

# Tecnología blockchain aplicada a la trazabilidad en la cadena de suministro para lograr una economía circular

Rocío Mena

June 30, 2024

## 1 Introducción

El mundo se enfrenta a un desafío ambiental sin precedentes: la gestión insostenible de los recursos naturales. La producción y consumo masivos de bienes generan un volumen creciente de residuos, lo que pone en riesgo la salud del planeta y el bienestar de las generaciones futuras [Pör+22; Pel21]. En este contexto, la transición hacia una economía circular se presenta como una alternativa viable para mitigar este impacto y construir un futuro más sostenible [Arr+22].

La economía circular es un modelo de producción y consumo que busca maximizar el valor de los recursos a lo largo de su ciclo de vida, minimizando la generación de residuos y reincorporando los materiales al sistema productivo para extender su vida útil [Da 22; Mel+21]. Para lograr este objetivo, es fundamental contar con mecanismos eficientes de trazabilidad que permitan rastrear el flujo de materiales desde su origen hasta su disposición final.

Las cadenas de suministro constituyen el conjunto de procesos y actores involucrados en la acción de llevar un producto o servicio desde su origen hasta el consumidor final. Las cadenas de suministro tradicionales se caracterizan por una falta de transparencia y trazabilidad en el flujo de materiales. Esto dificulta la identificación de oportunidades para la reutilización y el reciclaje, y limita la capacidad de responsabilizar a las industrias por el impacto ambiental de sus productos. Las prácticas actuales de trazabilidad suelen basarse en sistemas manuales y fragmentados, que son propensos a errores y manipulaciones. Además, estos sistemas no suelen estar integrados a lo largo de toda la cadena de suministro, lo que dificulta la obtención de una visión completa del ciclo de vida de los materiales.

La trazabilidad en la cadena de suministro juega un papel fundamental en la transición hacia una economía circular. Al permitir rastrear el flujo de materiales desde su origen hasta su disposición final, la trazabilidad puede ayudar a:

1. Identificar oportunidades para la reutilización y el reciclaje: la trazabilidad permite identificar qué materiales pueden ser reutilizados o reciclados en diferentes etapas de la cadena de suministro. Esto puede ayudar a reducir la generación de residuos y aumentar la eficiencia en el uso de recursos.
2. Responsabilizar a las industrias por su impacto ambiental: la trazabilidad permite rastrear el origen de los materiales y el impacto ambiental de su producción y consumo. Esto puede ayudar a responsabilizar a las industrias por su huella ambiental y promover prácticas más sostenibles [Mel+21].
3. Promover la transparencia en las cadenas de suministro: la trazabilidad puede ayudar a aumentar la transparencia en las cadenas de suministro, lo que puede generar confianza entre los consumidores y las empresas.

La tecnología blockchain ofrece una solución para la trazabilidad en la cadena de suministro. Una cadena de bloques o blockchain es un registro distribuido e inmutable que permite almacenar y compartir información de manera segura y transparente entre todos los participantes de la cadena [RCB18]. Las características de la tecnología blockchain, como su inmutabilidad, transparencia y trazabilidad, la convierten en una herramienta ideal para la gestión sostenible de la cadena de suministro [Bar+23; BZB23; Aln+23].

En este trabajo de tesis, proponemos una solución para mejorar la trazabilidad en la cadena de suministro utilizando tecnología blockchain integrada con otras tecnologías complementarias como Internet de las Cosas (IoT) y sistemas de gestión tradicionales. La propuesta se basa en el desarrollo de una plataforma blockchain fácilmente integrable con sistemas externos para la carga y lectura de información sobre productos y materias primas a lo largo de la cadena de suministros. Esta plataforma es capaz de incorporar datos de distintos sensores IoT de forma confiable y automatizada en varias etapas de la cadena de suministros. A su vez, se puede incorporar datos a la plataforma de forma manual o automatizada a través de sistemas informáticos de gestión utilizando una API REST, facilitando su adopción. Esta plataforma proporciona una visibilidad completa en tiempo real del movimiento y el estado de los productos a lo largo de la cadena de suministro.

La plataforma blockchain permitirá crear un registro inmutable y transparente de todos los eventos que ocurren en la cadena de suministro, desde la producción hasta el consumo. Existe la posibilidad futura de extender el uso de este sistema luego del fin de la vida útil del producto, durante la etapa de disposición final y posible revalorización de las materias primas del producto.

Esperamos que la implementación de esta solución contribuya significativamente a la transición hacia una economía circular sostenible. Al mejorar la trazabilidad en la cadena de suministro, se puede reducir la generación de residuos, responsabilizar a las industrias por su impacto ambiental y promover prácticas más sostenibles en la producción y el consumo de bienes.

Esta tesis se estructura en varias secciones: la Introducción (Sección 1) expone la problemática de la trazabilidad en la cadena de suministro, la prop-

uesta de solución y las posibles limitaciones. La Metodología (Sección 2) de investigación describe detalladamente el enfoque que se utilizará para desarrollar y evaluar la plataforma blockchain propuesta. La Revisión de la literatura (Sección 3) expone el estado actual del arte e investigación existente sobre trazabilidad en la cadena de suministro y tecnologías blockchain. El Diseño e implementación de la plataforma blockchain (Sección 4) detalla la arquitectura del sistema, los componentes principales y las funcionalidades. La Evaluación de la plataforma blockchain (Sección 5) presenta los resultados de implementación y evaluación del impacto ambiental. Finalmente, las Conclusiones y trabajo futuro (Sección 5) resumen los hallazgos del estudio y sugieren direcciones para investigaciones futuras.

## 2 Motivación

El mundo se enfrenta a un desafío ambiental sin precedentes: la gestión insostenible de los recursos naturales. La producción y consumo masivos de bienes generan un volumen creciente de residuos, lo que pone en riesgo la salud del planeta y el bienestar de las generaciones futuras [Pör+22; Pel21]. En este contexto, la transición hacia una economía circular se presenta como una solución prometedora para mitigar este impacto y construir un futuro más sostenible [Arr+22]. Este modelo económico busca maximizar el valor de los recursos a lo largo de su ciclo de vida, minimizando el desperdicio y reintroduciendo los materiales en los sistemas de producción [Da 22; Mel+21]. Sin embargo, un desafío clave para lograr una economía circular radica en la falta de transparencia y trazabilidad dentro de las cadenas de suministro tradicionales.

Esta falta de visibilidad dificulta la capacidad para identificar oportunidades de reutilización y reciclaje, responsabilizar a las industrias por su impacto ambiental y empoderar a los consumidores para que tomen decisiones informadas. Nuestra investigación tiene como objetivo abordar esta brecha mediante el desarrollo de una solución que aprovecha el poder de la tecnología blockchain para mejorar la trazabilidad de la cadena de suministro. Al mejorar la trazabilidad, podemos contribuir significativamente a la construcción de una economía circular sostenible, reducir la generación de residuos y promover prácticas de producción y consumo responsables.

## 3 Trabajos existentes sobre trazabilidad y blockchain

Investigaciones previas han explorado diversas tecnologías para mejorar la trazabilidad de la cadena de suministro, incluidos códigos de barras, etiquetas RFID y redes de sensores [Nob24]. Estas tecnologías ofrecen cierto nivel de capacidad de seguimiento; sin embargo, a menudo están limitadas por factores como la falta de estandarización, la fragmentación de información y la vulnerabilidad a la manipulación [Nob24].

En los últimos años, la tecnología blockchain ha surgido como una solución

prometedora para abordar estas limitaciones [Bar+23; BZB23; Aln+23]. Sus características principales, como el sistema de registro distribuido, la inmutabilidad y la transparencia, la convierten en una plataforma ideal para registrar y rastrear el movimiento de mercancías a lo largo de la cadena de suministro [Bar+23]. Numerosos estudios han explorado diversas aplicaciones de la tecnología blockchain para la trazabilidad de la cadena de suministro, demostrando su potencial para mejorar la transparencia y la responsabilidad dentro de estos sistemas. Ejemplos de estas aplicaciones incluyen la creación de un registro inmutable del origen de los productos para verificar su autenticidad y combatir la falsificación [BZB23], el rastreo de materiales a lo largo de la cadena de suministro para apoyar una economía circular [Bar+23], la optimización de la logística y la gestión de inventario mediante información en tiempo real [Nob24], y la promoción de prácticas sostenibles al identificar productos con menor impacto ambiental [BZB23].

## 4 Contribución al problema

La investigación existente reconoce el potencial de blockchain para la trazabilidad de la cadena de suministro, pero muchas soluciones propuestas se enfocan únicamente en la tecnología blockchain [Bar+23; BZB23; Aln+23]. Nuestro trabajo va más allá al proponer un enfoque híbrido que integra blockchain con Internet de las cosas (IoT) y sistemas de gestión tradicionales. Esta integración nos permite aprovechar los datos en tiempo real de los sensores de IoT, proporcionando una visión más completa y confiable del movimiento y el estado del producto a lo largo de la cadena de suministro. Además, nuestra solución incorpora sistemas de gestión tradicionales, asegurando la compatibilidad y facilitando la adopción dentro de las prácticas comerciales existentes. Creemos que este enfoque combinado ofrece una implementación más factible y práctica para mejorar la trazabilidad de la cadena de suministro, en última instancia, contribuyendo a la transición hacia una economía circular sostenible.

## 5 Problema ambiental

En la actualidad nos encontramos ante un problema ambiental sin precedente: el cambio climático. Este fenómeno, causado principalmente por la actividad humana, ha generado un aumento de las temperaturas medias en el planeta, así como una mayor recurrencia de fenómenos meteorológicos extremos. Estos efectos adversos ya están generando pérdidas y daños tanto en la naturaleza como en las sociedades humanas, exacerbando la vulnerabilidad de los sectores y regiones más expuestos [Arr+22].

Según el consenso científico actual, el aumento de las temperaturas medias que sufre el planeta está causado, casi en su totalidad, por la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, como resultado de la actividad humana [Pör+22]. Esta evidencia se fundamenta en el rápido aumento

de gases como el dióxido de carbono y el metano, donde aproximadamente dos tercios del dióxido de carbono provienen de la quema de combustibles fósiles, mientras que el metano tiene una contribución significativa desde la agricultura y la gestión de residuos [Pel21].

Las consecuencias del cambio climático en términos del aumento de las temperaturas medias y la mayor recurrencia de fenómenos meteorológicos extremos son significativas, con impactos económicos sustanciales que varían según las regiones y los grupos económicos [Pör+22]. Estos efectos adversos ya están generando pérdidas y daños tanto en la naturaleza como en las sociedades humanas, exacerbando la vulnerabilidad de los sectores y regiones más expuestos [Pel21].

Para mitigar y revertir los efectos del cambio climático, es esencial implementar políticas globales y locales efectivas. El IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) destaca la necesidad urgente de políticas regulatorias, fiscales, sociales y estructurales que incentiven una transición hacia modelos de producción y consumo más sostenibles. Entre estas medidas se incluyen la internalización de las externalidades de las emisiones de carbono a través de impuestos y sistemas de comercio de emisiones, así como la protección y apoyo a sectores vulnerables frente a los cambios estructurales [Pör+22].

Sin embargo, el futuro del cambio climático está marcado por una alta incertidumbre. Pelegrí señala varios factores críticos que influirán en la evolución climática futura, como la capacidad de los océanos y la biosfera terrestre para absorber dióxido de carbono, que podría disminuir con el tiempo, convirtiéndose potencialmente en fuentes de emisión en lugar de sumideros. Además, la dinámica de las grandes masas de hielo antártico y la incertidumbre en el ciclo del agua, incluidos los cambios en la formación de nubes y sus efectos en el albedo y el efecto invernadero, complican aún más las proyecciones climáticas [Pel21].

Este panorama subraya la urgencia de una respuesta global coordinada y basada en evidencias científicas. La humanidad enfrenta el desafío de adaptarse a un clima cambiante y mitigar sus impactos negativos. En el informe publicado por el IPCC en 2022, se destaca la importancia de todo tipo de acciones, desde acciones individuales de consumo sostenible hasta políticas internacionales ambiciosas. El informe afirma que todos los niveles de la sociedad tienen un papel crucial en asegurar un futuro sostenible para las generaciones venideras, y enfatiza que es fundamental la colaboración entre los líderes políticos, la sociedad civil y el sector privado para enfrentar este desafío global de manera inclusiva y equitativa [Pör+22; Pel21]. En este contexto complejo que requiere replantear nuestro modelo de producción y consumo mundial para hacerlo más sostenible y resiliente, la economía circular surge como una modelo prometedor.

## 6 Economía circular

La economía circular es un enfoque alternativo al modelo económico lineal tradicional, que se basa en la extracción de recursos naturales, la producción de bienes y servicios, y la eliminación de residuos. En contraste, la economía circular pro-

pone un sistema en el que los recursos se mantienen en uso durante el mayor tiempo posible, se reciclan y se reutilizan, minimizando la generación de residuos y reduciendo la extracción de materias primas [Fou14]. Este enfoque se basa en los principios de diseño ecológico, la reutilización de materiales y la regeneración de los sistemas naturales, con el objetivo de crear un sistema económico más sostenible y resiliente.

Desde la Revolución Industrial, la economía global ha operado principalmente bajo un modelo de "extraer, producir y consumir", caracterizado por la explotación de recursos naturales y la generación masiva de residuos [CK16]. Este enfoque, aunque ha impulsado un crecimiento económico sin precedentes, ha llevado al agotamiento de recursos críticos y a una crisis ambiental cada vez más evidente.

La economía circular propone un cambio radical al concebir los sistemas productivos y de consumo como ciclos cerrados, donde los materiales y recursos se mantienen en uso durante el mayor tiempo posible, se reciclan y se reutilizan al final de su vida útil [Cir17]. Este enfoque no solo busca minimizar la generación de residuos, sino también maximizar el valor de los recursos a lo largo de su ciclo de vida. El eco-diseño juega un papel central en este proceso, promoviendo la creación de productos y servicios que sean más eficientes en el uso de recursos, renovables, reciclables y menos perjudiciales para el medio ambiente.

Para efectuar esta transformación hacia la economía circular, es esencial adoptar no solo innovaciones tecnológicas sino también cambios organizativos y sociales significativos [Tra24]. Esto implica desarrollar nuevos conocimientos y tecnologías que apoyen procesos productivos más eficientes y menos intensivos en recursos. Además, se requiere reestructurar cadenas de valor existentes y fomentar la colaboración entre sectores industriales y actores gubernamentales para promover prácticas empresariales más sostenibles.

El impacto potencial de la economía circular va más allá de la mitigación ambiental. También se espera que genere nuevas oportunidades económicas y de empleo al incentivar la innovación en productos y servicios circulares. Las empresas que adoptan principios de economía circular no solo pueden reducir costos operativos y riesgos ambientales, sino también fortalecer su posicionamiento en mercados globales cada vez más conscientes del medio ambiente.

Un elemento clave dentro de la economía circular son los principios de las "3R": Reducir, Reutilizar y Reciclar [CK16]. Reducir implica minimizar el consumo de recursos y energía a través de mejoras en la eficiencia y eco-eficiencia. Reutilizar se refiere a la prolongación de la vida útil de productos y materiales mediante el segundo uso y la reparación. Reciclar, por otro lado, implica recuperar materiales valiosos de residuos para reintroducirlos en la cadena productiva.

Además de los beneficios ambientales y económicos, la economía circular también promueve un consumo más responsable y consciente, fomentando patrones de consumo que sean menos intensivos en recursos y generadores de residuos. Esto no solo contribuye a la conservación de los recursos naturales, sino que también fortalece la resiliencia de las comunidades frente a los desafíos globales emergentes.

Al desafiar el paradigma de "usar y desechar" con un enfoque en la regeneración y eficiencia de recursos, este modelo se posiciona como un catalizador clave para abordar los desafíos interconectados de la sostenibilidad ambiental y el progreso económico en el siglo XXI.

## 7 Cadena de suministro y economía circular

### 1. Introducción al Concepto de Economía Circular

Definición y principios de la economía circular. Importancia y beneficios de implementar la economía circular. Contexto actual y problemas asociados con los sistemas lineales de producción y consumo.

### 2. Trazabilidad de Materiales

Concepto de trazabilidad y su importancia en la gestión de materiales. Métodos tradicionales de trazabilidad y sus limitaciones. Aplicación de tecnologías emergentes para mejorar la trazabilidad.

### 3. Blockchain: Fundamentos y Aplicaciones

Definición y características principales de la tecnología blockchain. Principios de descentralización, transparencia e inmutabilidad. Casos de uso relevantes de blockchain en diferentes industrias.

### 4. Integración de Blockchain en la Trazabilidad de Materiales

Ventajas de utilizar blockchain para la trazabilidad de materiales. Casos de estudio y proyectos piloto que demuestran la efectividad de blockchain en la trazabilidad. Desafíos técnicos, económicos y regulatorios de implementar blockchain en sistemas de trazabilidad.

### 5. Economía Circular y Tecnología Blockchain

Sinergias entre la economía circular y la tecnología blockchain. Cómo blockchain puede facilitar la transición hacia modelos circulares de negocio. Ejemplos específicos de cómo la trazabilidad mediante blockchain puede cerrar ciclos de materiales.

### 6. Marco Conceptual y Modelos Teóricos

Desarrollo de un marco conceptual para la aplicación de blockchain en la trazabilidad de materiales. Revisión crítica de modelos teóricos relevantes para tu investigación. Adaptación de modelos existentes para el contexto de la economía circular y blockchain.

### 7. Implicaciones Sociales, Ambientales y Económicas

Impacto potencial de la implementación de blockchain en la trazabilidad de materiales sobre aspectos sociales, ambientales y económicos. Consideraciones éticas y de responsabilidad en la gestión de datos en blockchain. Perspectivas futuras y recomendaciones para la implementación práctica.

- 8 Cadena de suministros y economía circular
- 9 Regulaciones sobre sustentabilidad y trazabilidad
- 10 Trazabilidad en la cadena de suministro
- 11 Integración de tecnologías para la trazabilidad
- 12 Tecnología blockchain para la trazabilidad
- 13 Aplicaciones de blockchain en la cadena de suministro
- 14 Tecnología blockchain para la sustentabilidad
- 15 Tecnologías Blockchain

La tecnología blockchain es una tecnología de base de datos distribuída. Esta estructura de datos distribuida mantiene un registro inmutable de transacciones o eventos validados mediante técnicas criptográficas que protegen los datos contra la manipulación. La información de esta base de datos se organiza en transacciones, que son validadas y agrupadas en bloques. Cada bloque, junto con un puntero al bloque anterior, forma una cadena de transacciones interconectadas criptográficamente. Una vez que una transacción se ha añadido a la cadena, generalmente no puede ser modificada ni eliminada porque requeriría cambiar todos los bloques posteriores en la cadena, lo cual es computacionalmente impracticable debido a la distribución y la seguridad criptográfica de la red blockchain. En la Figura ?? se muestra un esquema de cómo se procesa una transacción en una blockchain.

[width=0.8]./assets/blockchain.jpg

Figure 1: Funcionamiento de una transacción en una blockchain. Fuente: Ameen Alam, Medium.

Esta arquitectura dota a la tecnología blockchain de características como inmutabilidad, transparencia y trazabilidad, que la convierten en una herramienta ideal para la gestión sostenible de la cadena de suministro. La tecnología blockchain ha sido ampliamente adoptada en diversos sectores y aplicaciones,



incluyendo la trazabilidad de la cadena de suministro, la autenticación de productos, la gestión de identidad, la votación electrónica, la gestión de activos digitales y la creación de contratos inteligentes.

En este trabajo se analizan y comparan cinco tecnologías blockchain líderes en la industria: Hyperledger Fabric, Ethereum, Polkadot, VeChain y Cardano. Cada una de estas tecnologías tiene sus propias características, ventajas y desventajas, y es importante comprender sus diferencias para seleccionar la tecnología más adecuada para este caso de uso específico.

Cada tecnología se compara en distintos aspectos clave relevantes para este trabajo. Como el tipo de tecnología, el protocolo de consenso, el lenguaje de programación, la interoperabilidad, la adopción real y el tamaño de la comunidad. A continuación, se presenta una descripción detallada de cada tecnología y una comparación de sus características.

## 16 Hyperledger Fabric

Hyperledger Fabric es una plataforma de tecnología ledger distribuida (DLT) de código abierto y diseñada para uso en contextos empresariales <sup>1</sup>. Hyperledger se estableció bajo la Fundación Linux y su sólida comunidad [And+18].

Fabric tiene una arquitectura altamente modular y configurable, que permite la innovación, la versatilidad y la optimización para una amplia gama de casos de uso de la industria, incluida la cadena de suministro. Esta es la primera plataforma de ledger distribuida que admite contratos inteligentes creados en lenguajes de programación de uso general como Java, Go y Node.js, en lugar de lenguajes específicos de dominio restringidos (DSL). Esto significa que en la mayoría de los casos no requiere capacitación adicional para aprender un nuevo idioma para desarrollo de contratos inteligentes.

La plataforma Fabric también es permisionada, lo que significa que, a diferencia de una red pública sin permiso, los participantes se conocen entre sí, en lugar de ser anónimos y, por lo tanto, no se confía en absoluto. A su vez la plataforma tiene compatibilidad con protocolos de consenso conectables que permiten que la plataforma se personalice de manera más eficaz para adaptarse a casos de uso particulares y modelos de confianza.

Fabric puede aprovechar los protocolos de consenso que no requieren una criptomoneda nativa para incentivar la minería costosa o impulsar la ejecución de contratos inteligentes. Evitar una criptomoneda reduce algunos vectores de riesgo / ataque significativos, y la ausencia de operaciones de minería criptográfica significa que la plataforma se puede implementar con aproximadamente el mismo costo operativo que cualquier otro sistema distribuido.

La combinación de estas características diferenciadoras de diseño convierte a Fabric en una de las plataformas de mejor rendimiento disponibles en la actualidad tanto en términos de procesamiento de transacciones como de latencia de confirmación de transacciones, y permite privacidad y confidencialidad de transacciones y los contratos inteligentes que los implementan.

---

<sup>1</sup><https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/latest/index.html>

## 17 Ethereum

Ethereum es una plataforma de código abierto basada en blockchain que permite a los desarrolladores crear y desplegar contratos inteligentes y aplicaciones descentralizadas (dApps) <sup>2</sup>. Ethereum tiene como objetivo ser una computadora mundial descentralizada que ejecute cualquier tipo de aplicación. Esta plataforma es alimentada por su criptomoneda nativa, Ether, que se utiliza para pagar las transacciones y los servicios de la red [But+13].

Esta plataforma fue pionera en la creación de contratos inteligentes y ha sido un líder en la industria desde su lanzamiento en 2015. Ethereum es una plataforma de blockchain pública y sin permiso, lo que significa que cualquiera puede unirse a la red y participar en la validación de transacciones y la ejecución de contratos inteligentes.

Los contratos inteligentes en Ethereum se escriben en Solidity [Dan17], un lenguaje de programación específico de dominio que se utiliza para definir las reglas y la lógica de una aplicación descentralizada. Los contratos inteligentes en Ethereum se ejecutan en la máquina virtual Ethereum (EVM), que es una máquina virtual Turing completa que puede ejecutar cualquier tipo de código. El lenguaje Solidity está inspirado en JavaScript y C++, lo que facilita su aprendizaje para los desarrolladores que ya están familiarizados con estos lenguajes.

Ethereum utiliza un protocolo de consenso de prueba de trabajo (PoW, Proof of Work) para validar las transacciones y agregar nuevos bloques a la cadena de bloques. Sin embargo, Ethereum está en proceso de migrar a un protocolo de consenso de prueba de participación (PoS, Proof of Stake).

## 18 Polkadot

Polkadot es una plataforma de blockchain de código abierto que permite la interoperabilidad entre diferentes blockchains <sup>3</sup>. Polkadot tiene como objetivo crear una red de blockchain escalable, segura e interoperable que pueda soportar una amplia gama de aplicaciones descentralizadas y contratos inteligentes. Esta plataforma es desarrollada por la Web3 Foundation y posee una sólida comunidad de desarrolladores activos [Woo16].

La arquitectura de esta plataforma consta de una cadena principal ("Relay Chain") y múltiples cadenas que se conectan a ella ("parachains"). Cada parachain es una blockchain independiente, pero puede comunicarse con las demás blockchains a través de la cadena principal. Esto permite que las aplicaciones descentralizadas y los contratos inteligentes se ejecuten en diferentes blockchains y se comuniquen entre sí de manera eficiente.

Esta plataforma utiliza un protocolo de consenso de PoS llamado "Nominated Proof of Stake" (NPoS) para validar las transacciones y agregar nuevos bloques a la cadena de bloques. La red posee una criptomoneda nativa llamada DOT, que se utiliza para pagar las transacciones y los servicios de la red. Cada

---

<sup>2</sup><https://ethereum.org/en/learn/>

<sup>3</sup><https://polkadot.network/>

blockchain en Polkadot puede tener su propia criptomoneda nativa y su propio conjunto de reglas y lógica.

Las aplicaciones para Polkadot son desarrolladas utilizando Substrate <sup>4</sup>, un framework modular escrito en Rust que facilita la creación de blockchains personalizadas y parachains. Substrate también posee un módulo de compatibilidad con contratos inteligentes escritos en Solidity, el lenguaje de programación utilizado en Ethereum.

## 19 VeChain

VeChain es una plataforma de blockchain de código abierto dedicada a la trazabilidad y que busca asegurar la autenticidad de los productos en la cadena de suministro <sup>5</sup>. VeChain utiliza una combinación de tecnología blockchain, RFID e Internet de las cosas (IoT) para rastrear el movimiento de productos a lo largo de toda la cadena de suministro, desde la producción hasta el consumidor final. Esta plataforma es desarrollada por la Fundación VeChain y tiene como objetivo mejorar la transparencia y la confianza en la cadena de suministro [She22].

VeChain es una plataforma permissionada, lo que significa que los participantes de la red se conocen entre sí y se confían mutuamente. Esto permite una mayor privacidad y confidencialidad de las transacciones y los contratos inteligentes que se ejecutan en la red. VeChain también utiliza una tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID) para rastrear los productos a lo largo de la cadena de suministro y garantizar su autenticidad.

Esta plataforma utiliza una arquitectura de dos tokens, donde VET es la criptomoneda nativa utilizada para pagar las transacciones y los servicios de la red, y VTHO es un token secundario utilizado para pagar el costo de la ejecución de contratos inteligentes y las transacciones en la red. Esta plataforma utiliza un protocolo de consenso de PoS llamado prueba de autoridad (PoA, Proof of Authority) para validar las transacciones y agregar nuevos bloques a la cadena.

Las aplicaciones para VeChain pueden desarrollarse utilizando el lenguaje de programación Solidity, el mismo utilizado en Ethereum, lo que facilita la migración de aplicaciones existentes de Ethereum a VeChain. A su vez, también se pueden desarrollar aplicaciones personalizadas utilizando el framework de desarrollo de Smart Contracts de VeChain, que proporciona una serie de herramientas y bibliotecas para facilitar el desarrollo de aplicaciones descentralizadas y contratos inteligentes.

## 20 Cardano

Cardano es una plataforma de blockchain de código abierto que busca crear una red de blockchain escalable, segura y sostenible <sup>6</sup>. Cardano tiene como

---

<sup>4</sup><https://docs.substrate.io/>

<sup>5</sup><https://docs.vechain.org/introduction-to-vechain/about-the-vechain-blockchain>

<sup>6</sup><https://docs.cardano.org/about-cardano/introduction/#cardano-explained>

objetivo ser una plataforma de contratos inteligentes de tercera generación que pueda soportar una amplia gama de aplicaciones descentralizadas y contratos inteligentes. Cardano se caracteriza por su enfoque científico y riguroso en su desarrollo, utilizando evidencia formal y revisión por pares para garantizar la seguridad y confiabilidad de la plataforma [Hos17].

Una de las características distintivas de Cardano es su enfoque en la seguridad y la provisión de garantías formales. Para programar aplicaciones en esta plataforma se utiliza el lenguaje de programación funcional Haskell, que permite la verificación formal de contratos inteligentes y protocolos. También se pueden desarrollar contratos inteligentes utilizando Plutus [Cha+19]<sup>7</sup>, un lenguaje de programación específico de dominio basado en Haskell que facilita la creación de contratos inteligentes seguros y confiables en Cardano.

Esta plataforma utiliza un protocolo de consenso de PoS, que es más eficiente energéticamente que los protocolos de PoW. La red posee una criptomoneda nativa llamada ADA, que se utiliza para pagar las transacciones y los servicios de la red.

## 21 Comparación de tecnologías

A continuación se realiza una comparación de las tecnologías blockchain mencionadas anteriormente en términos de tipo de tecnología, protocolo de consenso, lenguaje de programación, interoperabilidad, adopción real y tamaño de la comunidad.

Tecnología Hyperledger	Ethereum	Polkadot	VeChain	Cardano	
Tipo	Pública	Pública	Pública	Permissionada	Pública
Consenso	Pluggable	PoW - PoS	PoS	PoA	PoS
Lenguaje	Java, Go, Node.js	Solidity	Rust, Solidity	Solidity	Haskell
Interoperabilidad	Limitada	Limitada	Alta	Limitada	Limitada
Adopción	Alta	Muy alta	Media	Media	Media
Comunidad	Grande	Grande	Grande	Mediana	Grande

Table 1: Comparación de plataformas blockchain

## 22 Conclusión

En base al análisis realizado es los distintos aspectos clave de cada plataforma, se elige a Ethereum como la tecnología blockchain más adecuada para el desarrollo de este trabajo por los siguientes motivos:

<sup>7</sup><https://developers.cardano.org/docs/smart-contracts/plutus/>

- Pública: Ethereum es una plataforma de blockchain pública y sin permiso, lo que permite a cualquier persona unirse a la red, leer el estado de la cadena de bloques y participar en la validación de transacciones.
- PoS: en su última actualización, Ethereum está migrando a un protocolo de consenso de prueba de participación, que es más eficiente energéticamente que el protocolo de PoW, por lo que es más sostenible a largo plazo y reduce el impacto ambiental del uso de la aplicación.
- Comunidad: entre las opciones revisadas, Ethereum posee la mayor comunidad de desarrolladores activos y adopción en la industria, lo que garantiza un soporte continuo y una amplia gama de recursos disponibles durante el desarrollo y mantenimiento de la aplicación.
- Lenguaje de programación: Ethereum utiliza el lenguaje de programación Solidity para desarrollar contratos inteligentes y aplicaciones descentralizadas. Este lenguaje de alto nivel es fácil de aprender y permite a los desarrolladores crear aplicaciones complejas de manera eficiente.
- Interoperabilidad: Ethereum es compatible con una amplia gama de aplicaciones y protocolos, lo que facilita la interoperabilidad con otras plataformas de blockchain y aplicaciones descentralizadas. De entre las opciones revisadas, Ethereum es la plataforma más compatible y versátil para integrar con otras tecnologías y sistemas y posee una amplia gama de herramientas y bibliotecas disponibles para facilitar la integración.

- 23 Cadena de suministros y economía circular
- 24 Regulaciones sobre sustentabilidad y trazabilidad
- 25 Trazabilidad en la cadena de suministro
- 26 Integración de tecnologías para la trazabilidad
- 27 Tecnología blockchain para la trazabilidad
- 28 Aplicaciones de blockchain en la cadena de suministro
- 29 Tecnología blockchain para la sustentabilidad
- 30 Glosario

**Blockchain** es una estructura de datos distribuida que mantiene un registro inmutable de transacciones o eventos mediante técnicas criptográficas que protegen contra la manipulación. La información se organiza en transacciones que son validadas y agrupadas en bloques. Cada bloque, junto con un puntero al bloque anterior, forma una cadena de transacciones interconectadas. Una vez que una transacción se ha añadido a la cadena, generalmente no puede ser modificada ni eliminada porque requeriría cambiar todos los bloques posteriores en la cadena, lo cual es computacionalmente impracticable debido a la distribución y la seguridad criptográfica de la red blockchain [RCB18].

**Distributed ledger technology (DLT)** : un ledger es un libro mayor o registro contable que registra todas las transacciones realizadas dentro de un sistema. El término DLT se suele utilizar como sinónimo de Blockchain y se refiere a la base de datos distribuida donde se almacenan todas las transacciones [RCB18].

**Mecanismo de Consenso** es un protocolo utilizado en redes distribuidas, como una blockchain, que permite a los nodos de la red llegar a un acuerdo sobre el estado actual del sistema o sobre qué transacciones son válidas y deben ser agregadas al ledger. El objetivo principal de un mecanismo de consenso es asegurar que todos los participantes de la red lleguen a un consenso o

acuerdo sobre la verdad de los datos, incluso cuando algunos participantes puedan ser deshonestos o intenten manipular la red. Un mecanismo de consenso eficaz debe ser seguro, resistente a la censura, tolerante a fallas y verificable en tiempo real [DTF22].

**Proof of Work (PoW)** es un mecanismo de consenso donde los participantes, conocidos como mineros, compiten entre sí para resolver problemas criptográficos complejos y validar transacciones. Este proceso requiere una gran cantidad de poder computacional y consume mucha energía para encontrar la solución correcta primero. Una vez que un minero encuentra la solución, la cadena de bloques la verifica y el bloque con su solución se agrega a la cadena, lo que garantiza que el trabajo realizado sea genuino. El sistema de PoW es seguro debido a la dificultad computacional requerida para alterar la cadena de bloques, mientras que es verificable en tiempo real y no requiere confianza entre los participantes [RCB18].

**Proof of Stake (PoS)** es un mecanismo de consenso donde la cantidad de criptomonedas que un participante posee y decide "bloquear" o "apostar" determina sus posibilidades de ser elegido para validar transacciones y crear nuevos bloques. Este proceso elimina la necesidad de la competencia intensiva en recursos y el consumo de energía asociado con la PoW, ya que no se requiere resolver problemas criptográficos complejos. Los participantes con más monedas (stake) en juego tienen más probabilidades de ser seleccionados para validar transacciones, y si se descubre que están actuando de manera fraudulenta, pueden perder parte o la totalidad de sus criptomonedas apostadas [RCB18].

**Proof of Authority (PoA)** es un mecanismo de consenso donde la validez de las transacciones son validadas por un conjunto predeterminado de autoridades o validadores reconocidos dentro de la red. Estos validadores son elegidos por su reputación, credibilidad o posición dentro de un entorno permissionado o consorcio blockchain. PoA no requiere grandes recursos computacionales ni participación económica significativa. Las transacciones son confirmadas y agregadas al blockchain cuando son validadas por una mayoría o número predefinido de estas autoridades.

**Token** en el contexto de Blockchain, es una unidad de valor que representa un activo digital y está asociado a una plataforma blockchain en particular. Se suele utilizar como sinónimos de criptomoneda. Los tokens se pueden intercambiar, transferir, almacenar y utilizar en todas las aplicaciones construidas sobre una blockchain. Los tokens pueden ser fungibles o no fungibles, dependiendo de si son intercambiables o únicos.

## References

- [But+13] Vitalik Buterin et al. "Ethereum white paper". In: *GitHub repository* 1 (2013), pp. 22–23.

- [Fou14] Ellen MacArthur Foundation. *What is a circular economy?* 2014. URL: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview> (visited on 06/25/2024).
- [CK16] Emilio Cerdá and Aygun Khalilova. “Economía circular”. In: *Economía industrial* 401.3 (2016), pp. 11–20.
- [Woo16] Gavin Wood. “Polkadot: Vision for a heterogeneous multi-chain framework”. In: *White paper* 21.2327 (2016), p. 4662.
- [Cir17] Fundación Economía Circular. “Economía circular”. In: *Apoyar el cambio hacia una economía eficiente en el uso de los recursos* (2017).
- [Dan17] Chris Dannen. *Introducing Ethereum and solidity*. Vol. 1. Springer, 2017.
- [Hos17] Charles Hoskinson. “Why we are building Cardano”. In: *IOHK (accessed 18 December 2017)* <https://whycardano.com> (2017).
- [And+18] Elli Androulaki et al. “Hyperledger fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains”. In: *Proceedings of the thirteenth EuroSys conference*. 2018, pp. 1–15.
- [Gil18] Carlos Gómez Gil. “Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): una revisión crítica”. In: *Papeles de relaciones ecosociales y cambio global* 140 (2018), pp. 107–118.
- [RCB18] Michael JW Rennock, Alan Cohn, and Jared R Butcher. “Blockchain technology and regulatory investigations”. In: *Practical Law Litigation* 1 (2018), pp. 35–44.
- [Cha+19] Manuel Chakravarty et al. *Functional blockchain contracts*. 2019.
- [Amb21] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. “Estrategia Nacional de Consumo y Producción Sostenibles”. In: (2021). URL: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/encps\\_1.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/encps_1.pdf) (visited on 06/25/2024).
- [Mel+21] Jesus R Melendez et al. “Economía Circular: Una Revisión desde los Modelos de Negocios y la Responsabilidad Social Empresarial”. In: *Revista Venezolana de Gerencia: RVG* 26.6 (2021), pp. 560–573.
- [Pel21] Josep Lluís Pelegrí. “Informe IPCC: Certezas e incertidumbres sobre el cambio climático”. In: (2021).
- [Arr+22] J. I. Arroyo et al. *Clima*. El gato y la caja, 2022.
- [Da 22] Clayson Cosme Da Costa Pimenta. “La Economía Circular como eje de desarrollo de los países latinoamericanos”. In: *Revista Economía y Política* 35 (2022), pp. 1–18.
- [DTF22] Francisco Javier Díaz, Mónica Diana Tugnarelli, and Mauro F Fornaroli. “Protocolos de consenso”. In: *XXIV Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2022, Mendoza)*. 2022.



- [Dor+22] Leonor Dormido et al. “El cambio climático y la sostenibilidad del crecimiento: iniciativas internacionales y políticas europeas”. In: *Documentos Ocasionales/Banco de España, 2213* (2022).
- [Pör+22] H.-O. Pörtner et al., eds. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In Press. Cambridge University Press, 2022.
- [RA+22] Vivian Rocío Olarte Reyes, María Angélica Arenas, et al. “Sexto informe de evaluación del IPCC: cambio climático 2022 (impactos, adaptación y vulnerabilidad)”. In: (2022).
- [She22] Zongda She. “Vechain: A renovation of supply chain management—A look into its organization, current activity, and prospect”. In: *Proceedings of the 2022 International Conference on Educational Informatization, E-commerce and Information System, Macao, China*. 2022, pp. 29–30.
- [Aln+23] Eiman Alnuaimi et al. “Blockchain-based system for tracking and rewarding recyclable plastic waste”. In: *Peer-to-Peer Networking and Applications* 16.1 (2023), pp. 328–346.
- [Bar+23] Gavina Baralla et al. “Waste management: A comprehensive state of the art about the rise of blockchain technology”. In: *Computers in Industry* 145 (2023), p. 103812.
- [Bis+23] Debajyoti Biswas et al. “Traceability vs. sustainability in supply chains: The implications of blockchain”. In: *European Journal of Operational Research* 305.1 (2023), pp. 128–147. ISSN: 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.05.034>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221722004076>.
- [BZB23] Katarzyna Bułkowska, Magdalena Zielińska, and Maciej Bułkowski. “Implementation of Blockchain Technology in Waste Management”. In: *Energies* 16.23 (2023), p. 7742.
- [Cas+23] Aniello Castiglione et al. “A framework for achieving a circular economy using the blockchain technology in a sustainable waste management system”. In: *Computers & Industrial Engineering* 180 (2023), p. 109263.
- [MSZ+23] Siti Fatimah Az Zahra Binti Mohd, Goh Eg Su, Noor Hidayah Zakaria, et al. “E-Voting Blockchain: Enhancing The Security And Transparency Of Digital Voting”. In: *2023 3rd International Conference on Intelligent Cybernetics Technology & Applications (ICI-CyTA)*. IEEE. 2023, pp. 369–374.
- [Rod+23] Óscar Rodríguez et al. “Modelamiento de los efectos macroeconómicos de la transición a la economía circular en América Latina: Los casos de Chile, Colombia, México y el Perú”. In: (2023).

- [Ahm+24] Hasib Ahmed et al. “Innovative Approaches To Sustainable Supply Chain Management In The Manufacturing Industry: A Systematic Literature Review”. In: *Global Mainstream Journal of Innovation, Engineering & Emerging Technology* 3.02 (2024), pp. 01–13.
- [Gun+24] Ali Gunawan et al. “A review of data security of blockchain applications in social media”. In: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 3026. 1. AIP Publishing. 2024.
- [Ngu+24] Cong T Nguyen et al. “Generative AI-enabled Blockchain Networks: Fundamentals, Applications, and Case Study”. In: *arXiv preprint arXiv:2401.15625* (2024).
- [Nob24] Nobody. “Pending To Do”. In: (2024).
- [ONU24] ONU. *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. 2024. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> (visited on 06/25/2024).
- [Tan24] Yuchen Tang. “A Statistical Study Based on the Top 50 Blockchain Companies Analyzing the Current Development of Blockchain Applications”. In: *Highlights in Business, Economics and Management* 24 (2024), pp. 622–629.
- [Tra24] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). *España Circular 2030: Estrategia Española de Economía Circular*. 2024. URL: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/estrategia.html> (visited on 06/25/2024).