



UNIVERSIDAD
DE MURCIA

Escuela
de Doctorado

TESIS DOCTORAL

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

AUTOR: Rocío Belén Corral

DIRECTORES: Pablo Javier Vidal

2025

Être et Durer
Ser y durar

AGRADECIMENTOS

Comienzo este trabajo de tesina agradeciendo profundamente a todas las personas que, de forma consciente o sin darse cuenta, contribuyeron a su concepción y realización. Este trabajo no habría sido posible sin su apoyo, inspiración y colaboración.

En primer lugar, agradezco a mi tutor de tesis, Pablo Javier Vidal, por su guía, predisposición y disponibilidad absoluta, su presencia activa me generó la constancia para llevar este trabajo a término. Agradezco a su vez a Ana Carolina Olivera, quien también me asistió, por su buena voluntad y por su ayuda desinteresada en la elaboración de este trabajo.

Luego, tengo un gran agradecimiento hacia todos los profesores de la carrera, quienes me han formado y apoyado en mi carrera académica y profesional durante estos años. Todos ellos han sido mi mayor motivación para completar mi carrera, culminando en este trabajo.

Agradezco a mis compañeros de la carrera, de trabajo y amigos, que en muchos casos se solapan, por su compañía en este camino, por ser una fuente de inspiración para este trabajo y por su apoyo. Les agradezco especialmente a aquellos amigos que me hicieron dar cuenta que tengo una idea contagiosa y que es la que inspira este trabajo, muchos de mis proyectos y mi forma de ver el mundo.

Por último, mi mayor agradecimiento es hacia mi familia: mi mayor fuente de apoyo y motivación. Les agradezco aunque lo hagan de forma desinteresada, por su amor, aguante y contención emocional.

Por último, este trabajo lo quiero dedicar a todos los profesores de la carrera. Esta es mi forma de retribuirles todo lo que me han enseñado y apoyado a lo largo de estos años. Nuevamente, gracias.

*Rocío Belén Corral
Mendoza, Argentina
Julio 2025*

RESUMEN

La trazabilidad permite identificar el origen y las etapas de producción y distribución de bienes, facilitando la implementación de prácticas de economía circular, donde los residuos se reciclan o reutilizan en lugar de desecharse. En particular, es deseable poder realizar la trazabilidad del vidrio, dado que es un producto que puede ser reciclado o reinsertado en la cadena de suministro de diferentes formas.

Para proporcionar un nivel superior de transparencia, seguridad y eficiencia, los sistemas de trazabilidad están comenzando a hacer uso de la tecnología blockchain. Esta tecnología permite crear registros inmutables y descentralizados, asegurando la integridad de la información y evitando manipulaciones externas. Además, brinda confianza a los consumidores al garantizar la autenticidad y calidad de los productos, mientras que también permite a las organizaciones que adoptan esta tecnología diferenciarse en el mercado, al demostrar su compromiso con la sostenibilidad y el respeto al medio ambiente.

En este trabajo se desarrolla un prototipo de sistema de trazabilidad del vidrio basado en tecnología blockchain, diseñado para registrar y verificar cada etapa de su ciclo de vida, desde la producción hasta su reintroducción en la cadena de valor, facilitando su valorización. Este desarrollo sigue un proceso de ingeniería de software bajo el modelo en V, el cual estructura las fases de diseño, implementación y pruebas. Se detallan las etapas de análisis de requisitos, diseño arquitectónico, implementación del prototipo y verificación exhaustiva de sus funcionalidades, con el fin de demostrar la viabilidad y los beneficios de aplicar blockchain para una economía circular de vidrio transparente y sostenible.

ABSTRACT

Traceability enables the identification of the origin and various stages of goods' production and distribution processes, facilitating the implementation of circular economy practices where waste is recycled or reused instead of discarded. In particular, it is desirable to achieve the traceability of glass, as it is a product that can be recycled or reinserted into the supply chain in different ways.

To provide a superior level of transparency, security, and efficiency, traceability systems are leveraging blockchain technology. This technology allows for the creation of immutable and decentralized records, ensuring data integrity and preventing external manipulation. Furthermore, it fosters consumer confidence by guaranteeing product authenticity and quality, while also enabling organizations that adopt this technology to differentiate themselves in the market by demonstrating their commitment to sustainability and environmental responsibility.

This work develops a prototype blockchain-based glass traceability system, designed to record and verify each stage of its lifecycle, from production to its reintroduction into the value chain, thus facilitating its valorization. This development follows a V-model software engineering process, which structures the design, implementation, and testing phases. The stages of requirements analysis, architectural design, prototype implementation, and exhaustive testing of its functionalities are detailed, with the aim of demonstrating the viability and benefits of applying blockchain for a transparent and sustainable circular glass economy.

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS



INTRODUCCIÓN

1.1. 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 [1, 2]. 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 [3]. 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 [4, 5]. Sin embargo, el principal desafío 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.

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 [6]. 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 [6].

En los últimos años, la tecnología blockchain ha surgido como una solución prometedora para abordar estas limitaciones [7-9]. Sus características principales, como el registro de datos 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 [7]. Múltiples es-

tudios 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 [8], el rastreo de materiales a lo largo de la cadena de suministro para apoyar una economía circular [7], la optimización de la logística y la gestión de inventario mediante información en tiempo real [10], y la promoción de prácticas sostenibles al identificar productos con menor impacto ambiental [8].

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 [7-9], lo que limita su aplicabilidad en contextos donde se requiere la integración con sistemas de gestión tradicionales y tecnologías complementarias. Además, la mayoría de los estudios se centran en casos de uso específicos, como la industria alimentaria o farmacéutica, dejando una brecha significativa en la aplicación de blockchain para mejorar la trazabilidad en otros sectores, como el reciclaje de vidrio.

En Latinoamérica, el vidrio representa el 5 % de los residuos sólidos urbanos [11], y solo el 20 % de este vidrio se recicla [12]. La baja tasa de reciclaje de vidrio en la región se debe a la falta de infraestructura y sistemas de gestión adecuados, así como a la falta de conciencia y educación sobre la importancia del reciclaje. Mejorar la trazabilidad en la cadena de suministro del vidrio facilita su reciclaje, ayudando a promover una economía circular sostenible en la región. Al visibilizar el flujo de materiales y promover prácticas de reciclaje, y facilitar la información y procesos a los usuarios, es posible reducir la generación de residuos, disminuir la extracción de materias primas vírgenes y fomentar la reutilización de materiales en la producción de nuevos envases de vidrio.

Teniendo en consideración que la actividad económica principal de la provincia de Mendoza es la producción de vino, esta es una problemática local y concreta cuya solución puede tener un impacto real en la economía local. La industria del vidrio es un actor relevante en la cadena de suministro de vino al proveer los envases para el embotellado de los vinos. Por lo tanto, mejorar la trazabilidad en la cadena de suministro del vidrio puede tener un impacto significativo en la sostenibilidad de la industria vitivinícola y en la economía regional.

A su vez, este trabajo se enfoca específicamente. Esta decisión se fundamenta en la importancia del vidrio como material reciclable y la necesidad de mejorar su gestión dentro de la economía circular.

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar una solución de trazabilidad basada en tecnología blockchain para la cadena de suministro y reciclaje de envases de vidrio con el fin de mejorar la transparencia y la sostenibilidad a lo largo de todo el ciclo. La solución propuesta busca abordar las limitaciones de las tecnologías existentes y proporcionar una plataforma que permita a los actores involucrados en la cadena de suministro del vidrio rastrear y verificar el origen, el movimiento y el estado de los envases a lo largo de su ciclo de vida.

Este trabajo propone un enfoque abierto que permita integrar blockchain con Internet de las cosas (IoT) y sistemas de gestión tradicionales. Esta integración 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 suministros. Además, esta solución es compatible con sistemas de gestión tradicionales, facilitando la adopción dentro de las prácticas comerciales existentes. Se espera que este enfoque combinado represente una implementación factible y práctica para mejorar la trazabilidad de la cadena de suministro, en última instancia, contribuyendo a la transición hacia una economía circular sostenible.

Al abordar este caso de estudio específico, se busca proporcionar una solución concreta y aplicable en el ecosistema mendocino que a su vez pueda servir en un futuro como modelo para adaptarse a otras industrias y a una variedad amplia de materiales reciclables.

1.2. Objetivos

El objetivo general de esta Tesina Final de Grado consiste en hacer uso de blockchain como tecnología de vanguardia para el desarrollo de una aplicación prototipo destinada a mejorar la trazabilidad en modelos de economía circular orientados al reciclaje de vidrio.

- **Objetivo 1:** entender los procesos de adopción de tecnologías tales como blockchain y las capacidades actuales en la región para el uso de sistemas de trazabilidad.
- **Objetivo 2:** en lo referido a las Ciencias de la Computación, se busca desarrollar una aplicación prototipo funcional basada en tecnología blockchain. Esto permitirá la trazabilidad transparente, segura y en tiempo real de la gestión de residuos, en particular el vidrio, desde su generación hasta su disposición final, con el fin de garantizar el cumplimiento normativo, mejorar la eficiencia operativa y aumentar la confianza entre todos los actores involucrados en el proceso.

1.3. Estructura general del documento

El presente documento se encuentra organizado en capítulos, cada uno de los cuales aborda un aspecto del trabajo realizado. En primer lugar, en el Marco Teórico, se introducen los conceptos básicos relacionados con el problema y la tecnología utilizada, para desenlazar en un análisis de las soluciones existentes y los antecedentes académicos relevantes para contextualizar el trabajo. En el siguiente capítulo, se detalla la metodología adoptada y la planeación del trabajo. En capítulos posteriores se describe el proceso de diseño, desarrollo y pruebas de la solución propuesta. Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas y las perspectivas futuras del proyecto. Adicionalmente, al final del documento se incluyen anexos como lectura opcional y un glosario de términos específicos que pueden resultar útiles para el lector.



MARCO TEÓRICO

Este capítulo presenta los fundamentos teóricos necesarios para comprender los conceptos relacionados con la tecnología *blockchain* y su aplicación en la economía circular. Se aborda la estructura y funcionamiento de las cadenas de bloques, destacando sus características de descentralización, transparencia e inmutabilidad, así como los mecanismos de consenso que garantizan su seguridad y eficiencia. Además, se analiza el rol de los contratos inteligentes como herramientas para automatizar procesos y gestionar la lógica de negocio en entornos descentralizados. Asimismo, este capítulo explora los principios de la economía circular, enfatizando su enfoque regenerativo y su capacidad para transformar las cadenas de suministro hacia modelos más sostenibles. Se examinan las etapas del proceso de producción y reciclaje, con especial atención a la trazabilidad como habilitador para garantizar la transparencia y la eficiencia en una economía circular. Luego se incluye un análisis de la cadena de suministro del vidrio en el contexto mendocino, destacando su relevancia estratégica y los desafíos asociados a su implementación en un modelo circular. Finalmente, se explora el estado del arte de la tecnología *blockchain* en la economía circular, identificando las tendencias actuales y las oportunidades de mejora en la trazabilidad y sostenibilidad de la cadena de suministro del vidrio.

2.1. Blockchain

La tecnología *blockchain*, o cadena de bloques, se define como una estructura de datos distribuida y descentralizada en la que la información se almacena en forma de transacciones agrupadas en bloques, de manera que cada bloque se vincula al anterior mediante un hash criptográfico [13]. Su naturaleza distribuida radica en que cada nodo de la red mantiene una copia completa y actualizada del registro, lo cual asegura su transparencia y resiliencia al no depender de un

servidor central [8]. Por su parte, la descentralización implica la ausencia de una autoridad central, ya que la validación y adición de nuevos bloques se rige por un mecanismo de consenso entre los nodos participantes de la red. La interconexión criptográfica entre los bloques confiere a blockchain su característica de inmutabilidad. Una vez que un bloque es añadido, su hash se calcula a partir de su contenido y el hash del bloque anterior. Cualquier intento de alterar el contenido de un bloque invalidaría este hash y, por ende, los hashes de todos los bloques subsiguientes, rompiendo la integridad criptográfica de la cadena. Este mecanismo permite la detección de cualquier intento de manipulación y la preservación de la integridad histórica del registro [8].

Esta tecnología fue implementada inicialmente en 2008 como el fundamento del sistema de criptomonedas Bitcoin [14]. Desde entonces, ha trascendido el ámbito financiero para abarcar una amplia gama de aplicaciones [15]. Posteriormente, se han desarrollado diversos protocolos blockchain que han permitido la creación de redes más eficientes y adaptadas a distintas necesidades, como Ethereum [16], pionero en el concepto de contratos inteligentes, o Hyperledger [17], enfocado en aplicaciones empresariales [18, 19].

Técnicamente, una blockchain se compone de bloques enlazados que encapsulan un conjunto de transacciones. Cada bloque consta de un encabezado y un cuerpo [13]. El cuerpo alberga la lista de transacciones, mientras que el encabezado contiene metadatos, incluyendo el hash criptográfico del bloque anterior, una marca de tiempo, y un hash que identifica unívocamente el bloque actual, calculado sobre la totalidad de su contenido (tanto el encabezado como el cuerpo de transacciones). Este encadenamiento criptográfico de bloques en una red descentralizada garantiza la integridad e inmutabilidad de la información, ya que cualquier alteración en un bloque modificaría su hash y rompería la consistencia de la cadena, forzando a los nodos de la red a rechazar el bloque modificado o forzando al nodo que intenta modificarlo a actualizar todos los bloques posteriores [18]. En la Figura ?? se ilustra la estructura de una blockchain, donde cada bloque contiene un hash del bloque anterior, formando una cadena de bloques interconectados criptográficamente.

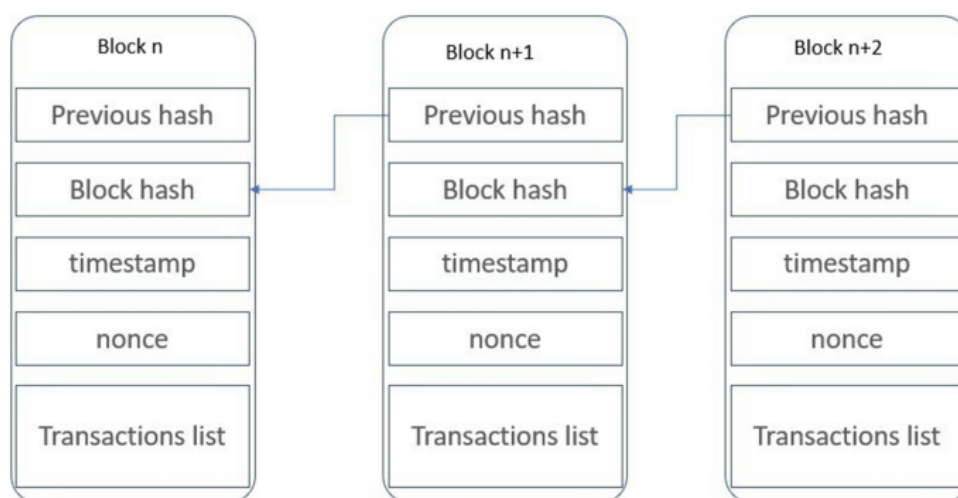


Figura 2.1: Estructura de una blockchain

Al unirse a la red, un nodo descarga una copia completa de la cadena de bloques existente, lo que le confiere una visión completa del historial de transacciones [8]. Posteriormente, el nodo ejecuta el software del protocolo blockchain encargado de implementar el mecanismo de consenso. Cuando se genera una nueva transacción en dicho nodo, esta se transmite a la red y es recibida por los demás nodos. A su vez, el nodo recibe transacciones de otros nodos, las cuales son validadas mediante el mecanismo de consenso antes de ser añadidas a un bloque en su copia local de la cadena [8].

La adición de un nuevo bloque a la cadena requiere su validación por los nodos de la red a través de un proceso de consenso. Una vez validado por el nodo, el bloque se incorpora al final de la cadena y se distribuye a todos los demás nodos, quienes proceden a actualizar su copia del registro [8]. Este proceso se gestiona mediante algoritmos de consenso como Proof of Work (PoW), que se basa en la resolución de problemas computacionales; Proof of Stake (PoS), que delega la validación en función de la participación económica; o Proof of Authority (PoA), que confía en un conjunto pre-aprobado de autoridades [20]. Cada uno de estos mecanismos ofrece distintos niveles de eficiencia, seguridad y descentralización. Durante la validación del bloque, se verifican múltiples aspectos: la correcta correspondencia del hash del bloque anterior con el almacenado en el encabezado del nuevo bloque, la validez y el cumplimiento de las transacciones con las reglas del protocolo, y que el hash del bloque propuesto haya sido generado correctamente a partir de la totalidad de su contenido.

Todo algoritmo de consenso debe asegurar que el costo de modificar un bloque de forma fraudulenta supere significativamente el beneficio potencial derivado de dicha acción [14]. Esta característica garantiza que la red se mantenga segura y resistente a ataques [16]. En el caso de Bitcoin, por ejemplo, el algoritmo de consenso Proof of Work (PoW) exige que los nodos realicen cálculos computacionales intensivos para generar nuevos bloques válidos. Aunque la validación de un bloque es de complejidad constante, la alteración de un bloque ya existente implicaría la necesidad de recalcular no solo dicho bloque, sino también todos los bloques subsiguientes. Esto convierte la modificación en un proceso extremadamente costoso en términos de recursos computacionales y energía, lo cual, sumado al rechazo de la red hacia cualquier cadena alterada, desincentiva eficazmente los intentos de manipulación [14].

De esta manera, la combinación de la estructura encadenada criptográficamente y el mecanismo de consenso convierten a la blockchain en una base de datos distribuida que permite registrar transacciones de forma segura, transparente e inmutable, prescindiendo de una autoridad central para la administración o validación de los intercambios.

En la Figura ?? se presenta un esquema ilustrativo con los pasos del proceso de incorporación de una nueva transacción y su respectivo bloque en una blockchain.

El proceso de incorporación de una nueva transacción y su respectivo bloque en una blockchain se desarrolla a través de los siguientes pasos:

1. Un nodo de la red crea y firma una nueva transacción con su clave privada.

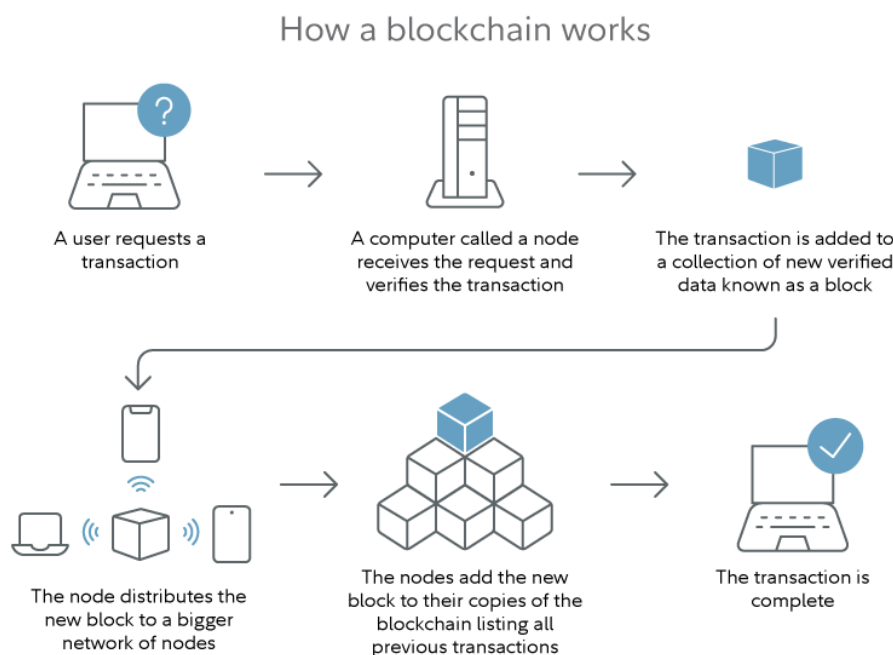


Figura 2.2: Creación de una transacción y un bloque en una blockchain

- La transacción se propaga a través de la red P2P, donde es recibida por los nodos participantes.
- Cada nodo valida la transacción individualmente, verificando la firma del remitente y asegurándose de que este dispone de los fondos o permisos necesarios. Una vez validada, la transacción se añade a un *pool* de transacciones pendientes.
- Un nodo (en el caso de PoW, un minero) selecciona un conjunto de transacciones pendientes del *pool* para formar un nuevo bloque. Este bloque incluye las transacciones seleccionadas, el hash del bloque anterior y otros metadatos (como la marca de tiempo y un *nonce* para PoW). El nodo luego calcula el hash de este nuevo bloque y, según el algoritmo de consenso, realiza el trabajo necesario para validarlo. En el caso de PoW, esto implica resolver un problema criptográfico que requiere una cantidad significativa de potencia computacional. En PoS, el nodo debe demostrar que posee una cantidad suficiente de fondos para participar en la validación del bloque.
- Una vez que el nodo ha validado el nuevo bloque (o "minado" en PoW), lo difunde a la red. Los demás nodos reciben este bloque y verifican su validez (incluyendo el hash, las transacciones y la prueba de trabajo/participación). Si el bloque es válido, lo añaden a su copia local de la cadena de bloques y descartan las transacciones ya incluidas de su *pool* de pendientes. Si el bloque es inválido, es rechazado por cada nodo y no se añade a la cadena.

De esta forma, la cadena de bloques se actualiza de manera continua y descentralizada, asegurando que todos los nodos de la red mantengan una copia idéntica y consistente del registro de transacciones.

Si bien en su concepción inicial las transacciones en un bloque se asociaban comúnmente a movimientos financieros [14], la flexibilidad inherente de la tecnología blockchain permite que los bloques contengan cualquier tipo de información estructurada [15]. Esta versatilidad ha sido el motor para el desarrollo de aplicaciones más complejas, destacando entre ellas los *smart contracts* (contratos inteligentes) [18].

Los *smart contracts*, o contratos inteligentes, son programas inmutables almacenados en una blockchain que se ejecutan automáticamente al cumplirse condiciones preestablecidas en su código [8]. Su función principal es automatizar procesos en entornos descentralizados, lo que reduce significativamente la dependencia de intermediarios humanos [21] y mejora la eficiencia operativa en múltiples sectores [18].

Un contrato inteligente se concibe como un conjunto de reglas y lógica de negocio codificadas. Cada contrato posee un código (las reglas) y un estado (la información dinámica) [16]. El código es inmutable una vez desplegado en la blockchain mediante una transacción, garantizando la permanencia de las reglas establecidas. Su estado, sin embargo, puede evolucionar a medida que se interactúa con el contrato a través de transacciones. Es importante destacar que, si bien se describen como “auto-ejecutables” por su automatismo al cumplir condiciones, su ejecución es llevada a cabo por los nodos de la red que validan las transacciones e integran los cambios de estado en la cadena [16]. Tanto el código como el estado del contrato se almacenan en la blockchain, asegurando su transparencia y disponibilidad pública. Por ejemplo, un contrato inteligente podría gestionar un sistema de votación, donde los participantes envían sus votos y el contrato contabiliza automáticamente los resultados al finalizar el periodo de votación. En la Figura ?? se ilustra el proceso de creación y ejecución de un contrato inteligente, describiendo las etapas desde su definición hasta su implementación y ejecución en la blockchain.

Para el desarrollo y ejecución de contratos inteligentes, se emplean lenguajes de programación específicos adaptados a cada plataforma blockchain [15]. Un ejemplo prominente es *Solidity* [22], utilizado en Ethereum, un lenguaje orientado a objetos diseñado para esta finalidad. Estos contratos pueden interactuar entre sí y con el estado global de la blockchain, habilitando la creación de aplicaciones descentralizadas (dApps) que operan de forma autónoma y sin intermediarios en la red [16].

Sin embargo, los contratos inteligentes enfrentan limitaciones inherentes a las infraestructuras blockchain, principalmente en términos de escalabilidad [23]. A diferencia de los sistemas centralizados que permiten ejecución paralela y optimización con bases de datos indexadas, los smart contracts operan bajo modelos de ejecución secuencial y replicación completa en cada nodo [22]. Esto impacta directamente su rendimiento y complejiza la implementación de algoritmos avanzados. Desde la perspectiva de la ingeniería de software, el desarrollo de contratos inteligentes introduce restricciones no triviales: el código inmutable, los costos asociados al almacenamiento en cadena, la ausencia de llamadas externas directas y los modelos de estado global distribuido. Estas particularidades exigen la adopción de nuevas metodologías y prácticas de diseño seguro, control de flujos y validación estática, muchas de las cuales aún se encuentran en proceso de estandarización [11, 22].

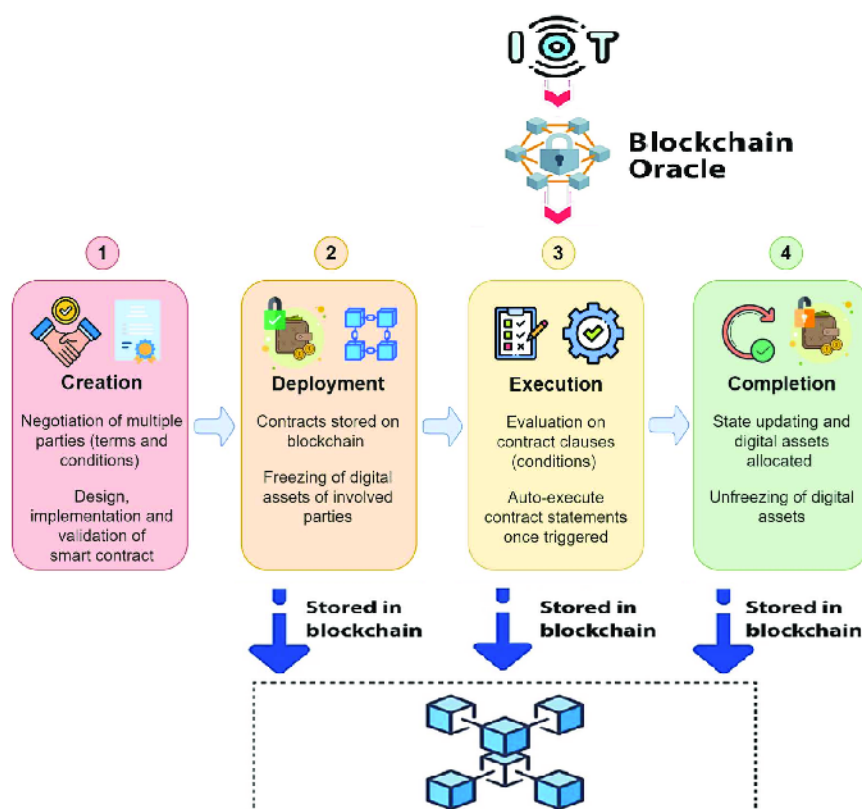


Figura 2.3: Proceso de creación y ejecución de un contrato inteligente

En síntesis, los contratos inteligentes constituyen una herramienta computacional que expande las fronteras de la programación distribuida y descentralizada. Si bien su potencial transformador es innegable [22], su desarrollo robusto y seguro representa un desafío activo que abarca múltiples dominios de la computación: desde la teoría de lenguajes formales [24] y la arquitectura de sistemas distribuidos, hasta la verificación de software, la criptografía aplicada y la integración de datos externos confiables [22].

Debido a la aparición de los contratos inteligentes, la tecnología blockchain ha trascendido su origen ligado a las criptomonedas para convertirse en un paradigma disruptivo con aplicaciones transversales en múltiples dominios [15, 25]. Se posicionan como un componente fundamental y un impulsor clave de gran parte de las nuevas y complejas soluciones basadas en blockchain, especialmente aquellas que buscan automatizar procesos y gestionar la lógica de negocio directamente en la cadena [26]. Si bien los contratos inteligentes representan una tecnología prometedora, aún se encuentran en una etapa incipiente, lo que implica la existencia de numerosos aspectos por perfeccionar [22]. En un contexto más amplio, la tecnología blockchain, incluyendo a los contratos inteligentes, ofrece una serie de ventajas fundamentales y limitaciones inherentes que la distinguen de los sistemas de almacenamiento de datos tradicionales.

Las características inherentes de la blockchain, detalladas previamente, se traducen en una serie de ventajas que distinguen a blockchain de los sistemas tradicionales. La descentralización propia de su diseño y la consecuente eliminación de intermediarios resultan en una mayor

confianza [27] y eficiencia operativa al prescindir de autoridades centrales [26]. La arquitectura basada en registros inmutables garantiza transparencia y trazabilidad completa [26], permitiendo un historial verificable de cualquier activo o evento, lo cual es crucial para casos de uso como certificación [15], logística [15, 27] y gestión de residuos [8]. La inmutabilidad de los datos, reforzada por la seguridad criptográfica, asegura la integridad de la información [18] y una resistencia robusta a manipulaciones maliciosas y puntos únicos de falla [15]. Además, la capacidad de automatización de aplicaciones mediante contratos inteligentes optimiza la eficiencia y confiabilidad operativa al ejecutar condiciones lógicas de forma autónoma [15]. En conjunto, estas propiedades confieren a blockchain una aplicabilidad transversal que la consolida como una tecnología habilitadora para la transformación digital en sectores diversos como finanzas, salud, IoT, energía, educación y ciudades inteligentes.

Sin embargo, a pesar de sus beneficios, la tecnología blockchain también enfrenta desafíos y limitaciones significativos. Uno de los principales desafíos es la escalabilidad y el rendimiento [13]. Las blockchains actuales suelen presentar un bajo *throughput* en comparación con los sistemas centralizados [7], lo cual restringe su aplicación en escenarios de alta frecuencia transaccional. Esto se debe inherentemente a la necesidad de alcanzar un consenso distribuido y a la replicación completa de datos en todos los nodos [13]. Otro reto importante es la interoperabilidad limitada, que dificulta la integración fluida entre distintas plataformas blockchain con infraestructuras externas preexistentes [13]. En entornos públicos, la privacidad es una preocupación, ya que, aunque los usuarios pueden operar de forma seudónima, la visibilidad total de las transacciones en la cadena puede comprometer datos sensibles [19, 28]. Además, existen vulnerabilidades técnicas inherentes, como el ataque del 51 %, el doble gasto, los ataques Sybil, y la posibilidad de errores en contratos inteligentes mal programados, que requieren atención constante [28]. La irreversibilidad de las transacciones, si bien es una garantía de seguridad, puede ser problemática ante vulnerabilidades de programación, errores o fraudes, ya que las operaciones registradas no pueden deshacerse [22]. Por último, las limitaciones de almacenamiento representan un desafío práctico, dado que los nodos deben almacenar volúmenes crecientes de información, lo cual no escala eficientemente en redes de gran tamaño [22].

Estos desafíos, aunque significativos, están siendo abordados activamente por la investigación y el desarrollo en la comunidad blockchain. La constante evolución de la tecnología y la aparición de nuevas soluciones buscan mitigar estas limitaciones, abriendo el camino para una adopción más amplia [7, 13, 22]. En este contexto de evolución y superación de barreras, la blockchain ha demostrado su potencial para transformar diversos sectores y abarcar numerosos casos de uso.

En el sector financiero, blockchain ha generado disrupción mediante soluciones para pagos directos (con las llamadas criptomonedas), emisión de bonos, transferencias internacionales y operaciones en mercados de capital [15]. Instituciones como Santander y la Bolsa de Comercio de Santiago han adoptado esta tecnología para simplificar transacciones, automatizar registros y eliminar intermediarios [15]. Gracias a su estructura descentralizada y sus mecanismos criptográficos, blockchain permite mejorar la trazabilidad de los activos financieros. Pero si bien su

uso en finanzas ha sido el más destacado, la tecnología blockchain ha demostrado ser versátil y aplicable a una amplia gama de sectores, cada uno con sus propias necesidades y desafíos.

A nivel gubernamental, blockchain ofrece nuevas herramientas para la modernización del Estado. Permite la gestión segura y verificable de identidades digitales, la trazabilidad de procesos administrativos, y la implementación de sistemas de votación transparentes [25]. Iniciativas como la European Blockchain Partnership buscan establecer una infraestructura digital pública para servicios intergubernamentales [28]. Proyectos como QualiChain exploran aplicaciones en el sector público, como la verificación de credenciales profesionales y la gestión automatizada de elegibilidad en concursos públicos [28].

En el sector salud, blockchain permite almacenar registros médicos de manera segura y distribuida, mejorando la interoperabilidad entre instituciones, garantizando la integridad de los datos y permitiendo un mayor control por parte de los pacientes [18]. También es clave en la trazabilidad de la cadena de suministro farmacéutica y en la supervisión de ensayos clínicos, donde se requiere un alto nivel de confianza y cumplimiento normativo [25].

En educación, su aplicación permite la emisión y verificación de certificados académicos inmutables y descentralizados. Universidades como Nicosia o la de Murcia ya utilizan blockchain para certificar diplomas y logros [28]. Iniciativas como Blockcerts o el pasaporte educativo propuesto por la Unión Europea buscan facilitar la movilidad académica y reducir la falsificación documental. También se exploran aplicaciones como exámenes autoevaluables con contratos inteligentes, recompensas por desempeño y la gestión segura de registros estudiantiles [28].

En energía, blockchain permite crear mercados descentralizados para el comercio de energía entre pares, mejora la gestión de certificados de energías renovables, y optimiza la trazabilidad de producción y consumo energético [18, 25]. Se está utilizando para reducir el impacto ambiental del sector y mejorar la eficiencia operativa de infraestructuras energéticas tradicionales.

En el ámbito de la gestión de la cadena de suministro (SCM), blockchain proporciona una plataforma confiable para garantizar la trazabilidad, autenticidad y visibilidad en tiempo real de productos y materiales [26, 29]. Empresas como IBM, Maersk y FedEx han implementado soluciones blockchain para monitorear inventarios, registrar pagos y reducir disputas logísticas [13]. Casos como el de Dervinsa en Argentina, que certifica la calidad de productos derivados de residuos de vinificación, y otras iniciativas que aplican trazabilidad a alimentos y textiles, muestran cómo esta tecnología fortalece el control de calidad y la confianza en los mercados [15]. Además, en contextos más amplios, blockchain permite una sincronización eficiente entre departamentos, la reducción de riesgos de falsificación y la mejora general de la sostenibilidad operativa [18].

En el marco de la economía circular, blockchain se posiciona como un facilitador clave para monitorear ciclos de vida de productos y materiales, ofreciendo transparencia y responsabilidad en la gestión de residuos [7, 8]. Diversos tipos de residuos, desde plásticos y vidrio hasta electrónicos y biomédicos, pueden ser gestionados de forma más eficiente mediante el uso de contratos inteligentes que automatizan verificaciones, recompensas e interacciones entre acto-

res de la cadena [7]. Asimismo, se propone la generación de pasaportes digitales de productos y esquemas de incentivos sostenibles, promoviendo hábitos de consumo responsables y nuevos modelos de negocio circulares [7].

Más allá de estos sectores, blockchain ha demostrado potencial en una variedad de aplicaciones adicionales. En IoT, facilita la recolección y gestión segura de datos en tiempo real [18]. En contabilidad y auditoría, posibilita libros contables distribuidos con transparencia total y reducción de fraudes [15]. También se emplea en caridad y donaciones, trazabilidad inmobiliaria y movilidad inteligente [15]. Estos casos de uso evidencian cómo blockchain puede transformar modelos tradicionales mediante estructuras distribuidas, reglas codificadas y registros inmutables. Su implementación efectiva puede contribuir a una mayor eficiencia, confianza y sostenibilidad en múltiples áreas críticas del desarrollo económico, social y tecnológico.

Si bien las aplicaciones de blockchain se extienden a numerosos sectores, uno de los ámbitos donde esta tecnología adquiere un protagonismo creciente es en la economía circular. La necesidad de trazar el flujo de materiales, certificar la autenticidad de los procesos productivos y garantizar la transparencia en la gestión de residuos ha posicionado a blockchain como una herramienta protagónica para habilitar modelos circulares sostenibles. En particular, su capacidad para registrar datos inmutables y automatizar interacciones mediante contratos inteligentes permite estructurar sistemas de trazabilidad que no sólo mejoran la eficiencia, sino que también fortalecen la confianza entre actores y fomentan la rendición de cuentas [26, 27]. A continuación, se analiza con mayor profundidad el rol de blockchain en el diseño e implementación de estrategias de economía circular, con énfasis en sus aplicaciones concretas en trazabilidad de materiales en la cadena de suministros y gestión de residuos.

2.2. Economía circular

La economía circular se presenta como una evolución del modelo económico lineal que ha prevalecido desde la Revolución Industrial. Mientras el enfoque lineal se basa en una secuencia unidireccional de extracción, producción, consumo y descarte, la economía circular propone un rediseño profundo de este paradigma al introducir principios de regeneración, reutilización y cierre de ciclos. Su objetivo es maximizar el valor de los recursos materiales y energéticos a lo largo del tiempo, minimizando al mismo tiempo el impacto ambiental y la dependencia de recursos no renovables.

El modelo lineal ha demostrado ser altamente efectivo para fomentar el crecimiento económico, pero también ha generado efectos colaterales significativos que lo hacen insostenible en el largo plazo. Entre los principales problemas que motivan la transición hacia un enfoque circular se encuentran el agotamiento progresivo de los recursos naturales, la acumulación masiva de residuos y la insostenibilidad de los patrones de consumo. La extracción intensiva de materias primas, muchas veces por encima de su tasa de regeneración, ha provocado deforestación, pérdida de biodiversidad y una creciente presión sobre ecosistemas frágiles. Al mismo tiem-

po, el diseño de productos con ciclos de vida cortos —como ocurre con la moda rápida o los dispositivos electrónicos desechables— genera residuos prematuros y desaprovecha el valor residual de los materiales.

Frente a estos desafíos, la economía circular emerge como un modelo restaurativo y regenerativo por diseño. Promueve prácticas como la reutilización, la reparación, el reciclaje de alta calidad y la remanufactura, con el propósito de mantener los productos y materiales en uso durante el mayor tiempo posible. Se basa en tres principios fundamentales: eliminar residuos y contaminación desde el diseño, mantener los recursos en uso mediante bucles cerrados, y regenerar sistemas naturales en lugar de degradarlos. En lugar de centrarse únicamente en reducir impactos negativos, busca generar valor positivo para la economía, la sociedad y el medio ambiente.

La economía circular ofrece una serie de ventajas frente al modelo lineal. Desde el punto de vista económico, puede fomentar nuevos modelos de negocio, reducir costos operativos y mejorar la eficiencia en el uso de materiales y energía. Además, contribuye a la creación de empleo, disminuye la dependencia de materias primas importadas y mejora la resiliencia económica. Ambientalmente, permite reducir emisiones de gases de efecto invernadero, minimizar la generación de residuos y preservar ecosistemas. A nivel social, promueve una cultura de consumo responsable, empodera a los ciudadanos y mejora la equidad mediante la formalización de sectores informales como el reciclaje.

Sin embargo, también enfrenta barreras significativas. Existen desafíos culturales, normativos y tecnológicos que dificultan su implementación a gran escala. La transición requiere una transformación estructural en los sistemas productivos, inversión en infraestructura, marcos regulatorios adecuados y políticas de incentivos claros. Asimismo, implica repensar la educación y la formación de trabajadores para adaptarse a nuevas dinámicas laborales. En muchos contextos, como América Latina y el Caribe, también se identifican limitaciones institucionales y de gobernanza que deben ser abordadas para permitir una adopción efectiva del modelo.

En definitiva, la economía circular no debe entenderse como una simple mejora del modelo actual, sino como una evolución hacia un sistema más integrado, resiliente y sostenible. Su implementación exige un enfoque sistémico, colaboración multisectorial y el uso estratégico de tecnologías habilitadoras como la trazabilidad digital y blockchain.

Para comprender en profundidad la diferencia estructural entre la economía lineal y la economía circular, se incluyen a continuación esquemas comparativos que ilustran el flujo de recursos en ambos modelos. En el enfoque lineal, la cadena de suministro se organiza como un proceso unidireccional: los recursos son extraídos, transformados en productos, consumidos y finalmente desechados. Este modelo ignora el valor residual de los materiales, genera una creciente acumulación de residuos y no contempla mecanismos para reincorporar los productos al ciclo productivo una vez finalizada su vida útil.

En contraste, la economía circular redefine el papel de la cadena de suministro transformándola en una red cerrada y regenerativa. El objetivo es mantener los productos, componentes y

materiales en uso el mayor tiempo posible mediante estrategias de reutilización, reparación, remanufactura y reciclaje. La cadena se vuelve más dinámica e interdependiente, integrando bucles de retroalimentación entre los diferentes actores de la cadena de valor, incluyendo consumidores, productores, proveedores y gestores de residuos. Esta visión implica una transformación profunda del diseño de productos, los procesos logísticos, la distribución y la gestión del fin de vida.

Para llevar a cabo esta transición sistémica desde un modelo lineal hacia uno circular, se requieren cambios estructurales en múltiples niveles. Entre los habilitadores clave de este proceso se encuentra la trazabilidad, entendida como la capacidad de rastrear el origen, el uso y el destino de materiales y productos a lo largo de toda su vida útil. La trazabilidad permite verificar compromisos ambientales, controlar impactos, optimizar la logística inversa y empoderar tanto a consumidores como a instituciones para adoptar decisiones basadas en información confiable. Su implementación resulta esencial para garantizar la transparencia, la confianza entre actores y la eficiencia en los flujos circulares.

Es importante destacar que esta transición ya se encuentra en marcha. Diversos países, regiones y sectores productivos han comenzado a incorporar principios circulares en sus estrategias de desarrollo, en muchos casos impulsados por marcos regulatorios, acuerdos internacionales y metas vinculadas a la sostenibilidad ambiental. En este contexto, las políticas públicas han asumido un rol central como motores de adopción, ofreciendo instrumentos normativos, fiscales y de gobernanza que facilitan la transformación del sistema económico. A continuación, se analizarán estas políticas sustentables como eje estratégico para avanzar hacia una economía más circular y resiliente.

2.2.1. Políticas sustentables

En el proceso de transición hacia modelos de desarrollo más sostenibles, la Unión Europea ha asumido un rol pionero en la implementación de políticas públicas alineadas con la economía circular. Iniciativas como el Pacto Verde Europeo, la Ley Europea del Clima o los marcos regulatorios vinculados al paquete Objetivo 55 han consolidado a Europa como un referente global en materia de sustentabilidad ambiental. Estas políticas no solo promueven la descarbonización de la economía, sino que también introducen principios de circularidad en sectores como la industria, la energía, la movilidad y la gestión de residuos, reconfigurando las cadenas de suministro hacia sistemas más regenerativos, transparentes y trazables.

Sin embargo, el mayor hito internacional en la construcción de una visión compartida sobre sustentabilidad ha sido, sin duda, la adopción de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas en 2015. Este conjunto de 17 objetivos interconectados, acompañados por 169 metas y más de 230 indicadores, propone una agenda universal que orienta las políticas públicas hacia un desarrollo económico, social y ambiental equilibrado para 2030.

El objetivo general de los ODS es erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar la paz

y prosperidad para todas las personas. En relación con la economía circular, existen cinco objetivos particularmente relevantes que guían tanto los marcos normativos como las estrategias de innovación en producción, consumo y gestión de residuos:

- **ODS 7: Energía asequible y no contaminante.** Promueve el acceso universal a fuentes de energía limpias, eficientes y modernas, fundamentales para la transición a una economía circular descarbonizada.
- **ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles.** Plantea la necesidad de gestionar de manera integrada los recursos urbanos, incluyendo residuos, infraestructura y movilidad, en articulación con una trazabilidad eficiente de los flujos materiales.
- **ODS 12: Producción y consumo responsables.** Es el núcleo del paradigma circular, impulsando el diseño sostenible de productos, el uso eficiente de recursos, la minimización de residuos y la promoción de modelos de cadena de suministro regenerativos.
- **ODS 13: Acción por el clima.** Vincula la circularidad con la reducción de emisiones y la adaptación al cambio climático, incentivando políticas que rediseñen los sistemas productivos de alto impacto ambiental.
- **ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres.** Apunta a la restauración y conservación de ecosistemas degradados, objetivos que sólo pueden alcanzarse mediante modelos productivos basados en ciclos cerrados de materia y energía.

Los ODS han generado un marco de referencia común que ha influido fuertemente en las agendas de sostenibilidad a nivel global, incluyendo América Latina. Aunque en la región la adopción de políticas circulares aún es incipiente en comparación con Europa, se observan avances significativos. Por ejemplo, varios países han comenzado a incorporar la responsabilidad extendida del productor, prohibiciones de plásticos de un solo uso y normativas orientadas a la reutilización y reciclado de materiales. Estas políticas buscan reestructurar las cadenas de valor y fomentar prácticas productivas y logísticas compatibles con los principios de circularidad.

En Argentina, la Estrategia Nacional de Consumo y Producción Sostenibles se destaca como el instrumento central para avanzar hacia la economía circular. Este plan integra medidas normativas, educativas, tecnológicas y financieras, orientadas a fortalecer la sostenibilidad en toda la cadena de producción y consumo. Se promueve activamente el uso de tecnologías limpias, la gestión sostenible de recursos, y la incorporación de criterios ambientales en compras públicas, reconociendo el rol de la trazabilidad como mecanismo para garantizar la transparencia, eficiencia y cumplimiento normativo en los procesos productivos.

Si bien estos esfuerzos representan un paso importante, los desafíos estructurales persisten. La región enfrenta obstáculos en términos de infraestructura, financiamiento, coordinación institucional y disponibilidad de información confiable. A pesar de ello, el impulso dado por los ODS ha generado una convergencia regional que permite imaginar una transición hacia modelos circulares, sostenida por políticas públicas que consideran no sólo las metas globales, sino también las realidades locales.

En este escenario, la transformación hacia una economía circular no puede pensarse sin una reconfiguración profunda de las cadenas de suministro, que constituyen la columna vertebral de los sistemas productivos. La implementación de políticas sustentables, tanto en Europa como en América Latina, ha puesto en evidencia la necesidad de contar con mecanismos que permitan monitorear, verificar y optimizar el flujo de materiales a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos. En este sentido, la trazabilidad emerge como una herramienta clave para operacionalizar los principios de la circularidad, asegurando la transparencia, la calidad y la responsabilidad en cada etapa del proceso. La siguiente sección abordará con mayor detalle cómo se articula esta relación entre cadenas de suministro y trazabilidad, y cuál es su rol estratégico en la transición hacia modelos económicos más sostenibles, resilientes y regenerativos.

2.2.2. Cadena de suministro

La cadena de suministro constituye el entramado logístico, operativo y estratégico que permite el flujo de materiales, información y recursos desde la extracción de materias primas hasta la llegada del producto al consumidor final. Este sistema complejo, que involucra a múltiples actores —proveedores, fabricantes, distribuidores, minoristas, consumidores y, en algunos casos, gestores de residuos y autoridades regulatorias—, busca garantizar que los bienes y servicios se produzcan y entreguen de manera eficiente, segura y rentable. En su concepción tradicional, la cadena de suministro ha estado orientada a la eficiencia lineal, es decir, maximizar el rendimiento del flujo “de origen a destino”, sin considerar el impacto postconsumo o el valor residual de los materiales.

Sin embargo, en el contexto de la economía circular, la cadena de suministro asume una nueva lógica de funcionamiento. En lugar de ser una secuencia finita de pasos que culminan con la disposición del producto, se transforma en un sistema regenerativo y cíclico, en el cual los materiales son diseñados para permanecer en uso el mayor tiempo posible, ser reutilizados, reacondicionados o reciclados. Esta visión circular implica rediseñar productos, procesos y relaciones para mantener el valor de los recursos a lo largo del tiempo, evitando su descarte prematuro y reduciendo la necesidad de materias primas vírgenes.

Esta transformación se estructura en una serie de etapas conectadas, que conforman el nuevo ciclo productivo circular: producción, consumo, recolección de residuos, transporte, clasificación y disposición, y finalmente, reciclaje o reacondicionamiento. Cada una de estas etapas requiere coordinación, trazabilidad e integración de datos, especialmente en sistemas donde intervienen múltiples organizaciones y tecnologías.

La trazabilidad —entendida como la capacidad de rastrear un producto desde su origen hasta su destino y más allá— se vuelve un habilitador fundamental que conecta todas las fases del proceso, asegurando integridad, transparencia y responsabilidad en cada paso.

La trazabilidad es la capacidad de seguir el recorrido completo de un producto, material o componente a lo largo de toda la cadena de suministro, desde su origen hasta su destino final,

e incluso más allá, en escenarios de reutilización o reciclaje. Su objetivo principal es reconstruir el historial de producción, transformación y movimiento de un bien, permitiendo conocer su composición, ubicación, responsables y condiciones de manejo en cada etapa del proceso. Esta información resulta clave no solo para verificar la autenticidad del producto, sino también para asegurar estándares de calidad, cumplimiento normativo, eficiencia operativa y sostenibilidad ambiental.

En el contexto de la cadena de suministro, la trazabilidad se aplica de forma transversal, es decir, atraviesa e interconecta todas las fases del ciclo: desde el diseño y la fabricación, hasta la distribución, el consumo, la gestión de residuos y el reciclaje. No se trata de una función aislada, sino de una infraestructura digital que permite registrar, verificar y compartir información crítica entre todos los actores del sistema. De este modo, la trazabilidad facilita la coordinación entre partes, reduce los riesgos asociados a errores, fraudes o contaminaciones, y mejora la capacidad de respuesta ante incidentes o fallas en la cadena.

No obstante, su implementación conlleva desafíos importantes. Las cadenas de suministro tradicionales suelen estar fragmentadas y utilizar sistemas de información heterogéneos o poco interoperables. Muchos registros todavía se realizan en papel o en bases de datos centralizadas, lo que aumenta la vulnerabilidad frente a errores humanos, pérdidas de datos o manipulaciones. Además, la ausencia de estándares unificados y la reticencia a compartir datos entre organizaciones limitan la visibilidad total del flujo de productos y materiales.

Los sistemas tradicionales de trazabilidad a menudo dependen de terceros de confianza, con datos almacenados en papel o en bases de datos centralizadas. Estos enfoques son propensos a problemas de integridad de datos, altos costos, ineficiencias por procesos manuales, errores humanos y manipulación. En contraste, Blockchain ofrece un nuevo modelo donde la autenticidad no es verificada por un tercero, sino por la propia red de nodos mediante consenso. La naturaleza descentralizada de Blockchain, donde cada participante tiene una copia del registro, contrasta con el modelo centralizado, donde un error puede llevar a la pérdida de información o comprometer su integridad.

Para abordar estos desafíos, se ha desarrollado un conjunto de tecnologías que fortalecen los sistemas de trazabilidad. Entre las más utilizadas se encuentran los códigos de barras y las etiquetas RFID, que permiten la identificación automática de productos; los sensores IoT, que capturan datos en tiempo real sobre condiciones ambientales o de transporte; los sistemas ERP y de gestión logística, que centralizan y organizan la información operativa; y, más recientemente, la tecnología blockchain, que introduce una capa adicional de seguridad, inmutabilidad y transparencia.

Blockchain, en particular, permite registrar cada transacción o evento de la cadena en un registro digital descentralizado e inalterable. Esto garantiza que todos los actores tengan acceso a un historial común y verificable, eliminando la necesidad de intermediarios o auditores externos. Combinando contratos inteligentes y plataformas de análisis de datos, la trazabilidad basada en blockchain permite no solo conocer lo que ocurrió, sino también automatizar respuestas

ante condiciones predefinidas, reduciendo los tiempos de reacción y aumentando la confianza entre las partes.

En la cadena de suministro (SCM), Blockchain desempeña un papel transformador. Aporta un aumento significativo en la seguridad, confidencialidad, trazabilidad, transparencia, precisión de datos, privacidad, eficiencia, responsabilidad y confianza. Se utiliza en diversos sectores como la agricultura, alimentos, industria, marítimo y medioambiental. Por ejemplo, en el sector alimenticio, impulsa el valor percibido del producto y la calidad, además de fortalecer la confianza entre las partes interesadas. Para el sector industrial, se enfoca en la planeación y el intercambio de información para una mayor sostenibilidad. En el sector textil, mejora los procesos internos, la trazabilidad y previene la falsificación. La tecnología Blockchain, unida a IoT, puede proporcionar soluciones eficientes y eficaces para la cadena de suministro, mejorando la recopilación de datos y los beneficios para las partes interesadas. Si bien su aplicación aún está en desarrollo, su potencial para optimizar la trazabilidad y la sostenibilidad en la gestión de residuos es ampliamente reconocido.

La trazabilidad, por lo tanto, se convierte en un habilitador clave para la transición hacia modelos de economía circular. Permite no solo verificar el cumplimiento de estándares ambientales y sociales, sino también optimizar el uso de recursos, reducir desperdicios y fomentar la reutilización y el reciclaje. En un contexto donde la sostenibilidad es cada vez más prioritaria, contar con sistemas de trazabilidad robustos y confiables resulta esencial para garantizar la transparencia, la eficiencia y la responsabilidad en las cadenas de suministro.

2.2.3. Proceso de producción y reciclaje en la economía circular

En el marco de la economía circular, los procesos de producción y reciclaje dejan de concebirse como etapas aisladas y unidireccionales para integrarse en un sistema dinámico y regenerativo. Este sistema busca maximizar el valor de los materiales a lo largo del tiempo, manteniéndolos en uso durante el mayor tiempo posible, y reintroduciéndolos en el ciclo económico una vez finalizada su vida útil. A diferencia del modelo lineal, donde los productos son descartados tras el consumo, la economía circular plantea un circuito continuo que requiere rediseñar tanto las formas de producir como las estrategias de recuperación.

El proceso de producción comienza en la etapa de diseño, donde se decide la composición de los productos considerando criterios de ecoeficiencia, reutilización y reciclabilidad. Aquí intervienen diseñadores, ingenieros y proveedores de materias primas, quienes priorizan materiales reciclados o de bajo impacto ambiental. A continuación, durante la fabricación, los procesos industriales buscan reducir el uso de recursos y minimizar las emisiones, integrando tecnologías limpias y eficientes. En esta fase, los productos terminados o semielaborados quedan registrados con información detallada sobre su origen, composición y trazabilidad, lo cual permite una futura gestión más eficiente de su reciclaje.

Una vez que los productos son utilizados por los consumidores, comienza el ciclo inverso de

valorización. Cuando estos artículos llegan al fin de su vida útil, se convierten en residuos que deben ser recolectados, transportados, clasificados y reacondicionados. Este proceso de reciclaje involucra a recolectores, centros de acopio, plantas de tratamiento, recicladores industriales y fabricantes secundarios. Durante la recolección, tecnologías como sensores IoT, lectores de códigos QR o etiquetas RFID permiten registrar información sobre la identidad del recolector, la cantidad, el tipo y las condiciones del residuo. Esta información permite monitorear flujos y brindar transparencia en la cadena.

Posteriormente, los residuos son transportados a instalaciones donde se clasifican y segregan según su tipo y calidad. Este paso es fundamental para evitar contaminaciones cruzadas y asegurar un reciclaje efectivo. Finalmente, los materiales seleccionados se someten a procesos de reciclaje o reacondicionamiento, reincorporándolos al sistema productivo como insumos o productos reutilizables. Aquí, tecnologías como blockchain pueden documentar cada transacción o transformación, fortaleciendo la integridad del proceso y fomentando la confianza entre los actores.

Existen diversos materiales reciclables, cada uno con características particulares. El papel y cartón son ampliamente reciclados y fáciles de recolectar, mientras que los metales —como el aluminio, el acero o el cobre— conservan sus propiedades tras múltiples ciclos. Los residuos electrónicos (RAEE) presentan un alto valor por su contenido en metales preciosos, aunque requieren procesos especializados. Los plásticos, si bien representan un desafío por su heterogeneidad, pueden reciclarse eficientemente si se rediseñan los envases y se simplifican sus composiciones. Los residuos orgánicos son compostables o pueden aprovecharse energéticamente. Finalmente, el vidrio destaca como el material circular por excelencia: puede reciclarse infinitas veces sin perder calidad, su estructura es químicamente estable, y su reciclaje requiere menos energía que su producción original. Estas cualidades lo convierten en un insumo ideal para sistemas de economía circular bien diseñados.

El siguiente esquema conceptual sintetiza estas etapas como un ciclo cerrado, donde cada fase se conecta mediante mecanismos de trazabilidad digital que permiten el seguimiento de los materiales desde su origen hasta su reincorporación al sistema:

Este enfoque refleja cómo el diseño de productos, la gestión eficiente de los residuos y la integración de tecnologías como blockchain pueden transformar las cadenas de suministro tradicionales en sistemas circulares, resilientes y sostenibles.

2.2.4. Cadena de suministro del vidrio

El vidrio es uno de los materiales más representativos de la economía circular por su capacidad única de ser reciclado indefinidamente sin perder calidad. Esta propiedad lo convierte en un recurso estratégico para reducir la demanda de materias primas vírgenes, minimizar residuos y disminuir la huella de carbono asociada a la producción industrial. A diferencia de otros materiales cuyo reciclaje implica degradación, el vidrio conserva íntegramente sus caracterís-

tivas físicas y químicas, permitiendo su reintegración al ciclo productivo tantas veces como sea necesario.

La cadena de suministro del vidrio en un modelo circular abarca múltiples etapas interconectadas, desde la extracción de materias primas hasta la reincorporación del material reciclado a nuevos ciclos de producción. El proceso comienza con el diseño del producto, etapa clave para asegurar su durabilidad, reutilización y posterior reciclabilidad. Le sigue la producción industrial, donde se funden arena, sosa y caliza a altas temperaturas, frecuentemente combinadas con calcín (vidrio reciclado triturado) para reducir el consumo energético. Luego, los envases fabricados son distribuidos y utilizados por los consumidores, quienes pueden reutilizarlos o, una vez descartados, ingresarlos a circuitos de reciclaje. La recolección diferenciada, el transporte, la clasificación y limpieza del material son esenciales para garantizar un reciclaje de calidad. Finalmente, el vidrio tratado se funde nuevamente y se convierte en materia prima secundaria para nuevos envases, cerrando así el ciclo.

Este sistema se representa esquemáticamente en el siguiente diagrama, que ilustra las etapas circulares desde el diseño hasta la refabricación y reincorporación al ciclo productivo:

En Mendoza, la cadena del vidrio adquiere una importancia estratégica por su estrecha vinculación con la industria vitivinícola, uno de los principales motores económicos de la región. La provincia cuenta con una única empresa que produce y recicla envases de vidrio a escala industrial: Verallia. Esta compañía internacional cubre la totalidad de la demanda local de botellas y frascos, fabricando envases para vinos, espumantes, cervezas, licores y alimentos. El proceso de producción en Verallia incluye desde la selección y mezcla de materias primas hasta la formación, inspección y distribución de los envases, con la integración progresiva de vidrio reciclado como parte del insumo.

Verallia ha reconocido públicamente que la mayor dificultad de su industria es la elevada emisión de dióxido de carbono, por lo que ha adoptado una estrategia dual orientada a optimizar el reciclaje y fomentar la reutilización del vidrio. Bajo esta lógica, ha desarrollado el programa “Vidrio, una acción transparente” en alianza con el Gobierno de Mendoza, mediante el cual se promueve la recolección de envases descartados, destinando los ingresos generados al apoyo de organizaciones benéficas. Esta iniciativa, aunque aún incipiente, representa un esfuerzo por avanzar hacia una cadena de suministro más circular y socialmente responsable.

Sin embargo, el reciclaje de vidrio en Mendoza enfrenta desafíos estructurales. La tasa de recuperación aún es baja, las métricas oficiales son escasas y las políticas de incentivo son limitadas. La logística de recolección depende en gran medida de la voluntad ciudadana y carece de sistemas obligatorios o premiantes que aseguren su masividad. En este contexto, el rol de actores industriales como Verallia resulta central para impulsar transformaciones sostenibles en la cadena del vidrio, tanto mediante la innovación tecnológica como a través de la articulación público-privada.

Más allá del caso mendocino, el vidrio sigue siendo uno de los materiales más valiosos dentro de una economía circular bien implementada. Su durabilidad, estabilidad química, transparen-

cia y capacidad de reciclaje total lo convierten en un insumo ideal para cerrar ciclos productivos sin pérdidas de calidad ni de valor. Avanzar hacia una cadena del vidrio plenamente circular requiere optimizar cada etapa, desde el diseño y la fabricación hasta la trazabilidad del reciclaje, consolidando sistemas logísticos eficientes, ciudadanos comprometidos y políticas públicas robustas que garanticen su sostenibilidad a largo plazo.

2.3. Proyectos y trabajos relacionados

To-Do

Fill this section with related projects and works

[Mencionar y describir de manera fluída algunos de todos estos proyectos, comenzando desde lo más simple a lo más complejo. Primero tecnología para incentivar reciclaje, luego uso de blockchain en cadena de suministros, luego específicamente orientado a sustentabilidad y por último que además se concentren en dar trazabilidad. Sacar en limpio los aportes relevantes de cada uno y los puntos débiles (que resolverá mi trabajo)].

Tecnología con incentivos para el reciclaje:

- DRS (PFAND, Alemania)
- Reciclos (España)
- Colmena (Argentina)
- Greenly Points (Argentina)
- Plastic Bank (Canadá)

Aplicaciones de tecnología blockchain en la cadena de suministro para logística/trazabilidad:

- Signeblock (España)

Uso de tecnología blockchain en la cadena de suministro para la sustentabilidad:

- Modelo para la gestión de residuos [baralla2023waste]
- Modelo ZERO para el Reciclaje de Plásticos con Tecnología Blockchain
- Uso de Blockchain y Marcadores Moleculares para el Manejo Sostenible de Residuos Plásticos

Uso de tecnología blockchain en la cadena de suministro para trazabilidad para Sustentabilidad:

- Circularise (Holanda)

- Circular (Reino Unido)

[Debo cerrar de alguna manera con conclusión o un párrafo el marco teórico antes de saltar a metodología? Quizás contar dónde acotamos el problema vistos los proyectos preexistentes? Dónde cuento que elegimos vidrio en Mendoza por el vino y que vamos a hacer un sistema de trazabilidad específicamente para esa cadena de suministros y todos sus actores??]



METODOLOGÍA DE TRABAJO

Contar sobre la planificación del plan de trabajo.

Contar sobre la metodología de investigación del estado del arte, los viajes y las entrevistas.

Hacer la comparación de metodologías de desarrollo y contar sobre la metodología en V elegida por qué la elegimos y describirla un poco. Poner figura de metodología en V.

Contar en qué etapa de la metodología hacemos:

Elección de herramientas, frameworks y softwares

Análisis de requerimientos

Implementación

Y cómo se lleva a cabo el testeo

Explicar que la documentación del proceso se fue realizando continuamente y se armó el informe al final a partir de toda la información registrada durante el proceso.

Explicar que trackeamos incidencias en Jira y que trackeamos evolución del código con git.



MODELADO DE REQUERIMIENTOS

En esta sección cuento cómo arrancamos, cuáles fueron los pasos para conseguir información y a partir de qué datos modelamos los requerimientos y cómo. Cómo bajamos los requerimientos funcionales y no funcionales, y cómo los pulimos e iteramos. Cómo despriorizamos algunos requerimientos y por qué durante este proceso.

Cómo bajamos a jira estos requerimientos y armamos una planificación tentativa del desarrollo de estas funcionalidades.

Contar que estos requerimientos se usan para realizar el diseño de la solución de software.



DISEÑO DE SOLUCIÓN

En esta sección voy a tener que diferenciar entre ambos tipos de diseño. Primero armé la arquitectura del sistema, separando en bloques frontend/api/datos. Contar cómo decidí esta arquitectura. Explicar la comparación y elección de tecnologías para cada módulo. Fundamentar la elección de blockchain en base a la comparación que se hizo en el estado del arte. O hacer la comparación acá en vez de en el estado del arte? Explicar también las interfaces entre módulos (API rest en gral), pero si usé alguna librería para estas interfaces explicar cuál.

Luego explicar el diseño de componentes, que sería interno a cada bloque. Cómo elegí la arquitectura de frontend, como elegí clean arch en back y las librerías que usé en back. Cómo armé la arquitectura de contratos en la blockchain y el modelo de datos en sql.

Acá tengo que detallar la arquitectura de pantallas de front, la distribución de apis del back y la separación de contratos en blockchain.

Explicar la combinación de Ownership en SQL con los datos en la blockchain para un trackeo eficiente, confiable y no redundante de información.



IMPLEMENTACIÓN

La implementación fue el proceso más largo y se llevó a cabo siguiendo la planificación.

Explicar que se realizó desarrollo y unit testing de forma conjunta e intercalada.

Al ser un sistema modular pero interconectado, el desarrollo se realizó por módulo desde adentro hacia afuera y no por dominio. Es decir, primero se programó el 100

Cuando se tuvo el software ejecutable y testeado con unit testing en un entorno local, se procedió al despliegue en un entorno de pruebas. Contar sobre las plataformas donde se desplegó cada módulo, el por qué (son gratuitas y ya, me sirve para un trabajo académico). Explicar que se configuraron herramientas de despliegue en docker para modularización, evitar conflictos de dependencias y que en el futuro se pueda transicionar fácilmente a un entorno productivo sin problemas ni necesidad de cambios.

Despliegue podría tener su propia sección directamente?

Explicar que en el mismo código se encuentra documentado el proceso de setup del proyecto en un entorno local y el despliegue en producción.

Agregar que se configuró un swagger para la documentación backend para que en el futuro se puedan desarrollar nuevas apps frontend que se conecten al mismo sistema interno.



PRUEBAS

Contar sobre las 3 etapas de pruebas integrales. Comenzando por integración, contar el enfoque, qué sistemas incluyen (api, sql, blockchain) y las características del entorno donde se desarrollaron. Contar que son pruebas automatizadas que pueden ejecutarse antes de cada despliegue.

Después las pruebas de sistema, contar que fueron manuales con una lista de casos de prueba por módulo simulando el uso de usuarios reales y validando consistencia de resultados entre actores del sistema. Agregar que también se hicieron pruebas no funcionales de rendimiento del sistema, aunque se hicieron sobre un entorno local (las de carga) debido a limitaciones de tráfico en los entornos deployados gratuitos.

Finalmente, contar la experiencia de pruebas con usuarios. Contar también en esta etapa que hicimos un repaso de la UX del frontend y se hicieron mejoras en la UI y la experiencia de usuario.

En cada caso, hacer un breve resumen de cuántas pruebas se realizaron, sobre qué sistema (si aplica) y cantidad de bugs levantados y resueltos o desestimados. Contar que se cargaron en incidencias de Jira.



CONCLUSIONES

Resultados de la metodología, contar experiencia de ejecución real vs planeada, dar opiniones de la metodología elegida y si fue idónea para este trabajo. Contar por qué se desvió la planificación y justificar por qué igual es aceptable.

Fue un trabajo interesante, más de proceso que de resultados. Es un problema acotado, pero sumamente aplicable en el mundo real. Tuvimos contratiempos, se alargó, hubieron viajes en el medio, pero curiosamente relacionados con este trabajo y que supieron aportar perspectiva al problema. Como desafío técnico fue interesante y principalmente pude aprender mucho sobre pruebas de calidad (ya algo de experiencia tenía en planteo de requerimientos y desarrollo de software). Fue interesante la experiencia de trabajar con blockchain, probó ser una tecnología accesible y con valor real, a pesar de sus restricciones que impone al resto del software en general.

8.1. Resultados

El resultado final fue un software testeado y productivo, con una UX y UI pulida. Agregar algunas imágenes y flujos? Contar algún flujo de la aplicación, por ejemplo el de productor o reciclador.

8.2. Desafíos

Desafíos principales:

- Hacer un planteo que pueda resolver las necesidades de todos los actores

- Llevar completa la metodología de equipo siendo un equipo unipersonal.
- Implementación de la tecnología blockchain con algo de experiencia previa.
- Desarrollar el proceso completo de testeos de calidad sin experiencia previa.
- Contratiempos de viajes y trabajo y materias.
- Resolver metodología de pruebas con usuarios al ser un sistema que involucra muchos actores reales ocupados en sus asuntos.

8.3. Perspectivas Futuras

A futuro este sistema puede implementarse realmente y seguir creciendo:

- Extender soporte a cadenas de valor de otro tipo de envases: PET, aluminio.
- Implementarse como piloto en Mendoza u otras regiones
- Nuevos proyectos, como Círculs, pueden nacer inspirados por este trabajo.
- El sistema actualmente es cerrado, es decir, sigue desde principio a fin a un mismo grupo de materiales. A futuro se puede extender para comenzar o soltar la trazabilidad de elementos en cualquier paso de la cadena, para bajar la barrera de ingreso.
- Se pueden desarrollar distintas aplicaciones independientes que reemplacen a cada módulo del frontend con casos de uso a medida para cada actor.
- Se puede integrar el sistema directamente con sensores en la línea de producción de las fábricas para automatizar la carga de información sin posibilidad de error humano de carga de datos.

Apéndice



CONTENIDO ANEXO

A.1. Multimedia

Como parte de este Trabajo Final se grabó un video resumiendo los puntos más importantes del mismo y mostrando el funcionamiento de la plataforma desarrollada. El mismo se encuentra disponible en el siguiente enlace: [enlace al video]

A.2. Código fuente

Todo el código del prototipo se encuentra disponible y accesible en un repositorio público de GitHub. El mismo puede ser consultado en el siguiente enlace: [enlace al repositorio]

A.3. Documentación técnica

La documentación técnica del sistema se encuentra disponible en el repositorio de GitHub mencionado anteriormente. Esta documentación incluye:

- Descripción de la arquitectura del sistema.
- Instrucciones de instalación y despliegue.
- Guía de uso de la API.
- Detalles sobre la implementación de los smart contracts.
- Información sobre las pruebas realizadas.
- Detalles sobre la configuración del entorno de desarrollo.



TECNOLOGÍAS BLOCKCHAIN

Comparación de tecnologías blockchain y justificación de elección de solidity.



MATERIALES RECICLABLES

Comparación de materiales reciclables y justificación de elección de vidrio.



ENTREVISTA A VERALLIA

Bajar minuta de la entrevista con la chica de Verallia. Contar cuánto duró y lista de preguntas y respuestas, tipo de entrevista.



VIAJE DE INVESTIGACIÓN

Contar la experiencia de investigación de sistemas de reciclaje en Europa. Contar sobre los DRS y los centros de reciclaje. Adjuntar fotos. Contar cada paso a paso qué cosas hicimos y a qué lugares fuimos. Hacer minuta.



USER FLOW

Contar el flujo de uso de la aplicación con screenshots de las pantallas y casos de uso de cada usuario.



RESULTADOS DE PRUEBAS AUTOMATIZADAS

Detallar para cada repositorio la lista de los títulos de las pruebas unitarias (son alrededor de 600 pruebas entre todo).

Detallar también la lista de casos de prueba de tests de integración.

Detallar la lista de pruebas manuales realizadas.

Contar la lista de bugs levantados y resueltos o desestimados.



USER ACCEPTANCE TESTING

Detallar la lista de pruebas manuales realizadas por los testers voluntarios, bugs levantados y resueltos, Adjuntar fotos del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] 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.
- [2] Josep Lluís Pelegrí. «Informe IPCC: Certezas e incertidumbres sobre el cambio climático». En: (2021).
- [3] J. I. Arroyo et al. *Clima*. El gato y la caja, 2022.
- [4] Clayson Cosme Da Costa Pimenta. «La Economía Circular como eje de desarrollo de los países latinoamericanos». En: *Revista Economía y Política* 35 (2022), págs. 1-18.
- [5] Jesus R Melendez et al. «Economía Circular: Una Revisión desde los Modelos de Negocios y la Responsabilidad Social Empresarial». En: *Revista Venezolana de Gerencia: RVG* 26.6 (2021), págs. 560-573.
- [6] Reuben Schuitemaker et al. «Product traceability in manufacturing: A technical review». En: *Procedia CIRP* 93 (2020). 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems 2020, págs. 700-705. ISSN: 2212-8271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.078>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120306922>.
- [7] Gavina Baralla et al. «Waste management: A comprehensive state of the art about the rise of blockchain technology». En: *Computers in Industry* 145 (2023), pág. 103812.
- [8] Katarzyna Bułkowska et al. «Implementation of Blockchain Technology in Waste Management». En: *Energies* 16.23 (2023), pág. 7742.
- [9] Eiman Alnuaimi et al. «Blockchain-based system for tracking and rewarding recyclable plastic waste». En: *Peer-to-Peer Networking and Applications* 16.1 (2023), págs. 328-346.
- [10] Signeblock. *Soluciones de valor para la transformación digital de las empresas*. Sitio web. Disponible en <https://www.signeblock.com/trazabilidad-blockchain-so-5-es>. 2024.
- [11] NU CEPAL. «Economía circular en América Latina y el Caribe: oportunidad para una recuperación transformadora». En: (2021).

- [12] Verallia. «Reimagining reuse for the circular economy of glass: Stakeholder Perspectives Series». En: (2022). URL: https://www.verallia.com/re-use/en/publication/contents/templates/VERALLIA_WHITE-BOOK_EN.pdf (visitado 14-07-2024).
- [13] Gautami Tripathi et al. «A comprehensive review of blockchain technology: Underlying principles and historical background with future challenges». En: *Decision Analytics Journal* 9 (2023), pág. 100344.
- [14] Satoshi Nakamoto. *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. Original Bitcoin whitepaper. Oct. de 2008. URL: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [15] Alejandro Bartolomeo et al. «Introducción a la tecnología blockchain: su impacto en las Ciencias Económicas». En: *Ponencia presentada en Jornadas de Ciencias Económicas. Buenos Aires* 7.8 (2020).
- [16] Vitalik Buterin et al. «Ethereum white paper». En: *GitHub repository* 1 (2013), págs. 22-23.
- [17] Elli Androulaki et al. «Hyperledger fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains». En: *Proceedings of the thirteenth EuroSys conference*. 2018, págs. 1-15.
- [18] Farhana Akter Sunny et al. «A systematic review of blockchain applications». En: *Ieee Access* 10 (2022), págs. 59155-59177.
- [19] Michael JW Rennock et al. «Blockchain technology and regulatory investigations». En: *Practical Law Litigation* 1 (2018), págs. 35-44.
- [20] Francisco Javier Díaz et al. «Protocolos de consenso». En: *XXIV Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2022, Mendoza)*. 2022.
- [21] V Verma. «An overview of Blockchain Technology: Past & Future». En: *Eduzone: International Peer Reviewed/Refereed Multidisciplinary Journal* 12.1 (2023), págs. 100-104.
- [22] Hamed Taherdoost. «Smart contracts in blockchain technology: A critical review». En: *Information* 14.2 (2023), pág. 117.
- [23] Jovan Kalajdjieski et al. «Databases fit for blockchain technology: A complete overview». En: *Blockchain: Research and Applications* 4.1 (2023), pág. 100116.
- [24] Charles Hoskinson. «Why we are building Cardano». En: *IOHK (accessed 18 December 2017)* <https://whycardano.com> (2017).
- [25] Karthik Kumar Vaigandla et al. «Review on blockchain technology: architecture, characteristics, benefits, algorithms, challenges and applications». En: *Mesopotamian Journal of CyberSecurity* 2023 (2023), págs. 73-84.
- [26] Abdel-Aziz Ahmad Sharabati et al. «Blockchain technology implementation in supply chain management: a literature review». En: *Sustainability* 16.7 (2024), pág. 2823.

-
- [27] Abderahman Rejeb et al. «The role of blockchain technology in the transition toward the circular economy: Findings from a systematic literature review». En: *Resources, Conservation & Recycling Advances* 17 (2023), pág. 200126.
 - [28] Alberto Díez Arias et al. «Web 3.0 y Blockchain en la Educación Secundaria». En: (2023).
 - [29] Juan Esteban Torres Castro et al. «Las tendencias en el uso del blockchain en el área de la cadena de suministro». En: (2022). URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12495/10594>.
 - [30] José Areia. *Polytechnic University of Leiria: LaTeX Thesis Template*. Dic. de 2023. URL: <https://github.com/joseareia/ipleiria-thesis>.
 - [31] Pérez-Navarro, Enrique. *University of Murcia*. Mayo de 2025. URL: <https://github.com/enriquee/umu-thesis>.

