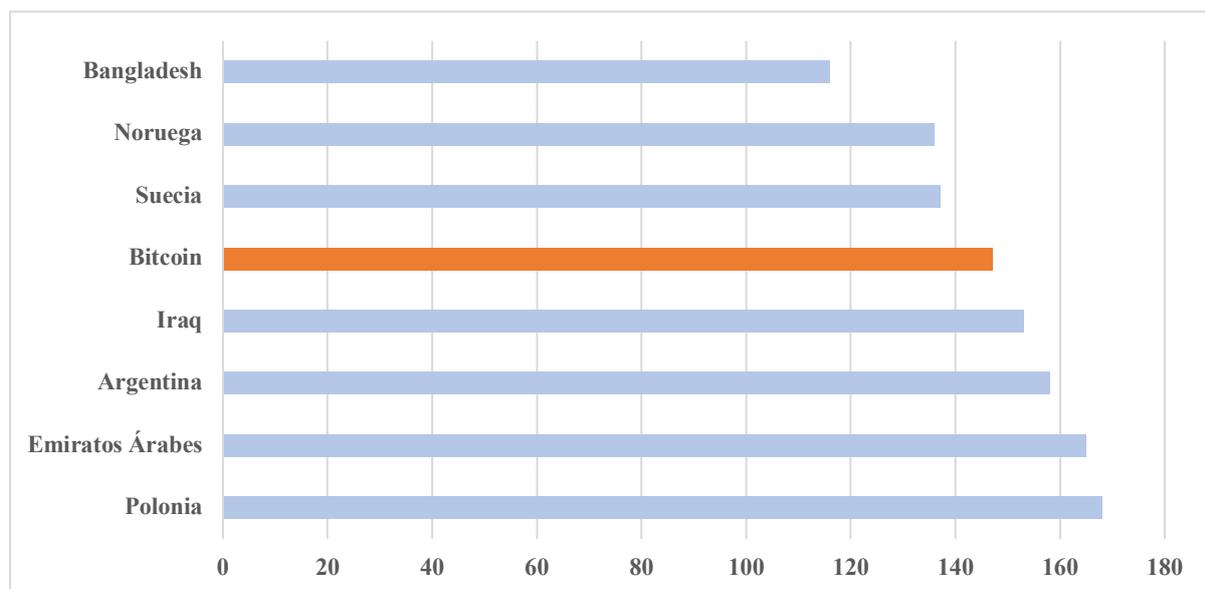
A continuación, se analiza en detalle el consumo energético de PoW, sus factores determinantes y sus implicaciones medioambientales.

Consumo energético de PoW

Como ya comentado anteriormente, el protocolo PoW requiere que los mineros compitan para resolver un problema criptográfico complejo, asegurando así la validación de las transacciones y la generación de nuevos bloques en la *blockchain*. Este proceso implica un uso intensivo de potencia computacional y, por ende, un elevado consumo energético, ya que los mineros realizan billones de cálculos por segundo con el fin de encontrar un hash válido que cumpla con los criterios establecidos por la red (Lashkari & Musilek, 2021).

Según estimaciones recientes, el consumo energético de la red Bitcoin en 2024 osciló alrededor de 100 y 175 teravatios hora (TWh) (*Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index, 2025*). Otro estudio de la Universidad Iberoamericana de la Ciudad de México estimó un consumo total en 2024 de 146 TWh, lo que representa el 0.58% de la producción mundial de electricidad y el 0.22% de la producción total de energía (Ruiz & Choperena, 2024). Este nivel de consumo es comparable al de países como Argentina.

Figura 2: TWh Países vs Bitcoin 2024



Fuente:(Enerdata, 2024)

Este incremento en el consumo energético se ha visto impulsado por el aumento del *hash rate* de la red, que alcanzó un máximo histórico de más de 1.000 *exahashes* por segundo (EH/s) en febrero de 2025. El *hash rate* promedio en marzo de 2025 se situó en ~800 millones de *terahashes* por segundo (TH/s), lo que refleja un incremento del 60% en comparación con el año anterior (*Blockchain.com, 2025*). Este crecimiento en la potencia de cómputo de la red ha

llevado a un aumento significativo en el consumo de electricidad asociado a la minería de Bitcoin.

Factores que contribuyen al consumo energético de PoW

El consumo energético de PoW está condicionado por tres factores principales:

a) Competencia computacional y evolución del hardware:

El diseño de PoW implica una carrera tecnológica en la que los mineros deben actualizar continuamente su equipamiento para mantenerse competitivos. Durante los primeros años de Bitcoin, la minería se realizaba con unidades centrales de procesamiento (CPU). Sin embargo, el aumento progresivo de la dificultad minera impulsó la transición hacia unidades de procesamiento gráfico (GPU) en 2010, matrices de puertas programables en campo (FPGA) en 2011, y, finalmente, circuitos integrados de aplicación específica (ASIC) a partir de 2013 (Küfeoğlu & Özkuran, 2019).

Los ASIC modernos son mucho más eficientes que las GPU en términos de consumo energético por unidad de cómputo (h/J) (Vranken, 2017). Sin embargo, la continua demanda de hardware más potente ha disparado el consumo energético total de la minería, ya que los dispositivos más antiguos no se retiran inmediatamente del mercado. Estudios recientes han demostrado que si toda la minería de Bitcoin se realizara exclusivamente con ASICs de última generación, el consumo energético total podría reducirse a 1,46 TWh/año, muy por debajo de las actuales estimaciones de 100 - 175 TWh/año (Kohli et al., 2023).

b) Redundancia en la operación y tráfico de la red:

Aunque la redundancia en el almacenamiento de datos es una característica común en muchas redes *blockchain* descentralizadas, el modelo de Proof of Work (PoW) presenta una redundancia adicional y particularmente intensiva en recursos. En PoW, no solo todos los nodos almacenan una copia completa de la cadena de bloques, sino que también existe una competencia simultánea entre miles de mineros para validar el mismo bloque. Este proceso, en el que solo uno resulta ganador, implica un uso masivo de potencia computacional que se descarta en cada ronda de validación, lo que amplifica el consumo energético global del sistema.

Además, estudios recientes han evidenciado una elevada redundancia en el tráfico de red de Bitcoin, derivada del mecanismo de retransmisión de datos entre nodos. Según Zhang y Liu

(2021), hasta el 98% del tráfico generado es redundante, es decir, información ya conocida que se vuelve a propagar innecesariamente. Por cada 1.000 nodos adicionales, el tráfico útil se incrementa en tan solo 0,3 GB, mientras que el tráfico total aumenta en 24 GB, lo que implica que 23,7 GB corresponden a datos duplicados (Zhang & Liu, 2021). Esta ineficiencia no solo incrementa el consumo eléctrico en los centros de datos que alojan los nodos, sino que también introduce latencias que pueden afectar a la escalabilidad y eficiencia operativa de la red.

c) Fuentes de energía utilizadas en la minería

El impacto ambiental de PoW no solo depende del consumo energético absoluto, sino también de las fuentes de energía empleadas en la minería. Existen discrepancias significativas en los estudios sobre la proporción de minería de criptomonedas que se realiza con energías renovables:

- Estudios anteriores, como el informe de CoinShares Research de 2018, estimaban que hasta un 80 % de la electricidad utilizada en la minería de Bitcoin provenía de fuentes renovables, principalmente hidroeléctricas en regiones como Sichuan (China), Canadá o Islandia (Bendiksen & Gibbons, 2018). Sin embargo, estas cifras se basaban en estimaciones indirectas y no han sido ampliamente verificadas.
- En contraste, datos más rigurosos y actualizados del *3rd Global Cryptoasset Benchmarking Study* elaborado por el Cambridge Centre for Alternative Finance (CCAF) en 2020 indican que aproximadamente el 61 % de la energía consumida por la minería de criptomonedas proviene de fuentes no renovables, con una alta dependencia del carbón y el gas natural, especialmente en los principales centros de minería como China antes de su prohibición (Blandin et al., 2020).

Tabla 2: Uso Aproximado de Energía Renovable en Minería de Bitcoin

Región	Media regional % uso energías renovables	Media regional hashrate Bitcoin	% energía renovable empleada en minería BTC
Asia-Pacific	26%	77%	20%
Europa	30%	10%	3%
America Latina	20%	1%	0%
Oriente Medio y África	NA	4%	NA
Norte América	63%	8%	5%

Global		100%	29%
---------------	--	------	-----

Fuente: (Blandin et al., 2020)

Se ha estimado que, en 2024, la huella de carbono de Bitcoin osciló entre 60 y 97 MtCO₂, una cifra comparable con las emisiones anuales de países como Grecia, Austria o Finlandia (*Our World Data*, 2025). A pesar del creciente interés por integrar fuentes de energía renovable, el uso persistente de combustibles fósiles en la minería de criptomonedas sigue representando una amenaza ambiental considerable. De hecho, un estudio publicado en *Nature Communications* advertía que, de no haberse aplicado restricciones regulatorias, las operaciones mineras de Bitcoin en China podrían haber alcanzado hasta 130,5 MtCO₂ en 2024, un volumen de emisiones similar al de países como Italia o España (Jiang et al., 2021).

3.2 Casos de Estudio Principales

Casos de Minería Alimentada por Energías Renovables

- a) **Islandia – Energía Geotérmica e Hidroeléctrica:** Islandia es un referente mundial en minería sostenible gracias a sus abundantes recursos de energía renovable. Empresas como Genesis Mining se benefician de una infraestructura energética basada en energía geotérmica e hidroeléctrica. El uso de estas fuentes no solo minimiza el impacto ambiental, sino que también asegura costes energéticos estables y predecibles, una ventaja en la volátil economía de la minería. Además, el clima frío reduce la necesidad de sistemas de refrigeración adicionales, optimizando el consumo energético y mejorando la eficiencia operativa (Gasiorowska et al., 2023).
- b) **Texas – Minería Eólica:** Texas se ha posicionado como un centro emergente de minería sostenible gracias a su capacidad para integrar proyectos eólicos. Empresas como Mara Holdings utilizan la flexibilidad de la minería para ajustar sus operaciones en función de la disponibilidad de energía y las necesidades de la red eléctrica. Durante picos de demanda, las actividades mineras se reducen o detienen temporalmente, ayudando a estabilizar el sistema energético mientras monetizan la energía excedente en periodos de baja demanda (Rudd & Porter, 2024; Stoll et al., 2023).
- c) **Quebec – Energía Hidroeléctrica:** Quebec se ha consolidado como un centro atractivo para la minería de criptomonedas debido a su abundante suministro de energía hidroeléctrica y su clima frío, que reduce la necesidad de sistemas de refrigeración adicionales. Sin embargo, estudios como el encargado por Hydro-Québec a la firma KPMG

revelan que, a menos que se asocie con actividades adicionales, la minería de criptomonedas no genera un número significativo de empleos, lo que ha llevado a debates sobre su impacto económico y social en la región (Rosales et al., 2024).

- d) **Noruega y Suecia – Energía renovable diversificada:** Los países nórdicos, especialmente Noruega y Suecia, se han convertido en destinos atractivos para la minería de criptomonedas debido a su excedente de energía renovable, principalmente hidroeléctrica, y ocasionales precios negativos de la energía. Esta disponibilidad energética, combinada con un clima frío que reduce los costes de refrigeración, ha permitido que empresas como Genesis Digital Assets establezcan centros de datos en estas regiones, aprovechando el excedente de energía renovable disponible (Rudd & Porter, 2024; Tomatsu & Han, 2023).
- e) **El Salvador – Energía Geotérmica Volcánica:** El Salvador ha adoptado un enfoque innovador al utilizar energía geotérmica proveniente de sus volcanes para la minería de Bitcoin. Desde 2021, el país ha minado un total de 474 Bitcoin, valorados en aproximadamente 29 millones de dólares, utilizando energía geotérmica del volcán Tecapa. Esta iniciativa posiciona a El Salvador como un referente en la integración de tecnologías emergentes con recursos naturales sostenibles (Gaikwad & Mavale, 2021).
- f) **Australia – Minería Solar:** En Australia, los proyectos de minería alimentados por energía solar abordan los desafíos de la capacidad limitada de la red eléctrica y monetizan el excedente energético generado por parques solares. Este modelo no solo aumenta la viabilidad económica de las iniciativas solares, sino que también fomenta inversiones sostenibles en infraestructuras renovables. En regiones aisladas, este enfoque ha demostrado ser una herramienta eficaz para equilibrar la generación intermitente de energía renovable y promover la estabilidad del sistema eléctrico (Rudd & Porter, 2024).
- g) **China – Reubicación hacia Renovables en Yunnan y Sichuan:** Antes de las prohibiciones gubernamentales, las provincias chinas de Yunnan y Sichuan eran epicentros de la minería de criptomonedas, aprovechando su abundante energía hidroeléctrica para alimentar las operaciones mineras. Sin embargo, las autoridades chinas han intensificado las medidas enérgicas contra la industria criptográfica local, emitiendo advertencias a las plantas hidroeléctricas para que no proporcionen suministro de energía a empresas dedicadas a la minería de criptomonedas (Z. Xiao et al., 2023).
- h) **Kazajistán – Transición hacia Renovables:** Tras las restricciones impuestas por China a la minería de criptomonedas, Kazajistán ha emergido como uno de los principales destinos para esta actividad, contribuyendo significativamente al poder de procesamiento global de Bitcoin. Sin embargo, la Agencia Internacional de la Energía (AIE) destaca la fuerte

dependencia de Kazajistán de las energías no renovables, como el petróleo, el carbón y el gas natural, lo que plantea desafíos ambientales significativos para la sostenibilidad de la minería en el país (Estecahandy, 2024).

Nuevas Sinergias entre Minería y Energías Renovables

Bitcoin y otras criptomonedas con alta demanda energética pueden actuar como consumidores adaptables en sistemas de energía renovable. Los estudios muestran que los mineros pueden aprovechar la energía excedente durante periodos de alta generación y baja demanda, evitando la *curtailment* (desperdicio de energía renovable) y promoviendo el desarrollo de nuevas infraestructuras de energía limpia (Rudd & Porter, 2024). Proyectos como los de Aspen Creek Digital Corporation en EE.UU., donde instalaciones mineras están conectadas directamente a parques solares, representan ejemplos de cómo estas sinergias pueden fomentar la expansión de infraestructura renovable.

3.3 Desafíos en la Trazabilidad Energética y Verificación del Uso de Renovables

Aunque la integración de energías renovables en la minería de criptomonedas presenta ventajas evidentes desde el punto de vista ambiental, su implementación real plantea importantes interrogantes relacionados con la transparencia y la trazabilidad energética. Es habitual que compañías mineras anuncien el uso exclusivo de fuentes renovables para mejorar su imagen pública y atraer inversiones sostenibles, pero no siempre existe una garantía verificable que respalde estas afirmaciones, dando lugar a posibles situaciones de *greenwashing* o lavado de imagen verde.

Por ejemplo, aunque Islandia es frecuentemente citada como un modelo de minería sostenible debido a su abundancia de energía geotérmica e hidroeléctrica, no todas las instalaciones cuentan con auditorías independientes que certifiquen el origen renovable de su consumo eléctrico en tiempo real. Esto implica que, incluso en regiones conocidas por una alta proporción de energía renovable, la energía suministrada a los centros de datos podría provenir puntualmente de fuentes fósiles en momentos de mayor demanda (Siddique et al., 2023).

Este problema de trazabilidad energética no es exclusivo de Islandia. También se ha identificado en regiones como Texas o Noruega, donde la flexibilidad del mercado eléctrico permite adquirir certificados de energía renovable (RECs), cuya posesión acredita formalmente la compra de energía limpia, pero no siempre garantiza que la electricidad utilizada en las

operaciones mineras sea íntegramente renovable en cada instante (Lal et al., 2024; Siddique et al., 2023).

Una solución prometedora a estos desafíos de verificación pasa por el uso de tecnologías avanzadas, como el *blockchain*, que permiten registrar y auditar el origen exacto de la energía en tiempo real. Plataformas como la Energy Web Foundation (EWF) proponen mecanismos basados en contratos inteligentes para asegurar la autenticidad del consumo energético renovable, proporcionando una mayor transparencia y confianza a todas las partes implicadas (Andoni et al., 2019).

Finalmente, es crucial reconocer que la integración efectiva de renovables en la minería debe considerar la infraestructura existente, la intermitencia inherente a muchas fuentes renovables y la necesidad urgente de tecnologías de almacenamiento y gestión energética más avanzadas. Sin estos elementos, la expansión de la minería renovable a gran escala seguirá enfrentando importantes limitaciones técnicas y operativas.

3.4 Impacto Medioambiental de Proof of Stake (PoS)

A continuación, se analiza en detalle la reducción del impacto ambiental lograda con PoS y sus implicaciones en términos de sostenibilidad y escalabilidad.

Reducción del consumo energético en PoS

El caso más representativo de esta reducción energética es Ethereum. Antes de su transición a PoS, Ethereum tenía un consumo energético estimado de 80 TWh al año (*Digiconomist Ethereum Energy Consumption Index*, 2025). Sin embargo, tras la implementación de PoS, su consumo se ha reducido a aproximadamente 0,01 TWh al año, situándose en niveles similares a los de servicios de pago electrónicos tradicionales como Visa (Kapengut & Mizrach, 2022).

Este drástico descenso en el consumo energético ha convertido a PoS en una opción ampliamente aceptada para futuras implementaciones de *blockchain*, permitiendo la expansión de redes descentralizadas sin comprometer la sostenibilidad ambiental.

Factores que contribuyen a la sostenibilidad de PoS

El menor impacto ambiental de PoS se debe a tres factores clave que lo diferencian de PoW:

a) Eliminación de la minería intensiva

En PoS, los validadores son seleccionados en función de la cantidad de criptomonedas que poseen y han inmovilizado como garantía, eliminando la necesidad de resolver problemas matemáticos complejos mediante hardware especializado. Como resultado, PoS no requiere el uso de ASICs o GPUs, reduciendo la demanda de electricidad y evitando la generación de residuos electrónicos derivados de la obsolescencia del hardware minero (Platt et al., 2021).

b) Mayor eficiencia en la operación de la red

PoS permite un diseño más eficiente de *blockchain* en términos de almacenamiento y tráfico de red. En lugar de exigir que todos los nodos procesen y validen cada transacción, como ocurre en Bitcoin, PoS facilita la implementación de técnicas como *sharding*, que divide la red en fragmentos o *shards*, permitiendo que las transacciones se procesen en paralelo (Zamani et al., 2018).

Esta optimización no solo reduce el consumo energético global de la red, sino que también mejora su escalabilidad.

c) Uso de hardware convencional y reducción del impacto en la cadena de suministro

A diferencia de PoW, donde los mineros necesitan adquirir equipos especializados que consumen mucha energía, los nodos validadores de PoS pueden ejecutarse con hardware convencional, como servidores de propósito general o incluso ordenadores personales.

Esto reduce la dependencia de la industria de semiconductores, que ha sido objeto de críticas por el alto consumo energético de la fabricación de hardware especializado y la generación de desechos electrónicos derivados de la obsolescencia programada de estos dispositivos (Stoll et al., 2019).

3.5 Comparación de Emisiones de CO₂ entre PoW y PoS

Tabla 3: Comparativa de Consumo Energético entre PoW y PoS

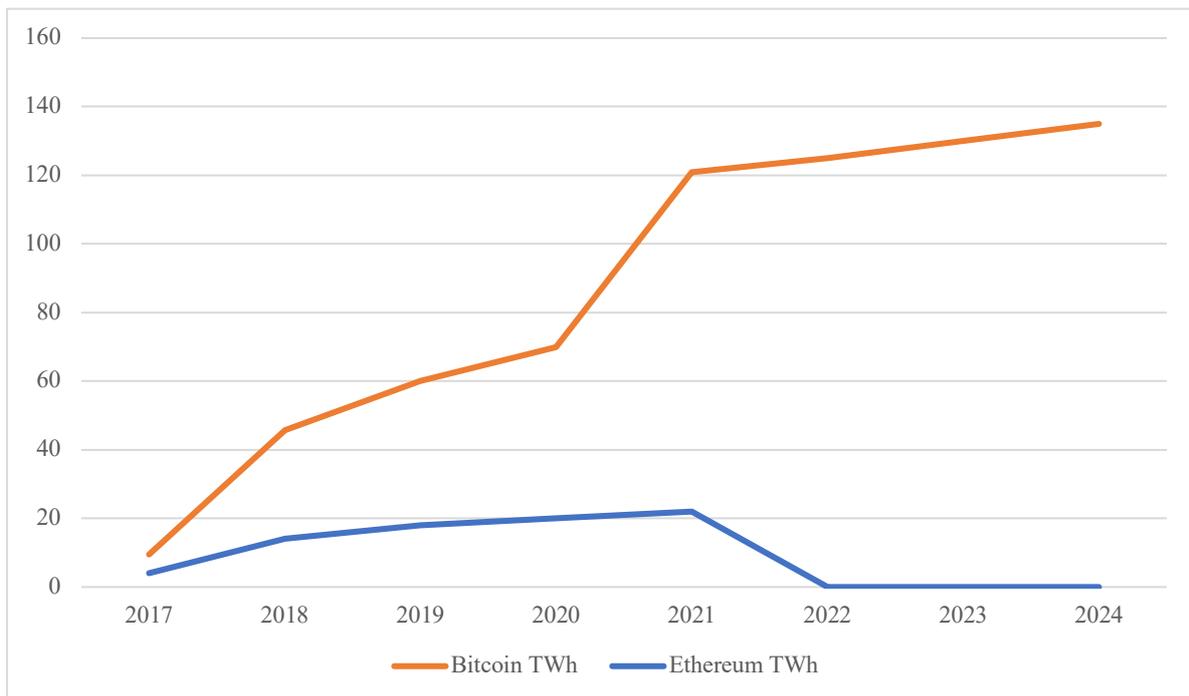
Parámetro	Proof of Work (PoW)	Proof of Stake (PoS)
Consumo energético (TWh/año)	100-175 TWh (Bitcoin)	~0.01 TWh (Ethereum 2.0)
Emisiones de CO ₂ (MtCO ₂ /año)	~80 MtCO ₂ (Bitcoin)	~0.1 MtCO ₂ (Ethereum 2.0)
Hardware necesario	ASICs y GPUs de alto consumo	Hardware convencional

Eficiencia energética (kWh/transacción)	~1214 kWh	~0.01 kWh
--	-----------	-----------

Fuentes: (Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index, 2025; Digiconomist Ethereum Energy Consumption Index, 2025)

Como se observa en la tabla, PoS representa una alternativa significativamente más eficiente en términos de consumo energético y emisiones de carbono, lo que lo posiciona como el estándar emergente para la sostenibilidad de las redes *blockchain*.

Figura 3: Comparativa Consumo anual en TWh Bitcoin y Ethereum



Fuentes: (Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index, 2025; Digiconomist Ethereum Energy Consumption Index, 2025)

Limitaciones metodológicas y necesidad de evaluación específica

Cabe destacar que, actualmente, no existe una metodología estándar para medir de forma uniforme el impacto ambiental de las *blockchains*, debido a las diferencias en los algoritmos utilizados, los protocolos de consenso y los tipos de hardware implementados. Además, resulta complicado separar el consumo energético propio de la *blockchain* del impacto causado por las infraestructuras de red que la soportan.

Se han realizado varios intentos para medir este impacto ambiental, centrados especialmente en Bitcoin y Ethereum por su popularidad y su uso del mecanismo de consenso Proof of Work (PoW). Sin embargo, los resultados obtenidos presentan grandes discrepancias, lo que refleja la falta de metodologías comparables y de estudios revisados por pares. Esta situación se ve agravada por la experiencia limitada de la industria de *blockchains* públicas en abordar y cuantificar el impacto climático (Sedlmeir et al., 2020).

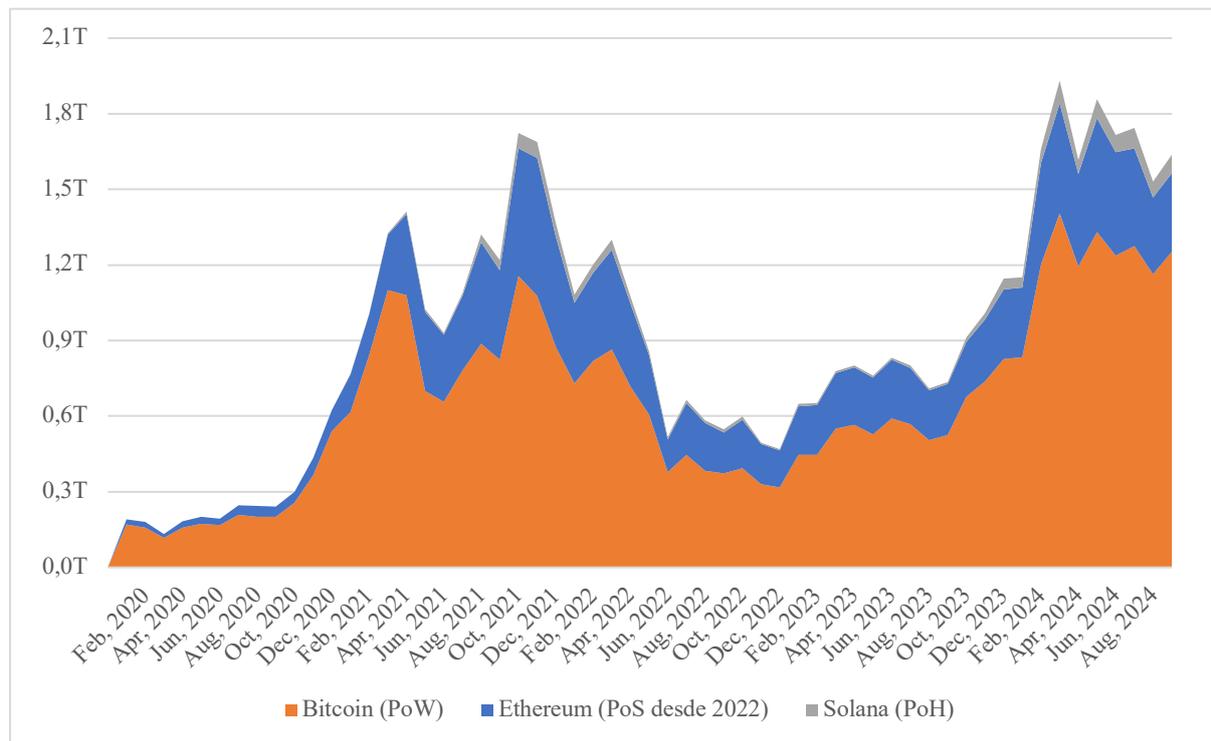
Otro problema significativo es que muchos estudios no recurren a investigaciones previas sobre el impacto ambiental, como las realizadas en el sector de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), ni a normas reconocidas, como las de la Organización Internacional de Normalización (ISO) (Ghosh & Das, 2020). Esto pone de manifiesto la necesidad urgente de establecer estándares claros y desarrollar herramientas fiables que permitan evaluar de forma precisa el impacto ambiental de las tecnologías *blockchain*.

4. Mecanismos de Consenso Alternativos y Consumo Energético

4.1 Introducción a los mecanismos alternativos

La relevancia de explorar mecanismos de consenso alternativos a Proof of Work (PoW) y Proof of Stake (PoS) radica en la necesidad creciente de desarrollar soluciones escalables y sostenibles para el ecosistema *blockchain*. Con el fin de contextualizar esta necesidad, se presenta en el Gráfico 4 una comparativa de la capitalización de mercado de las top 3 criptomonedas representativas de diferentes mecanismos de consenso: Bitcoin (BTC), Ethereum (ETH) y Solana (SOL). El análisis de esta gráfica permite evaluar la adopción real, aceptación del mercado y viabilidad práctica de estos modelos en los últimos cuatro años.

Figura 4: Comparativa Capitalización de Mercado top 3 Criptomonedas



Fuente: (CoinMarketCap, 2025)

La elevada capitalización de mercado de Bitcoin refleja principalmente su posición histórica consolidada como reserva de valor digital, pese a la conocida ineficiencia energética asociada a su mecanismo PoW. Sin embargo, esta posición dominante no implica que su protocolo sea tecnológicamente superior; más bien ilustra la dificultad inherente a sistemas descentralizados sin una autoridad centralizada, lo que complica transiciones técnicas complejas hacia modelos más sostenibles.

Por otro lado, Ethereum representa una respuesta positiva del mercado gracias a una mejora sustancial en eficiencia energética y escalabilidad. No obstante, es importante mencionar que esta adopción acelerada también se explica por la influencia dominante de Ethereum en la industria, la cual permite imponer indirectamente estándares técnicos a los numerosos proyectos construidos sobre su plataforma. Esto genera un efecto red favorable derivado de su tamaño previo y posición establecida.

Finalmente, el caso de Solana debe analizarse con precaución. Aunque su mecanismo Proof of History (PoH) ofrece ventajas claras en términos de escalabilidad y sostenibilidad, su menor capitalización de mercado evidencia los desafíos que enfrentan las nuevas plataformas al

competir con protocolos más establecidos. Conviene recordar que existen muchos protocolos comparables al PoH, pero suelen estar implementados en criptomonedas con capitalizaciones reducidas, lo que refleja un sesgo de supervivencia al destacar principalmente aquellas alternativas con mayor éxito mediático o financiero.

Esta reflexión pone de manifiesto que la adopción y éxito en el mercado no dependen exclusivamente de las características técnicas o energéticas del protocolo, sino también de factores económicos y contextuales. Precisamente por ello, en la siguiente sección se abordará en profundidad un conjunto seleccionado de mecanismos alternativos que, más allá de su capitalización actual, han demostrado potencial significativo desde el ámbito académico y su implementación práctica en diversos proyectos *blockchain*.

En esta sección analizaremos distintos mecanismos de consenso alternativos, agrupándolos según sus contextos ideales de aplicación:

- **Redes públicas y abiertas:** PoW, PoS, DPoS, PoH (mecanismos que utilizan incentivos económicos o recursos computacionales).
- **Redes privadas, permitidas o semiabiertas:** PBFT, FBA, PoA (mecanismos que utilizan mensajes, identidades verificables y confianza previa entre participantes).

Aunque todos buscan lograr consenso, operan bajo premisas diferentes en cuanto a descentralización, confianza, anonimato y escalabilidad.

El objetivo de este análisis es proporcionar un marco comparativo sólido que permita valorar críticamente la viabilidad práctica y el grado real de sostenibilidad energética de estos mecanismos, resaltando ventajas, limitaciones y escenarios específicos en los que cada uno pueda resultar más adecuado.

4.2 Delegated Proof of Stake (DPoS)

El mecanismo Delegated Proof of Stake (DPoS) es una variante derivada del sistema Proof of Stake tradicional (PoS), con el cual comparte ciertas similitudes, como el hecho de otorgar prioridad en la validación de bloques a aquellos nodos con mayores cantidades de activos comprometidos en la red. No obstante, la diferencia sustancial radica en el procedimiento de elección de los validadores, pues mientras en PoS estos son seleccionados de manera aleatoria basándose únicamente en su participación económica, en DPoS los validadores son elegidos por los demás participantes de la red a través de un sistema de votación (Bamakan et al., 2020).

La restricción en el número de validadores elegibles implica una estructura más centralizada respecto a otros mecanismos. Esta particularidad permite reducir aún más el uso de recursos computacionales y, por ende, el consumo energético total del sistema. Adicionalmente, al contar con menos nodos implicados directamente en la validación, el tiempo promedio de generación de bloques disminuye considerablemente, situándose en torno a 3 segundos frente a los aproximadamente 64 segundos de PoS (Liu & Xu, 2021).

En cuanto al consumo energético, la mayor parte de la demanda en redes que implementan DPoS se concentra exclusivamente en los pocos nodos que actúan como validadores. A modo ilustrativo, EOS, la *blockchain* más popular en adoptar este mecanismo, estima su consumo energético en aproximadamente 1,8 kW por bloque generado, lo que representa un consumo energético anual total cercano a 0,0012 TWh (Skh Saad & Raja Mohd Radzi, 2020).

Limitaciones DPoS

Al igual que ocurre con los mecanismos PoS convencionales, DPoS presenta ciertas limitaciones relevantes en términos de seguridad y descentralización. Dado que el proceso de consenso se basa en la votación, existe la posibilidad de elegir validadores poco éticos, lo que podría derivar en riesgos de seguridad si estos permanecen en posiciones privilegiadas durante largos periodos de tiempo. No obstante, la capacidad del resto de nodos para retirar el voto a validadores deshonestos y elegir nuevos representantes mitiga parcialmente este riesgo (Liu & Xu, 2021).

4.3 Proof of History (PoH)

El mecanismo de consenso Proof of History (PoH), propuesto por Anatoly Yakovenko y popularizado por la red Solana, consiste en una técnica innovadora orientada a establecer un registro histórico verificable de eventos dentro de la *blockchain*. Aunque PoH no representa estrictamente un mecanismo de consenso aislado, su integración complementaria con otras técnicas permite mejorar sustancialmente el rendimiento de la red en términos de velocidad y eficiencia energética.

La esencia de Proof of History radica en el empleo de una función verificable de retardo o Verifiable Delay Function (VDF), que genera un registro cronológico, inmutable y seguro del tiempo transcurrido entre distintos eventos dentro del sistema (Yakovenko, 2018). Esta metodología posibilita que cada nodo valide la secuencia temporal de las transacciones sin

necesidad de mantener comunicación constante con otros nodos, permitiendo un procesamiento considerablemente más ágil y evitando así procesos computacionales redundantes.

Un ejemplo práctico destacable es la *blockchain* de Solana, en la cual PoH es utilizado para lograr altos niveles de escalabilidad, alcanzando rendimientos superiores a 65.000 transacciones por segundo (TPS), con tiempos de confirmación inferiores a un segundo. Estas cifras representan una mejora significativa en comparación con los mecanismos tradicionales como Proof of Work (PoW), Proof of Stake (PoS) o Delegated Proof of Stake (DPoS) (Yakovenko, 2018).

En relación con el consumo energético, Proof of History destaca por su eficiencia. Al prescindir de la competencia directa entre nodos mediante pruebas criptográficas intensivas (como sucede con PoW) o procedimientos complejos de votación reiterativa (como PBFT o FBA), PoH minimiza significativamente el gasto computacional y energético de la red. Su diseño, centrado en la creación continua y predecible de secuencias históricas, permite reducir el coste energético asociado a la validación distribuida de las transacciones.

Limitaciones de PoH

No obstante, el mecanismo presenta también ciertas limitaciones potenciales. Entre ellas, cabe destacar la relativa dependencia respecto a nodos específicos encargados de generar y mantener dicho registro histórico, lo cual podría implicar puntos únicos de fallo o vulnerabilidades de carácter estructural. Asimismo, al ser un método relativamente reciente, todavía se encuentra en fase de evaluación y perfeccionamiento en cuanto a su seguridad a largo plazo y resiliencia frente a ataques externos (Yakovenko, 2018).

4.4 Proof of Authority (PoA)

El mecanismo Proof of Authority (PoA) constituye un sistema de consenso diseñado principalmente para redes *blockchain* privadas o permissionadas, en las cuales se busca priorizar aspectos como la eficiencia energética, el rendimiento y el control de la privacidad. A diferencia de mecanismos más difundidos, como PoW o PoS, en PoA los validadores no comprometen activos económicos, sino que su autoridad para validar bloques está basada en la identidad personal o corporativa previamente autorizada. De esta manera, lo que los

validadores arriesgan al ejercer su función no es una inversión económica, sino su reputación y prestigio dentro de la red (De Angelis, 2018).

Este mecanismo opera mediante un conjunto reducido de nodos autorizados denominados autoridades. Entre estas autoridades se selecciona periódicamente a un líder encargado de proponer nuevos bloques, siguiendo un esquema de rotación predefinido. Las identidades de los validadores son conocidas y verificables, hecho que reduce considerablemente el riesgo de comportamientos maliciosos debido a la potencial pérdida de reputación y exclusión del conjunto autorizado en caso de actuación fraudulenta (Lone & Naaz, s. f.).

En términos energéticos, PoA es significativamente más eficiente que Proof of Work, dado que elimina la necesidad de resolver complejos acertijos criptográficos basados en *hashing*. En lugar de ello, PoA utiliza mecanismos de consenso basados en el intercambio de mensajes, principalmente algoritmos derivados del modelo Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT), aunque con un menor número de interacciones entre nodos. Esto permite no solo reducir drásticamente el consumo de energía, sino también aumentar considerablemente el rendimiento y la tolerancia a fallos de la red (De Angelis, 2018; Dinh et al., 2018).

Limitaciones de PoA

Sin embargo, a pesar de estas ventajas, el carácter privado y permissionado de PoA implica cierta centralización inherente. Al depender de un conjunto relativamente pequeño de validadores cuyas identidades son conocidas, existe un riesgo potencial de manipulación o interferencia por parte de terceros. Por esta razón, PoA resulta más adecuado para aplicaciones empresariales o gubernamentales donde la privacidad, la eficiencia energética, la rapidez en la validación de transacciones y el control explícito sobre la red son prioridades fundamentales.

4.5 Federated Byzantine Agreement (FBA)

El mecanismo Federated Byzantine Agreement (FBA), conocido principalmente por su implementación en el Stellar Consensus Protocol (SCP), es un modelo de consenso que opera mediante acuerdos federados para alcanzar decisiones dentro de una red distribuida. A diferencia de otros mecanismos como Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT) o Proof of Authority (PoA), FBA utiliza grupos específicos denominados *quorum slices*, formados por conjuntos de nodos que colaboran para alcanzar consensos de manera más ágil y eficiente (Eres, 2016; Xu et al., 2023).

En FBA, cada nodo participante del sistema establece su propio conjunto de nodos de confianza, configurando así su respectivo *quorum slice*. Posteriormente, estos conjuntos se intersectan de manera natural en una red más amplia, formando *quorums*, definidos como grupos de consenso definitivos e inmutables dentro del protocolo. La selección de nodos confiables para el establecimiento de cada *quorum slice* es libre y descentralizada, proporcionando flexibilidad y permitiendo un nivel alto de escalabilidad. Sin embargo, esta configuración, aunque aparenta ser descentralizada en términos de participación abierta, presenta vulnerabilidades derivadas de cierta centralización efectiva, debido a la dependencia de la confianza mutua entre grupos reducidos de validadores. Esto puede generar posibles puntos únicos de fallo en la estructura general del sistema (Eres, 2016).

Una de las principales ventajas del protocolo FBA radica en su considerable eficiencia energética. Al prescindir de solucionar problemas criptográficos complejos y limitar el consenso exclusivamente a nodos confiables predeterminados, FBA consigue reducir notablemente el consumo energético, especialmente en comparación con mecanismos PoW. Esta eficiencia, además, se complementa con una baja latencia y un alto rendimiento transaccional, como se observa en redes como Stellar, facilitando transacciones rápidas, económicas y escalables (Eres, 2016; Xu et al., 2023).

Limitaciones de FBA

No obstante, la centralización derivada de la dependencia en *quorum slices* preseleccionados puede conducir a vulnerabilidades significativas en términos de seguridad y resiliencia ante fallos o comportamientos maliciosos, especialmente si se compromete alguno de los nodos clave del sistema. Adicionalmente, la seguridad del protocolo depende fuertemente de la correcta configuración de los nodos de confianza, incrementando el riesgo de errores humanos durante el establecimiento inicial o ajustes posteriores (Eres, 2016).

4.6 Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT)

El mecanismo Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT), propuesto inicialmente por Castro y Liskov en 2002, es una solución orientada a alcanzar consenso en redes distribuidas parcialmente síncronas que pueden estar sujetas a fallos bizantinos, es decir, a comportamientos arbitrarios o maliciosos por parte de algunos nodos participantes. A diferencia de otros mecanismos basados en *hashing* como Proof of Work, PBFT se apoya en

un modelo de comunicación basado en confianza entre los nodos, eliminando la necesidad de cálculos criptográficos complejos, lo que se traduce en un consumo energético considerablemente reducido (Castro & Liskov, 2002; Chang et al., 2022).

El proceso de consenso PBFT se organiza en una secuencia de fases o vistas, cada una coordinada por un nodo líder que se encarga de ordenar y transmitir los mensajes a través de una comunicación en tres etapas hacia los nodos réplicas. Estas réplicas validan las propuestas del líder y se aseguran continuamente del correcto funcionamiento de este. En caso de detectarse comportamientos maliciosos o ausencia de comunicación por parte del nodo líder, las réplicas pueden proponer un cambio de vista, eligiendo así un nuevo líder que garantice la continuidad y fiabilidad del consenso (X. Zheng & Feng, 2021).

En cuanto al consumo energético, debido a que PBFT no requiere realizar cálculos criptográficos intensivos, su demanda energética es notablemente inferior a la de los mecanismos basados en *hashing*, como PoW (Balpunuri, 2024). Además, dada la similitud estructural con otros mecanismos centralizados como Delegated Byzantine Fault Tolerance (DBFT), su consumo energético se estima en rangos similares, posicionándolo como una alternativa viable para implementaciones empresariales con requerimientos estrictos de eficiencia energética (X. Zheng & Feng, 2021).

Limitaciones de PBFT

En primer lugar, requiere un entorno cerrado y estable, ya que la incorporación o salida de nodos obliga a reconfigurar el sistema, interrumpiendo temporalmente el consenso. Además, no cuenta con mecanismos internos para detectar o aislar nodos maliciosos o inactivos, lo que puede comprometer la estabilidad a largo plazo. Su diseño exige una comunicación intensiva entre nodos, con una complejidad cuadrática, lo que limita su escalabilidad. Finalmente, la falta de criterios claros para evaluar el rendimiento de las réplicas puede generar dependencia de ciertos nodos y reducir la eficiencia operativa del sistema (X. Zheng & Feng, 2021).

4.7 Técnicas de Optimización y Limitaciones para Implementar una Blockchain Sostenible

La implementación práctica de una *blockchain* energéticamente eficiente no solo depende del mecanismo de consenso seleccionado, sino también de técnicas adicionales de optimización de

red que permitan mejorar su sostenibilidad energética global. En este sentido, destacan diversas estrategias orientadas a acelerar las comunicaciones entre nodos, reducir el ancho de banda empleado y optimizar la escalabilidad del sistema en redes *blockchain*.

Entre estas técnicas se incluyen la mejora de los protocolos de comunicación peer-to-peer (P2P), que buscan optimizar la velocidad de propagación de datos en la red *blockchain* mediante topologías escalables que reducen el consumo energético asociado a una comunicación ineficiente (Hao et al., 2020). Otra técnica habitual consiste en la reducción de mensajes duplicados generados por algoritmos de propagación tipo *gossip*, planteando esquemas más eficientes que disminuyen la redundancia y congestión en las comunicaciones internas (Antwi et al., 2022; Hao et al., 2020). Asimismo, se han propuesto métodos para minimizar el tamaño de los datos transmitidos, empleando esquemas de agregación de paquetes o técnicas avanzadas de codificación que agilizan la propagación de bloques reduciendo el uso innecesario de recursos (Antwi et al., 2022; Cheng et al., 2024).

Finalmente, otra estrategia destacable es la reducción de la complejidad en las comunicaciones propias de los mecanismos de consenso, lo que permite interacciones más rápidas, menor riesgo de congestión y un uso más moderado del ancho de banda (J. Xiao et al., 2024).

Sin embargo, la búsqueda de eficiencia energética en redes *blockchain* implica enfrentar diversos desafíos y limitaciones técnicas. La principal dificultad radica en la existencia de posibles concesiones o *trade-offs* entre la reducción energética y otros indicadores clave como seguridad, descentralización, escalabilidad o fiabilidad. Por ejemplo, simplificar o reducir ciertas operaciones criptográficas para disminuir el consumo energético puede afectar negativamente la seguridad o integridad de los datos. Del mismo modo, reducir el número o frecuencia de nodos participantes puede comprometer la descentralización, introduciendo posibles puntos únicos de fallo o vulnerabilidades adicionales al sistema (J. Xiao et al., 2024).

5. Marco Regulatorio en Materia de Sostenibilidad de Criptoactivos

5.1 Iniciativas regulatorias pioneras: Unión Europea (UE)

La Unión Europea ha adoptado un papel pionero a nivel global en la regulación de los aspectos medioambientales vinculados a los criptoactivos, integrando explícitamente requisitos de

sostenibilidad dentro del Reglamento sobre los Mercados de Criptoactivos (Markets in Crypto-Assets Regulation, MiCA) aprobado en 2023 (UE, 2023). Este marco regulatorio, alineado con los objetivos europeos en materia de finanzas sostenibles, exige a partir de enero de 2025 que tanto emisores como proveedores de servicios de criptoactivos publiquen información detallada sobre los impactos ambientales negativos generados por su actividad.

De acuerdo con MiCA, las entidades deberán incorporar estos datos en los llamados white papers de los proyectos y ponerlos a disposición pública a través de sus páginas web, actualizando dicha información anualmente. Los indicadores establecidos tendrán en cuenta especialmente los diferentes mecanismos de consenso utilizados para validar transacciones en las redes *blockchain*, así como las estructuras de incentivos implícitas en cada modelo (UE, 2023).

Estos requisitos no estaban contemplados originalmente en la propuesta inicial del reglamento, sino que se añadieron posteriormente durante las negociaciones legislativas, en respuesta a las crecientes preocupaciones sobre la sostenibilidad medioambiental del sector. Algunos grupos políticos dentro del Parlamento Europeo llegaron incluso a proponer la prohibición directa de los criptoactivos basados en PoW (como Bitcoin), dada su alta demanda energética. Finalmente, se adoptó la solución de exigir estas divulgaciones obligatorias como medida intermedia, destinada a incentivar progresivamente la adopción de mecanismos de consenso alternativos y más eficientes desde el punto de vista energético, destacando como modelo de referencia la transición exitosa realizada por Ethereum hacia PoS.

La implementación práctica de estos requisitos podría transformar significativamente el mercado europeo de criptoactivos, estableciendo estándares más estrictos que promuevan activamente la sostenibilidad ambiental, y posicionando a la UE como un referente regulatorio en el ámbito internacional.

5.2 Indicadores obligatorios y opcionales en la divulgación sostenible

La Autoridad Europea de Valores y Mercados (ESMA, por sus siglas en inglés) ha especificado con claridad los contenidos, metodologías y formatos que deberán seguir los emisores y proveedores de servicios de criptoactivos en la presentación de sus indicadores de sostenibilidad. Según lo establecido por la ESMA en 2023, los indicadores obligatorios abarcan principalmente cuatro ámbitos fundamentales: el consumo energético total de la red *blockchain*, la intensidad energética asociada a la validación de transacciones, las emisiones

directas e indirectas de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas del uso energético, así como la proporción cuantitativa de fuentes energéticas no renovables empleadas (*ESMA Report, 2023*).

Adicionalmente, será obligatoria la publicación de métricas sobre la generación de residuos peligrosos y de residuos de equipos eléctricos y electrónicos vinculados a la operación de los nodos de la red *blockchain*, junto con una descripción explícita del impacto sobre los recursos naturales asociado al uso de dichos equipos. La inclusión de estos indicadores busca proporcionar una visión integral y transparente del impacto ambiental generado por la operación diaria de las plataformas de criptoactivos (*ESMA Report, 2023*).

Por otro lado, se han definido también indicadores opcionales, cuyo cálculo y evaluación presentan una mayor complejidad técnica. Entre estos indicadores opcionales destacan principalmente las emisiones indirectas adicionales (Alcance 3), como las derivadas de la fabricación y adquisición del equipamiento utilizado por los nodos de la red *blockchain* o las asociadas a la gestión posterior de los residuos generados por estos equipos. Estos indicadores, aunque no obligatorios, permiten obtener una perspectiva más amplia del impacto medioambiental de los criptoactivos a lo largo de toda la cadena de valor (*ESMA Report, 2023*).

5.3 Retos en la implementación efectiva de las regulaciones de sostenibilidad

Pese al avance que representa la introducción de criterios ambientales en la regulación europea sobre criptoactivos, persisten importantes desafíos prácticos relacionados con su aplicación efectiva. Uno de los principales retos reconocidos por las propias autoridades europeas es la dificultad para recopilar información precisa y homogénea en un sector caracterizado por su descentralización y diversidad tecnológica (*ESMA Report, 2023*). Esto implica que, al menos en una primera etapa, la presentación de la información ambiental se podrá realizar sobre la base de "mejor esfuerzo" por parte de emisores y proveedores. En aquellos casos donde no sea posible disponer de datos concretos y verificables, se permitirá la utilización de estimaciones basadas en modelos aceptados internacionalmente.

Además, es necesario considerar que la calidad y trazabilidad de la información proporcionada podrían variar significativamente entre distintas plataformas y proveedores, lo que genera preocupación sobre posibles casos de *greenwashing* o divulgaciones ambientales engañosas. Este riesgo se agrava en el contexto actual, donde la certificación independiente del origen de la energía renovable utilizada por muchas operaciones de minería sigue siendo escasa o

insuficiente, dificultando la verificación objetiva de las declaraciones de sostenibilidad realizadas por determinadas entidades del sector (Finney, 2023).

Finalmente, la coordinación internacional resulta fundamental para evitar fragmentaciones regulatorias y asegurar que los estándares adoptados en Europa sean compatibles con los que desarrollen otras jurisdicciones clave en el ámbito global, como Estados Unidos o Reino Unido, que también han comenzado a considerar seriamente la introducción de criterios similares (*HM Treasury*, 2023). Esta cooperación internacional permitiría reforzar la transparencia, mejorar la comparabilidad de la información ambiental divulgada y fomentar una auténtica transición hacia modelos más sostenibles dentro del ecosistema global de los criptoactivos.

Cooperación internacional y selección de estándares regulatorios

La cooperación internacional desempeña un papel clave en la búsqueda de un marco regulatorio global armonizado en materia de sostenibilidad en los criptoactivos. Debido al carácter intrínsecamente descentralizado y transfronterizo de la tecnología *blockchain* y los criptoactivos, resulta imprescindible la colaboración activa entre jurisdicciones para evitar incoherencias normativas y garantizar la efectividad real de las regulaciones adoptadas (*HM Treasury*, 2023).

En este sentido, organismos internacionales de referencia, como la Organización Internacional de Comisiones de Valores (IOSCO), están comenzando a prestar atención a la necesidad urgente de consensuar estándares internacionales sobre la divulgación de impactos ambientales en este sector (*HM Treasury*, 2023). Esta necesidad se fundamenta en que una fragmentación normativa podría generar arbitraje regulatorio, llevando a actores del sector a trasladar sus operaciones hacia jurisdicciones menos exigentes en términos de sostenibilidad, lo que a su vez perjudicaría la eficacia global de las iniciativas medioambientales.

El Reino Unido, siguiendo los pasos de la Unión Europea, también ha manifestado explícitamente su intención de liderar discusiones en estos organismos internacionales con el objetivo de impulsar el establecimiento de normas consensuadas sobre la divulgación de información sostenible en los criptoactivos (Finney, 2023; *HM Treasury*, 2023). Esta postura refleja la creciente concienciación por parte de los reguladores nacionales sobre la necesidad de una cooperación internacional efectiva y un enfoque coordinado.

Por último, la creación de un marco regulatorio global armonizado no solo beneficiaría al medioambiente al promover estándares universales más exigentes, sino que también aportaría una mayor transparencia y seguridad jurídica al mercado internacional de criptoactivos. La

existencia de criterios comunes facilitaría la comparación objetiva entre diferentes plataformas y proyectos, fortaleciendo así la confianza de los inversores y usuarios finales.

6. Conclusiones

El presente trabajo ha tenido como finalidad analizar de forma crítica la sostenibilidad y eficiencia energética de las criptomonedas, poniendo especial énfasis en los mecanismos de consenso utilizados en las redes *blockchain* y en los marcos regulatorios emergentes. En un contexto marcado por la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad urgente de transitar hacia modelos económicos más sostenibles, este estudio se enmarca en el debate global sobre el impacto ambiental de las tecnologías emergentes. Desde esta perspectiva, la tecnología *blockchain*, a pesar de su potencial transformador en múltiples sectores, plantea desafíos sustanciales en términos de consumo energético, emisiones de carbono y trazabilidad del uso de recursos. El objetivo ha sido, por tanto, contribuir a una comprensión más profunda de las implicaciones ambientales del ecosistema cripto y explorar caminos hacia su sostenibilidad futura.

6.1 Síntesis de los hallazgos principales

A lo largo del estudio se ha demostrado que el mecanismo de consenso Proof of Work (PoW), utilizado por criptomonedas como Bitcoin, presenta un impacto ambiental considerable debido a su elevado consumo energético y a la generación de emisiones de CO₂ equivalentes a las de países de tamaño medio. Este impacto está estrechamente ligado al diseño competitivo del proceso de minería y al uso predominante de fuentes de energía no renovables en muchas jurisdicciones. En contraposición, el modelo Proof of Stake (PoS), adoptado por Ethereum a partir de 2022, ha evidenciado una reducción drástica del consumo eléctrico, convirtiéndose en un referente para una blockchain más eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

Asimismo, se han analizado alternativas técnicas como DPoS, PoH, PoA o PBFT, las cuales, si bien presentan ciertas limitaciones estructurales o de descentralización, ofrecen ventajas significativas en términos de eficiencia energética. Junto con estas innovaciones, la integración de energías renovables en la minería ha surgido como una estrategia clave para mitigar el impacto ambiental, tal como se refleja en casos prácticos observados en Islandia, Texas o Quebec.

Por otra parte, se ha examinado la evolución del marco regulatorio, destacando la iniciativa de la Unión Europea a través del Reglamento MiCA, que establece criterios obligatorios de divulgación ambiental. Esta regulación representa un paso relevante hacia una mayor transparencia y responsabilidad climática en el sector de los criptoactivos, aunque su efectividad dependerá de la calidad de los datos reportados y de la cooperación internacional para evitar el arbitraje regulatorio.

6.2 Valoración crítica

El análisis realizado pone de manifiesto la necesidad de encontrar un equilibrio entre el desarrollo tecnológico que ofrecen las criptomonedas y blockchain, y los compromisos medioambientales asumidos a nivel global. Si bien estas tecnologías representan una disrupción significativa en términos de descentralización, seguridad y autonomía financiera, su sostenibilidad depende en gran medida del tipo de infraestructura y diseño de red que se adopte.

La permanencia de modelos como PoW en proyectos de gran escala plantea una contradicción difícil de resolver: el valor atribuido a la descentralización y seguridad entra en tensión con los imperativos de descarbonización y eficiencia energética. Aunque mecanismos como PoS y sus derivados han demostrado ser más sostenibles, su adopción todavía genera debates en torno a la posible concentración del poder de validación y los riesgos para la resiliencia de las redes.

En este contexto, se observa que la sostenibilidad del ecosistema cripto no puede recaer exclusivamente en soluciones tecnológicas. También resulta fundamental el papel de los reguladores, las comunidades de desarrolladores y los inversores, quienes deben ejercer presión para fomentar la transparencia ambiental, la trazabilidad del uso energético y la responsabilidad social de los proyectos. Solo desde una aproximación colaborativa y multidisciplinar será posible transitar hacia un modelo de innovación digital alineado con los objetivos climáticos y de desarrollo sostenible.

Limitaciones del estudio

A pesar de la amplitud temática y el enfoque integral adoptado, este trabajo presenta una serie de limitaciones que deben ser reconocidas con el fin de contextualizar adecuadamente sus conclusiones. En primer lugar, existe una considerable incertidumbre asociada a los datos de consumo energético y emisiones de carbono en redes blockchain, especialmente en aquellas que utilizan Proof of Work. Esta incertidumbre se debe a la opacidad en la localización

geográfica de los mineros, la variabilidad en las fuentes energéticas utilizadas y la ausencia de estándares metodológicos uniformes en los estudios existentes.

En segundo lugar, el enfoque geográfico adoptado es generalista, lo que implica que si bien se han considerado regulaciones relevantes como el Reglamento MiCA en la Unión Europea, no se ha entrado en profundidad en los marcos normativos específicos de otras jurisdicciones. Esto puede limitar la aplicabilidad directa de algunas recomendaciones a contextos nacionales concretos.

Asimismo, se ha optado por centrarse en mecanismos de consenso y tecnologías que ya han alcanzado cierto grado de implementación práctica, dejando fuera propuestas emergentes que, si bien prometedoras, aún no cuentan con suficiente evidencia empírica para ser evaluadas con rigor. Finalmente, el estudio no profundiza en aspectos sociales, filosóficos o éticos del uso de las criptomonedas, los cuales podrían enriquecer futuras investigaciones desde una perspectiva interdisciplinar más amplia.

6.3 Aportes del trabajo

Este trabajo ofrece una contribución relevante al debate académico y técnico sobre la sostenibilidad de las criptomonedas, aportando un análisis estructurado y actualizado sobre los mecanismos de consenso más utilizados, su impacto ambiental y las estrategias regulatorias emergentes. A diferencia de estudios fragmentados o centrados en aspectos puramente técnicos, este trabajo adopta una visión transversal que articula elementos tecnológicos, medioambientales, regulatorios y económicos, proporcionando así una visión comprensiva y fundamentada del problema.

Uno de los principales aportes reside en la comparación crítica entre PoW y PoS, ilustrada con datos empíricos y casos reales, lo cual permite no solo entender las diferencias conceptuales entre ambos mecanismos, sino también cuantificar sus implicaciones ambientales. Asimismo, se ha hecho un esfuerzo por integrar perspectivas prácticas a través del análisis de casos de minería sostenible en distintas regiones del mundo, subrayando que la sostenibilidad es alcanzable si se combinan decisiones tecnológicas adecuadas con contextos energéticos favorables.

Además, este trabajo resalta la importancia de los marcos regulatorios como herramientas clave para orientar la transición del sector cripto hacia modelos más responsables. En ese sentido, el estudio no solo expone los avances legislativos, sino que también alerta sobre los desafíos

operativos de su implementación, como la fiabilidad de la información divulgada o los riesgos de greenwashing.

En suma, el TFG no se limita a describir un problema, sino que busca ofrecer una base argumental sólida para el diseño de políticas, la toma de decisiones empresariales y la profundización de futuras investigaciones académicas en un campo en constante evolución.

6.4 Perspectivas futuras

El análisis desarrollado a lo largo de este trabajo permite identificar diversas líneas de investigación y acción futura que resultan esenciales para consolidar un ecosistema cripto verdaderamente sostenible. En primer lugar, se requiere el desarrollo y estandarización de metodologías rigurosas para medir el impacto ambiental de las redes blockchain, que incluyan no solo el consumo energético directo, sino también factores asociados como la generación de residuos electrónicos, las emisiones indirectas (alcance 3) y el ciclo de vida del hardware.

Además, la mejora de la trazabilidad energética en tiempo real representa una prioridad estratégica. La implementación de tecnologías como blockchain aplicada a la certificación del origen de la energía podría constituir un avance clave en la verificación del uso de renovables, ayudando a mitigar el riesgo de greenwashing y fomentando una mayor transparencia en las operaciones mineras.

Desde el punto de vista tecnológico, será importante seguir evaluando el rendimiento y la resiliencia de mecanismos de consenso emergentes que prometen combinar eficiencia energética, descentralización y seguridad. Esto incluirá tanto el perfeccionamiento de modelos como PoH, PBFT o FBA, como la exploración de nuevas arquitecturas híbridas o modulares adaptadas a diferentes necesidades de uso.

En el plano regulatorio, se espera una progresiva ampliación de los requisitos ambientales aplicables a criptoactivos en distintas jurisdicciones. Para evitar fragmentaciones normativas y promover un cambio real a escala global, será indispensable fomentar la cooperación entre reguladores, establecer estándares comunes de divulgación ambiental y apoyar iniciativas multilaterales de gobernanza tecnológica.

Finalmente, a medida que las criptomonedas se integren más profundamente en los sistemas económicos y financieros, será imprescindible abordar también sus dimensiones sociales, éticas y de justicia ambiental, con especial atención a los efectos que puedan tener sobre territorios vulnerables o comunidades energéticamente desfavorecidas.

7. Bibliografía

1. Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P., & Peacock, A. (2019). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *100*, 143-174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>
2. Antwi, R., Gadze, J. D., Tchao, E. T., Sikora, A., Nunoo-Mensah, H., Agbemenu, A. S., Obour Agyekum, K. O.-B., Agyemang, J. O., Welte, D., & Keelson, E. (2022). A Survey on Network Optimization Techniques for Blockchain Systems. *Algorithms*, *15*(6), 193. <https://doi.org/10.3390/a15060193>
3. Bach, L. M., Mihaljevic, B., & Zagar, M. (2018). Comparative analysis of blockchain consensus algorithms. *2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 1545-1550. <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2018.8400278>
4. Balpunuri, V. V. (2024). Sustainable Blockchain: A New Horizon for Energy-Efficient Consensus Mechanisms. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, *12*(5), 5430-5437. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.62895>
5. Bamakan, S. M. H., Motavali, A., & Babaei Bondarti, A. (2020). A survey of blockchain consensus algorithms performance evaluation criteria. *Expert Systems with Applications*, *154*, 113385. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113385>
6. Bendiksen, C., & Gibbons, S. (2018). *The Bitcoin Mining Network*.

7. Blandin, A., Pieters, G. C., Wu, Y., Dek, A., Eisermann, T., Njoki, D., & Taylor, S. (2020). 3rd Global Cryptoasset Benchmarking Study. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3700822>
8. *Blockchain.com*. (2025). [Dataset]. <https://www.blockchain.com/explorer/charts/hash-rate>
9. Bonneau, J., Miller, A., Clark, J., Narayanan, A., Kroll, J. A., & Felten, E. W. (2015). SoK: Research Perspectives and Challenges for Bitcoin and Cryptocurrencies. *2015 IEEE Symposium on Security and Privacy*, 104-121. <https://doi.org/10.1109/SP.2015.14>
10. Bublyk, Y., Borzenko, O., & Hlazova, A. (2023). Cryptocurrency energy consumption: Analysis, global trends and interaction. *Environmental Economics*, *14*(2), 49-59. [https://doi.org/10.21511/ee.14\(2\).2023.04](https://doi.org/10.21511/ee.14(2).2023.04)
11. Buterin, V. (2013). *A NEXT GENERATION SMART CONTRACT & DECENTRALIZED APPLICATION PLATFORM*. https://blockchainlab.com/pdf/Ethereum_white_paper-a_next_generation_smart_contract_and_decentralized_application_platform-vitalik-buterin.pdf
12. Castro, M., & Liskov, B. (2002). Practical byzantine fault tolerance and proactive recovery. *ACM Transactions on Computer Systems*, *20*(4), 398-461. <https://doi.org/10.1145/571637.571640>
13. Chang, Y.-X., Li, Q.-L., Wang, Q., & Song, X.-S. (2022). *Dynamic Practical Byzantine Fault Tolerance and Its Blockchain System: A Large-Scale Markov Modeling* (Versión 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2210.14003>
14. Chen, J., & Micali, S. (2017). *Algorand* (No. arXiv:1607.01341). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1607.01341>
15. Cheng, L., Tan, H., Li, X., Pan, W., Zhao, H., Yuan, M., & Li, X. (2024). A hierarchical overlay network optimisation model for enhancing data transmission performance in

- blockchain systems. *Scientific Reports*, 14(1), 31900. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83399-z>
16. *CoinMarketCap*. (2025). [Dataset]. <https://coinmarketcap.com>
 17. De Angelis, S. (2018). *Assessing Security and Performances of Consensus algorithms for Permissioned Blockchains* (Versión 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1805.03490>
 18. *Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index*. (2025). [Dataset]. <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>
 19. *Digiconomist Ethereum Energy Consumption Index*. (2025). [Dataset]. <https://www.google.com/search?client=safari&rls=en&q=digiconomist+ethereum+consumption+index&ie=UTF-8&oe=UTF-8>
 20. Dinh, T. T. A., Liu, R., Zhang, M., Chen, G., Ooi, B. C., & Wang, J. (2018). Untangling Blockchain: A Data Processing View of Blockchain Systems. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 30(7), 1366-1385. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2017.2781227>
 21. *Enerdata*. (2024). [Dataset]. <https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html>
 22. Eres, D. M. (2016). *The Stellar Consensus Protocol: A Federated Model for Internet-level Consensus*.
 23. Estecahandy, H. (2024). Geopolitics of cryptocurrency mining in Kazakhstan. *Central Asian Survey*, 43(3), 327-345. <https://doi.org/10.1080/02634937.2024.2324192>

24. Finney, B. R. (2023). *WIN-WIN ENVIRONMENTAL REGULATIONS FOR CRYPTO MINING: DEVELOPING A REGULATORY PROGRAM THAT REDUCES ENVIRONMENTAL HARM AND PROMOTES INNOVATION AND COMPETITION*.
25. *Future financial services regulatory regime for cryptoassets*. (2023). https://assets.publishing.service.gov.uk/media/653bd1a180884d0013f71cca/Future_financial_services_regulatory_regime_for_cryptoassets_RESPONSE.pdf
26. Gaikwad, A., & Mavale, S. (2021). The Impact of Cryptocurrency Adoption as a Legal Tender in El Salvador. *International Journal of Engineering and Management Research*, 11(6). <https://doi.org/10.31033/ijemr.11.6.16>
27. Gasiorska, A., Folwarczny, M., Sturluson, J. P., & Demir, E. (2023). *Crypto Quest: Unveiling the Gender Gap in Iceland's Cryptocurrency Ownership and Investment*. PsyArXiv. <https://doi.org/10.31234/osf.io/fgdvk>
28. Ghosh, E., & Das, B. (2020). A Study on the Issue of Blockchain's Energy Consumption. In M. Chakraborty, S. Chakrabarti, & V. E. Balas (Eds.), *Proceedings of International Ethical Hacking Conference 2019* (Vol. 1065, pp. 63-75). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0361-0_5
29. *Guidelines on the conditions and criteria for the qualification of crypto- assets as financial instruments*. (2023). https://www.esma.europa.eu/sites/default/files/2024-12/ESMA75453128700-1323_Final_Report_Guidelines_on_the_conditions_and_criteria_for_the_qualification_of_CAs_as_FIs.pdf
30. Hao, W., Zeng, J., Dai, X., Xiao, J., Hua, Q.-S., Chen, H., Li, K.-C., & Jin, H. (2020). Towards a Trust-Enhanced Blockchain P2P Topology for Enabling Fast and Reliable

- Broadcast. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 17(2), 904-917.
<https://doi.org/10.1109/TNSM.2020.2980303>
31. IPCC. (2021).
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf
 32. Jiang, S., Li, Y., Lu, Q., Hong, Y., Guan, D., Xiong, Y., & Wang, S. (2021). Policy assessments for the carbon emission flows and sustainability of Bitcoin blockchain operation in China. *Nature Communications*, 12(1), 1938. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22256-3>
 33. Kapengut, E., & Mizrach, B. (2022). *An Event Study of the Ethereum Transition to Proof-of-Stake* (Versión 2). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2210.13655>
 34. King, S., & Nadal, S. (2012). *PPCoin: Peer-to-Peer Crypto-Currency with Proof-of-Stake*.
 35. Kohli, V., Chakravarty, S., Chamola, V., Sangwan, K. S., & Zeadally, S. (2023). An analysis of energy consumption and carbon footprints of cryptocurrencies and possible solutions. *Digital Communications and Networks*, 9(1), 79-89.
<https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.06.017>
 36. Küfeoğlu, S., & Özkuran, M. (2019). *Energy Consumption of Bitcoin Mining*.
 37. Lal, A., Niaz, H., Liu, J. J., & You, F. (2024). Can bitcoin mining empower energy transition and fuel sustainable development goals in the US? *Journal of Cleaner Production*, 439, 140799. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140799>
 38. Lashkari, B., & Musilek, P. (2021). A Comprehensive Review of Blockchain Consensus Mechanisms. *IEEE Access*, 9, 43620-43652.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065880>

39. Lim, E. T. K., Yu, J. J., Cai, S., & Tuunainen, V. (2024). Blockchain innovations: Technological applications and management challenges. *Information & Management*, 61(3), 103756. <https://doi.org/10.1016/j.im.2023.103756>
40. Liu, Y., & Xu, G. (2021). Fixed degree of decentralization DPoS consensus mechanism in blockchain based on adjacency vote and the average fuzziness of vague value. *Computer Networks*, 199, 108432. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108432>
41. Lone, A. H., & Naaz, R. (s. f.). *Reputation Driven Dynamic Access Control Framework for IoT atop PoA Ethereum Blockchain*.
42. Malone, D., & O'Dwyer, K. J. (2014). Bitcoin Mining and its Energy Footprint. *25th IET Irish Signals & Systems Conference 2014 and 2014 China-Ireland International Conference on Information and Communities Technologies (ISSC 2014/CIICT 2014)*, 280-285. <https://doi.org/10.1049/cp.2014.0699>
43. *Markets in Crypto-Assets Regulation (MiCA)*. (2023). <https://www.esma.europa.eu/esmas-activities/digital-finance-and-innovation/markets-crypto-assets-regulation-mica>
44. Md Rohul Amin. (2020). *51% ATTACKS ON BLOCKCHAIN: A SOLUTION ARCHITECTURE FOR BLOCKCHAIN TO SECURE IOT WITH PROOF OF WORK*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13763.12328>
45. Mora, C., Rollins, R. L., Taladay, K., Kantar, M. B., Chock, M. K., Shimada, M., & Franklin, E. C. (2018). Bitcoin emissions alone could push global warming above 2°C. *Nature Climate Change*, 8(11), 931-933. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0321-8>
46. Mora, C., Spirandelli, D., Franklin, E. C., Lynham, J., Kantar, M. B., Miles, W., Smith, C. Z., Freel, K., Moy, J., Louis, L. V., Barba, E. W., Bettinger, K., Frazier, A. G., Colburn Ix, J. F., Hanasaki, N., Hawkins, E., Hirabayashi, Y., Knorr, W., Little, C. M., ... Hunter, C. L. (2018). Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by

- greenhouse gas emissions. *Nature Climate Change*, 8(12), 1062-1071.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0315-6>
47. Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*.
 48. *Our World Data*. (2025). [Dataset]. <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
 49. Platt, M., Sedlmeir, J., Platt, D., Tasca, P., Xu, J., Vadgama, N., & Ibañez, J. I. (2021). *The Energy Footprint of Blockchain Consensus Mechanisms Beyond Proof-of-Work*.
<https://doi.org/10.48550/ARXIV.2109.03667>
 50. Rogelj, J., Den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi, K., & Meinshausen, M. (2016). Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature*, 534(7609), 631-639.
<https://doi.org/10.1038/nature18307>
 51. Rosales, A., Millar, H., & Richardson, A. (2024). Leveraging intra-provincial regulatory differences in a post-Paris context: Cryptocurrency mining “reverse battery” strategy in Atlantic Canada. *The Extractive Industries and Society*, 17, 101396.
<https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101396>
 52. Rudd, M., & Porter, D. (2024). *Economic integration of Bitcoin mining in renewable energy and grid management*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4899244>
 53. Ruiz, A. M., & Choperena, O. E. F. (2024). *Impacto Ambiental y Soluciones Sostenibles en la Minería de Bitcoin: Un Análisis Dialéctico*.
 54. Sedlmeir, J., Buhl, H. U., Fridgen, G., & Keller, R. (2020). The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth. *Business & Information Systems Engineering*, 62(6), 599-608. <https://doi.org/10.1007/s12599-020-00656-x>

55. Shinde, M., & Upadhyay, D. N. (2024). *Evaluating Proof of Stake (PoS) Efficiency and Security in Blockchain Using Real-World Data Analysis*. 20.
56. Siddique, I. M., Siddique, A. A., Smith, E. D., & Molla, S. (2023). Assessing the Sustainability of Bitcoin Mining: Comparative Review of Renewable Energy Sources. *Journal of Alternative and Renewable Energy Sources*, 10(1), 1-12. <https://doi.org/10.46610/JOARES.2024.v10i01.001>
57. Skh Saad, S. M., & Raja Mohd Radzi, R. Z. (2020). Comparative Review of the Blockchain Consensus Algorithm Between Proof of Stake (POS) and Delegated Proof of Stake (DPOS). *International Journal of Innovative Computing*, 10(2). <https://doi.org/10.11113/ijic.v10n2.272>
58. Statista. (2025). [Dataset]. <https://www.statista.com/statistics/881541/bitcoin-energy-consumption-transaction-comparison-visa/>
59. Stoll, C., Klaaßen, L., & Gallersdörfer, U. (2019). The Carbon Footprint of Bitcoin. *Joule*, 3(7), 1647-1661. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.05.012>
60. Stoll, C., Klaaßen, L., Gallersdörfer, U., & Neumüller, A. (2023). *Climate Impacts of Bitcoin Mining in the U.S.*
61. Tomatsu, Y., & Han, W. (2023). Bitcoin and Renewable Energy Mining: A Survey. *Blockchains*, 1(2), 90-110. <https://doi.org/10.3390/blockchains1020007>
62. University of Cambridge. (2025). [Dataset]. https://ccaf.io/cbnsi/cbeci/mining_map
63. Vangoor, V. K. R., Ravi, C. S., & Developer, M. (2020). *Energy-Efficient Consensus Mechanisms for Sustainable Blockchain Networks*. 1(1).
64. Vranken, H. (2017). Sustainability of bitcoin and blockchains. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 28, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.04.011>

65. Xiao, J., Luo, T., Li, C., Zhou, J., & Li, Z. (2024). CE-PBFT: A high availability consensus algorithm for large-scale consortium blockchain. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 36(2), 101957. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2024.101957>
66. Xiao, Z., Cui, S., Xiang, L., Liu, P. J., & Zhang, H. (2023). The environmental cost of cryptocurrency: Assessing carbon emissions from bitcoin mining in China. *Journal of Digital Economy*, 2, 119-136. <https://doi.org/10.1016/j.jdec.2023.11.001>
67. Xu, J., Wang, C., & Jia, X. (2023). A Survey of Blockchain Consensus Protocols. *ACM Computing Surveys*, 55(13s), 1-35. <https://doi.org/10.1145/3579845>
68. Yakovenko, A. (2018). *Solana: A new architecture for a high performance blockchain*.
69. Zamani, M., Movahedi, M., & Raykova, M. (2018). RapidChain: Scaling Blockchain via Full Sharding. *Proceedings of the 2018 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, 931-948. <https://doi.org/10.1145/3243734.3243853>
70. Zhang, Y.-H., & Liu, X. F. (2021). Traffic Redundancy in Blockchain Systems: The Impact of Logical and Physical Network Structures. *2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ISCAS51556.2021.9401386>
71. Zheng, X., & Feng, W. (2021). Research on Practical Byzantine Fault Tolerant Consensus Algorithm Based on Blockchain. *Journal of Physics: Conference Series*, 1802(3), 032022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1802/3/032022>
72. Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. (2017). An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends. *2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress)*, 557-564. <https://doi.org/10.1109/BigDataCongress.2017.85>

73. Zohar, A. (2015). Bitcoin: Under the hood. *Communications of the ACM*, 58(9), 104-113.

<https://doi.org/10.1145/2701411>

Declaración de Uso de Herramientas de Inteligencia Artificial Generativa en Trabajos Fin de Grado

Por la presente, yo, Borja Muñoz Espinosa, estudiante de Administración de Empresas y Business Analytics de la Universidad Pontificia Comillas al presentar mi Trabajo Fin de Grado titulado " **Sostenibilidad y Eficiencia Energética en Criptomonedas: Evaluación de Mecanismos de Consenso y Marcos Regulatorios** ", declaro que he utilizado la herramienta de Inteligencia Artificial Generativa ChatGPT u otras similares de IAG de código sólo en el contexto de las actividades descritas a continuación:

1. **Referencias:** Usado conjuntamente con otras herramientas, como Science, para identificar referencias preliminares que luego he contrastado y validado.
2. **Metodólogo:** Para descubrir métodos aplicables a problemas específicos de investigación.
3. **Constructor de plantillas:** Para diseñar formatos específicos para secciones del trabajo.
4. **Corrector de estilo literario y de lenguaje:** Para mejorar la calidad lingüística y estilística del texto.
5. **Generador previo de diagramas de flujo y contenido:** Para esbozar diagramas iniciales.
6. **Sintetizador y divulgador de libros complicados:** Para resumir y comprender literatura compleja.
7. **Revisor:** Para recibir sugerencias sobre cómo mejorar y perfeccionar el trabajo con diferentes niveles de exigencia.

Afirmo que toda la información y contenido presentados en este trabajo son producto de mi investigación y esfuerzo individual, excepto donde se ha indicado lo contrario y se han dado los créditos correspondientes. Soy consciente de las implicaciones académicas y éticas de presentar un trabajo no original y acepto las consecuencias de cualquier violación a esta declaración.

Fecha: 02/06/2025

Firma: Borja Muñoz Espinosa