



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

TESINA FINAL DE GRADO
Licenciatura en Ciencias de la Computación

**Desarrollo de una aplicación basada en
tecnología blockchain orientada a la
trazabilidad y valorización del vidrio**

Autora: Rocío Belén Corral
Tutor: Pablo Javier Vidal

Julio 2025

Página intencionalmente dejada en blanco.

Être et Durer
Ser y durar

AGRADECIMIENTOS

Agradecer. Gracias totales.

Rocío Belén Corral
Mendoza, Argentina
agosto 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 Figurasxiii Índice de Tablas1

1.	Introducción	3
1.1.	Motivación	3
1.2.	Objetivos	5
1.3.	Estructura general del documento	5
2.	Marco Teórico	7
2.1.	Blockchain	7
2.1.1.	Estructura de una Blockchain	9
2.1.2.	Funcionamiento de una Blockchain	14
2.1.3.	Contratos Inteligentes	16
2.1.4.	Desafíos y Oportunidades	18
2.2.	Economía Circular	20
2.2.1.	Políticas sustentables	22
2.2.2.	Cadena de suministro	24
2.2.3.	Proceso de producción y reciclaje en la economía circular	26
2.2.4.	Cadena de suministro del vidrio	29
2.3.	Proyectos y Trabajos Relacionados	31
3.	Metodología de Trabajo	35
3.1.	Metodología de Desarrollo	36
3.1.1.	Etapas del Proceso de Desarrollo	42
4.	Modelado de Requerimientos	47
4.1.	Definición de Dominio	50
4.2.	Modelado de Casos de Uso	53
4.3.	Definición de Requerimientos	55
4.4.	Historias de Usuario y Planificación	59
5.	Diseño de Solución	63
5.1.	Diseño de Arquitectura	64
5.1.1.	Capa de Datos	65
5.1.2.	Capa Backend	69

5.1.3. Capa Frontend	71
5.2. Diseño de Componentes	72
5.2.1. Arquitectura de Datos	73
5.2.2. Arquitectura Backend	75
5.2.3. Arquitectura Frontend	77
6. Implementación	79
6.1. Desarrollo Técnico	81
6.2. Despliegue	82
6.3. Documentación	83
7. Pruebas	85
7.1. Pruebas Unitarias	85
7.2. Pruebas de Integración	86
7.3. Pruebas de Sistema	86
7.4. Pruebas de Calidad	87
7.5. Pruebas de Aceptación con Usuarios	87
7.6. Pruebas Unitarias	88
7.7. Pruebas de Integración	89
7.8. Pruebas de Sistema	90
7.9. Pruebas de Aceptación con Usuarios	91
8. Conclusiones	93
8.1. Resultados	93
8.2. Desafíos	93
8.3. Perspectivas Futuras	94

Apéndices

A. Contenido Anexo	103
A.1. Multimedia	103
A.2. Código fuente	103
A.3. Documentación técnica	103
B. Tecnologías Blockchain	105
B.1. Hyperledger Fabric	106
B.2. Ethereum	106
B.3. Polkadot	107
B.4. VeChain	108
B.5. Cardano	108
B.6. Comparación	109
B.7. Conclusión	109
C. Materiales Reciclables	111

C.0.1. Residuos Orgánicos	111
C.0.2. Residuos Electrónicos	111
C.0.3. Papel y Cartón	112
C.0.4. Plásticos	112
C.0.5. Textiles	112
C.0.6. Metales	113
C.0.7. Vidrio	113
C.0.8. Residuos de Construcción y Demolición	113
C.0.9. Decisión Final	113
C.1. Comparación entre Vidrio y Plástico	113
D. Entrevista a Verallia	115
E. Viaje de Investigación	119
F. User Flow	121
G. Resultados de Pruebas Automatizadas	123
H. User Acceptance Testing	125
Bibliografía127 Glosario129 Siglas129	

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1.	Comparación entre el modelo cliente-servidor y el modelo distribuido de blockchain	9
2.2.	Estructura básica de una cadena de bloques	10
2.3.	Contenido de un bloque en una cadena de bloques	10
2.4.	Ejemplo de códigos hash generados a partir de cadenas de texto	11
2.5.	Creación de una transacción y un bloque en una blockchain	15
2.6.	Proceso de creación y ejecución de un contrato inteligente	17
2.7.	Comparación entre la economía lineal y la economía circular	21
2.8.	Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas	22
2.9.	Componentes de una cadena de suministro	24
2.10.	Ejemplo de trazabilidad como herramienta transversal en la cadena de suministro de envases de vino	25
2.11.	Ciclo productivo de la economía circular	27
2.12.	Usos de la tecnología blockchain en las etapas de la economía circular [7]	28
2.13.	Ciclo de vida de envases de vidrio en un modelo de economía circular	29
3.1.	Planificación de las actividades del plan de trabajo	36
3.2.	Modelo en cascada. Fuente: [pressman2010ingenieria]	37
3.3.	Modelo en V. Fuente: [pressman2010ingenieria]	38
3.4.	Modelo espiral. Fuente: [37]	39
3.5.	Metodología Scrum. Fuente: [37]	40
3.6.	Tablero Kanban de ejemplo.	41

3.7. Modelo en V agrupado por etapas. Fuente: [pressman2010ingenieria]	43
4.1. Etapas del proceso de modelado de requerimientos del prototipo de trazabilidad de vidrio	49
4.2. Etapas del ciclo de vida de los envases de vidrio	50
4.3. Canvas de Propuesta de Valor para el sistema de trazabilidad de vidrio	52
4.4. Diagrama de Casos de Uso del sistema de trazabilidad de vidrio	54
4.5. Tablero de Jira para la gestión de historias de usuario	61
4.6. Diagrama de Gantt para la planificación del proyecto	61
5.1. Arquitectura del sistema	65
5.2. Diagrama de ciclo de vida de los envases.	73
5.3. Diagrama de la arquitectura de smart contracts.	74
5.4. Diagrama Entidad-Relación (DER) del modelo de datos.	75
5.5. Modelo Clean Architecture.	76
5.6. Arquitectura de módulos frontend.	77
5.7. Identidad de marca de la aplicación.	78
C.1. Composición de los residuos sólidos urbanos en América Latina. Fuente: CEPAL, 2021.	112

ÍNDICE DE TABLAS

4.1. Requerimientos Funcionales del sistema de trazabilidad de envases de vidrio	56
4.2. Requerimientos No Funcionales del sistema de trazabilidad de envases de vidrio . .	58
5.1. Comparación de plataformas blockchain	68
7.1. Comparación de las etapas de prueba del prototipo de trazabilidad de vidrio	88
B.1. Comparación de plataformas blockchain	109
C.1. Comparación entre vidrio y plástico en el contexto de economía circular.	114

1

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 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 [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 permite 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.

2

MARCO TEÓRICO

Este capítulo presenta los fundamentos teóricos que sirven de base para este trabajo. 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 (Sección 2.1) [15, 16]. Además, se analiza el rol de los contratos inteligentes como herramientas para automatizar procesos y gestionar la lógica de negocio en entornos descentralizados (Sección 2.1.3) [20]. 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 (Sección 2.2) [5, 30]. 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 [6]. 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 [vidriotransparente2024mendoza]. 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 (Sección 2.3) [7, 25].

2.1. Blockchain

Blockchain es una tecnología emergente y potencialmente disruptiva que permite registrar información de forma segura, transparente y sin intermediarios. Esta tecnología está siendo aplicada para diversos casos de uso y ha sido objeto de creciente atención tanto en el ámbito empresarial como académico desde su aparición en 2008 [14]. La primera y más famosa aplicación de blockchain es Bitcoin. Su inventor anónimo, Satoshi Nakamoto, lanzó Bitcoin en 2008

durante la crisis financiera mundial con el objetivo de crear un nuevo tipo de moneda digital confiable fuera del control de gobiernos, bancos y otras instituciones financieras tradicionales [14]. Desde entonces, la tecnología blockchain ha sido adoptada en diversos sectores. En el ámbito financiero, se utiliza como un libro contable digital para facilitar transferencias de valor entre pares, sin bancos ni entidades intermediarias [8]. En logística y cadenas de suministro, se aplica para mejorar la trazabilidad, transparencia y eficiencia de los procesos productivos [25].

La tecnología blockchain, o cadena de bloques, sirve para registrar información digital de manera segura, transparente e immutable. Es relevante comprender los motivos de su surgimiento como una tecnología disruptiva en los últimos años, antes de introducir su estructura y funcionamiento [13].

Para entender la necesidad e impacto de la tecnología blockchain, primero es necesario analizar la arquitectura predominante de Internet hasta la actualidad, basada tradicionalmente en un modelo centralizado cliente-servidor. En este esquema, los datos son almacenados en servidores administrados por proveedores, quienes actúan como intermediarios de confianza entre los clientes o usuarios. Aunque este modelo ha facilitado el intercambio de información a escala masiva, también trae aparejados ciertos problemas de confianza, seguridad y privacidad [gunawan2024review]. La centralización implica que los usuarios ceden el control y gestión de sus datos a terceros, lo que puede derivar en una dependencia significativa de estas entidades para la integridad y disponibilidad de la información. Ejemplos de esto incluyen la exposición de datos personales privados en ciber-ataques, la interrupción de servicios por fallas en servidores centrales o la censura de contenido por decisiones unilaterales de las plataformas [gunawan2024review]. Por ejemplo, cuando el servidor de Whatsapp deja de funcionar, los usuarios no pueden utilizar la aplicación para comunicarse hasta que el proveedor vuelva a hacerlo funcionar. Otro ejemplo, es cuando un proveedor sufre un ciber-ataque y se filtran contraseñas de los usuarios, quienes no tienen conocimiento de las vulnerabilidades que puede tener el proveedor, pero dependen de su servicio [13].

Ante los desafíos de confianza e integridad en los sistemas centralizados, la tecnología blockchain emergió en 2008 como una solución disruptiva. Concebida inicialmente como la base del sistema de criptomonedas Bitcoin [14], la blockchain actúa como un libro de contabilidad digital descentralizado que facilita transferencias de valor entre pares sin la necesidad de intermediarios. Esta funcionalidad revolucionaria rápidamente demostró un potencial significativo más allá del ámbito financiero, posicionando a la tecnología blockchain como una herramienta para abordar problemas de confianza, transparencia e inmutabilidad en la gestión de datos [8]. Su arquitectura permite el registro de información de manera distribuida, eliminando la dependencia de proveedores centralizados y habilitando la interacción directa entre múltiples partes [8].

A diferencia de lo que suele suponerse, blockchain no se basa en tecnologías radicalmente nuevas, sino que integra de forma innovadora principios existentes de la computación y las matemáticas. Combina conceptos de criptografía (para asegurar la información), redes distribuidas

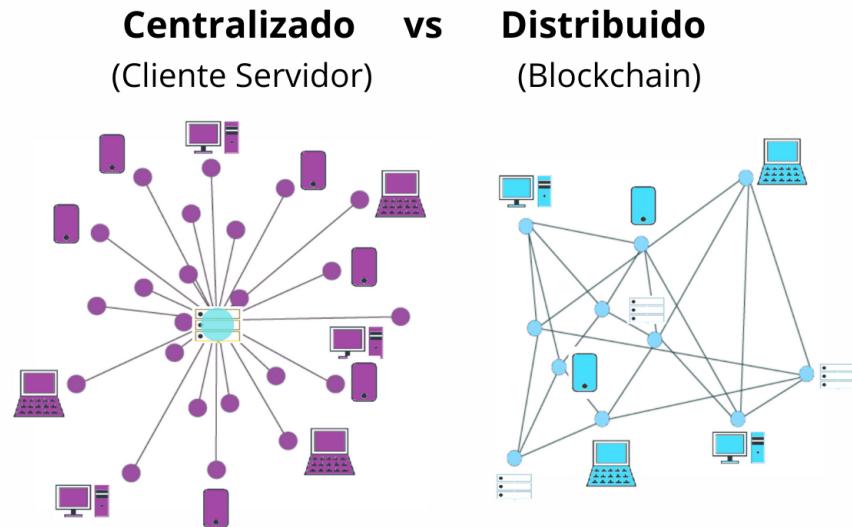


Figura 2.1: Comparación entre el modelo cliente-servidor y el modelo distribuido de blockchain

(para la replicación de los datos) y teoría de juegos e incentivos (para coordinar el comportamiento de los participantes y garantizar la seguridad de los datos) [8, 15]. Esta integración produce un sistema seguro, transparente y resistente a manipulaciones, características difíciles de lograr en modelos centralizados. De esta manera, blockchain impulsa un nuevo paradigma donde el registro de la información es gestionado colectivamente, lo que permite transacciones y acuerdos entre pares sin depender de un tercero de confianza centralizado.

A continuación, se explorará en detalle la estructura y funcionamiento de la tecnología blockchain, sus características distintivas, los mecanismos de consenso que garantizan su seguridad y el papel de los contratos inteligentes como herramientas para la automatización de procesos. Además, se analizarán las ventajas y desafíos asociados a su implementación, así como su potencial de uso más allá del ámbito financiero.

2.1.1. Estructura de una Blockchain

La tecnología blockchain, o cadena de bloques, es una estructura de datos distribuida y descentralizada donde la información se organiza en transacciones agrupadas en bloques enlazados criptográficamente. Cada bloque posee un código único, conocido como hash del bloque, que lo identifica y sirve para enlazarlo al bloque posterior. El hash de cada bloque se genera a partir de su contenido y del hash del bloque anterior, creando así una cadena continua de bloques interconectados [16]. En la Figura 2.2 se ilustra la estructura simplificada de una blockchain, donde cada bloque incluye el hash del bloque anterior, formando una cadena de bloques interconectados.

Cada bloque de la cadena consta de un encabezado y un cuerpo [16]. El cuerpo guarda la lista

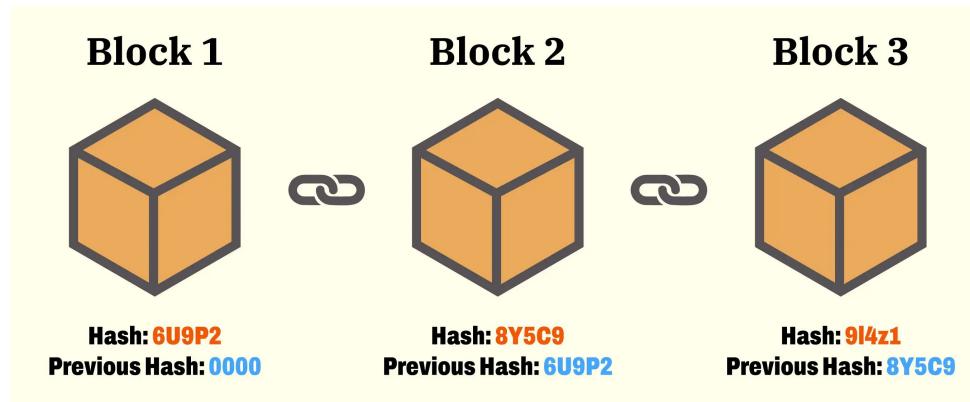


Figura 2.2: Estructura básica de una cadena de bloques

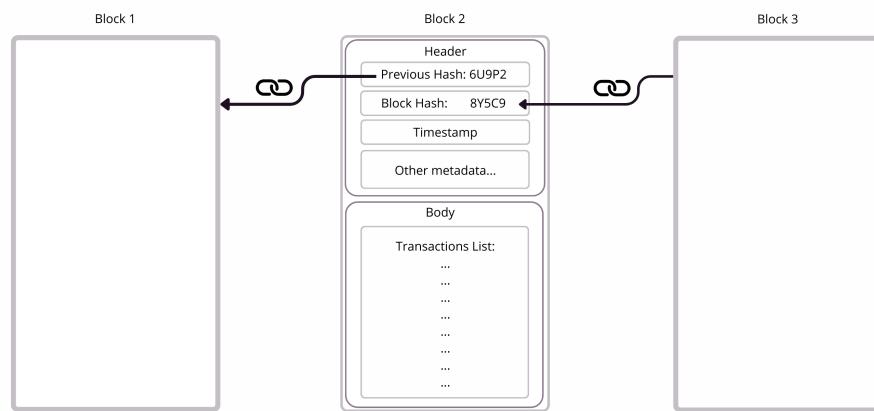


Figura 2.3: Contenido de un bloque en una cadena de bloques

de transacciones, mientras que el encabezado contiene metadatos (que pueden variar en cada implementación). Entre los metadatos más relevantes se encuentran el código único del bloque anterior, una marca de tiempo, y el código que identifica únicamente al bloque actual. En la Figura 2.3 se puede observar un esquema del contenido de un bloque de la cadena.

El hash del bloque se calcula usando funciones hash criptográficas, que son algoritmos matemáticos que transforman datos de entrada en una cadena de caracteres de longitud fija. Los códigos hash tienen la propiedad de ser rápidos de calcular, difíciles de revertir (matemáticamente imposible hacerles ingeniería inversa) y únicos para cada conjunto de datos (cualquier cambio en el contenido del bloque generará un código hash completamente diferente) [13]. Estas características permiten verificar la integridad de los datos almacenados en la cadena, ya que el código hash de un bloque se puede recalcular en cualquier momento y comparar con el código almacenado en la cadena. Si los códigos coinciden, se puede confiar en que los datos no han sido alterados; si no coinciden, se ha producido una modificación no autorizada en el contenido del bloque [13]. En la Figura 2.4 se puede ver un ejemplo de los códigos generados usando un algoritmo hash a partir de dos cadenas parecidas, donde se observa que incluso un cambio mínimo en el contenido produce un hash completamente diferente.

La interconexión criptográfica entre los bloques confiere a blockchain su característica de in-

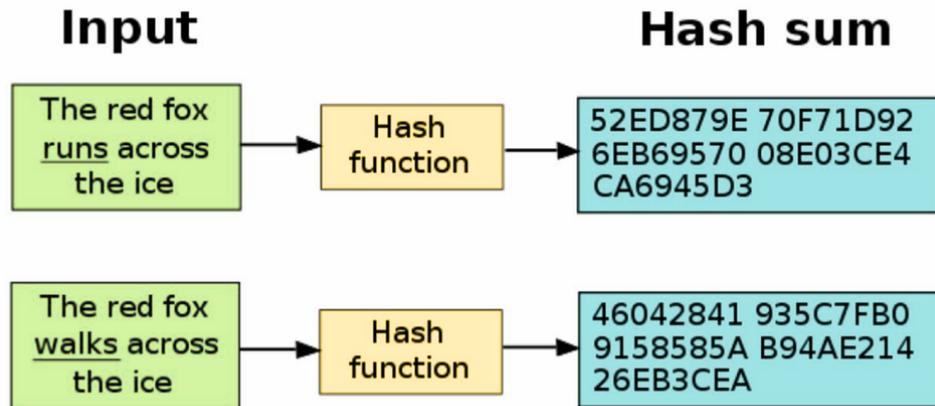


Figura 2.4: Ejemplo de códigos hash generados a partir de cadenas de texto

mutabilidad. Una vez que un bloque es añadido a la cadena, su hash se calcula a partir de su contenido y el hash del bloque anterior. Cualquier intento de alterar el contenido del 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].

Como ya se mencionó, la blockchain es una estructura de datos distribuida y descentralizada. La naturaleza distribuida de la blockchain implica que la información no se encuentra almacenada en un único servidor, sino que está distribuida en una red de computadoras interconectadas (conocidas como nodos) y cada nodo de la red mantiene una copia completa y actualizada del registro (de toda la cadena de bloques). Esto asegura su transparencia y resiliencia al no depender de un servidor central [8] propenso a ataques maliciosos y puntos únicos de fallo. Por su parte, la descentralización implica la ausencia de una autoridad central, de modo que la validación y adición de nuevos bloques se rige por un mecanismo de consenso entre todos los nodos participantes de la red.

Precisamente en este marco, los mecanismos de consenso son algoritmos o una serie de reglas que se definen en una red distribuida para que todos los nodos (que en este caso deben guardar exactamente la misma cadena de bloques) se pongan de acuerdo sobre qué información es correcta y válida. Sin un mecanismo de consenso, la red sería vulnerable a ataques por parte de nodos maliciosos que esparzan información inválida por la red con fines de beneficio propio, pudiendo perjudicar al resto de la red. Por ejemplo, en la red Bitcoin, cada transacción representa una transferencia de fondos entre cuentas; un nodo podría difundir transacciones al resto de la red registrando que cientos de usuarios le transfirieron fondos a una cuenta en específico, si el mecanismo de consenso no definiera reglas para validar el origen legítimo de cada transacción, este nodo malicioso podría robar los fondos de los demás usuarios para beneficio exclusivo de la persona que controla ese nodo.

Cada nodo de la red blockchain ejecuta un mismo programa computacional (software) que codifica las reglas del mecanismo de consenso, definiendo cómo crear transacciones y bloques

válidos, transmitirlos a la red y comprobar la validez de una transacción o bloque recibido de otro nodo antes de agregarlo a su copia local de la cadena (o descartarlo si no es válido). Para unirse a la red, un nuevo nodo descarga una copia completa de la cadena de bloques existente, lo que le confiere una visión completa del historial de transacciones y el estado actual de la cadena [8]. Posteriormente, el nodo comienza a ejecutar el software del mecanismo de consenso. A partir de entonces, el nodo puede generar nuevas transacciones y transmitirlas a la red para ser recibidas por los demás nodos. Asimismo, el nodo recibe transacciones de otros nodos y las valida mediante el mecanismo de consenso antes de añadirlas a un bloque en su copia local de la cadena [8].

La combinación de estas características, el encadenamiento criptográfico de bloques, la red descentralizada y el mecanismo de consenso, es lo que le permite a la blockchain garantizar la integridad e inmutabilidad de la información. Esto se debe a que cualquier alteración maliciosa en un bloque de la cadena modificaría su hash y rompería la consistencia posterior de la cadena, forzando a cada nodo de la red descentralizada a rechazar el bloque modificado. En consecuencia, para recuperar la consistencia de la cadena, sería necesario modificar los hashes de todos los bloques posteriores, lo que sería un proceso computacionalmente costoso y fácilmente detectable por el resto de la red.

En la actualidad, existen múltiples y variados algoritmos de consenso que definen distintas formas de generar un bloque válido (desde un nodo) y comprobar la validez del bloque (recibido desde otro nodo). Cada mecanismo de consenso utiliza distintas técnicas de teoría de juegos e incentivos con el objetivo de incentivar a que se unan nuevos nodos a la red (obteniendo ganancias) y desincentivar que un nodo actúe de manera maliciosa para obtener un beneficio individual. Esta combinación se logra mediante esquemas donde la penalización o pérdida generada por un comportamiento malicioso supere con creces las ganancias que se puedan obtener comportándose de forma maliciosa. Ejemplos prominentes de la diversidad de algoritmos de consenso incluyen la Prueba de Trabajo (PoW), la Prueba de Participación (PoS) y la Prueba de Autoridad (PoA), cada uno con características particulares.

El mecanismo de Prueba de Trabajo (PoW, por sus siglas en inglés) es uno de los algoritmos de consenso más conocidos y el primero introducido en las redes blockchain por su implementación en Bitcoin [14]. En PoW, todos los nodos (conocidos como “mineros” en este contexto) compiten para resolver un problema matemático complejo que requiere una gran capacidad computacional. El primer nodo que logra resolver este problema matemático valida la transacción y crea el nuevo bloque incluyendo la solución en su encabezado. El resto de nodos recibe el bloque y comprueba que el problema haya sido resuelto correctamente. El nodo que resuelve el reto recibe una compensación en Bitcoin como incentivo por aportar un bloque válido a la red. La desventaja de este algoritmo de consenso es que implica un alto costo energético debido a la carga computacional requerida para resolver el problema [13].

Otro mecanismo ampliamente utilizado es Prueba de Participación (PoS, por sus siglas en inglés), a diferencia de PoW, no requiere de una alta capacidad computacional para la creación de bloques. En PoS, los nodos (conocidos como validadores) “apuestan” una cantidad de las

criptomonedas como garantía de su buen comportamiento. Para generar un bloque válido, el protocolo selecciona pseudo-aleatoriamente un validador para generar el siguiente bloque, con una probabilidad de selección proporcional a la cantidad de criptomonedas que ha apostado. Una vez que el validador seleccionado crea un bloque y lo transmite a la red, los demás nodos validadores de la red simplemente comprueban que el bloque cumpla con las reglas de negocio del protocolo. Si un validador actúa de manera maliciosa, puede perder parte o la totalidad de su participación (proceso conocido como “slashing”). La principal ventaja del PoS es su eficiencia energética significativamente mayor en comparación con PoW, ya que no se requiere una minería intensiva. Además, puede ofrecer mayor escalabilidad y tarifas de transacción más bajas. Ethereum es un ejemplo de protocolo blockchain que fue implementado originalmente con PoW, pero que se actualizó para utilizar PoS debido a estas ventajas. Sin embargo, una desventaja potencial es el riesgo de centralización si la mayoría de la participación se acumula en pocos nodos, lo que podría darles un control desproporcionado sobre la red.

La Prueba de Autoridad (PoA, por sus siglas en inglés) es otro mecanismo de consenso donde la validación de bloques se basa en la identidad y reputación de un conjunto pre-aprobado de validadores. Para generar un bloque válido, el protocolo elige una autoridad designada (del conjunto de validadores aprobados y de confianza) que tiene el derecho exclusivo de crear y firmar el nuevo bloque. Para verificar que un bloque es válido, los demás nodos de la red simplemente comprueban la firma digital del validador que lo propuso y que el bloque cumple con las reglas del protocolo. La principal ventaja del PoA es su alta velocidad de transacción, ya que solo un número limitado de validadores de confianza necesita llegar a un consenso. Esto lo hace ideal para redes privadas o consorcios donde la confianza entre los participantes ya existe. Sin embargo, esta misma es su mayor desventaja, ya que la seguridad y el control de la red dependen de un pequeño grupo de entidades conocidas, lo que va en contra del principio de descentralización de muchas blockchains públicas.

Cada uno de los mecanismos mencionados ofrece distintos niveles de eficiencia de procesamiento, seguridad y descentralización. Durante la validación del bloque, se verifican múltiples aspectos en común en cualquiera de estos mecanismos: la correcta correspondencia del hash del bloque anterior con el almacenado en el encabezado del nuevo bloque, la validez de las transacciones de acuerdo a la lógica de negocios propia del protocolo blockchain, 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 [17]. 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 siguientes. 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].

En síntesis, la robustez de una blockchain reside en la interconexión sinérgica de sus componentes: el encadenamiento criptográfico, la red distribuida y el mecanismo de consenso. No es un único elemento el que garantiza su seguridad, sino la forma en que estos principios interactúan constantemente. Los mecanismos de consenso, en particular, son los encargados de arbitrar la creación de nuevos bloques de forma segura, resolviendo el problema de la confianza en un entorno descentralizado. A su vez, el encadenamiento criptográfico asegura que la integridad de un bloque dependa del anterior, haciendo que cualquier intento de manipulación sea computacionalmente costoso y fácilmente detectable por el resto de la red.

A continuación, se detalla cómo estos elementos se articulan en la práctica para permitir un registro de transacciones seguro y transparente. A través de un proceso iterativo de validación, los nodos de la red trabajan de forma coordinada para generar, verificar y distribuir nuevos bloques, conformando un ciclo de vida que asegura la consistencia y la inmutabilidad del registro global de transacciones.

2.1.2. Funcionamiento de una Blockchain

Teniendo conocimiento de los elementos fundamentales que conforman una blockchain, es posible analizar cómo interactúan para registrar y validar transacciones de manera coordinada en un entorno descentralizado. Este proceso, que combina principios criptográficos, distribución de datos y reglas de consenso, se desarrolla de forma secuencial y repetitiva, asegurando que cada bloque añadido a la cadena preserve la integridad y coherencia del registro global de transacciones. En la Figura 2.5 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 (la firma criptográfica garantiza la autenticidad de la transacción)
2. La transacción se propaga a través de la red distribuida, donde es recibida por cada nodo participante.
3. Cada nodo valida la transacción individualmente, verificando la firma del remitente y asegurándose de que la transacción cumple con la lógica de negocios propia del protocolo blockchain (por ejemplo, en Bitcoin, que el remitente cuente con los fondos a transferir). Una vez validada, la transacción se añade a un pool de transacciones pendientes. En caso de ser inválida, simplemente se ignora y se descarta.
4. Cuando un nodo tiene suficiente cantidad de transacciones en su pool, procede a seleccionar 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

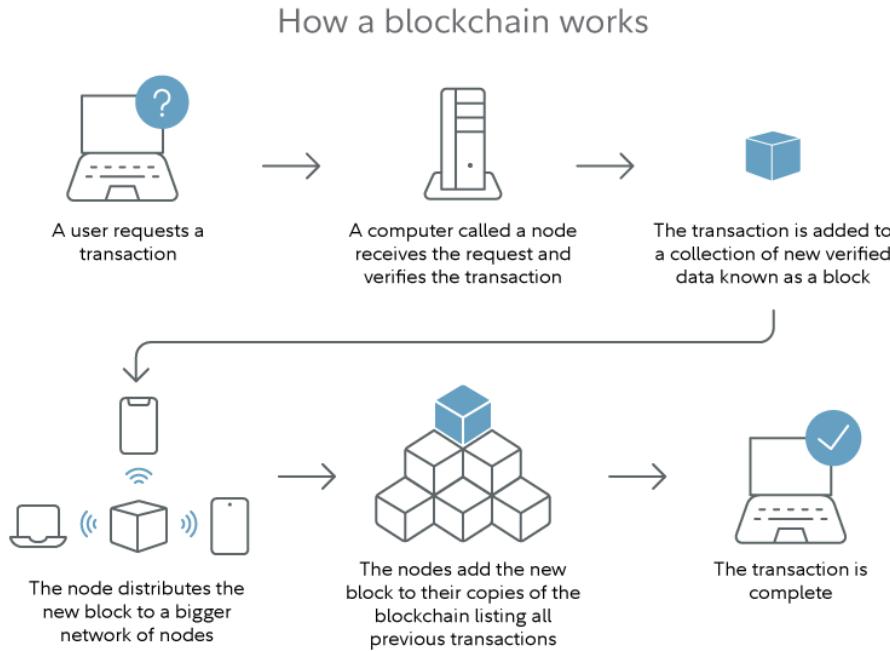


Figura 2.5: Creación de una transacción y un bloque en una blockchain

metadatos (como la marca de tiempo y un nonce para PoW). Luego, el nodo calcula el hash de este nuevo bloque y, según el algoritmo de consenso, realiza el trabajo necesario para garantizar que sea válido. 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, cada nodo lo añade a su copia local de la cadena de bloques y descarta de su pool de pendientes las transacciones incluidas en el bloque. Si el bloque es inválido, es rechazado por cada nodo y no se añade a la cadena.

De esta manera, la cadena de bloques se actualiza de forma 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 [18]. Esta versatilidad ha sido el motor para el desarrollo de aplicaciones más complejas, destacando entre ellas los contratos inteligentes [15], que permiten almacenar programas computacionales en la blockchain, habilitando la automatización segura de procesos como la trazabilidad, la certificación de origen o la valorización de materiales reciclados.

2.1.3. Contratos Inteligentes

A mediados de la década de 1990, cuando el comercio electrónico comenzaba a expandirse y se buscaban mecanismos seguros para realizar transacciones entre personas sin relación previa y sin confianza mutua, el criptógrafo y jurista Nick Szabo propuso el concepto de contrato inteligente [13]. Lo definió como un protocolo informático diseñado para ejecutar de forma automática los términos de un acuerdo, reduciendo la necesidad de intermediarios humanos y de documentos legales tradicionales.

En su concepción original, estos contratos no dependían necesariamente de blockchain. Sin embargo, la aparición de esta tecnología a partir de Bitcoin en 2008 y, especialmente, la introducción de Ethereum en 2015, proporcionó por primera vez una infraestructura distribuida, segura e immutable capaz de materializar la idea de Szabo. Hoy, un contrato inteligente es un programa almacenado en una blockchain que se activa y ejecuta automáticamente cuando se cumplen condiciones predefinidas, garantizando que los acuerdos se lleven a cabo tal como fueron codificados, sin intervención de terceros de confianza [8]. Su función principal es automatizar procesos en entornos descentralizados, reduciendo la dependencia de intermediarios humanos [19] y mejorando la eficiencia operativa en múltiples sectores [15].

Para codificar las reglas de un contrato inteligente, se emplean lenguajes de programación específicos adaptados a cada plataforma blockchain [18]. Un ejemplo prominente es Solidity [20], utilizado en Ethereum, un lenguaje orientado a objetos diseñado específicamente para esta finalidad. Los contratos programados en Solidity pueden interactuar entre sí y con el estado global de la blockchain, habilitando la creación de aplicaciones descentralizadas (conocidas también como dApps, por sus siglas en inglés) que operan de forma autónoma y sin intermediarios en la red [17].

Un contrato inteligente se concibe como un conjunto de reglas y lógica de negocio codificadas. Cada contrato posee un código (las reglas, por ejemplo, en Solidity) y un estado (la información dinámica almacenada en la blockchain) [17]. El código del contrato 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 [17]. 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 2.6 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.

Además de las ventajas generales de la tecnología blockchain, los contratos inteligentes aportan beneficios y desafíos específicos frente a la automatización de procesos basada en sistemas di-

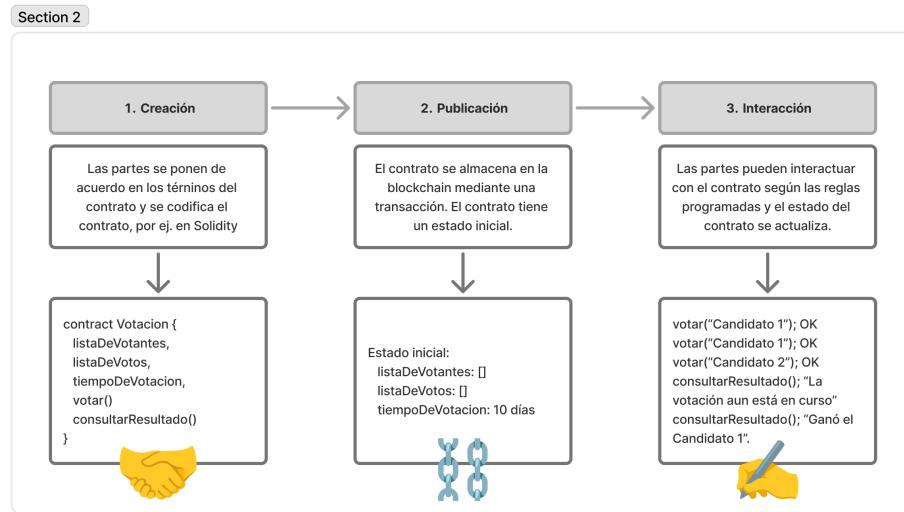


Figura 2.6: Proceso de creación y ejecución de un contrato inteligente

gitales tradicionales. Entre sus principales ventajas, destacan la capacidad de ejecutar acuerdos de forma automática y verificable sin necesidad de intermediarios, la transparencia y auditabilidad del código y de su historial de transacciones, así como la posibilidad de integrarse con otros contratos para crear procesos más complejos. Estas propiedades permiten reducir fricciones operativas, agilizar procesos y ofrecer garantías criptográficas de que las reglas se cumplen tal como fueron definidas.

Sin embargo, los contratos inteligentes enfrentan limitaciones inherentes a las infraestructuras blockchain, principalmente en términos de escalabilidad [21]. 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 [20]. 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, 20].

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 [20], su desarrollo robusto y seguro representa un desafío activo que abarca múltiples dominios de la computación: desde la teoría de lenguajes formales [22] y la arquitectura de sistemas distribuidos, hasta la verificación de software, la criptografía aplicada y la integración de datos externos confiables [20]. Debido a la aparición 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 [18, 23]. En la actualidad, los contratos inteligentes 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 [24]. Si bien representan una tecnología prometedora, aún se encuentran en una etapa incipiente, lo que implica la existencia de numerosos aspectos por perfeccionar [20]. 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.

2.1.4. Desafíos y Oportunidades

Las características inherentes de la blockchain, detalladas previamente, se traducen en una serie de ventajas que la distinguen de tecnologías tradicionales. La descentralización propia de su diseño y la consecuente eliminación de intermediarios resultan en una mayor confianza [25] y eficiencia operativa al prescindir de autoridades centrales [24]. La arquitectura basada en registros inmutables garantiza transparencia y trazabilidad completa [24], permitiendo un historial verificable de cualquier activo o evento, lo cual es crucial para casos de uso como certificación [18], logística [18, 25] y gestión de residuos [8]. La inmutabilidad de los datos, reforzada por la seguridad criptográfica, asegura la integridad de la información [15] y una resistencia robusta a manipulaciones maliciosas y puntos únicos de falla [18]. Además, la capacidad de automatización de aplicaciones mediante contratos inteligentes optimiza la eficiencia y confiabilidad operativa al ejecutar condiciones lógicas de forma autónoma [18]. 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 [16]. 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 [16]. Otro reto importante es la interoperabilidad limitada, que dificulta la integración fluida entre distintas plataformas blockchain con infraestructuras externas preexistentes [16]. En entornos públicos, la privacidad es una preocupación, ya que, aunque los usuarios pueden operar de manera seudónima, la visibilidad total de las transacciones en la cadena puede comprometer datos sensibles [26, 27]. 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 [26]. 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 [20]. 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 [20].

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, 16, 20]. En este contexto de evolución y superación de barreras, la tecnología blockchain ha demostrado su potencial para transformar diversos sectores y abarcar numerosos casos de uso.

En el sector financiero, blockchain ha generado disruptión mediante soluciones para pagos directos (con las llamadas criptomonedas), emisión de bonos, transferencias internacionales y operaciones en mercados de capital [18]. Instituciones como Santander y la Bolsa de Comercio de Santiago han adoptado esta tecnología para simplificar transacciones, automatizar registros y eliminar intermediarios [18]. 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 desde sus comienzos con Bitcoin, la tecnología blockchain ha demostrado ser versátil y aplicable a una amplia gama de sectores, cada uno con sus propias necesidades y desafíos. Un conjunto de variados casos de uso evidencia 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 distintas áreas del desarrollo económico, social y tecnológico.

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 [23]. Iniciativas como la European Blockchain Partnership buscan establecer una infraestructura digital pública para servicios intergubernamentales [26]. En el ámbito de la salud, blockchain permite almacenar registros médicos de manera segura y distribuida, mejorando la interoperabilidad entre instituciones y permitiendo a los pacientes un mayor control de su historial médico [15]. Esta tecnología también se utiliza 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 se debe garantizar cumplimiento normativo [23]. En otros rubros, como la educación, esta tecnología se utiliza para 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 académicos [26]. En IoT, facilita la recolección y gestión segura de datos en tiempo real [15]. En contabilidad y auditoría, posibilita libros contables distribuidos con transparencia total y reducción de fraudes [18]. A su vez, también se está utilizando blockchain para crear mercados para el comercio de energía entre pares, mejorando la gestión de certificados de energías renovables y optimizando la trazabilidad de producción y consumo energético [15, 23].

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 [24, 28]. Empresas como IBM, Maersk y FedEx han implementado soluciones blockchain para monitorear inventarios, registrar pagos y reducir disputas logísticas

[16]. 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 [18]. 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 [15].

Dentro de modelos de economía circular, blockchain se posiciona como un facilitador 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 manera más eficiente mediante el uso de contratos inteligentes que automatizan verificaciones, recompensas e interacciones entre actores de la cadena [7]. Asimismo, han surgido propuestas innovadoras como la generación de pasaportes digitales de productos y esquemas de incentivos sostenibles, promoviendo hábitos de consumo responsables y nuevos modelos de negocio circulares [7].

La necesidad de trazar el flujo de materiales, certificar la autenticidad de los procesos productivos y garantizar la gestión responsable 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 [24, 25]. A continuación, se analizará con mayor profundidad el uso de blockchain para trazabilidad de materiales en la cadena de suministros y para la implementación de estrategias de economía circular.

2.2. Economía Circular

La economía circular es un enfoque alternativo al modelo económico lineal tradicional, que nace con el objetivo transformar de manera sostenible la forma en que la sociedad produce, consume y gestiona los recursos naturales.

Desde la Revolución Industrial, la economía global ha operado principalmente bajo un modelo lineal de “extraer, producir y consumir”, caracterizado por la explotación de recursos naturales y la generación masiva de residuos [29]. En este modelo económico, los recursos son extraídos de la naturaleza, transformados en productos, consumidos y finalmente desechados al terminar su vida útil. Este enfoque, aunque ha impulsado un crecimiento económico mundial sin precedentes, ha generado sobreexplotación y degradación de ecosistemas. La deforestación, pérdida de biodiversidad, contaminación del agua, generación masiva de residuos y escasez de recursos no renovables son algunas de las consecuencias negativas de este enfoque extractivo a gran escala. A medida que la población mundial y la demanda de recursos continúan creciendo, la insostenibilidad de este modelo a largo plazo se hace cada vez más evidente [3].



Figura 2.7: Comparación entre la economía lineal y la economía circular

En contraste con la economía lineal, la economía circular propone 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 [30]. La economía circular propone un cambio radical de paradigma, al concebir los sistemas productivos y de consumo como ciclos cerrados. 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. La diferencia estructural entre la economía lineal y la economía circular se hace evidente al ilustrar el flujo de recursos en ambos modelos, como se muestra en la Figura 2.7.

En el enfoque lineal, la cadena de suministro de materiales 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, no contempla mecanismos para reincorporar los productos al ciclo productivo una vez finalizada su vida útil y, en consecuencia, genera una creciente acumulación de residuos. En contraste, la economía circular redefine el papel de la cadena de suministros, transformándola en una red cerrada y regenerativa. Con este enfoque, la cadena se vuelve más dinámica e interdependiente, integrando bucles de retroalimentación entre los diferentes actores de la cadena de valor, incluyendo a consumidores, productores, proveedores y gestores de residuos.

A nivel sistémico, la economía circular se concibe como una evolución hacia un sistema más integrado, resiliente y sostenible. Su implementación es paulatina, en forma de transición desde el modelo lineal predominante hacia un modelo circular. Esta transición requiere una transformación estructural en los sistemas productivos en múltiples niveles: diseño de productos, procesos logísticos, distribución y gestión del fin de vida útil. Entre los habilitadores clave de este proceso de transición, 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.

En la actualidad existen desafíos culturales, normativos y tecnológicos que dificultan la implementación de la economía circular a gran escala. La transición de los sistemas productivos requiere inversión en infraestructura, marcos regulatorios adecuados y políticas de incentivos claros. Asimismo, implica repensar la educación y la formación de trabajadores para adaptarse



Figura 2.8: Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas

a nuevas dinámicas laborales. En muchos contextos, como América Latina y el Caribe, también se han identificado limitaciones institucionales y de gobierno que deben ser abordadas para permitir una adopción efectiva del modelo.

Es importante destacar que esta transición ya se encuentra en marcha. Numerosos 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.

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 y la Ley Europea del Clima 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 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, se identifican un conjunto de 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.¹ 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.² 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.³ 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.⁴ 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.

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 en la última década. 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. La estrategia integra medidas normativas, educativas, tecnológicas y financieras, orientadas a fortalecer la sostenibilidad en toda la cadena de producción y consumo. Promueve activamente el uso de tecnologías limpias, la gestión sostenible de recursos, y la incorporación de criterios ambientales en compras públicas, reconociendo el rol central de la trazabilidad como mecanismo para garantizar la transparencia, eficiencia y cumplimiento normativo en los sistemas productivos y sus cadenas de suministro.

Estas políticas dejan ver que la transformación hacia una economía circular no puede pensarse sin una reconfiguración 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

¹ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>

² <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>

³ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>

⁴ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>

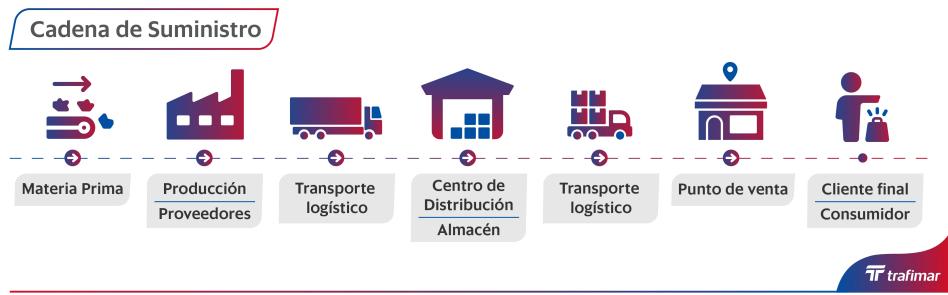


Figura 2.9: Componentes de una cadena de suministro

tan monitorear, verificar y optimizar el flujo de materiales a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos. En la siguiente sección se 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 un modelo económico circular.

2.2.2. Cadena de suministro

En el contexto de la economía circular, la cadena de suministro asume una nueva lógica de funcionamiento. Pasa de ser una secuencia finita de pasos que culminan con el consumo y disposición del producto, a transformarse en un sistema cíclico, en el cual los productos son diseñados para permanecer en uso el mayor tiempo posible y ser reutilizados, reacondicionados o reciclados.

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 de un producto al consumidor final. Este sistema complejo involucra a múltiples actores: proveedores, fabricantes, distribuidores, comerciantes, consumidores y, en el caso del modelo circular, gestores de residuos y autoridades regulatorias. Su objetivo es garantizar que los bienes y servicios se produzcan y entreguen de manera eficiente, segura y rentable.

A lo largo de los años, las cadenas de suministro se han establecido para maximizar la eficiencia y reducir costos en la producción de productos. Con este objetivo claro, se ha dividido el proceso en etapas y se aplican herramientas, procesos y tecnologías diversas para optimizar cada una de ellas, desde la adquisición de materias primas hasta la distribución final. Sin embargo, la maximización de la eficiencia en este modelo lineal, sin preocuparse por el destino del producto luego de su uso, ha generado efectos secundarios adversos en el medioambiente que, como ya se mencionó, han llevado a la necesidad de un modelo sostenible en el tiempo.

Transicionar una cadena de suministros desde un modelo lineal hacia uno circular implica una inversión en rediseño de productos, procesos y creación de nuevas relaciones y colaboraciones entre los actores involucrados. En muchos casos los distintos actores de la cadena lo perciben como una inversión sin retorno inmediato o como un costo adicional, lo que dificulta su adopción. Sin embargo, las políticas sostenibles y regulaciones previamente mencionadas,



Figura 2.10: Ejemplo de trazabilidad como herramienta transversal en la cadena de suministro de envases de vino

entre otras, están impulsando a las empresas a adoptar prácticas circulares, no solo por responsabilidad social, sino también por la presión del mercado y de las autoridades reguladoras.

Para diseñar una cadena de suministros circular, la trazabilidad se posiciona como la herramienta que permite mantener y mejorar la eficiencia y costos, mientras que permite incorporar al final de la cadena las etapas de disposición, reciclaje y reutilización de materiales. Sin una trazabilidad robusta en cadenas donde intervienen múltiples organizaciones y tecnologías, es difícil garantizar que los materiales se manipulen de manera adecuada, se traten, se reciclen y efectivamente se reincorporen al ciclo productivo.

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. 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. Por ejemplo, aplicando trazabilidad en la producción de vino se puede conocer la parcela de origen de la uva, la fecha de la vendimia y el proceso de añejamiento, permitiendo al consumidor verificar su autenticidad y al productor identificar rápidamente cualquier problema en un lote. Otro ejemplo frecuente es la trazabilidad de residuos peligrosos, que permite verificar que la disposición final del residuo se hizo correctamente para evitar riesgos de salud o ambientales. La información permite verificar la autenticidad del producto, asegurar estándares de calidad, cumplimiento normativo, eficiencia operativa y sostenibilidad ambiental. Procesos de trazabilidad establecidos permiten también identificar riesgos y oportunidades de mejora en la cadena, permitiendo optimizar la logística, reducir costos y riesgos asociados a errores, fraudes o contaminaciones, y mejorar la capacidad de respuesta ante incidentes o fallas. En 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 obstante, la implementación de trazabilidad en la cadena de suministro 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. 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 mediante etiquetas físicas; los sensores IoT, que capturan datos en tiempo real sobre condiciones ambientales o de transporte; los sistemas ERP y de gestión logística digitales, que centralizan y organizan la información operativa; y, más recientemente, la tecnología blockchain se está posicionando como solución para unificar a todos los actores de la cadena aportando una nueva capa de transparencia entre etapas y resolviendo problemas de confianza entre los diferentes actores.

La tecnología blockchain en la cadena de suministros permite registrar cada transacción o evento de la cadena en una base de datos digital descentralizado e inalterable. Esto garantiza que todos los actores tengan acceso a un historial común y verificable, reduciendo la necesidad de intermediarios y 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. El uso de blockchain en este contexto aporta un aumento significativo en la seguridad, transparencia, precisión de datos, eficiencia, responsabilidad y confianza entre actores. Esta tecnología ya se está utilizando para trazabilidad en diversos sectores como la agricultura, alimentos, industria textil y medioambiente. 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. Además, es posible combinar tecnología Blockchain con IoT y otros sistemas digitales ya implementados en la cadena de suministros. Esta combinación puede proporcionar soluciones aún más eficientes para la cadena de suministro, automatizando la recopilación de datos confiables y aumentando los beneficios para las partes interesadas.

La trazabilidad basada en blockchain ya se está aplicando en la cadena de suministros de diversos sectores con el objetivo de transicionar a una economía circular. Su adopción aún está en desarrollo, pero su potencial para optimizar la trazabilidad y la sostenibilidad en la gestión de residuos es ampliamente reconocido. Aplicar trazabilidad para la economía circular permite unir la producción con el reciclaje, posibilitando no solo verificar el cumplimiento de estándares ambientales y sociales en gestión de residuos, sino también optimizar el uso de recursos, reducir desperdicios y fomentar la reutilización y el uso de materiales reciclados de calidad en nuevos productos. A continuación, se explorará cómo se articula el proceso de producción y reciclaje en la economía circular, y cómo la trazabilidad digital puede potenciar este ciclo.

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. En este esquema, la cadena de suministros del proceso productivo incluye la gestión de



Figura 2.11: Ciclo productivo de la economía circular

residuos y la reincorporación de materiales reciclados en nuevos ciclos productivos.

El proceso de producción comienza propiamente con 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. Tras su elaboración, los productos son distribuidos a través de canales logísticos que buscan optimizar los costos e impacto ambiental del transporte y almacenamiento.

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 (y ya no pueden ser reutilizados), se convierten en residuos que deben ser recolectados, transportados, clasificados y reciclados o reacondicionados. Este proceso, conocido de forma genérica como “reciclaje” (sin distinguir si el destino final es reacondicionamiento o 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 de materiales y brindar transparencia en la cadena. En el primer paso del proceso de reciclaje, los residuos son transportados a instalaciones

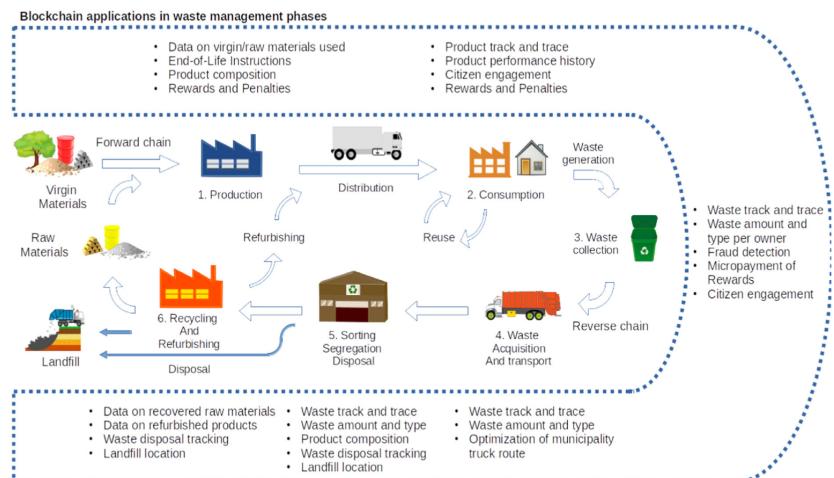


Fig. 2. Representation of the macro phases of a waste management system (from 1 to 6) and the related applications of the blockchain technology, in a circular economy model.

Figura 2.12: Usos de la tecnología blockchain en las etapas de la economía circular [7]

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

El esquema de la Figura 2.12 ilustra las distintas aplicaciones posibles de la tecnología blockchain en cada etapa del ciclo completo de economía circular. En este sistema ilustrado, la tecnología blockchain conecta las etapas en un flujo de información unificada, formando un sistema de trazabilidad digital que permite el seguimiento de los materiales desde su origen hasta su reincorporación al sistema o disposición final.

El proceso de reciclaje varía en complejidad dependiendo del material. 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 presentan un alto valor por su contenido en metales preciosos, aunque requieren procesos especializados para su desmontaje. Los plásticos representan un desafío por su heterogeneidad, pero pueden reciclar- se eficientemente si se rediseñan los envases y se simplifican sus composiciones. Los residuos orgánicos son compostables o pueden aprovecharse energéticamente en caso de no mezclarse con residuos no reciclables. 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.

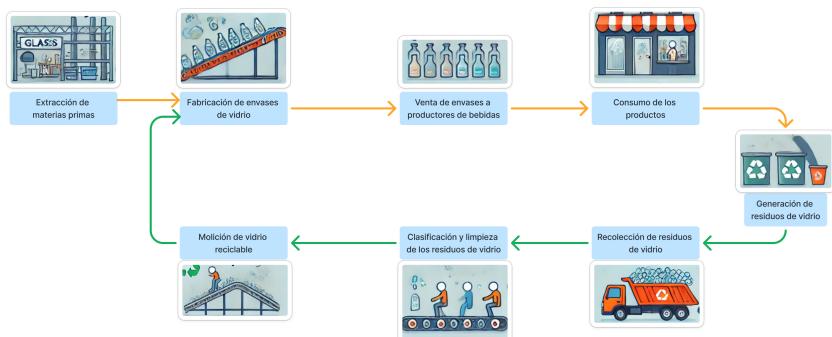


Figura 2.13: Ciclo de vida de envases de vidrio en un modelo de economía circular

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 características físicas y químicas, permitiendo su reintegración al ciclo productivo tantas veces como sea necesario. En la Figura 4.2 se muestra el ciclo de vida del vidrio en un modelo de economía circular, que abarca desde la extracción de materias primas hasta su reincorporación como materia prima en nuevos productos, exemplificando el caso de los envases de vidrio.

El proceso comienza con el diseño del producto, etapa clave para asegurar su durabilidad, reutilización y posterior reciclabilidad. Por ejemplo, en la producción de envases de vidrio, en esta etapa se deciden aspectos como color, forma y composición del envase para optimizar durabilidad, reciclabilidad y aspectos estéticos. Luego del diseño, 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 y demanda de materiales vírgenes. La especial reciclabilidad del vidrio se hace visible en esta etapa, ya que la calidad del vidrio resultante es la misma sin importar la proporción de calcín y de materiales vírgenes utilizados (característica que, por ejemplo, no es igual para el plástico), por lo que los productores de vidrio no encuentran pérdidas potenciales al utilizar materiales reciclados. Luego, los envases fabricados son distribuidos, utilizados para embotellar bebidas (por ejemplo, vino) y adquiridos por los consumidores, quienes (luego de consumir su contenido) pueden reutilizarlos, descartarlos (como basura común) o ingresarlos a circuitos de reciclaje. Para el correcto reciclaje del vidrio (y otros materiales) es importante el circuito de recolección diferenciada, que evita que el vidrio reciclable se mezcle con otros materiales que lo contaminen e imposibiliten su reciclaje. Los residuos de vidrio son recolectados por empresas especializadas o por los propios consumidores, quienes pueden depositarlos en contenedores específicos para su pos-

terior tratamiento. Una vez recolectado, el vidrio es transportado a plantas de reciclaje donde se clasifica. En la clasificación se separa al vidrio de otros materiales reciclables que puedan haber sido mezclados y se separan los distintos tipos de vidrio (por ejemplo, por color), ya que algunas características, como el color y la composición química, son relevantes para el posterior uso del vidrio reciclado. Luego, el vidrio es triturado y limpiado para eliminar impurezas, como etiquetas o restos de alimentos, dando como resultado lo que se conoce como calcín. Esta etapa es crucial, ya que la pureza del material reciclado influye directamente en la calidad del vidrio producido. Finalmente, el calcín se funde nuevamente y se convierte en materia prima para nuevos envases, cerrando así el ciclo de vida del vidrio. Este proceso de reciclaje puede repetirse indefinidamente, lo que lo convierte en un modelo ejemplar de economía circular.

La cadena de suministros y reciclaje de envases de vidrio tiene una importancia estratégica en la provincia de Mendoza, 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: Verallia⁵. 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 en la provincia.

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, transparencia 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 recicla-

⁵ <https://ar.verallia.com/>

je, consolidando sistemas logísticos eficientes, ciudadanos comprometidos y políticas públicas robustas que garanticen su sostenibilidad a largo plazo. En este contexto, la incorporación de sistemas basados en tecnología blockchain ofrece la posibilidad de reforzar la trazabilidad a lo largo de toda la cadena de suministro, facilitando un uso más eficiente y seguro de la información en cada etapa. Esta integración no solo optimiza la operación de cada parte involucrada, sino que también impulsa la adopción de prácticas de economía circular y el uso de blockchain en la región. Tomando esta iniciativa como base para el proyecto, a continuación se detallan proyectos y trabajos previos que han explorado la trazabilidad y el reciclaje de vidrio, así como otras iniciativas vinculadas a la economía circular y la sostenibilidad, las cuales aportan soluciones innovadoras para la gestión de residuos y la promoción de prácticas responsables en la cadena de suministro.

2.3. Proyectos y Trabajos Relacionados

La tecnología blockchain se ha posicionado como una herramienta poderosa para mejorar la trazabilidad en cadenas de suministro, ofreciendo registros inmutables y transparentes que permiten rastrear el movimiento de productos desde su origen hasta el consumidor final. Esta característica fortalece la confianza entre los actores y favorece la economía circular, al garantizar la autenticidad e integridad de la información. Numerosos proyectos, tanto comerciales como académicos, han explorado su aplicación en la gestión de residuos y en la trazabilidad de materiales. A continuación, se presentan casos representativos, agrupados por tipología, con sus características, beneficios y limitaciones, a fin de identificar lecciones aplicables al desarrollo de un sistema de trazabilidad para el vidrio.

Entre las soluciones comerciales destaca Signeblock (España) [10] con su producto Gouze, que permite registrar cada paso de los procesos productivos y de distribución en blockchain, ofreciendo acceso personalizado a la información mediante un gestor documental unificado. Incorpora digitalización y notarización de procesos, certificación blockchain para garantizar inalterabilidad y códigos QR para compartir información del proceso con consumidores. Sus principales limitaciones se relacionan con la interoperabilidad con sistemas existentes y la resistencia organizacional a compartir datos entre actores. Otra solución relevante es Circularise (Países Bajos) [circularise2024], plataforma que ofrece pasaportes digitales de productos para trazabilidad de extremo a extremo y el intercambio seguro de datos. Para cada producto registra origen, composición y datos ambientales respaldados por blockchain, facilitando cálculo de huella de carbono. Integra con sistemas ERP y promueve un enfoque abierto e interoperable, utilizando una blockchain pública descentralizada para asegurar credibilidad. Por su parte, Circulor (Reino Unido) [circulor2024] es una plataforma que proporciona trazabilidad completa desde la fuente hasta el consumidor final, ayudando a demostrar procedencia responsable, reducir emisiones y gestionar riesgos. Se integra con plataformas empresariales mediante APIs, rastrea materias primas y controla el flujo de materiales en la producción. En conjunto, estas plataformas evidencian la viabilidad de blockchain para trazabilidad industrial

a gran escala, integrando datos ambientales y de origen. No obstante, su enfoque en cadenas de alto valor agregado plantea dudas sobre su adaptación a cadenas de reciclaje de vidrio con márgenes reducidos y mayor fragmentación de actores.

En el ámbito académico, Baralla et al. en su trabajo “Waste Management: A Comprehensive State of the Art about the Rise of Blockchain Technology” [7] exploran la trazabilidad de residuos, prevención de fraude e incentivos mediante contratos inteligentes. El modelo planteado permite gestionar tanto la cadena directa (producción y consumo) como la inversa (reciclaje), pero señala la necesidad de enfocarse en categorías específicas de residuos y advierte sobre desafíos de escalabilidad, privacidad y rendimiento en blockchains públicas.

Otro caso académico es el Modelo ZERO de Sandhiya et al. [sandhiya2020investigating] para reciclaje de plásticos, que integra códigos QR, IoT y blockchain para proveer un sistema de trazabilidad inmutable y brindar incentivos para reciclar a los consumidores. En este modelo, cada producto lleva un QR único grabado molecularmente, evitando manipulaciones, y se utilizan “bines inteligentes” que aceptan solo plásticos válidos, con verificación y clasificación automática en máquinas de reciclaje. El modelo ofrece incentivos monetarios a los consumidores y busca mejorar calidad, transparencia y costos del reciclaje. De forma complementaria, Bhubalan et al. [BHUBALAN2022113631] proponen integrar blockchain con marcadores moleculares para rediseñar químicamente plásticos y lograr un reciclaje cerrado. Aunque reconocen su potencial técnico, cuestionan la rentabilidad para plásticos de un solo uso debido a los altos costos de implementación. Estos trabajos demuestran que blockchain puede integrarse con tecnologías de identificación física para reforzar la trazabilidad, pero el nivel de infraestructura requerida puede limitar su adopción en contextos con recursos más restringidos, como el reciclaje de vidrio en entornos municipales o regionales. A su vez, la lógica de incentivar al consumidor mediante un mecanismo verificable y confiable, presente en el Modelo ZERO, encuentra un ejemplo real y ampliamente adoptado en el sistema PFAND en Alemania. Este sistema de Depósito y Reembolso (DRS) no emplea blockchain, pero materializa en la práctica el principio fundamental de estos trabajos: ofrecer una recompensa directa y comprobable para asegurar que el material recicitable retorne a la cadena de valor.

La efectividad de este enfoque se confirma con múltiples experiencias regionales e internacionales, que demuestran que la incorporación de incentivos tangibles es un factor clave para fomentar hábitos de reciclaje en los consumidores e impulsar el desarrollo de una economía circular. En España, Reciclos [reciclos2024] ofrece recompensas por el reciclaje de latas y botellas. En Argentina, Colmena [colmena2024] premia a los usuarios con la criptomoneda Jelly-Coin, mientras que Greenly Points [greenlypoints2024] en Mendoza otorga puntos canjeables por beneficios locales al entregar residuos reciclables en puntos verdes. A nivel global, Plastic Bank en Canadá utiliza la tecnología blockchain para ofrecer criptomonedas como incentivo a los recolectores de plástico en regiones empobrecidas, demostrando cómo las recompensas digitales pueden impulsar la participación y aumentar la transparencia en el flujo de residuos. Estas experiencias subrayan que, al ofrecer valor a cambio del material reciclable, se logra una mayor involucración ciudadana y se contribuye de manera significativa a cerrar los ciclos de

vida de los productos.

Los proyectos y modelos analizados evidencian el vasto potencial de la tecnología blockchain para transformar la gestión de residuos y las cadenas de suministro hacia modelos más sostenibles y circulares. Desde sistemas de incentivos simples hasta plataformas complejas de trazabilidad de extremo a extremo, la inmutabilidad, transparencia y descentralización de blockchain ofrecen soluciones prometedoras. No obstante, se identifican puntos débiles recurrentes en su aplicación actual, que incluyen la necesidad de un mayor desarrollo técnico y madurez de la tecnología, la superación de barreras organizacionales (como la reticencia a compartir datos), los altos costos de implementación inicial, problemas de escalabilidad en redes públicas y el consumo energético en ciertos algoritmos de consenso, así como la aún incipiente regulación y falta de estándares comunes. Es en este contexto de desafíos y oportunidades donde se posiciona el presente trabajo de tesis. A pesar de los avances y el reconocimiento de la importancia del reciclaje de vidrio, especialmente en regiones como Mendoza con una fuerte industria vitivinícola, se observa una fuerte desconexión entre los actores de la cadena de suministro, baja tasa de recuperación (con escasez de métricas oficiales) y débiles políticas de incentivos. Los programas existentes en Argentina, si bien son un paso adelante, aún carecen de mecanismos obligatorios o premiantes que aseguren la masividad de la recolección diferenciada y no garantizan por sí mismos el reciclaje efectivo del material.

Este trabajo busca abordar estas brechas mediante el desarrollo de un prototipo de sistema de trazabilidad del vidrio basado en tecnología blockchain. Enfocado específicamente en la cadena de suministro del vidrio en el contexto mendocino, con el objetivo de integrar a todos sus actores del proceso, desde la producción hasta su reintroducción en la cadena de valor. Este sistema se propone permitir el registro y verificación de cada etapa del ciclo de vida del vidrio, mientras que, a su vez, busca superar las limitaciones identificadas en los proyectos preexistentes al ofrecer una solución que facilite la valorización del vidrio, promoviendo una economía circular más transparente, eficiente y sostenible en la región. En este trabajo se hace énfasis en la usabilidad, la integración de datos relevantes y la demostración de los beneficios tangibles para todos los participantes de la cadena.

3

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para llevar a cabo los objetivos propuestos de este trabajo final es necesario definir una metodología que permita planificar y gestionar las diferentes tareas y recursos de manera ordenada. Por ello, en este capítulo se presentan los diferentes pasos que se ejecutaron para llegar a cumplir los objetivos planteados inicialmente. Primeramente, se hablará sobre la planificación de este trabajo, haciendo hincapié en las actividades necesarias para llevar a cabo el proyecto de forma ordenada y efectiva. Posteriormente, se analizarán distintas metodologías de desarrollo de software, que podrían utilizarse como marco de referencia para la organización de las actividades de desarrollo del prototipo tecnológico, comparando sus características y seleccionando la más adecuada para este trabajo. Finalmente, se describirán las etapas del proceso de desarrollo del prototipo tecnológico, detallando las actividades y resultados esperados en cada una de ellas a partir de la metodología seleccionada.

Definir un plan de trabajo previo al desarrollo del prototipo tecnológico, es una buena práctica que permite establecer una hoja de ruta concisa que sirve de guía orientativa a lo largo de todo el proceso. Un plan de trabajo es un documento que define los objetivos, actividades y recursos necesarios para llevar a cabo un proyecto de manera efectiva. Para este trabajo en particular, se definió un plan que comprende las actividades necesarias para poder desarrollar un prototipo tecnológico basado en blockchain, orientado a la trazabilidad y valorización del vidrio, con el objetivo de contribuir a la economía circular en la región. Este plan sirve de guía para la ejecución de las actividades y la toma de decisiones a lo largo del proyecto, pero es flexible y puede adaptarse a cambios y nuevas necesidades que puedan surgir durante el desarrollo del trabajo. En la Figura 3.1 se ilustran las actividades que conforman el plan de trabajo junto con su duración estimada y secuencialidad. A continuación se detalla el alcance y los objetivos de cada actividad.

Actividad	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9
Actividad A		X							
Actividad B			X						
Actividad C				X					
Actividad D					X				
Actividad E									X

Figura 3.1: Planificación de las actividades del plan de trabajo

- Actividad A: Completar la formación en blockchain y las tecnologías y plataformas relacionadas. Los resultados de esta formación se aplican posteriormente en las etapas de diseño de solución e implementación del prototipo tecnológico (comprendidas en la Actividad D).
- Actividad B: Realizar un estudio pormenorizado del estado actual del arte en todo lo relacionado con blockchain en el campo del reciclado. En particular, la búsqueda se orienta al reciclado de vidrio. Se analizan trabajos de la literatura, así como aplicaciones blockchain orientadas al reciclaje y la cadena de suministro. Los resultados de este estudio se encuentran documentados en el Capítulo 2: Marco Teórico y en los Apéndices D: Entrevista a Verallia y E: Viaje de Investigación.
- Actividad C: Definir los procesos de desarrollo del prototipo, haciendo hincapié en aplicar los fundamentos de la ingeniería de software y planificar de forma concisa y clara. En la Sección 3.1 se describe la metodología elegida para el proceso de desarrollo del prototipo tecnológico.
- Actividad D: Desarrollar la aplicación prototipo. Esta actividad comprende las diferentes etapas del proceso de desarrollo de software, desde análisis de requerimientos, diseño, implementación, evaluación, corrección del prototipo y despliegue. Todos estos pasos se deben ejecutar siguiendo la metodología específica elegida para este trabajo durante la Actividad C, teniendo en cuenta las características particulares del modelo de proceso elegido, con el fin de llevar a cabo el objetivo general de este trabajo.
- Actividad E: Documentar en una memoria el proceso ejecutado y los resultados del trabajo realizado.

En la siguiente sección, se hará una comparación de las principales metodologías de desarrollo de software disponibles en la actualidad para seleccionar la más adecuada para este trabajo, teniendo en cuenta las características del proyecto y el equipo de trabajo.

3.1. Metodología de Desarrollo

En la actualidad, existen diversas metodologías de desarrollo de software que permiten planificar y ordenar el proceso de desarrollo de software para lograr obtener resultados que cumplan con los objetivos del proyecto haciendo un uso eficiente de los recursos disponibles. Cada metodología tiene sus propias características, ventajas y desventajas, y la elección de una me-

todología apropiada depende de las necesidades específicas del proyecto, el equipo de trabajo y los objetivos a alcanzar.

El objetivo principal de esta sección es realizar un análisis detallado de las principales metodologías de desarrollo de software conocidas, evaluando sus características y su aplicabilidad en función de los requerimientos y condiciones particulares del trabajo de tesis. Para ello, se realiza un análisis de las principales metodologías de desarrollo de software vigentes en la industria del software, cada una con enfoques y principios diferentes, pero con un mismo fin: facilitar el desarrollo de un software funcional que cumpla con los objetivos planteados. Como parte del análisis, se compara cada metodología en función de varios criterios relevantes para este trabajo, como la definición de requerimientos, la planificación de actividades, el alcance del prototipo, el tamaño del equipo, la frecuencia de entrega de resultados y la flexibilidad frente a cambios de requerimientos.

Las metodologías de desarrollo de software pueden clasificarse en dos grandes categorías: los modelos prescriptivos o tradicionales, que ofrecen una estructura y un orden definidos para maximizar la previsibilidad y la eficiencia en entornos estables, y los modelos evolutivos o ágiles, que se adaptan mejor a las realidades dinámicas del desarrollo de software moderno al permitir la iteración continua y la flexibilidad frente a los cambios. A continuación, se describe cada una de las principales metodologías consideradas para este trabajo.

Dentro de los enfoques tradicionales, el modelo en cascada es el más conocido, un modelo secuencial y lineal donde las fases del proyecto deben completarse en un orden estricto, desde la especificación de requerimientos hasta el despliegue y mantenimiento. Cada una de las etapas del proceso debe ser completada satisfactoriamente antes de avanzar a la siguiente. Si bien su rigidez lo hace ideal para proyectos con requisitos estables, esta misma característica le impide adaptarse a cambios, lo que puede llevar a costos adicionales y retrasos si surgen nuevas necesidades o se descubren errores durante el desarrollo. Por esta razón, el modelo en cascada es ideal para proyectos donde los requerimientos son bien conocidos y estables desde el inicio.

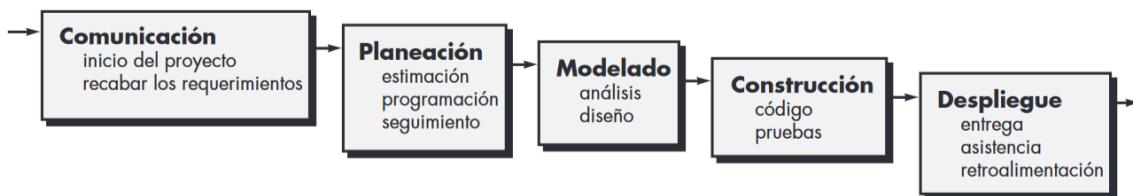


Figura 3.2: Modelo en cascada. Fuente: [pressman2010ingenieria]

Otra opción considerada dentro de los enfoques tradicionales es el modelo en V, una extensión del modelo en cascada que empareja cada fase de desarrollo con una fase de prueba correspondiente. Esta estructura en forma de "V" busca una verificación sistemática en cada etapa, con el fin de detectar y corregir errores de forma temprana y minimizar riesgos al final del proyecto. A medida que el proyecto avanza hacia abajo en la primera mitad de la V, los requisitos y componentes del sistema son detallados cada vez más. Una vez completada la codificación,

el proceso asciende por el lado derecho de la V, donde cada etapa de desarrollo anterior es validada a través de pruebas específicas. Este modelo es apropiado para proyectos que requieren altos estándares de calidad y donde los errores tempranos podrían tener consecuencias costosas o críticas. Aunque este modelo comparte algunas limitaciones con el modelo en cascada, como la dificultad para adaptarse a cambios significativos una vez que el proyecto está en curso, su estructura permite una mejor gestión del riesgo y calidad mediante la validación constante de cada etapa del desarrollo.

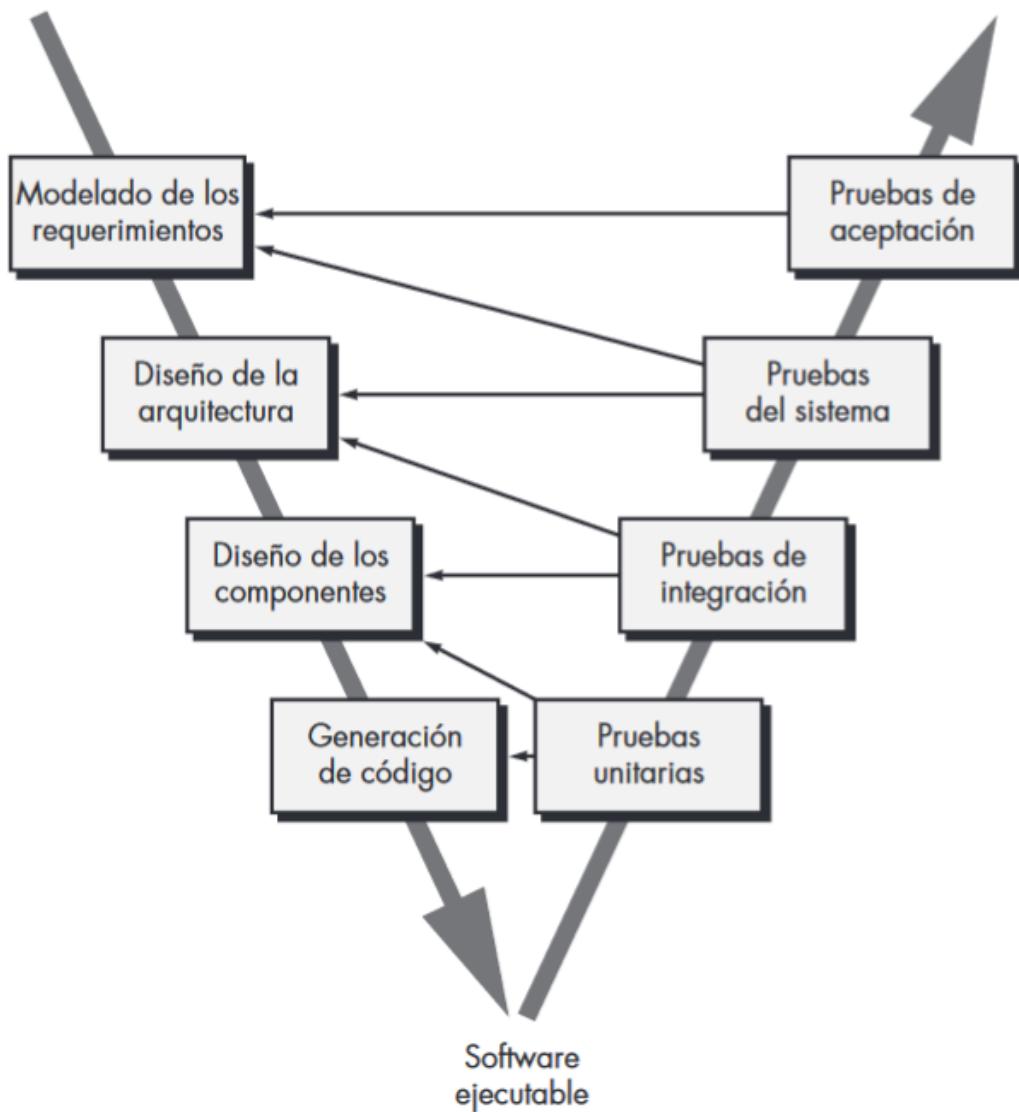


Figura 3.3: Modelo en V. Fuente: [pressman2010ingenieria]

Dentro del conjunto de modelos evolutivos, el modelo espiral es un enfoque destacado por combinar la iteración flexible de los prototipos con la rigurosidad sistemática del modelo en cascada [37]. Se distingue por su enfoque cíclico, diseñado para permitir el crecimiento incremental de un sistema mientras se gestionan y reducen los riesgos. La flexibilidad de esta metodología reside en su capacidad para adaptarse continuamente a las necesidades cambiantes del proyecto a través de iteraciones sucesivas. En cada ciclo de la espiral, el proceso contempla

la planificación, la identificación de riesgos, el desarrollo y la evaluación de un prototipo o una sección del software, para luego planificar la siguiente iteración. Este enfoque iterativo permite a los desarrolladores y actores involucrados entender mejor los riesgos y reaccionar ante ellos en cada etapa del proyecto. El modelo espiral es particularmente útil en entornos dinámicos y en constante cambio, aunque su principal desafío radica en la necesidad de una evaluación continua y experta de los riesgos, lo que puede aumentar la complejidad de la gestión del proyecto.

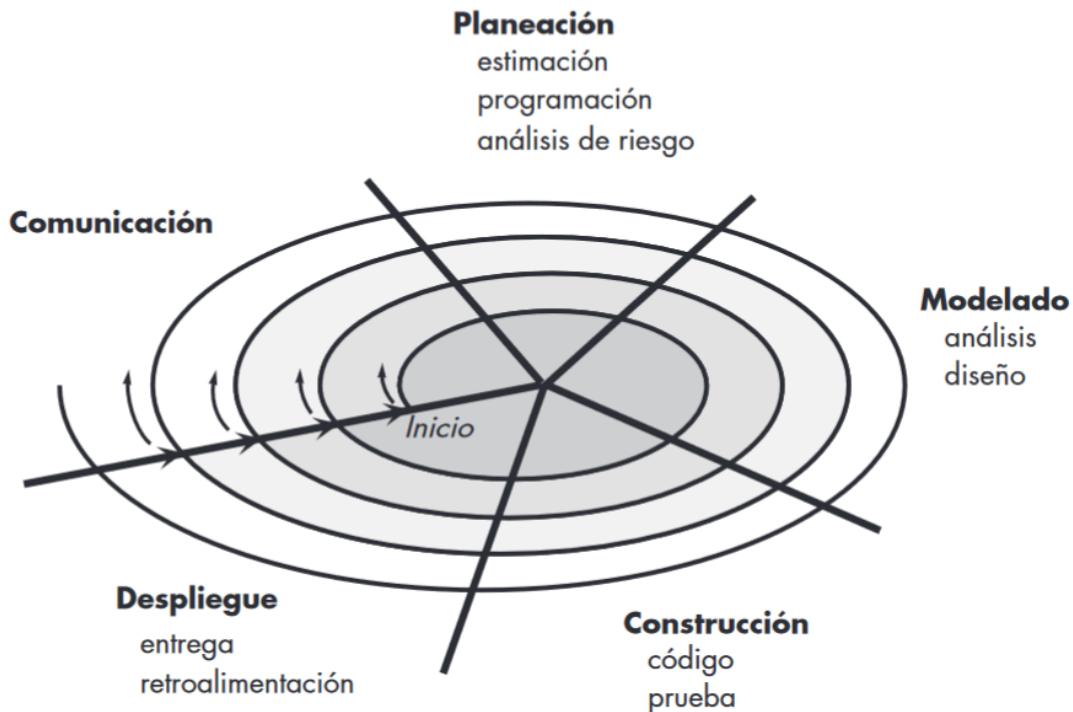


Figura 3.4: Modelo espiral. Fuente: [37]

Por otro lado, Scrum es una metodología ágil de desarrollo de software que se alinea con los principios del Manifiesto Ágil, promoviendo la flexibilidad, la colaboración continua y la adaptabilidad a los cambios [37]. Este modelo estructura el desarrollo en ciclos cortos y repetitivos denominados sprints, típicamente de dos semanas. Al comenzar cada sprint, se seleccionan las tareas que se abordarán de la lista de pendientes del proyecto. Durante un sprint, no se permiten cambios en los requisitos, lo que proporciona estabilidad mientras el equipo aborda las tareas seleccionadas. El proceso incluye reuniones diarias breves, que ayudan a identificar y resolver problemas rápidamente y fomentan la autogestión del equipo. Al final de cada sprint, se presenta una demostración del incremento de software desarrollado, lo que facilita la retroalimentación hacia el equipo para influir en los siguientes incrementos. Scrum es particularmente efectivo en entornos donde la incertidumbre es alta, ya que permite la iteración continua y la evaluación constante de riesgos, haciendo que el proyecto se adapte a las expectativas de las distintas partes interesadas y a las circunstancias cambiantes. A su vez, su enfoque en la colaboración y la comunicación constante, hace que esta metodología sea apro-

piada para equipos medianos y grandes, donde la coordinación es importante y las reuniones diarias no representan una sobrecarga, sino una oportunidad para alinear esfuerzos y resolver impedimentos.

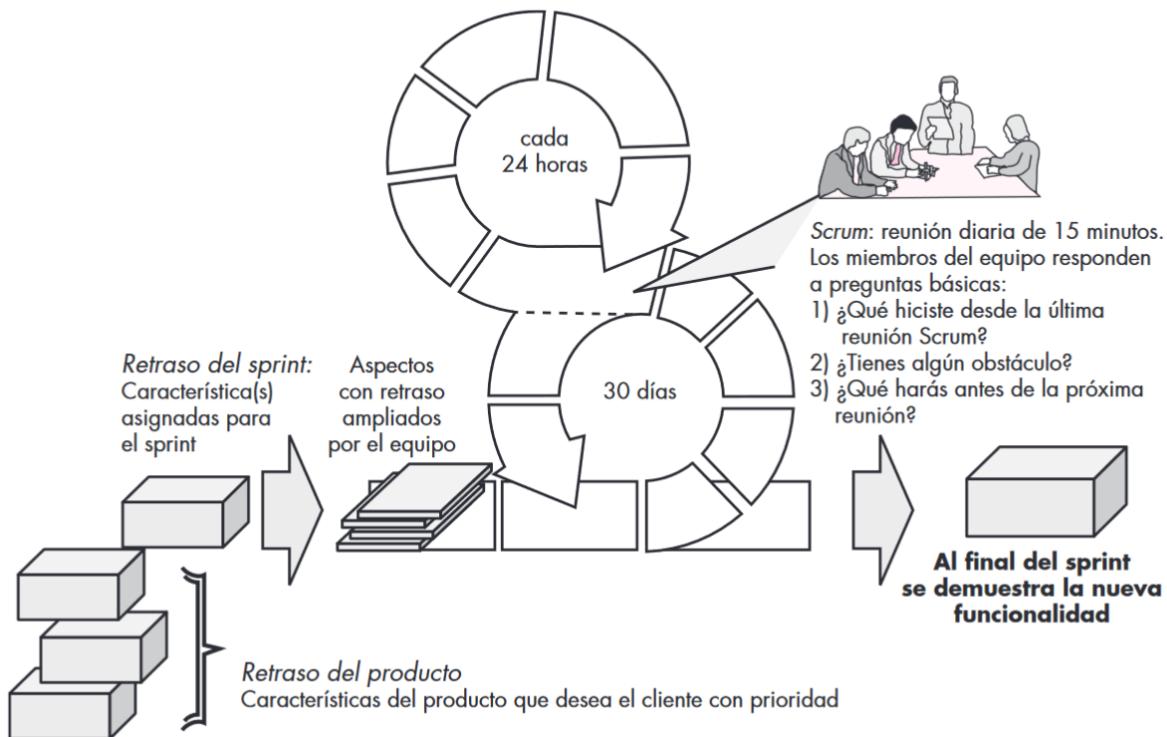


Figura 3.5: Metodología Scrum. Fuente: [37]

Finalmente, el método Kanban es un enfoque visual para la gestión del flujo de trabajo, cuyo objetivo principal es optimizar la eficiencia al prevenir la sobrecarga de tareas y eliminar cuellos de botella [38]. Se centra en un sistema dinámico, donde el trabajo solo se inicia cuando hay capacidad disponible, lo que se traduce en una mayor adaptabilidad y una respuesta más rápida a los cambios en las prioridades del proyecto. Este método propone implementar un tablero visual dividido en columnas que representan las diferentes etapas del proceso de desarrollo, por donde se mueven las tareas o tarjetas. Los principios de este modelo incluyen limitar el trabajo en curso, visualizar el flujo de tareas y medir su progreso para reconocer oportunidades de mejora. Kanban es una metodología de implementación ligera que se adapta bien a la situación actual de cualquier organización, es compatible con otras metodologías de trabajo y su implementación no requiere cambios estructurales. Sin embargo, su eficacia depende de una disciplina rigurosa y una comunicación constante para asegurar que el flujo visualizado en el tablero refleje la realidad actual del estado del proyecto.

Para el desarrollo del presente trabajo, se busca seleccionar una metodología que se adapte a las características del proyecto. Por lo tanto, el proceso de selección de metodología comienza prescindiendo aquellos enfoques que no se ajustan a las necesidades y características del proyecto. En primer lugar, se desestima el uso de la metodología Scrum debido a que requiere una participación activa y constante de un cliente para guiar los sprints, un rol que no es factible en

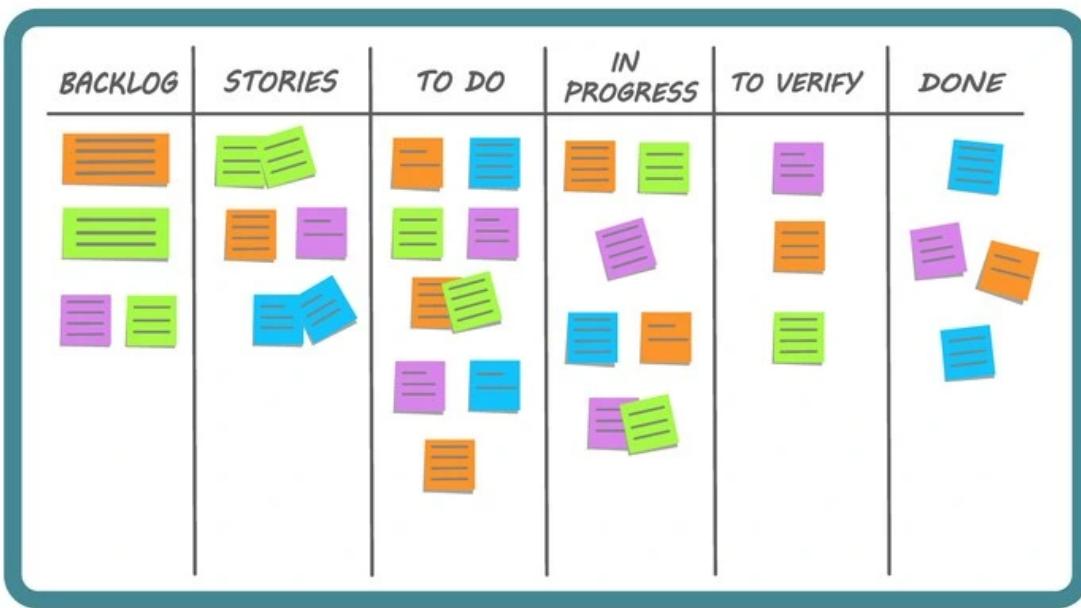


Figura 3.6: Tablero Kanban de ejemplo.

el contexto de un proyecto académico individual. A su vez, las reuniones recurrentes de esta metodología pierden sentido en un equipo unipersonal, donde la comunicación constante y la coordinación del equipo no son necesarias. Por otro lado, el modelo Espiral no se considera apropiado para este trabajo debido a su alta complejidad para el alcance del prototipo. Este modelo se centra en la gestión de riesgos y la adaptación continua a los cambios. Sin embargo, dado que los requisitos de este trabajo están claramente definidos y la investigación y el análisis previos han minimizado la incertidumbre, la complejidad y el tiempo adicional que el modelo Espiral implicaría no se justifican para este proyecto.

Luego de prescindir los enfoques mencionados, la selección de metodología se centró en los modelos restantes, principalmente en Modelo en V y Kanban. Ambos modelos se consideran apropiados para el desarrollo de este trabajo y su implementación es mutuamente compatible. El Modelo en V aporta un enfoque estructurado para la planificación y documentación del proyecto, mientras que Kanban proporciona flexibilidad para la gestión de tareas y el seguimiento del flujo de trabajo diario en un entorno unipersonal. La naturaleza visual de Kanban facilita el seguimiento del progreso y permite una adaptación ágil a los cambios menores que puedan surgir en el día a día, sin comprometer la estructura general del proyecto. A su vez, el modelo en V resulta más apropiado respecto al modelo en cascada debido a su foco en la verificación y validación de los resultados de cada etapa del proceso de desarrollo. Este enfoque de validación continua resulta especialmente valioso para este trabajo, ya que la inmutabilidad de los contratos inteligentes desplegados en la blockchain, hace que la detección temprana de errores sea crítica para garantizar la calidad y la fiabilidad del prototipo final.

Finalmente, para este trabajo se elige aplicar una combinación de modelos, utilizando el mo-

delo en V para la planificación y estructura general del proceso de desarrollo, y Kanban para la gestión de tareas diarias y el seguimiento del progreso del proyecto. Esta combinación busca mantener un enfoque sistemático y estructurado, al mismo tiempo que se aprovecha la flexibilidad operativa que Kanban ofrece para adaptarse a los cambios menores que puedan surgir durante el desarrollo del prototipo. El siguiente apartado abordará en detalle cada etapa del proceso de desarrollo en el contexto del modelo en V, desde el modelado de requerimientos hasta las pruebas, para llevar a cabo el desarrollo del prototipo tecnológico.

3.1.1. Etapas del Proceso de Desarrollo

Una vez seleccionada la metodología de desarrollo, se procede a la ejecución de las fases de construcción y validación del prototipo. Utilizando el Modelo en V como marco de referencia, el desarrollo del sistema se concibe como un proceso estructurado que se divide en dos grandes fases: la fase descendente, que se enfoca en la definición, el diseño y la implementación, y la fase ascendente, que se centra en la verificación y las pruebas. A continuación, se detallan las actividades y los resultados esperados de cada una de las etapas del proceso de desarrollo, siguiendo el modelo en V, aplicado al prototipo de trazabilidad del vidrio basado en blockchain. En la Figura 3.7 se ilustran las etapas del proceso de desarrollo en V agrupadas en bloques temáticos, con el objetivo de ilustrar de manera más clara las interacciones y dependencias entre las diferentes fases de desarrollo de este trabajo.

Modelado de requerimientos: Es la primer fase del proceso, comprende la identificación y documentación detallada de los requisitos funcionales y no funcionales del prototipo. Los hallazgos se nutren directamente de la investigación realizada como parte de la Actividad B, comprendiendo la revisión del estado del arte en blockchain, gestión de residuos y trazabilidad, así como las entrevistas y las observaciones de programas de reciclaje existentes. El objetivo en esta etapa es comprender las necesidades específicas del sistema de trazabilidad del vidrio para definir un conjunto exhaustivo de requerimientos que aseguren que el prototipo aborde los desafíos identificados en la cadena de producción de envases de vidrio en la región. El resultado de esta fase es un documento de requisitos funcionales y no funcionales que sirve como guía para las siguientes etapas del desarrollo. La ejecución y resultados de esta fase se detallan en el Capítulo 4.

Diseño: El diseño del sistema se divide en dos etapas: diseño de arquitectura y diseño de componentes. En la primera etapa, se define la arquitectura general del sistema, incluyendo la selección de tecnologías y plataformas a utilizar, así como la estructura de los módulos principales y la división de responsabilidades entre ellos. En la segunda etapa, se realiza el diseño detallado de cada componente de los módulos del sistema, especificando las interfaces, protocolos de comunicación y estructuras de datos a utilizar. El diseño en etapas y previo a la implementación tiene el objetivo de garantizar que el sistema sea escalable, mantenable y cumpla con los requisitos definidos en la fase anterior. El resultado es un conjunto de documentos de diseño que guían la implementación del prototipo. Los detalles de estas dos fases de diseño se presentan

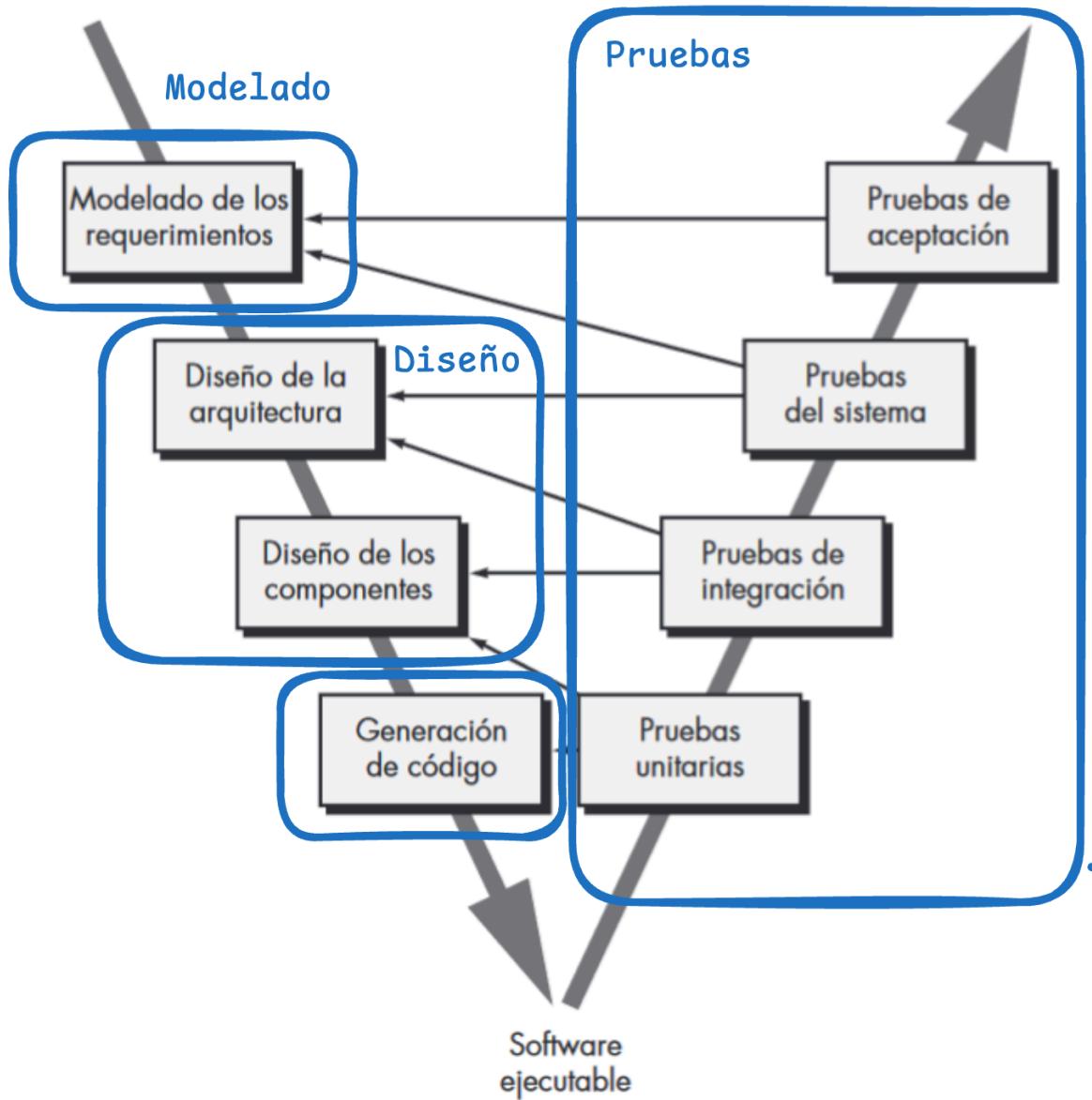


Figura 3.7: Modelo en V agrupado por etapas. Fuente: [pressman2010ingenieria]

en el Capítulo 5.

Generación de código: Durante la fase de generación de código o implementación, se lleva a cabo la codificación del prototipo, cada módulo y sus componentes en las tecnologías elegidas y especificaciones detalladas durante la etapa de diseño. Esta etapa es gestionada con el apoyo de Kanban para la organización y seguimiento de las micro-tareas para mantener un flujo de trabajo ágil y adaptable a los cambios menores que puedan surgir durante el desarrollo. El resultado de esta fase es un prototipo funcional que implementa los requisitos y diseños definidos previamente. En simultáneo con la generación de código se realiza la primera etapa de validación, que consiste en pruebas unitarias de cada componente desarrollado. Estas pruebas aseguran que cada componente funcione correctamente de forma aislada y cumpla con los requisitos funcionales especificados. Al finalizar esta etapa, el software ejecutable está

listo para ser desplegado en un entorno de pruebas. Los detalles de la implementación y las pruebas unitarias se describen en el Capítulo 6.

Pruebas: El proceso de pruebas se lleva a cabo en múltiples etapas. Después de las pruebas unitarias, se realizan pruebas de integración automatizadas para verificar que los diferentes módulos del sistema interactúan correctamente entre sí a través de sus interfaces. Estas pruebas aseguran que los datos fluyan adecuadamente dentro del sistema. Posteriormente, se llevan a cabo pruebas de sistema para evaluar el comportamiento del prototipo en su conjunto para validar que el sistema cumple con los requisitos funcionales y no funcionales definidos. Las pruebas de sistema incluyen pruebas manuales para validar consistencia de datos en el sistema y corroborar que el prototipo cumple con los requerimientos funcionales, junto con pruebas automatizadas mediante código, que permiten verificar los requerimientos no funcionales como rendimiento y seguridad bajo condiciones simuladas. Finalmente, se realizan pruebas de aceptación con un conjunto de usuarios voluntarios para validar que el prototipo cumple con los criterios de aceptación establecidos en la fase de modelado de requerimientos. Los detalles de las pruebas realizadas en estas etapas de pruebas se presentan en el Capítulo 7.

Para asegurar una gestión eficiente a lo largo de todas las fases del proceso de desarrollo, se implementan herramientas y prácticas de control de proyectos. La documentación del proceso es continua, registrando las decisiones de diseño, los problemas encontrados y las soluciones aplicadas, lo que sirve como base para la elaboración del informe final. Para el control de versiones del código fuente, se utiliza Git, una herramienta que permite un seguimiento detallado, seguro y ordenado de los cambios en el código. Adicionalmente, se emplea la herramienta Jira, un software de gestión de proyectos para el seguimiento de tareas y la evolución general del desarrollo mediante un tablero Kanban, facilitando la planificación, el monitoreo del progreso y la gestión de tareas pendientes. Esta combinación de herramientas y metodologías permite mantener un flujo de trabajo organizado, transparente y eficiente, alineado con las necesidades específicas del proyecto.

En los próximos capítulos se detallará el proceso de ejecución llevado a cabo en cada una de las etapas descriptas, incluyendo los resultados obtenidos en cada una. En el Capítulo 4 se describirá el proceso de modelado de requerimientos, donde se explica cómo se obtuvieron los requerimientos funcionales y no funcionales, su priorización y la planificación del desarrollo. En el Capítulo 5 se abordará el diseño del sistema, incluyendo la elección de tecnologías, diseño de arquitectura de software, modelado de la interfaz de usuario y definición de los módulos principales del prototipo. Seguidamente, en el Capítulo 6 se detallará la implementación de cada módulo del sistema, integración de los módulos, pruebas unitarias realizadas y despliegue del prototipo en un entorno de pruebas similar a un entorno productivo. En el Capítulo 7 se describirán las pruebas realizadas, tanto las pruebas de integración automatizadas como las pruebas de sistema manuales y las pruebas con usuarios. Finalmente, en el Capítulo 8 se presentarán las conclusiones del trabajo, resultados obtenidos, reflexiones sobre el proceso de desarrollo y oportunidades de mejora de este trabajo con recomendaciones para futuros trabajos relacionados con la trazabilidad y valorización del vidrio mediante tecnologías emergentes

como blockchain.

4

MODELADO DE REQUERIMIENTOS

Análisis de requerimientos

La introducción de este documento tiene como objetivo proporcionar un panorama global del proyecto, estableciendo claramente el propósito, el alcance, el valor y el público objetivo del producto. El objetivo final de este documento es definir de forma exhaustiva los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema prototipo de trazabilidad de envases de vidrio, así como los requerimientos específicos del frontend del sistema. Estos requerimientos servirán como base para el diseño, desarrollo y validación del sistema.

Propósito del Producto

El propósito de este sistema es mejorar la trazabilidad en los modelos de economía circular orientados al reciclado de vidrio. Al proporcionar una plataforma que registre y audite las transacciones de residuos de vidrio a lo largo de toda la cadena de suministros, el sistema busca garantizar la transparencia y la eficiencia desde la producción del envase hasta su disposición final. Este registro confiable y verificable facilitará el cumplimiento normativo y mejorará la gestión de recursos en el sector.

Alcance del Producto

El alcance de este proyecto incluye el desarrollo de un contrato inteligente en la blockchain de Ethereum, una interfaz web para interactuar con dicho contrato, una base de datos SQL para almacenar información adicional, y una API que conecte todos estos componentes, junto con una API pública para facilitar la integración con otros sistemas. Además, se desarrollará un frontend prototípico específico para cada actor de la cadena de suministro de envases de vidrio (productores, comerciantes, recicladores y consumidores) que interactuará con el sistema de

trazabilidad. El objetivo es centralizar y simplificar el acceso a la información de trazabilidad para todos los actores de la cadena de suministro de envases de vidrio, incluyendo productores, comerciantes, consumidores y recicladores.

Valor del Producto

El valor principal del sistema reside en su capacidad para garantizar la integridad y la transparencia de la información a lo largo de la cadena de suministro del vidrio reciclado. Este sistema no solo ayuda a cumplir con las normativas internacionales y locales, sino que también ofrece un beneficio competitivo a las empresas al mejorar la percepción de marca y aumentar la confianza del consumidor en productos sostenibles y responsables. Además, facilita la adopción de prácticas más sostenibles en la industria del vidrio al disponibilizar información detallada sobre la trazabilidad y el impacto ambiental de los envases.

Público Objetivo

El público objetivo del sistema incluye a todos los actores involucrados en la cadena de suministro de envases de vidrio, desde productores que necesitan certificar la sostenibilidad de sus productos hasta recicladores interesados en optimizar el proceso de recolección y reutilización de materiales. Además, reguladores y organismos de certificación podrán utilizar el sistema para verificar el cumplimiento de las normativas pertinentes.

Uso Previsto

El sistema será utilizado de diversas maneras según el rol del usuario:

- **Productores** podrán registrar y verificar la producción de envases de vidrio con materias primas vírgenes o recicladas. - **Comerciantes** utilizarán el sistema para gestionar compras y verificar el origen del vidrio. - **Recicladores** podrán documentar el proceso de reciclaje y su cumplimiento con las normativas. - **Consumidores** tendrán acceso a información sobre la trazabilidad y sostenibilidad de los productos que compran y que reciclan.

Cada uno de estos roles contará con interfaces y funcionalidades específicas diseñadas para facilitar estas operaciones. El sistema se convertirá en una fuente de información confiable y verificable para todos los actores involucrados en la cadena de suministro de envases de vidrio, a partir del cual se puedan desarrollar aplicaciones y servicios adicionales.

Requerimientos

Un requerimiento de sistema representa una necesidad específica que el sistema de software debe satisfacer para cumplir con sus objetivos. Los requerimientos son fundamentales porque definen qué debe hacer el sistema (funcionalidad) y cómo debe comportarse (calidad y restricciones). Los requerimientos se clasifican en dos categorías:

- **Requerimientos Funcionales**: Describen las funcionalidades que el sistema debe proporcionar. Estos requerimientos detallan las acciones que el sistema debe ser capaz de realizar, los procesos que debe soportar y las interacciones que debe permitir entre los usuarios y el

sistema.

- **Requerimientos No Funcionales**: Establecen las características de calidad que debe cumplir el sistema, como rendimiento, seguridad, escalabilidad y usabilidad. Estos no se centran en las funcionalidades específicas, sino en cómo el sistema debe ejecutarlas.

Cada requerimiento debe ser claro, específico, medible y verificable. Un requerimiento se especifica generalmente en un formato que incluye un identificador único y una descripción detallada. A continuación, se presentan los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema prototipo de trazabilidad de envases de vidrio, así como los requerimientos específicos del frontend del sistema.

El modelado de requerimientos constituye la etapa inicial del lado izquierdo del modelo en V, que enfatiza la importancia de las pruebas en cada fase del ciclo de vida del proyecto de software. El objetivo principal de esta etapa es comprender, documentar y validar las necesidades y expectativas de los interesados del sistema, definiendo de forma precisa su comportamiento y funcionalidades. Esta fase se asocia directamente con las pruebas de aceptación del lado derecho de la V, la etapa final del modelo, en la cual se verifica que el sistema cumple con los requerimientos definidos inicialmente.

Un modelado de requerimientos preciso incide en las etapas subsiguientes de diseño, implementación y pruebas. Los errores o ambigüedades en la fase de modelado pueden propagarse a lo largo del proyecto, resultando en un aumento del tiempo y los recursos requeridos para corregirlos. Por lo tanto, la inversión de esfuerzo para asegurar que los requerimientos sean claros, completos y factibles reduce el riesgo de inconsistencias y la necesidad de refactorizaciones en fases posteriores, contribuyendo a la ejecución exitosa del proyecto.

En el contexto de este trabajo, centrado en el desarrollo de un prototipo de aplicación con tecnología blockchain para la trazabilidad y valorización de envases de vidrio, el modelado de requerimientos se ejecutó de forma estructurada para garantizar que el prototipo respondiera a las necesidades específicas de una economía circular sostenible y transparente.

El proceso de modelado de requerimientos se estructuró en una serie de pasos iterativos para descubrir, definir y refinar los requisitos del sistema. Las etapas del proceso se resumen en la Figura 4.1.



Figura 4.1: Etapas del proceso de modelado de requerimientos del prototipo de trazabilidad de vidrio

El proceso dio inicio con una investigación exhaustiva del dominio del problema para identificar los actores clave y sus interacciones (Sección 4.1). A partir de esta información, se elaboró

un Canvas de Propuesta de Valor para documentar de manera flexible las necesidades y problemáticas de cada actor. Posteriormente, se modelaron los casos de uso para describir las funcionalidades del sistema desde la perspectiva del usuario (Sección 4.2). Estos casos de uso constituyeron la base para la definición formal de los requerimientos funcionales y no funcionales, incluyendo sus interdependencias (Sección 4.3). Finalmente, se redactaron historias de usuario con un nivel de detalle suficiente para definir los criterios de aceptación, lo cual permitió iniciar las etapas de diseño de arquitectura, estimación de esfuerzo y planificación de la implementación.

4.1. Definición de Dominio

El modelado de requerimientos inicia con la definición del dominio del problema. En el contexto de este proyecto, que busca la trazabilidad y valorización del vidrio, el objetivo es comprender el entorno en el que el sistema operará, identificando los actores y sus interacciones. El análisis establece la base para la construcción de los requerimientos del sistema.

La definición del dominio se realizó a través de una investigación y revisión de la literatura sobre la trazabilidad del vidrio. En la Sección 2.3, se exploraron los trabajos existentes en el área de blockchain aplicada para lograr una economía circular, también se investigaron proyectos existentes que aborden la misma temática o el uso de tecnología para el mismo fin. A su vez, se realizaron entrevistas e investigaciones de campo con expertos en la industria del vidrio y el reciclaje regional, para comprender los procesos actuales, las problemáticas y las expectativas de los actores involucrados (Apéndices D y E). Se examinaron las etapas del ciclo de vida de los envases de vidrio, desde su producción hasta su reintroducción en la cadena de valor, para identificar los puntos donde la tecnología blockchain puede aplicarse. La Figura 4.2 ilustra el ciclo de vida de los envases de vidrio y los actores involucrados en cada etapa.

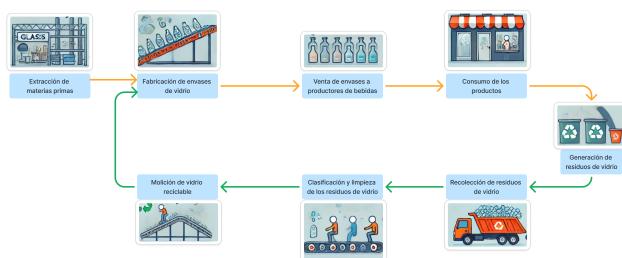


Figura 4.2: Etapas del ciclo de vida de los envases de vidrio

En este marco, se identificaron los siguientes actores clave:

- **Productor de Vidrio (Productor Primario):** Fabricante del envase de vidrio, con la responsabilidad de registrar la información inicial del lote de material.

- **Productor de vino (Productor Secundario):** Empresa productora de vino que utiliza el envase de vidrio para embotellar sus productos y requiere acceder a la información de trazabilidad con el fin de garantizar la calidad y seguridad alimentaria.
- **Consumidor:** Usuario final que adquiere bebidas envasadas, las consume y puede participar en el proceso de reciclaje.
- **Centro de Reciclaje:** Entidad que recibe, procesa y recicla el vidrio, utiliza la información de trazabilidad para verificar la calidad del material reciclado y dejar registro de su disposición final.

Tras la identificación de los actores, la revisión de la literatura y la investigación de campo y entrevistas, se elaboró un Canvas de Propuesta de Valor. Este diagrama semi-estructurado es una herramienta estratégica que documenta de manera flexible las necesidades y desafíos de cada actor, facilitando la comprensión de sus expectativas.

El canvas se divide en dos secciones principales: el perfil del actor y el mapa de valor de la solución. En el perfil del actor, se detallan sus necesidades, deseos y miedos, lo que proporciona una visión clara de sus motivaciones y los obstáculos que enfrentan en su estado actual. En el mapa de valor de la solución, se definen las funcionalidades y experiencia que ofrecerá la solución, con el objetivo de aplacar los miedos y satisfacer las necesidades y los deseos de los actores. Este análisis conjunto de las expectativas y la solución permite adoptar un enfoque centrado en el usuario desde el inicio del proceso de diseño de solución, asegurando que el sistema propuesto aborde de manera efectiva los problemas y oportunidades identificados.

La Figura 4.3 muestra el canvas elaborado para este sistema de trazabilidad, detallando las necesidades y expectativas de cada actor. Este análisis, al contrastar las necesidades y expectativas de los actores con las funcionalidades de la solución, sirve como el primer paso para conceptualizar cómo el sistema de trazabilidad basado en blockchain puede mitigar los problemas existentes en la cadena de valor de los envases de vidrio y generar valor tangible para cada participante.

El análisis detallado a través del Canvas de Propuesta de Valor revela que los principales desafíos se centran en la falta de transparencia y la ineficiencia de los procesos actuales involucrados en el ciclo de vida del vidrio. El Productor Primario necesita un flujo constante de materia prima reciclada de calidad para minimizar sus costos y cumplir con metas de sostenibilidad. A su vez, el Productor Secundario enfrenta el desafío de verificar la procedencia de los envases de vidrio para garantizar la seguridad alimentaria y, de esta manera, acceder a mercados regulados y sostenibles, cumpliendo sus propias metas de sostenibilidad. Por su parte, el Consumidor busca una forma simple de reciclar, con la seguridad de que su esfuerzo es valorado y recompensado, y desea tener la capacidad de conocer el impacto ambiental de los productos que adquiere. Finalmente, el Centro de Reciclaje se enfrenta a altos costos operativos y a falta de calidad en el material recibido, lo que dificulta su valorización. Estas problemáticas y expectativas compartidas se traducen en la necesidad de un sistema unificado y confiable, que permita a los actores verificar la procedencia del material, documentar cada etapa del ci-

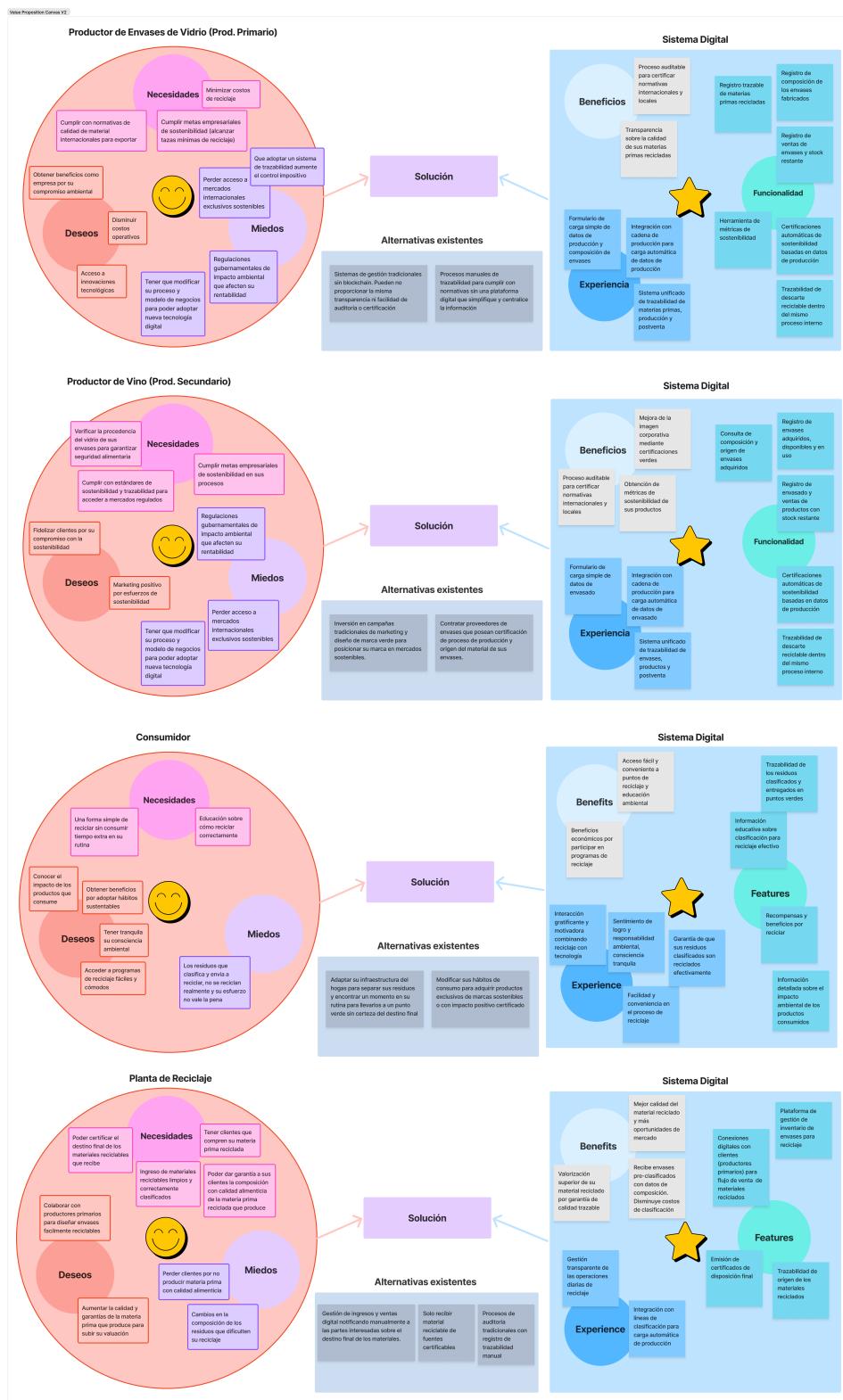


Figura 4.3: Canvas de Propuesta de Valor para el sistema de trazabilidad de vidrio

clo de vida y ofrecer incentivos a los usuarios finales. Por lo tanto, los casos de uso del sistema se diseñan para abordar directamente estas necesidades, permitiendo el registro de lotes de producción de envases, consulta de la trazabilidad de cada unidad, gestión del reciclaje de los envases y verificación de la calidad del material reciclado.

La información recopilada en esta fase proporciona una comprensión de las necesidades de los actores y sienta las bases para la siguiente etapa del modelado de requerimientos, donde se definirán los casos de uso del sistema con una perspectiva centrada en el usuario.

4.2. Modelado de Casos de Uso

Después de definir el dominio y los actores, se procede a la identificación y modelado de los casos de uso. Un caso de uso describe una interacción atómica entre un actor y el sistema para alcanzar un objetivo específico, representando una funcionalidad desde la perspectiva del usuario.

Con el objetivo de acotar el alcance de este trabajo, se realiza el modelado de los casos de uso relacionados con la trazabilidad de los envases de vidrio, abarcando las acciones que los actores pueden realizar en el sistema. Estos casos de uso se centran en las funcionalidades esenciales que permiten a los actores registrar, consultar y gestionar la información relacionada con los envases de vidrio a lo largo de su ciclo de vida. Los casos de uso relacionados con la certificación de cada etapa del proceso e integración con sistemas preexistentes se consideran fuera del alcance de este trabajo, pero los casos de uso modelados permiten sentar las bases para futuras extensiones del sistema hacia estas funcionalidades.

En el prototipo de sistema de trazabilidad para envases de vidrio, los casos de uso comprenden tanto las acciones inherentes al ciclo de vida del material como las interacciones propias de una plataforma digital basada en blockchain. Los primeros tipos de caso de uso describen las operaciones fundamentales del proceso de trazabilidad, como el registro de un nuevo lote de envases fabricado por parte del Productor Primario, la consulta del origen del envase por parte del Consumidor y la recepción de envases reciclables por el Centro de Reciclaje. Los segundos tipos de caso de uso, por su parte, abarcan las funcionalidades básicas del sistema, tales como la autenticación de usuarios y la visualización de datos en la interfaz.

Los casos de uso se representan gráficamente a través de un diagrama de casos de uso que muestra las interacciones entre los actores y el sistema. La Figura 4.4 presenta el diagrama elaborado para el sistema de trazabilidad de envases de vidrio para una economía circular, ilustrando las funcionalidades mínimas que debe implementar el sistema y los actores asociados a cada funcionalidad. Cada caso de uso está vinculado a un actor específico, lo que permite visualizar claramente las interacciones y responsabilidades de cada uno. En caso de que un caso de uso sea compartido por varios actores, se puede representar como un caso de uso heredado, indicando que varios actores pueden realizar la misma acción o funcionalidad.



Figura 4.4: Diagrama de Casos de Uso del sistema de trazabilidad de vidrio

El diagrama muestra que cada actor tiene un conjunto de casos de uso alineado con sus responsabilidades. Por ejemplo, el Productor Primario puede registrar un nuevo lote de envases producidos o registrar la venta de envases a un Productor Secundario, mientras que el Productor Secundario puede consultar la trazabilidad de origen de los envases recibidos y registrar su uso asociando los envases a un lote de producto final. Por otro lado, el Consumidor puede consultar el origen de un envase adquirido y el destino de un envase enviado a reciclaje, mientras que el Centro de Reciclaje puede recibir envases reciclables, consultar su composición de materiales y registrar su reciclaje. Los casos de uso de los diferentes actores se interrelacionan de manera cíclica, integrando la información de cada actor de la cadena en un único sistema de información interrelacionado que refleja el flujo de la economía circular de envases de vidrio. Por ejemplo, la acción "Vender envases a productores secundarios" del Productor Primario está ligada a los casos de uso del Productor Secundario, permitiendo rastrear el vidrio a lo largo de su ciclo de vida.

La lista de casos de uso sirve como punto de partida para la definición de los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema, donde cada caso de uso se descompone en uno o más requerimientos específicos que describen las funcionalidades que el sistema debe implementar para cumplir con las expectativas de los actores.

4.3. Definición de Requerimientos

Después de identificar los casos de uso, se definen los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema. Los requerimientos funcionales describen las funcionalidades específicas que el sistema debe ofrecer a los usuarios, mientras que los requerimientos no funcionales establecen las características de calidad que el sistema debe cumplir, tales como rendimiento, seguridad o usabilidad.

Los requerimientos se documentan de manera estructurada, asignando un identificador único a cada requerimiento para su seguimiento durante las etapas posteriores de diseño, implementación y pruebas del sistema. La descripción de cada requerimiento incluye su propósito, las condiciones bajo las cuales se cumple y las dependencias con otros requerimientos. Un ejemplo de requerimiento funcional es que "el sistema debe permitir al Productor de Vidrio registrar un nuevo lote de vidrio, especificando la cantidad y el tipo de vidrio", mientras que un requerimiento no funcional puede ser que "el sistema debe garantizar la seguridad de los datos del usuario mediante autenticación y autorización".

A partir de los casos de uso previamente identificados, se definieron 28 requerimientos funcionales y 6 requerimientos no funcionales para el sistema. Estos requerimientos se documentan en la etapa de modelado para su posterior seguimiento durante el desarrollo. Se establecen dependencias entre ellos, lo que permite identificar restricciones en el orden de implementación de las funcionalidades del sistema. Por ejemplo, el registro de un lote de vidrio (RF-006) es una dependencia para que dicho lote pueda ser recibido por un productor secundario para envasar

productos (RF-016). La Tabla 4.1 presenta los requerimientos funcionales, mientras que la Tabla 4.2 muestra los requerimientos no funcionales definidos para el prototipo de trazabilidad de envases de vidrio basado en blockchain.

Tabla 4.1: Requerimientos Funcionales del sistema de trazabilidad de envases de vidrio

ID	Título	Descripción	Deps
RF-001	Registrar usuarios	El sistema debe permitir registrar usuarios mediante correo electrónico u otro medio con diferentes roles para hacer uso de las distintas partes del sistema. Los roles disponibles en esta primera etapa son: Productor Primario, Productor Secundario, Consumidor y Reciclador.	-
RF-002	Ingresar a la plataforma	Todos los usuarios deben poder ingresar a la plataforma con su correo electrónico registrado mediante algún método de autenticación con contraseña, OTP, 3rd party, etc.	RF-001
RF-003	Mantener sesión de usuario	Cada cuenta de usuarios debe poder mantener abiertas múltiples sesiones en simultáneo. El usuario debe cerrar una sesión individual en cualquier dispositivo. La sesión debe mantenerse abierta en el dispositivo a lo largo del tiempo a pesar de que se cierre el navegador o aplicación.	RF-002
RF-004	Validar Autorización	Cada rol de usuario debe tener ciertos permisos y un usuario con un rol dado no debe poder realizar acciones que requieran un permiso del que no goza. Detalle: Productor: CRUD productos. Comerciante: RU productos (transferencia de propiedad de productos) Consumidor: R productos (consultar composición de productos) Reciclador: R productos, CRUD lotes de reciclaje. Invitados (sin autenticación): permiso de lectura en todo el sistema (R productos, R lotes de reciclaje).	RF-002
RF-005	Ver mi perfil de usuario	Cada usuario debe poder consultar la información personal asociada a su cuenta y modificar algunos datos: Email, Nombre Empresa/persona (modificable), Responsable (modificable), Nro teléfono (modificable), Dirección pública blockchain.	RF-002
RF-006	Cargar lotes de producción	El productor puede cargar lotes de producción de envases de vidrio incluyendo la siguiente información: Cantidad de envases, Peso por envase, Color, Composición, Espesor, entre otras.	RF-004
RF-007	Editar lotes de producción	El productor puede editar la información de producción en caso de equivocación hasta antes de comercializar el lote.	RF-006
RF-008	Eliminar lotes de producción	El productor puede eliminar un lote en caso de equivocación hasta antes de comercializar el lote.	RF-006

Continúa en la siguiente página

ID	Título	Descripción	Deps
RF-009	Consultar histórico de producción	El productor puede consultar información histórica de todos los lotes que ha creado con sus detalles y puede consultar su trazabilidad posterior.	RF-006
RF-010	Consultar material reciclable ingresado	El productor puede ver la lista de los lotes o conjuntos de materiales reciclables que volvieron a ingresar a su fábrica (como compra a la recicladora o devoluciones desde bodegas).	RF-006, RF-018, RF-025
RF-011	Sacar de circulación envases	El productor puede marcar grupos de botellas de un lote como fuera de circulación o enviado a reciclar (en caso de rotura, falla o desaparición).	RF-006
RF-012	Vender envases a productores secundarios	El productor puede marcar cierta cantidad de envases del lote como vendidos a un productor secundario específico. Los envases dejan de ser propiedad del productor y ya no puede modificarlos ni revenderlos.	RF-006
RF-013	Asociar envase a código comercial	El productor secundario puede asociar un código de barras (u otro tipo de código visible en la etiqueta impresa de su producto, como QR) a conjuntos de botellas compradas. EL CÓDIGO DEBE GARANTIZAR UNICIDAD.	RF-012
RF-014	Modificar código comercial	El productor secundario puede editar la información de códigos asociados a envases hasta antes de vender el producto.	RF-013
RF-015	Eliminar código comercial	El productor secundario puede eliminar códigos asociados a envases hasta antes de vender el producto.	RF-013
RF-016	Consultar inventario de envases nuevos	El productor secundario puede ver la lista de conjuntos de envases que ha comprado pero aún no ha utilizado (no han sido asociados a ningún producto propio ni código). El productor puede confirmar conformidad o rechazar la compra.	RF-012
RF-017	Rechazar envases recibidos	El productor secundario puede desconocer la transacción de transferencia de envases desde el productor en caso de no reconocer la compra o realizar una devolución por algún tipo de error.	RF-012
RF-018	Sacar de circulación envases	El productor secundario puede devolver botellas en caso de no conformidad, fallas de fábrica o rotura. Estos envases pueden transferirse al productor como material reciclable o descartarse.	RF-012
RF-019	Consultar histórico de producción	El productor secundario puede consultar el histórico de sus productos embotellados o botellas utilizadas. A su vez puede consultar su trazabilidad posterior a la comercialización.	RF-013
RF-020	Vender envases a comerciantes	El productor secundario puede marcar sus productos embotellados como vendidos al comerciante.	RF-013

Continúa en la siguiente página

ID	Título	Descripción	Deps
RF-021	Consultar la historia de un envase	Mediante el código asociado a la botella, el ciudadano debe poder consultar el origen, composición y trazabilidad histórica de envase cualesquiera.	RF-013
RF-022	Marcar envase como reciclable	El ciudadano puede registrar un envase como ingresado al sistema de reciclaje escaneando su código.	RF-013
RF-023	Dar seguimiento a envases	El ciudadano puede hacer seguimiento del destino y trazabilidad hasta la disposición final de todos los envases que ingresó al sistema de reciclaje.	RF-022
RF-024	Consultar información del envase para clasificación	El reciclador clasificador puede escanear el código de la botella y obtener información relevante sobre su composición para su correcta clasificación.	RF-013
RF-025	Crear lotes de material reciclado	El reciclador puede crear lotes de material reciclado a partir de un conjunto de envases reciclables recibidos de los ciudadanos. Cada lote tiene los siguientes atributos: Peso, Dimensión (si aplica), Material, Composición.	RF-022
RF-026	Editar lote de material reciclado	El reciclador puede editar la información de un lote en caso de equivocación hasta antes de su comercialización.	RF-025
RF-027	Eliminar lote de material reciclado	El reciclador puede eliminar un lote en caso de equivocación hasta antes de su comercialización.	RF-025
RF-028	Vender lote de material reciclado	El reciclador puede marcar un lote de material reciclable como vendido a un productor y debe especificar el comprador. Se asume en este caso que el material fue efectivamente reciclado, finalizando la trazabilidad.	RF-025

Tabla 4.2: Requerimientos No Funcionales del sistema de trazabilidad de envases de vidrio

ID	Título	Descripción
RNF-01	Transparencia	La trazabilidad de un producto debe ser libremente accesible por cualquier usuario autenticado del sistema en todo momento.
RNF-02	Disponibilidad	El sistema debe estar disponible para su uso 24/7
RNF-03	Escalabilidad	El sistema debe soportar un nro creciente de transacciones
RNF-04	Mantenibilidad	El sistema debe poder ser mantenible por otros desarrolladores de la industria actual en un futuro
RNF-05	Interoperabilidad	El sistema debe ser integrable con otros múltiples sistemas de stock y gestión de terceros preexistentes

Continúa en la siguiente página

ID	Título	Descripción
RNF-06	Integridad	Los datos de trazabilidad no deben poder ser alterados luego de cargados sin dejar registro público de la modificación

La lista de requerimientos funcionales y no funcionales sirve como base para la siguiente fase de modelado, en la que se definirán las historias de usuario y se planificará el desarrollo del sistema. A su vez, la lista de requerimientos se utilizará posteriormente en la validación y verificación del sistema, asegurando que todas las funcionalidades implementadas cumplan con las expectativas y necesidades de los usuarios.

4.4. Historias de Usuario y Planificación

A partir de la definición de los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema, se procede a la creación de las historias de usuario. Las historias de usuario permiten documentar las funcionalidades del sistema desde la perspectiva de sus actores, utilizando un formato estandarizado que describe el rol, la acción deseada y el beneficio esperado: *Como [rol], quiero [acción], para [beneficio]*". Por ejemplo, *Como Productor Primario, quiero poder editar la información de un lote de envases antes de su comercialización, para poder corregir cualquier error en los datos de producción y asegurar la precisión en el registro*". Esta forma de documentar requerimientos facilita la priorización de funcionalidades y la comprensión de las necesidades desde un enfoque centrado en el usuario a la hora de desarrollar el sistema.

Cada historia de usuario se complementa con criterios de aceptación que establecen las condiciones necesarias para su validación, vinculándose directamente con uno o más requerimientos previamente definidos. Esta trazabilidad entre los requerimientos y las historias de usuario es un mecanismo de control que guía el proceso de desarrollo y asegura que la implementación cumpla con las expectativas planteadas. En el contexto del modelo en V, las historias de usuario establecen la base para la fase de pruebas de aceptación, garantizando que el sistema final se alinee con los objetivos del proyecto.

A continuación se presenta un ejemplo de historia de usuario con sus respectivos criterios de aceptación, que ilustra la relación entre las funcionalidades y las necesidades de los actores.

Historia de Usuario: Consultar historial de producción de lotes de envases de vidrio
Como productor,
Quiero poder consultar el historial de todos los lotes de producción con sus detalles y trazabilidad,
Para poder revisar la información de producción y rastrear cada lote en su ciclo de vida.

Criterios de Aceptación:

1. Visualización del historial de lotes:

- El sistema debe mostrar una lista de todos los lotes creados por el productor con la siguiente información:
 - Código de lote
 - Fecha de producción
 - Cantidad de envases
 - Peso por envase
 - Color

2. Acceso a detalles de cada lote:

- Al seleccionar un lote específico, el sistema debe mostrar los detalles completos, incluyendo:
 - Espesor
 - Fecha de producción
 - Observaciones adicionales

En el presente trabajo, se definieron un total de 28 historias de usuario, donde cada historia de usuario se corresponde exactamente con un requerimiento funcional del sistema. Los requerimientos no funcionales se abordan de manera transversal, asegurando que aspectos como el rendimiento, la seguridad y la usabilidad sean considerados en el diseño e implementación del sistema.

Para la gestión del proceso de desarrollo, las historias de usuario se registraron en la herramienta Jira, un software para gestión de proyectos de desarrollo de software compatible con la metodología Kanban. Esta herramienta permite gestionar el flujo de trabajo, asignar tareas a los miembros del equipo y realizar un seguimiento del progreso durante el desarrollo. Como parte del proceso de planificación, se estimó el esfuerzo necesario para realizar cada tarea y se registró en la herramienta Jira junto con la tarea. La estimación del esfuerzo consideró la complejidad técnica, el tiempo requerido proyectado para implementarlo y las interdependencias entre las funcionalidades, lo que permitió una planificación objetiva del desarrollo.

La planificación del proyecto se realizó mediante un diagrama de Gantt. Un diagrama de Gantt es una herramienta visual que muestra la secuencia de las tareas, sus dependencias y los plazos de implementación estimados. Este diagrama permite visualizar el cronograma del proyecto, facilitando la identificación de hitos y la gestión de recursos. En este caso, se utilizó para planifi-

car las historias de usuario y su implementación en iteraciones o sprints, asegurando que todas las funcionalidades necesarias sean contempladas y ejecutadas de manera ordenada según sus dependencias.

En la Figura 4.5, se muestra el tablero utilizado para el seguimiento del progreso de cada historia de usuario, mientras que la Figura 4.6 presenta el diagrama de Gantt que ilustra la secuencia de las tareas, sus dependencias y los plazos de implementación estimados. Con la planificación armada, se estimó que el desarrollo del sistema tendría una duración de 6 semanas, con un total de 28 historias de usuario a implementar. Esta estimación de tiempo corresponde exclusivamente al tiempo de codificación de funcionalidades del prototipo, ya que, posterior a la etapa de generación de código, se procede a la fase codificación y ejecución de pruebas automatizadas y validación manual del sistema, donde es posible a su vez que se deban realizar ajustes o correcciones de programación en función de los resultados obtenidos.

Todas las actividades						
		Aplicaciones		Compartir		Exportar
		Proyecto = Tesis LCC		Persona asignada		Tipo
						Más filtros
Básica		JQL	<input type="text"/> Buscar...	Proyecto = Tesis LCC	Persona asignada	Tipo
Borrar filtros		Guardar filtro				
Actividad	Persona asignada	Informador	Prioridad	Estado	Rei	+
SCRUM-14 RF-009 Consultar historial de produ...	Rocio Corral	Rocio Corral	= Medium	FINALIZADA	Listo	
SCRUM-13 RF-008 Eliminar lotes de producción	Rocio Corral	Rocio Corral	= Medium	FINALIZADA	Listo	
SCRUM-12 RF-007 Editar lotes de producción	Rocio Corral	Rocio Corral	= Medium	FINALIZADA	Listo	
SCRUM-11 RF-006 Cargar lotes de producción...	Rocio Corral	Rocio Corral	= Medium	FINALIZADA	Listo	
SCRUM-10 RF-005 Ver y editar perfil de usuario	Rocio Corral	Rocio Corral	= Medium	FINALIZADA	Listo	
SCRUM-9 RF-004 Validar autorización según ...	Rocio Corral	Rocio Corral	= Medium	FINALIZADA	Listo	
SCRUM-8 RF-003 Mantener sesión de usuario	Rocio Corral	Rocio Corral	= Medium	FINALIZADA	Listo	
SCRUM-7 RF-003 Mantener sesión de usuario	Rocio Corral	Rocio Corral	= Medium	FINALIZADA	Listo	
SCRUM-6 RF-001 Registrar usuario con difere...	Rocio Corral	Rocio Corral	= Medium	FINALIZADA	Listo	

Figura 4.5: Tablero de Jira para la gestión de historias de usuario

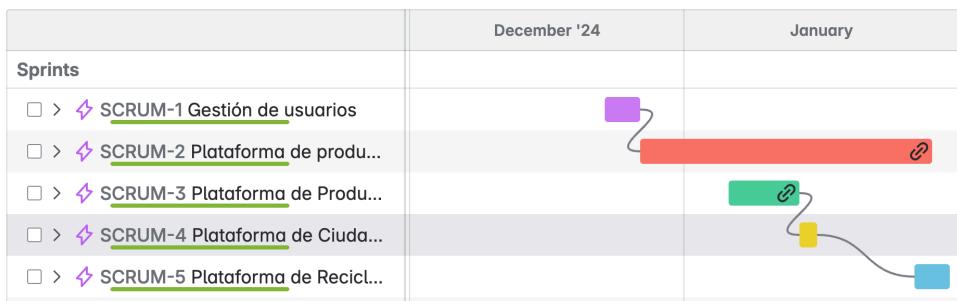


Figura 4.6: Diagrama de Gantt para la planificación del proyecto

Concluidas las fases de modelado de requerimientos y planificación, se establece la base para la siguiente etapa del proceso. El conjunto de requerimientos, casos de uso y la planificación detallada con las historias de usuario constituyen la referencia que guiará las fases de diseño, implementación y pruebas del sistema. En el próximo capítulo, se abordará el diseño de la

arquitectura y los componentes del sistema, donde se definirán las soluciones tecnológicas y la estructura del software que implementará los requerimientos establecidos.

5

DISEÑO DE SOLUCIÓN

En la fase de modelado de requerimientos se definieron las bases del sistema, estableciendo sus funcionalidades y características que el prototipo debe cumplir. A partir de estas bases, es posible proceder a la etapa de diseño de solución, que es una transición entre la especificación de lo que el sistema debe hacer y el cómo se construirá, transformando los requisitos abstractos en una arquitectura concreta y un plan de implementación. El diseño permite obtener una visión integral del sistema antes de iniciar la implementación, lo que facilita la identificación de dependencias e interfaces y asegura que todos los componentes y módulos interactúen de manera coherente. Este proceso de planificación anticipada reduce la probabilidad de encontrar inconsistencias, fallas de lógica o funcionalidades indefinidas durante las fases de desarrollo y pruebas.

El diseño de la solución, en el marco del modelo en V, se aborda en dos etapas: primero se realiza el diseño de arquitectura y luego el diseño de componentes. Cada una de estas etapas se enfoca en un nivel de abstracción distinto del sistema. El diseño de arquitectura comprende la definición de la estructura general del sistema a través de módulos, mientras que el diseño de componentes se ocupa de los detalles internos de cada módulo.

En la primer etapa, diseño de arquitectura, el sistema se divide en subsistemas o módulos lógicos, y se definen sus interacciones, las responsabilidades de cada uno y las tecnologías subyacentes. Este enfoque permite establecer las bases del sistema, abarcando tanto los requerimientos funcionales como los no funcionales. Las decisiones de diseño tomadas en esta etapa se validan posteriormente mediante pruebas de sistema, las cuales se encargan de verificar que todos los módulos trabajen conjuntamente y que el sistema de forma integral satisfaga los requerimientos especificados.

Por otro lado, la segunda etapa es el diseño de componentes, donde se profundiza en los deta-

lles de la arquitectura interna de cada módulo. Esto incluye la especificación de clases, interfaces, flujos de datos y la organización de la lógica de negocio. Los requerimientos funcionales, guiados por las historias de usuario, se traducen en documentos de arquitectura de software específicos que posteriormente se implementan en la fase de codificación. Las decisiones de diseño tomadas en esta etapa se verifican a través de las pruebas de integración, que aseguran que los componentes individuales interactúen de forma correcta entre sí.

Los requerimientos funcionales, definidos en el capítulo anterior, son el fundamento para el diseño de la solución y se utilizan en esta etapa a través de las historias de usuario, que guían el diseño de los módulos y componentes. De manera complementaria, los requerimientos no funcionales también se contemplan en la fase de diseño, particularmente en el diseño de arquitectura, donde se establecen las bases para garantizar atributos como la seguridad, el rendimiento y la escalabilidad, incluso si no están directamente asociados a una historia de usuario.

A continuación, se explicará cada una de las etapas del diseño de solución, comenzando con el diseño de arquitectura en la sección 5.1, seguido por el diseño de componentes en la sección 5.2.

5.1. Diseño de Arquitectura

La fase de diseño de arquitectura representa el primer paso en la traducción de los requerimientos del sistema hacia un sistema de software funcional. El diseño permite una visión global de la solución, asegurando que todos los componentes y módulos trabajen juntos de manera coherente previo a la implementación. A partir de los requerimientos previamente definidos, se establece un marco de trabajo de alto nivel que estructura la solución en componentes lógicos, delineando sus responsabilidades, las interacciones entre ellos y las tecnologías que los soportan. La salida de esta etapa es la arquitectura del sistema, la cual servirá de base para las decisiones de diseño a un nivel más granular. En el contexto del modelo en V, las decisiones tomadas en esta etapa se validan en la fase de pruebas de sistema, donde se verifica que la arquitectura en su conjunto cumple con las especificaciones definidas en los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema.

Para el prototipo tecnológico de trazabilidad de vidrio basado en blockchain, la arquitectura del sistema se concibió siguiendo un enfoque de tres capas lógicas para asegurar una clara separación de responsabilidades y modularidad. Este patrón, común en el desarrollo de aplicaciones web, permite que cada capa se desarrolle, mantenga y escale de forma independiente. La arquitectura se compone de la capa de presentación (frontend), la capa de lógica de negocio (backend) y la capa de datos (blockchain y base de datos relacional). La comunicación entre estas capas se define a través de interfaces estandarizadas, lo que promueve una baja dependencia y puede facilitar futuras extensiones e integraciones, por ejemplo, con sistemas de gestión externos o con dispositivos de Internet de las Cosas (IoT) para automatizar la captura de datos en los procesos productivos.

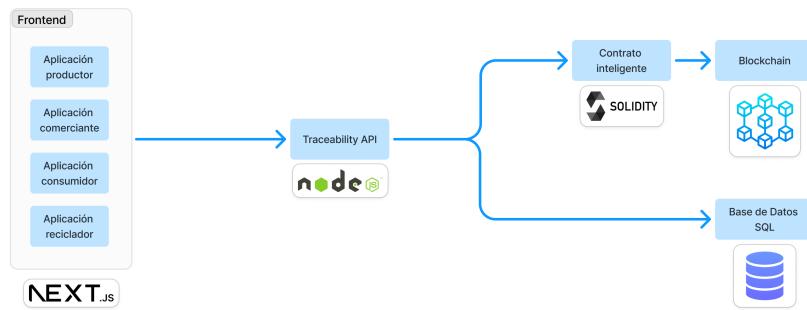


Figura 5.1: Arquitectura del sistema

A su vez, dentro de cada capa del sistema, es necesario definir un criterio para la delimitación de los módulos lógicos dentro de la misma capa. El criterio aplicado en este trabajo se basa en el principio de cohesión funcional, el cual plantea agrupar las funcionalidades y responsabilidades del sistema a partir de cada rol de usuario identificado. Siguiendo este criterio, para este trabajo se definió implementar un módulo específico para cada actor (productor primario, productor secundario, consumidor y centro de reciclaje), así como módulos compartidos para la lógica de negocio transversal, como la autenticación de usuarios o trazabilidad de envases de vidrio. Esta división de responsabilidades reduce el acoplamiento entre los módulos y simplifica el mantenimiento del sistema, en el caso de requerir cambios o actualizaciones en el futuro.

Luego de definir las capas que componen la arquitectura del sistema, es posible proceder a seleccionar las tecnologías más adecuadas para cada uno de los módulos definidos. La elección de tecnologías para cada capa busca satisfacer una serie de criterios técnicos y de negocio, incluyendo la compatibilidad con otras tecnologías, el rendimiento, la escalabilidad y el soporte de la comunidad.

A continuación, se describen las tecnologías seleccionadas, los patrones de diseño aplicados y las decisiones arquitectónicas tomadas para cada capa del sistema. Comenzando por la capa de datos, se explicará la arquitectura desde adentro hacia afuera, siguiendo el flujo de datos desde su almacenamiento hasta la presentación al usuario final.

5.1.1. Capa de Datos

La capa de datos constituye el cimiento de todo sistema de software. Se encarga de la persistencia, gestión y recuperación de toda la información del sistema. Las bases de datos relacionales son el tipo de base de datos más utilizado actualmente para gestionar información estructurada. Los datos se organizan en tablas, con filas y columnas, y se pueden establecer relaciones entre las distintas tablas mediante claves únicas. Cada columna tiene un nombre y un

tipo de dato asociado, mientras que cada fila representa un registro único dentro de la tabla y su contenido debe cumplir con el tipo de dato definido para cada columna. Por ejemplo, se podría definir una tabla “Usuario”, para almacenar información sobre los usuarios del sistema, incluyendo columnas como “nombre” de tipo texto, “correo electrónico” de tipo texto y “fecha de registro” de tipo fecha, entre otras columnas. Cada fila en esta tabla representaría un usuario específico, con su nombre, correo electrónico y la fecha en que se registró en el sistema, entre otros datos. Las principales ventajas de las bases de datos relacionales radican en su capacidad para garantizar la uniformidad de los datos a través de esquemas definidos para cada tabla, así como la facilidad para realizar consultas y análisis complejos de manera eficiente. Sin embargo, su naturaleza centralizada las hace susceptibles a manipulaciones manuales difíciles de detectar, lo que justifica la necesidad de una tecnología complementaria, como la blockchain, para registrar información que requiere garantías de integridad.

En este prototipo, la tecnología blockchain resulta apropiada para registrar la información clave del sistema, que requiere inmutabilidad y transparencia para fomentar la confianza entre los distintos actores. Ejemplos de este tipo de información puede ser la propiedad de los lotes de envases vidrio o la trazabilidad de los envases reciclados. Por este motivo, se tomó la decisión estratégica de combinar la blockchain con una base de datos relacional con el objetivo de resolver la necesidad de equilibrio entre la seguridad y la transparencia, con el rendimiento y la escalabilidad. La blockchain, por su naturaleza, provee una fuente de información segura y transparente, pero puede presentar limitaciones en cuanto a la velocidad de las transacciones y el volumen de datos que permite consultar eficientemente. Para abordar estas limitaciones, es que se decidió utilizar la blockchain como base de datos principal del sistema, mientras que se decidió utilizar una base de datos relacional complementaria para almacenar datos auxiliares e indexar los datos de acceso frecuente, como los perfiles de usuario, los metadatos de los lotes (id, propietario, estado, etc.) y otros datos de soporte que no requieren inmutabilidad. La relación entre ambas fuentes de datos se maneja mediante identificadores únicos que se almacenan en la blockchain, sirviendo como una referencia a los datos detallados en la base de datos relacional. La capa backend es responsable de mantener la consistencia entre ambas fuentes de información (blockchain y base de datos relacional) a la hora de persistir nueva información o actualizar información existente. Este enfoque híbrido permite proveer una recuperación de información ágil y una experiencia de usuario fluida sin poner en compromiso la integridad de los datos sensibles.

Luego de definir la estrategia de almacenamiento y gestión de datos, es posible proceder a seleccionar las tecnologías específicas que se utilizarán, tanto para la base de datos relacional como para la plataforma blockchain, ya que existen múltiples opciones en el mercado.

En el caso de la base de datos relacional, se optó por el uso de MariaDB¹, una base de datos de código abierto elegida por su sencillez y familiaridad, ya que el uso que se le dará en este trabajo es complementario y no hace falta utilizar una alternativa más compleja. MariaDB cuenta con un amplio soporte, librerías y documentación disponible para conectarse a ella de forma

¹ <https://mariadb.org/documentation/>

estandarizada desde cualquier lenguaje o framework utilizado en la capa backend.

Por otro lado, para la tecnología blockchain, la elección de una plataforma adecuada puede determinar la complejidad y tiempo de implementación del sistema. La tecnología blockchain no se implementa desde cero, sino que se utilizan plataformas ya desarrolladas y probadas que ofrecen características y funcionalidades específicas. Estas plataformas, conocidas como protocolos blockchain, varían en aspectos como su mecanismo de consenso, lenguaje de programación y comunidad de desarrolladores. Para este trabajo, se analizaron cinco de las plataformas líderes en la industria para su análisis y comparación: Hyperledger Fabric, Ethereum, Polkadot, VeChain y Cardano. Estas plataformas se seleccionaron por su relevancia y características técnicas, evaluando su idoneidad para el caso de uso específico de trazabilidad en la cadena de suministro del vidrio.

Hyperledger Fabric² es una plataforma de código abierto diseñada para uso empresarial, que forma parte de la Fundación Linux [31]. Se caracteriza por su arquitectura modular y configurable, ideal para una amplia gama de casos de uso en la industria. A diferencia de las redes públicas, es una plataforma permisionada, lo que significa que los participantes se conocen y confían entre sí. Admite contratos inteligentes en lenguajes de programación comunes como Java y Node.js, lo que reduce la curva de aprendizaje. Hyperledger no requiere una criptomoneda nativa, lo que elimina ciertos riesgos de ataque y permite que la plataforma se implemente con costos operativos similares a los de cualquier otro sistema distribuido.

Ethereum³ es una plataforma de código abierto y pública que permite a los desarrolladores crear contratos inteligentes y aplicaciones descentralizadas (dApps). Se considera una computadora mundial descentralizada, alimentada por su criptomoneda nativa, Ether. Ethereum fue pionera en la creación de contratos inteligentes y ha mantenido un liderazgo en la industria desde su lanzamiento en 2015. Los contratos se escriben en Solidity, un lenguaje de programación de dominio específico que se ejecuta en la red de Ethereum. Aunque se lanzó con un protocolo de consenso de Prueba de Trabajo (PoW), la plataforma ha migrado a la Prueba de Participación (PoS) para mejorar su eficiencia energética y escalabilidad.

Polkadot⁴ es una plataforma de código abierto que busca facilitar la interoperabilidad entre diferentes blockchains. Su objetivo es crear una red escalable y segura que pueda soportar una amplia gama de aplicaciones descentralizadas. Su arquitectura se basa en una cadena principal (Relay Chain) y múltiples cadenas que se conectan a ella (parachains), permitiendo que las blockchains se comuniquen entre sí de manera eficiente a través de la Relay Chain. Utiliza un protocolo de consenso derivado de PoS, llamado Nominated Proof of Stake (NPoS) y su criptomoneda nativa es DOT. Las aplicaciones se desarrollan con Substrate, un framework modular escrito en Rust, que también es compatible con contratos inteligentes escritos en Solidity.

VeChain⁵ es una plataforma de código abierto dedicada específicamente a la trazabilidad y

² <https://hlf.readthedocs.io/en/latest/>

³ <https://ethereum.org/en/developers/docs/>

⁴ <https://docs.polkadot.com/>

⁵ <https://docs.vechain.org/>

Tecnología	Hyperledger	Ethereum	Polkadot	VeChain	Cardano
Consenso	Flexible	PoW - PoS	NPoS	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

Tabla 5.1: Comparación de plataformas blockchain

la autenticación de productos en la cadena de suministro. Combina tecnología blockchain con identificación por radiofrecuencia (RFID) e Internet de las cosas (IoT) para rastrear productos desde la producción hasta el consumidor final. Es una plataforma permisionada, donde los participantes se conocen y confían mutuamente, lo que permite una mayor privacidad y confidencialidad. Utiliza una arquitectura de dos tokens (VET y VTHO) y un protocolo de consenso de Prueba de Autoridad (PoA). Al ser compatible con Solidity, facilita la migración de aplicaciones existentes de Ethereum.

Cardano⁶ es una plataforma de blockchain de código abierto que se enfoca en la creación de una red escalable, segura y sostenible. Se distingue por su enfoque científico y riguroso, utilizando evidencia formal y revisión por pares para garantizar la seguridad y confiabilidad de la plataforma. Para programar aplicaciones se utiliza el lenguaje de programación funcional Haskell, que permite la verificación formal de los contratos inteligentes. También se pueden desarrollar contratos utilizando Plutus, un lenguaje de dominio específico basado en Haskell. La red utiliza un protocolo de consenso PoS y su criptomoneda nativa es ADA.

En la Tabla 5.1, se presenta un resumen comparativo de los protocolos blockchain analizados, destacando los aspectos relevantes de cada uno para la selección del más adecuado para este trabajo.

Luego de realizar el análisis comparativo entre protocolos blockchain, se llega a la determinación de que Ethereum resulta ser la tecnología más adecuada para este trabajo por múltiples razones. En primer lugar, su naturaleza pública está alineada con el objetivo del proyecto, ya que permite a cualquier persona unirse a la red y verificar el estado de la cadena de forma transparente, sin necesidad de permisos, como puede ocurrir en las plataformas permisionadas como Hyperledger. A su vez, otro factor influyente en esta elección es la adopción del mecanismo de consenso PoS en la red Ethereum, que es más eficiente energéticamente que PoW, de modo que se alinea directamente con los objetivos de sostenibilidad ambiental del proyecto. Además, Ethereum posee la mayor comunidad de desarrolladores entre las plataformas analizadas y una alta adopción en la industria, lo que garantiza un soporte continuo y una amplia gama de herramientas y recursos a su disposición. Su lenguaje de programación, Solidity, es de alto nivel y fácil de aprender en comparación a lenguajes como Rust y Haskell, permitiendo la creación de aplicaciones complejas de manera eficiente. Finalmente, existe una amplia variedad de herramientas que permiten conectar otras tecnologías y sistemas con Ethereum,

⁶ <https://docs.cardano.org/>

facilitando la integración con la base de datos relacional y la capa backend del sistema.

Sin embargo, Ethereum presenta algunas desventajas, como los altos costos de transacción y alta latencia de red, que pueden afectar la experiencia del usuario y la viabilidad económica del sistema. Afortunadamente, en la actualidad existen múltiples soluciones para mitigar estos problemas. En particular, para mitigar los altos costos y la latencia de la red de Ethereum para esta aplicación de trazabilidad que puede alcanzar un volumen de datos considerable, se decidió realizar el despliegue de los contratos en una solución de capa 2 de Ethereum. Este tipo de solución en capas permite procesar las transacciones fuera de la cadena principal para luego sincronizarlas, lo que reduce costos y aumenta la escalabilidad, sin comprometer la seguridad ni la integridad de los datos de la blockchain. A su vez, se eligió hacer uso del framework Hardhat para el desarrollo y despliegue de los contratos inteligentes, ya que es una herramienta ampliamente adoptada que facilita la implementación y ejecución de pruebas unitarias y de integración sobre contratos inteligentes en Solidity.

5.1.2. Capa Backend

La capa de lógica de negocio, generalmente conocida como backend o API, actúa como el cerebro del sistema. Su propósito principal es implementar y ejecutar las reglas de negocio del sistema, orquestar la interacción entre las distintas capas (capa frontend y capa de datos), y exponer una interfaz estandarizada a través de la cual otros componentes puedan interactuar con la funcionalidad del sistema, sin depender de su implementación interna.

Para este prototipo, se ha optado por implementar una arquitectura desacoplada, donde la capa de presentación (frontend) y la capa de lógica de negocio se desarrollan de forma independiente. Este tipo de arquitectura desacoplada resulta necesaria para un sistema de las características de este trabajo. A diferencia de una arquitectura monolítica, este enfoque promueve la modularidad y la escalabilidad, permitiendo que la interfaz de usuario pueda evolucionar o ser reemplazada sin afectar la lógica de negocio central de la aplicación. Este diseño responde directamente al requerimiento no funcional de interoperabilidad (RNF-05), ya que la API de trazabilidad está pensado para ser el punto de integración principal no solo para el frontend del prototipo, sino también para sistemas de gestión preexistentes, dispositivos IoT y otras aplicaciones de terceros que pudieran surgir en el futuro para la trazabilidad de procesos de la cadena de suministro y reciclaje de los envases de vidrio.

Para la implementación de la capa backend se tomó la decisión de utilizar la tecnología Node.js⁷, un entorno de ejecución del lenguaje Javascript que permite crear servidores, aplicaciones web, herramientas de línea de comandos y scripts. A su vez, JavaScript es un lenguaje de programación de alto nivel, interpretado y dinámico, que es ampliamente conocido y utilizado para el desarrollo web tanto en frontend como en backend. Su curva de aprendizaje es relativamente baja y es el lenguaje que se utiliza para dar dinamismo a las páginas web. Sin embargo, su uso también se ha extendido al lado del servidor gracias a entornos de ejecución como No-

⁷ <https://nodejs.org/es>

de.js, lo que ha permitido a los desarrolladores crear aplicaciones web completas utilizando un único lenguaje de programación. Su popularidad y amplia adopción en la industria, se deben a su flexibilidad y a la gran cantidad de librerías y frameworks que se han desarrollado para este lenguaje, que permiten construir tanto aplicaciones web simples, como sistemas complejos y escalables.

Existen múltiples motivos que justifican la elección del entorno Node.js para el desarrollo de la capa backend de este trabajo. En primer lugar, considerando el alcance limitado del trabajo, Javascript resulta ser un lenguaje propicio debido a su baja curva de aprendizaje y su flexibilidad para ser utilizado tanto en la capa backend como en la capa frontend, lo que facilita el proceso de desarrollo al permitir que el mismo desarrollador trabaje en ambas capas sin necesidad de cambiar de lenguaje. Existen múltiples lenguajes y frameworks ampliamente utilizados en la industria para desarrollar la capa backend de aplicaciones web, como Java con Spring Boot, Python con Django o Flask y Ruby on Rails, pero la posibilidad de utilizar el mismo lenguaje tanto en frontend como en backend, simplifica el proceso de desarrollo en equipos pequeños o unipersonales y ayuda a facilitar el mantenimiento del código en el futuro. A su vez, Node.js ofrece una excelente soporte para la interacción con la red de Ethereum, mediante una serie de librerías ampliamente adoptadas y probadas en la comunidad, como pueden ser Ethers.js y Web3.js. Por último, la amplia adopción de Node.js en la industria y la disponibilidad de herramientas para pruebas unitarias facilitan el desarrollo y el mantenimiento del sistema.

Por otro lado, la comunicación del backend con las demás capas del sistema debe implementarse a través de interfaces bien definidas. Con la capa de presentación, el backend se comunica mediante una API RESTful. El estándar REST (Representational State Transfer) define una arquitectura para la comunicación entre sistemas que se basa en el uso del protocolo HTTP para intercambiar información sin mantener un estado entre intercambios. Una API RESTful utiliza los métodos estándar de HTTP (como GET, POST, PUT, DELETE) para realizar operaciones sobre los recursos del sistema, y el formato JSON para el intercambio de datos. Por ejemplo, el frontend del sistema podría enviar una solicitud GET a la API para solicitar la lista de envases de vidrio producidos por cierto productor primario. En este caso, el backend respondería con la información solicitada en formato JSON y el frontend podría utilizar esta información para actualizar la interfaz de usuario, mostrando el listado de los envases de vidrio correspondientes al usuario.

Dentro del entorno de Node.js, existen múltiples librerías y frameworks que facilitan el desarrollo de APIs REST. La opción más popular y ampliamente adoptada es Express.js⁸, un framework minimalista y flexible que proporciona las utilidades esenciales para la construcción de APIs RESTful. Entre sus principales ventajas se encuentran su simplicidad, flexibilidad y extensibilidad. Gracias a estas características, Express.js es utilizado para construir API REST directamente, pero también ha sido utilizado como base de múltiples frameworks de desarrollo de APIs RESTful más complejos, como Nest.js, Sails.js y Sails.js, entre otros. Estos frameworks extienden las funcionalidades de Express.js y facilitan el desarrollo de APIs RESTful en No-

⁸ <https://expressjs.com/>

de.js, añadiendo funcionalidades adicionales que mejoran la mantenibilidad y escalabilidad de las APIs RESTful. Sin embargo, estos frameworks suelen imponer una estructura más rígida y una curva de aprendizaje más pronunciada que Express.js. Por este motivo, se decidió utilizar Express.js como base para el desarrollo de la API del sistema, ya que no impone restricciones adicionales sobre el modelo arquitectónico y permite una implementación eficiente y escalable, sin sacrificar la flexibilidad necesaria para adaptarse a los requerimientos específicos del sistema.

Finalmente, para la interacción con la capa de datos, el backend se conecta a la base de datos relacional mediante librerías de conexión estandarizadas y a la blockchain a través de librerías de interacción con contratos inteligentes, lo que permite un acceso unificado a los datos, abstrayendo la complejidad de cada fuente de datos y proporcionando una interfaz coherente para la capa frontend del sistema.

5.1.3. Capa Frontend

La capa de presentación, conocida habitualmente como frontend, es la interfaz de usuario web que permite a los distintos actores de la cadena de suministro interactuar con el sistema de trazabilidad del vidrio. Su objetivo es traducir la lógica de negocio y los datos que provienen de la API en una experiencia visual y funcional, permitiendo que los usuarios interactúen con el prototipo de manera intuitiva. El frontend es la cara visible del sistema completo.

Para este prototipo, se tomó la decisión de implementar de forma desacoplada la interfaz de la lógica de negocio, con el objetivo de reforzar la mantenibilidad y flexibilidad del sistema. Esta separación es propicia para que la interfaz de usuario pueda evolucionar de manera independiente de la lógica, adaptándose a nuevas necesidades, experiencias de usuario o tecnologías sin afectar el funcionamiento del sistema. Con este esquema, es factible que en un futuro, cada actor de la cadena tenga acceso a una interfaz a medida de sus necesidades. Por ejemplo, para un productor de envases de vidrio, se podría desarrollar una aplicación de escritorio con métricas de negocio sobre su producción y venta, mientras que para los consumidores, se podría crear una aplicación móvil que muestre puntos de reciclaje y ofrezca incentivos por reciclar. Aunque el prototipo desarrollado para este trabajo final presenta una interfaz web unificada para todos los actores, el diseño modular facilita la creación de estas aplicaciones independientes en el futuro.

La elección tecnológica para esta capa estuvo focalizada en encontrar frameworks y librerías que promuevan la modularidad y la eficiencia durante el desarrollo. En primer lugar, se determinó utilizar React⁹ como librería base para la construcción de la interfaz, debido a su modelo de desarrollo basado en componentes, que promueve la reutilización de código. A su vez, para potenciar React, se optó por hacer uso del framework Next.js¹⁰, que agrega funcionalidades extra a React para facilitar aún más el desarrollo de aplicaciones web modulares y de alto rendimiento.

⁹ <https://es.react.dev/>

¹⁰ <https://nextjs.org/docs>

miento, combinando técnicas como generación de sitios estáticos y renderizado en el servidor. Por otro lado, para el diseño de las interfaces web se utiliza el lenguaje de estilado CSS, que en este prototipo se complementó con el uso de la librería Tailwind CSS¹¹ que promueve una estética moderna y una sintaxis simplificada dentro del código.

La comunicación del frontend con el backend se realiza exclusivamente a través de llamadas a la API RESTful. La interfaz no contiene la lógica de negocio, sino que actúa como un cliente ligero que envía datos al backend (por ejemplo, al registrar un nuevo lote) y recibe la respuesta, la cual es luego presentada al usuario. Este modelo garantiza que el frontend se enfoca en la interacción y la visualización, mientras la lógica crítica reside en el backend. Debido a que el frontend se enfoca únicamente en la visualización de información, es necesario implementar un sistema de autenticación y autorización unificado entre frontend y backend que permita a cada usuario visualizar e interactuar únicamente con las funcionalidades propias de su rol. Por este motivo, para gestionar la autenticación de usuarios este proyecto, se determinó hacer uso del servicio Firebase Authentication, que gestiona la autenticación de usuarios e implementa de forma abstracta el estándar de autorización OAuth 2.0, asegurando que solo los actores con los permisos adecuados puedan acceder a cada recurso del sistema.

Luego de definir la arquitectura de la aplicación web, incluyendo la definición de capas, la comunicación entre ellas y los lenguajes de programación a utilizarse, es posible comenzar con la etapa de diseño de componentes. En esta segunda etapa de diseño, se define la arquitectura interna de cada capa o módulo definido en la etapa anterior. En la próxima sección, se detallará el diseño de componentes de este sistema, que abarca la estructura interna del frontend, la API y la capa de datos.

5.2. Diseño de Componentes

La segunda etapa de diseño, el diseño de componentes, tiene como objetivo detallar la arquitectura interna de los módulos definidos en la fase anterior. Su propósito es traducir la arquitectura de alto nivel en un plan de construcción específico, que incluye la estructura de la interfaz de usuario, la arquitectura de la API y el modelo de datos. Esta fase toma como punto de partida los requerimientos del sistema y la arquitectura de módulos previamente definida, y su resultado es un conjunto de especificaciones detalladas que guiarán la implementación de cada módulo del software. De esta forma, se busca asegurar la cohesión interna de cada módulo y su correcta interacción con los demás. A su vez, cada decisión de diseño tomada en esta etapa se verificará posteriormente en la fase de pruebas de integración, que valida la correcta comunicación entre los componentes del sistema.

A continuación, se presentarán las decisiones de diseño tomadas para cada uno de los módulos definidos en la arquitectura del sistema: la capa de datos, la capa de lógica de negocio (backend) y la capa de presentación (frontend).

¹¹<https://tailwindcss.com/>

5.2.1. Arquitectura de Datos

El diseño de la arquitectura de datos representa un componente central de este trabajo, ya que debe integrar de manera transparente y eficiente la naturaleza descentralizada de la blockchain con la eficiencia y escalabilidad de una base de datos relacional para cumplir con los requerimientos no funcionales del sistema (RNF-01: Transparencia, RNF-03: Escalabilidad y RNF-06: Integridad). La solución definida durante la etapa de diseño de arquitectura propone un modelo de datos híbrido para optimizar el almacenamiento y la recuperación de información. En este esquema, la blockchain se utiliza como una capa de confianza inmutable, mientras que la base de datos SQL se encarga de la gestión de datos auxiliares que no requieren la inmutabilidad de la cadena de bloques. El diseño de componentes para esta arquitectura, por lo tanto, implica definir la estructura de los contratos inteligentes en la blockchain y el esquema de la base de datos relacional, asegurando que ambos sistemas interactúen de manera eficiente y coherente.

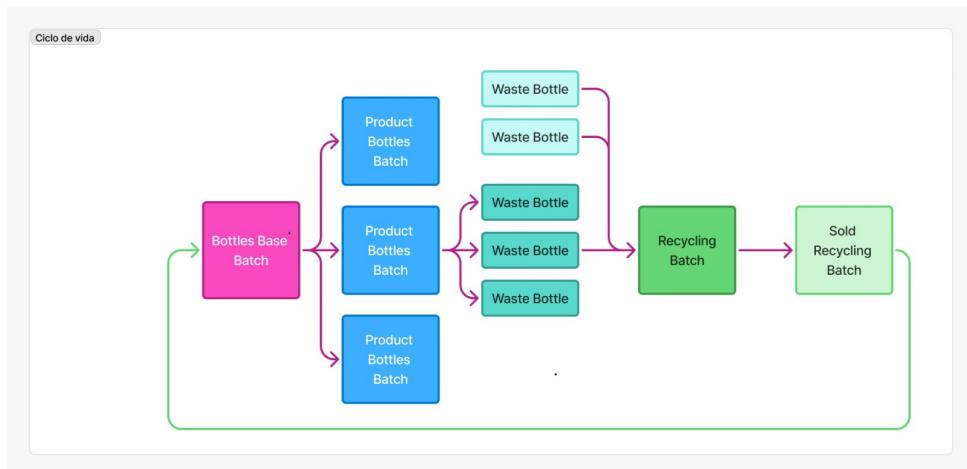


Figura 5.2: Diagrama de ciclo de vida de los envases.

En primera instancia, se definió la representación de los datos, tanto en la blockchain como en la base de datos relacional. Con base en los requerimientos del sistema y la investigación sobre el ciclo de vida del vidrio, se optó por representar cada envase o conjunto de envases con una estructura distinta en cada etapa de su vida útil. Esta decisión se tomó debido a que los envases tienen metadatos, propietarios y agrupaciones diferentes en cada fase del proceso. El flujo de estados de los envases de vidrio, como se observa en la Figura 5.2, comienza con un lote de envases producido por el productor primario, que luego se vende a múltiples productores secundarios para crear lotes de productos envasados. Finalmente, los consumidores pueden llevar cada envase vacío a centros de reciclaje, donde se agrupan en lotes de reciclaje para su posterior reprocesamiento. Para mantener la trazabilidad completa del ciclo de vida, cada elemento posee una referencia a su ID de origen, lo que permite rastrear, a partir de un envase reciclado, el lote original en el que fue producido, su productor y sus metadatos.

A partir de la representación de los datos, se diseñaron los contratos inteligentes en la blockchain para almacenar únicamente la información necesaria para garantizar la trazabilidad de

los envases y la integridad de los datos, como un identificador único de cada lote de vidrio, sus metadatos esenciales de producción, el propietario actual y un historial de las transferencias de propiedad y de estado. Al igual que en un sistema de programación orientada a objetos (OOP), los contratos en Solidity implementan atributos que guardan el estado y métodos que permiten interactuar con él. En lugar de un único contrato monolítico, se decidió implementar tres contratos que interactúan entre sí para lograr mayor modularidad, mantenibilidad y desacoplamiento. A continuación, se detalla la arquitectura de cada uno de ellos, mientras que en la Figura 5.3 se presenta un diagrama de la arquitectura de los contratos inteligentes.

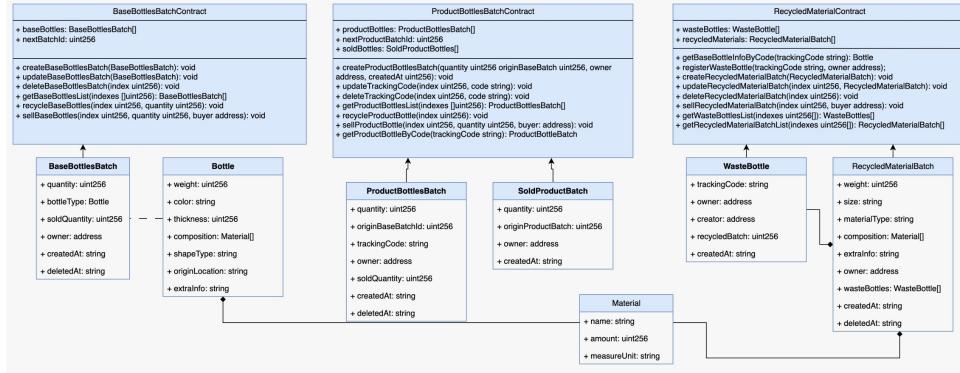


Figura 5.3: Diagrama de la arquitectura de smart contracts.

Contrato 1: BaseBottlesBatchContract es el punto de partida del ciclo de vida del vidrio, encargado de gestionar la producción inicial de los envases. Sus responsabilidades incluyen registrar lotes de botellas recién fabricadas por el productor primario y sus metadatos (como la cantidad y composición), así como gestionar la transferencia de propiedad a productores secundarios. Sus métodos permiten crear, actualizar y eliminar lotes, además de consultar la información histórica de los mismos. La información de este contrato es consumida por el contrato ProductBottlesBatchContract, proporcionando una referencia al lote original para el siguiente eslabón de la cadena de trazabilidad.

Contrato 2: ProductBottlesBatchContract gestiona la segunda fase del ciclo de vida del vidrio, comprende el envasado y la comercialización de estos productos. Este contrato registra los lotes de productos terminados, asociando un código de seguimiento a cada uno y referenciando el lote de envases original del contrato BaseBottlesBatchContract. Sus funciones permiten crear lotes de productos, registrar su venta y marcar aquellos envases que se convierten en residuos. La información de seguimiento generada en este contrato juega un rol central en el sistema de trazabilidad, ya que el código de seguimiento introducido en este contrato actúa como el eslabón intermedio que permite vincular el lote de origen de un envase de BaseBottlesBatchContract con el envase en RecycleMaterialContract cuando el consumidor lo deseche para su posterior reciclaje.

Contrato 3: RecycleMaterialContract cubre la gestión del final de la vida útil de los envases, desde su recolección como residuo hasta su procesamiento como material reciclado. Este contrato almacena los registros de los envases que han sido entregados para reciclaje, permitiendo crear nuevos lotes de material reciclado a partir de ellos. Sus métodos permiten registrar enva-

ses de desecho, crear lotes de material reciclado (agrupando envases previamente registrados) y transferir la propiedad de estos lotes a los productores primarios, cerrando de esta forma el ciclo de vida circular del vidrio. La información de seguimiento de los envases provista por el contrato ProductBottlesBatchContract es consumida por este contrato, que a su vez genera nuevos lotes de material que pueden ser reutilizados por el contrato BaseBottlesBatchContract.

De forma complementaria a la arquitectura de contratos inteligentes, el diseño de la base de datos relacional almacena la información de los usuarios (relacionada con los requerimientos funcionales de autenticación y autorización) y una referencia al ID y propietario de cada lote y envase registrado en la blockchain. La relación entre los datos de la blockchain y la base de datos relacional se establece mediante el identificador único del lote, que sirve como clave de enlace y permite realizar consultas de metadatos detallados de cada lote. Adicionalmente, en la base de datos relacional se guarda una referencia a cada envase reciclado por los consumidores. Esto permite que cada consumidor pueda acceder al listado de envases que ha reciclado previamente y consultar si efectivamente ha sido procesado, cumpliendo así con el requerimiento funcional asociado (RF-023). En la Figura 5.4 se presenta un diagrama que ilustra la relación entre las entidades de la base de datos.

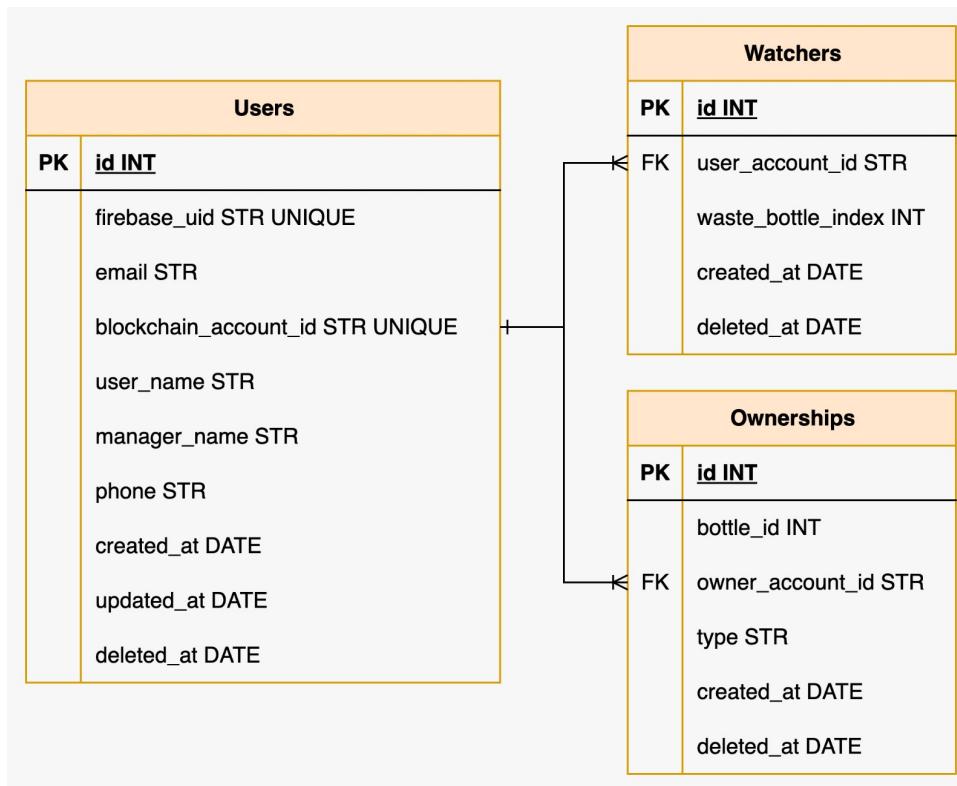


Figura 5.4: Diagrama Entidad-Relación (DER) del modelo de datos.

5.2.2. Arquitectura Backend

En el diseño de arquitectura de la capa de la capa backend se adoptó el patrón Clean Architecture (Arquitectura Limpia), un modelo de diseño que prioriza la separación de las reglas

de negocio de las dependencias externas. En este esquema, la implementación de la API se estructura en tres capas principales: Routers, Handlers y Repositories. Los routers reciben las solicitudes HTTP y las dirigen al handler correspondientes, luego los handlers contienen la lógica de negocio y orquestan las operaciones, por último, los repositories se encargan de la interacción con las fuentes de datos (ya sea la base de datos relacional o la blockchain). La comunicación entre estas capas es unidireccional, lo que significa que las capas externas solo pueden acceder a las capas más internas, reforzando así la independencia de la lógica de negocio (Figura 5.5).

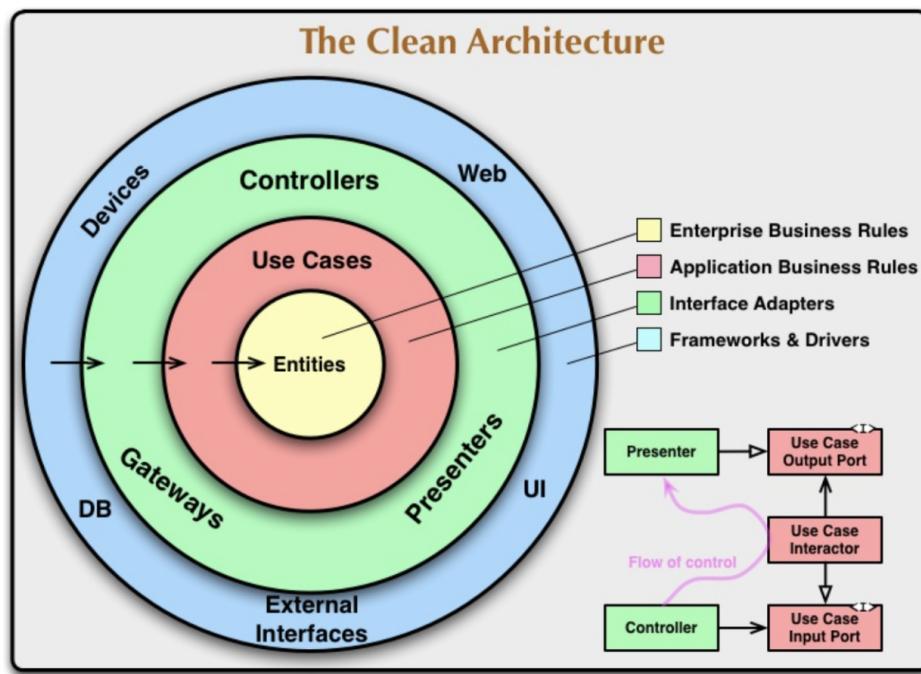


Figura 5.5: Modelo Clean Architecture.

La elección del patrón Clean Architecture se justifica por su capacidad para generar un sistema altamente desacoplado, lo que se traduce en una mayor mantenibilidad del sistema y flexibilidad ante futuros cambios. La lógica de negocio, situada en el núcleo de la arquitectura (Handlers), se mantiene independiente de las tecnologías de implementación (infraestructura), la presentación de los datos (Routers) y las bases de datos (Repositories). Esto es particularmente ventajoso en un sistema de trazabilidad como el planteado en este trabajo, donde la lógica de negocio debe ser estable, pero la interfaz de usuario y las integraciones con otros sistemas (como plataformas de gestión o dispositivos IoT) pueden evolucionar. A su vez, en este proyecto la arquitectura de la API se ha dividido en módulos de dominio (por ejemplo, gestión de usuarios o trazabilidad de lotes), cada uno de los cuales expone un conjunto de endpoints a través de una API REST.

En particular, para orquestar la comunicación entre la API, la base de datos relacional y la blockchain, se implementó un patrón de repositorios que unifica las operaciones de lectura y escritura. De esta forma, el Handler puede manejar todos los datos de manera uniforme, sin

importar si el repositorio los obtuvo de la blockchain o de la base de datos relacional, ya que esta lógica de acceso a datos se abstrae en el repositorio. Por ejemplo, al registrar un nuevo lote, el handler valida la información y luego instruye al repositorio de la blockchain para registrar la transacción y al repositorio de la base de datos relacional para almacenar la referencia del lote. En este caso, el patrón de diseño Clean Architecture permite abstraer la complejidad de la arquitectura híbrida, proporcionando una interfaz de programación unificada a la capa de lógica de negocio.

5.2.3. Arquitectura Frontend

La interfaz de usuario del sistema se diseñó como una aplicación web, con el objetivo de proporcionar una experiencia de usuario fluida, accesible desde cualquier dispositivo con conexión a Internet y sin necesidad de instalar software adicional. La interfaz se estructuró en una arquitectura basada en componentes, un patrón de diseño que promueve la creación de elementos reutilizables, modulares e independientes, que es el patrón recomendado por librerías como React y frameworks como Next.js.

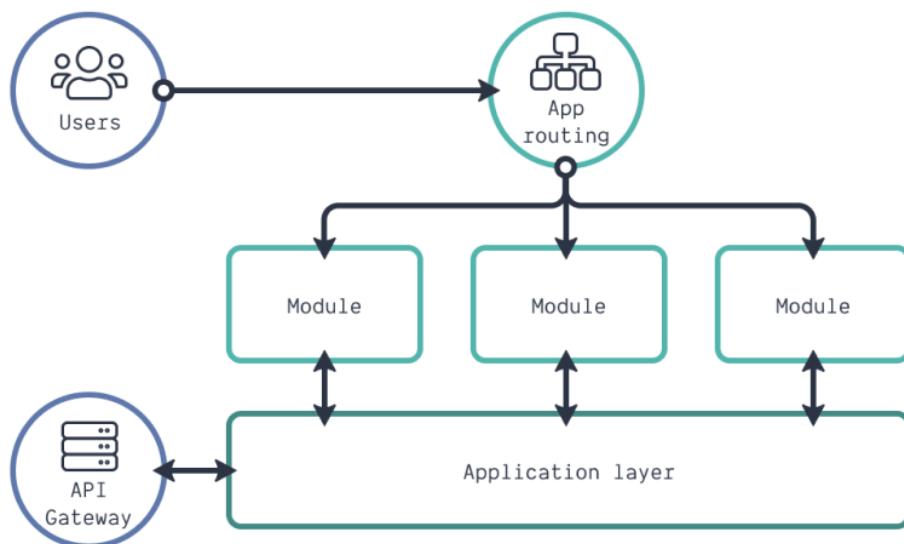


Figura 5.6: Arquitectura de módulos frontend.

Para la estructuración interna del código, se eligió implementar una arquitectura MVC (Modelo-Vista-Controlador), que establece una clara separación de responsabilidades: la vista implementa la interfaz de usuario, el controlador maneja la lógica y las interacciones, y el modelo (en este caso, un servicio) se comunica con el backend. Esta metodología, combinada con la arquitectura de componentes, facilita una construcción rápida y consistente de cada vista, al mismo tiempo que mejora la mantenibilidad del código a largo plazo, ya que cada componente puede ser actualizado sin afectar otras partes del sistema. En la Figura 5.6 se ilustra la arquitectura de componentes y módulos del frontend.

La estructura de la interfaz de usuario se organizó en módulos funcionales por cada rol de

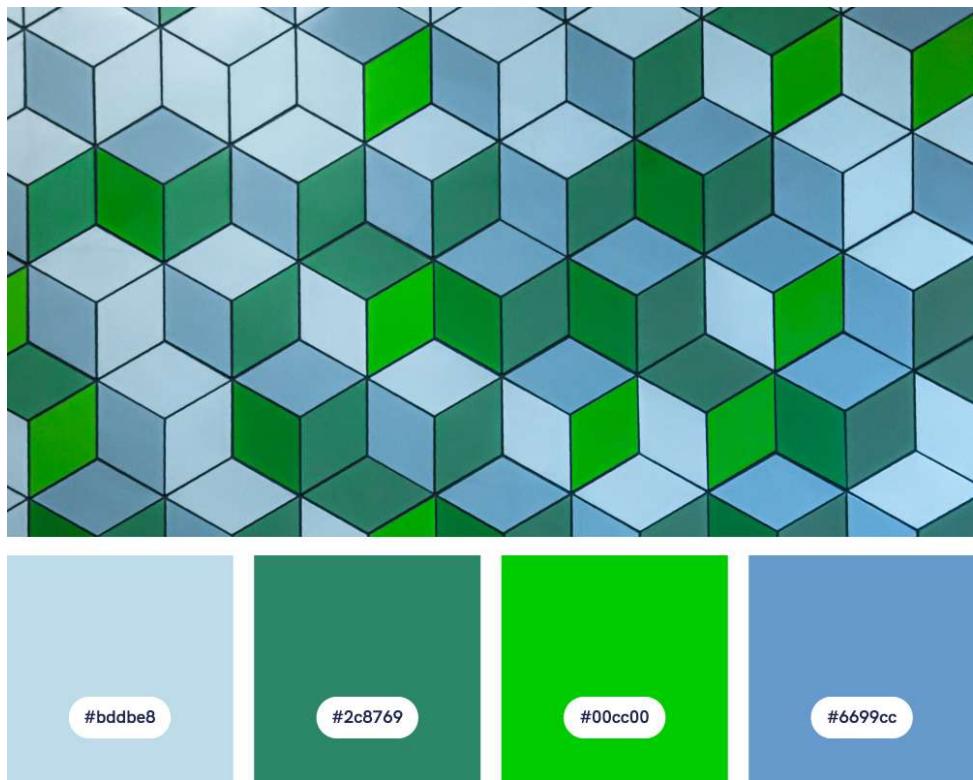


Figura 5.7: Identidad de marca de la aplicación.

usuario, lo que se alinea con la división de responsabilidades del diseño de arquitectura de backend y capa de datos. Se definieron vistas específicas para el registro y la gestión de lotes por parte de los productores, y una interfaz de consulta para los consumidores. Para asegurar una identidad visual consistente, se definió un sistema de diseño con una paleta de colores basada en tonalidades de verde con el objetivo de transmitir el compromiso ambiental del proyecto mediante la economía circular, así como también tipografías e iconografía que complementan esta estética. En la Figura 5.7 se puede observar la una muestra de la identidad de marca de la aplicación, a través de su paleta de colores y un conjunto de componentes visuales.

Con la definición de las especificaciones detalladas de la arquitectura de componentes para el frontend, el backend y la capa de datos, culmina la etapa de diseño y se completa el proceso de definición del modelo en V. Con un plan claro que define la estructura del sistema, sus módulos y sus interacciones, el proceso de desarrollo posterior puede ser más fluido, organizado y predecible. En el siguiente capítulo se abordará el proceso de implementación del prototipo tecnológico, a través del cual se materializarán los diseños aquí descritos en un software funcional que cumpla con los requerimientos establecidos.



IMPLEMENTACIÓN

La fase de implementación representa el proceso de traducción del diseño de software a código ejecutable, constituyendo el puente entre la teoría y la práctica. En el marco del modelo en V, este proceso es una de las etapas finales de la fase descendente, que a su vez marca el inicio de la fase ascendente, ya que la implementación de cada módulo va acompañada de la ejecución de pruebas unitarias. Este enfoque iterativo de desarrollo y validación temprana busca asegurar que la funcionalidad de cada componente se verifique de forma continua para minimizar la aparición de errores cuando el software se despliegue en un entorno real.

La implementación del software se llevó a cabo siguiendo la planificación elaborada a partir de las historias de usuario junto con el diseño del sistema. Durante la ejecución de esta etapa, se utilizó la herramienta Jira para gestionar las tareas en curso y el progreso del desarrollo. El cronograma original enfrentó desviaciones debido a la superposición de actividades académicas y compromisos imprevistos, pero la flexibilidad en la gestión del proyecto permitió la adaptación, posibilitando el cumplimiento de los objetivos del trabajo. En esta fase de desarrollo, se implementa e integra cada uno de los módulos definidos en el proceso de diseño, asegurando su funcionamiento de forma aislada y en conjunto.

El proceso de desarrollo se estructuró para seguir un flujo de trabajo lógico. En primer lugar, se crearon los contratos inteligentes, que conforman la capa más interna del prototipo y definen la lógica de las transacciones en la blockchain. Posteriormente, se construyó la API, que actúa como intermediario para interactuar con los contratos. Finalmente, se desarrolló la interfaz de usuario, que sirve como la capa de presentación. Este enfoque se adoptó con el objetivo de garantizar que cada componente estuviera operativo y probado antes de proceder a la siguiente capa que interactúa con él. A nivel de dominio, el desarrollo siguió secuencialmente el ciclo de vida del vidrio (productor primario, secundario, consumidor, reciclador) para mantener la coherencia del sistema. En la siguiente sección se detalla el proceso de generación de código

llevado a cabo durante la implementación del prototipo (Sección ??). Posteriormente, se describe el proceso de despliegue en un entorno de pruebas (Sección 6.2). Finalmente, se aborda la estrategia de documentación del software desarrollado (Sección 6.3).

6.1. Generación de Código

La implementación del prototipo se realizó en un entorno de desarrollo local, siguiendo un flujo de trabajo que priorizó la separación por capas para gestionar las dependencias del sistema. Como la lógica de negocio central recae en los contratos inteligentes, su implementación fue la primera en abordarse. La capa de datos no solo define la lógica de las transacciones en la blockchain, sino que también establece el modelo de datos base que utilizan las capas superiores. Una vez que los contratos estuvieron completamente desarrollados y probados en base a las especificaciones de requerimientos y diseño, se procedió a la construcción de la API. Esta capa actúa como un intermediario entre los contratos y el frontend, siendo responsable de traducir las peticiones de la interfaz de usuario en transacciones y llamadas a los contratos. Finalmente, se construyó la interfaz de usuario, que se conecta a la API para poder presentar la información al usuario y permitir la interacción con el sistema.

El proceso de desarrollo se concibió de manera iterativa, donde la escritura de código se alternó con la creación de pruebas unitarias. Este método permitió verificar el correcto funcionamiento de cada componente de forma individual, asegurando que las funciones y módulos cumplieran con las especificaciones de diseño. Gracias al diseño de sistema realizado previamente, la implementación de cada módulo se llevó a cabo de manera sistemática sin bloqueos, pero esto no implicó que no surgieran desafíos técnicos durante la integración de los componentes. Un ejemplo destacable durante la implementación fue el desafío de adaptar la API a la naturaleza inherente de los contratos inteligentes, los cuales no retornan datos de forma nativa, sino que emiten eventos notificando cambios en su estado. Esta particularidad técnica de la blockchain requirió que la capa de la API fuera adaptada para escuchar estos eventos, capturando información como los identificadores únicos de los lotes de vidrio recién creados para su posterior almacenamiento en la base de datos relacional. Esta solución técnica permitió demostrar la viabilidad de la arquitectura híbrida propuesta, asegurando la sincronización de la información entre la blockchain y la base de datos complementaria.

A nivel de dominio, la implementación de las funcionalidades siguió el ciclo de vida del vidrio para mantener una mayor coherencia. El desarrollo se inició con las funcionalidades del productor primario, continuó con las del productor secundario, luego con las del consumidor y, finalmente, con las del centro de reciclaje, cerrando así el ciclo de trazabilidad. Una vez que se completaron las funcionalidades para cada actor, se desarrolló la funcionalidad de seguimiento de extremo a extremo, que permite visualizar el historial completo de un envase desde su producción hasta su revalorización. Este enfoque permitió que el flujo del proceso de trazabilidad se construyera de manera lógica y progresiva. Una vez que todas las funcionalidades del prototipo fueron implementadas a nivel de código, se procedió a realizar el despliegue del

prototipo en un entorno de pruebas, como se detalla en la siguiente sección.

6.2. Despliegue

Una vez que cada módulo del sistema fue implementado y verificado con pruebas unitarias en un entorno local, se procedió a la fase de despliegue en un entorno de pruebas de características similares a un entorno productivo real. El objetivo principal de esta acción fue demostrar la operatividad del prototipo y simular su funcionamiento en un contexto accesible públicamente. Para ello, se eligieron plataformas gratuitas que permitieran la exposición pública de los componentes del sistema, lo cual facilitó la validación por parte de terceros y la demostración de la viabilidad del proyecto dentro del alcance de un trabajo académico.

En primer lugar, para la modularización y gestión del despliegue, se configuraron contenedores de Docker para cada uno de los componentes del sistema. El uso de esta tecnología permitió empaquetar la aplicación y sus dependencias en unidades portables y autónomas, para poder garantizar la reproducibilidad del trabajo en cualquier entorno y facilitar la futura transición del prototipo a un entorno productivo evitando problemas de compatibilidad debido a diferencias en la configuración del entorno. Posteriormente, el despliegue se llevó a cabo de forma diferente para cada tecnología. La API de backend se desplegó en una plataforma de alojamiento web¹, los contratos inteligentes se publicaron en una red de pruebas de Ethereum² y la interfaz de usuario se puso a disposición en un servicio de hospedaje web estático³. Esta configuración no solo logró que el prototipo fuera accesible en línea, sino que también permitió la ejecución de pruebas de integración y aceptación de usuarios en un entorno que replicaba las condiciones de uso finales. Si bien el prototipo se implementó en un entorno de pruebas, fue diseñado con una arquitectura escalable, con el objetivo de facilitar una transición sin fricciones a un entorno productivo en el futuro.

Finalmente, todos los detalles del proceso de despliegue, incluyendo las instrucciones para la configuración del entorno local y la replicación del despliegue en producción, se documentaron exhaustivamente en cada repositorio del proyecto. Esta documentación asegura que otros desarrolladores o investigadores puedan reproducir el entorno de desarrollo y desplegar el sistema de manera autónoma, contribuyendo a la transparencia y accesibilidad del trabajo realizado. En la siguiente sección se detalla la estrategia de documentación adoptada para el prototipo desarrollado.

¹ <https://cloud.google.com/>

² <https://sepolia-optimism.etherscan.io/>

³ <https://vercel.com/>

6.3. Documentación

Como parte integral del proceso de ingeniería de software, la documentación busca asegurar la mantenibilidad del código, facilitar la colaboración futura y consolidar el conocimiento técnico del proyecto. En este trabajo, el prototipo se documentó en tres niveles: la documentación del código fuente, la interfaz de la API y la configuración del proyecto.

En el primer nivel, se incluyeron comentarios directamente en el código fuente de cada repositorio (contratos inteligentes, API y frontend), una práctica conocida como documentación inline. Esto permite que el código sea autoexplicativo y más fácil de comprender para otros desarrolladores o para futuros trabajos de mantenimiento. En el segundo nivel, se utilizó la especificación de OpenAPI para describir la interfaz de la API del backend, detallando todos los endpoints, parámetros y formatos de solicitudes y respuestas. A partir de este estándar, se utilizó una librería para generar un sitio web interactivo que presenta esta documentación de manera accesible. Exponer esta documentación facilita que la API sea interoperable y pueda ser consumida por cualquier otra aplicación cliente, por ejemplo, en el caso de que se desarrollen nuevas interfaces de usuario o aplicaciones móviles que se conecten a la misma API.

Finalmente, en el tercer nivel, cada repositorio cuenta con un archivo README que actúa como una guía de referencia rápida para la configuración y operación del sistema. Estos archivos detallan los requisitos técnicos, la estructura del proyecto y los comandos para ejecutar pruebas y desplegar el sistema. A su vez, también se incluyó una explicación de la arquitectura de cada repositorio y una serie de links de utilidad que pueden ser de ayuda para los desarrolladores que comiencen a interactuar con el código del proyecto.

Concluido el proceso de implementación y documentación, el prototipo del sistema de trazabilidad del vidrio se considera listo para la fase de validación. La construcción de cada componente, desde los contratos inteligentes hasta la interfaz de usuario, ha sido exhaustivamente verificada con pruebas unitarias, sentando las bases para una evaluación más rigurosa. El siguiente capítulo, "Pruebas", abordará en detalle este proceso de verificación, detallando la metodología de pruebas unitarias, de integración, de sistema y de aceptación del usuario para asegurar la calidad y el correcto funcionamiento del prototipo en su conjunto.



PRUEBAS

El presente capítulo aborda el proceso de pruebas del prototipo, un componente central del Modelo en V de ingeniería de software que rige el desarrollo de este trabajo. Este proceso de validación, que abarca la totalidad de la segunda mitad del modelo, tiene como objetivo principal verificar que el prototipo se alinee con los requerimientos y el diseño definidos en las fases previas. El proceso de pruebas se estructura en un ciclo progresivo, donde la granularidad de la validación disminuye a medida que se avanza en las etapas, comenzando por las unidades de código más pequeñas y atómicas (pruebas unitarias), avanzando con pruebas de integración entre los módulos del sistema, hasta alcanzar la validación del sistema en su totalidad (pruebas de sistema y de aceptación). La naturaleza de estas pruebas varía entre automatizada y manual. Las pruebas automatizadas, si bien requieren una inversión inicial, se ejecutan de manera instantánea y repetible, lo cual resulta ideal para verificar comportamientos de forma constante. Por su parte, las pruebas manuales, aunque resultan más lentas de ejecutar, permiten una validación completa de los flujos de usuario y la experiencia general del sistema.

A continuación, se detallan las cuatro etapas de pruebas integrales realizadas en el proyecto:

- Pruebas Unitarias: se enfocan en la validación del código a nivel de componente.
- Pruebas de Integración: verifican la interacción entre los módulos del sistema.
- Pruebas de Sistema: validan el cumplimiento de los requerimientos funcionales y no funcionales del prototipo en su totalidad.
- Pruebas de Aceptación con Usuarios: validan que el prototipo cumpla con las expectativas y necesidades del usuario final.

La Tabla 7.1 presenta una comparación de estas etapas, destacando sus características y su alcance, como una guía visual para comprender la metodología de prueba aplicada.

Tabla 7.1: Comparación de las etapas de prueba del prototipo de trazabilidad de vidrio

Etapa de Prueba	Frecuencia de Ejecución	Tipo
Continua (por cada cambio)	Automatizada	Baja
Automatizada	Media	Interacción de componentes
Media-Alta	Requerimientos funcionales	Al finalizar la implementación
Experiencia del usuario height	Pruebas de Aceptación	

A lo largo de este capítulo, se detallará la gestión de las incidencias halladas durante las pruebas. Los errores detectados en cada etapa de prueba fueron registrados y se les dio seguimiento en la herramienta Jira, asegurando que cada problema se resolviera antes de avanzar a la siguiente fase. El Anexo ?? contiene los detalles de la ejecución de cada prueba, los resultados obtenidos y la gestión de las incidencias documentadas. A continuación, se describen en detalle cada una de las etapas de prueba mencionadas, proporcionando una visión completa del proceso de validación del prototipo.

7.1. Pruebas Unitarias

Las pruebas unitarias constituyen la base de la pirámide de pruebas y se corresponden directamente con la fase de codificación del Modelo en V. Su objetivo es validar la unidad más pequeña de código, como una función o un método, de forma aislada del resto del sistema. La naturaleza atómica de estas pruebas permite verificar que cada componente individual se comporte de acuerdo con las especificaciones de diseño antes de ser integrado con otras partes del prototipo. Para este proyecto, se implementaron pruebas unitarias automatizadas para permitir una verificación continua de la integridad del código a lo largo de todo el proceso de implementación y luego de cada modificación de código posterior.

El desarrollo de cada módulo del prototipo se realizó de forma conjunta con la escritura de sus pruebas unitarias. Se utilizó el framework Jest¹ en las tres capas del proyecto (contratos inteligentes, API y frontend), aunque con configuraciones específicas para cada entorno. Por ejemplo, en los contratos inteligentes, las pruebas unitarias se orientaron a verificar que la lógica de negocio se ejecute correctamente y que el estado de los contratos cambie como se espera. En el backend, se enfocaron en validar la lógica de negocios. En el frontend, se validó el comportamiento de los componentes, su estado interno y la interacción con la API.

Un indicador representativo de la calidad del testing unitario es la cobertura de código (conocida comúnmente como coverage), que mide el porcentaje de código fuente ejecutado por las pruebas. Este valor, si bien no garantiza la ausencia de errores, es una herramienta útil para evaluar la robustez del código. Los requisitos de cobertura mínima se definieron en función de la criticidad de cada módulo del sistema:

- Contratos Inteligentes: se requirió una cobertura mínima del 100 %. Dado que los contra-

¹ <https://jestjs.io/>

tos son la base del sistema de trazabilidad y no pueden modificarse una vez desplegados, resulta fundamental garantizar que todos los caminos de ejecución del código estén cubiertos para minimizar el riesgo de errores una vez desplegados. Este es un estándar de la industria para contratos inteligentes.

- API Backend: se requirió una cobertura mínima del 80 %. Dado que la API representa el componente central del sistema como responsable de la comunicación con la blockchain y la base de datos, resulta relevante garantizar la calidad del código y minimizar el riesgo de errores en el manejo de datos. Por este motivo, se ha elegido este umbral de cobertura, que es un estándar habitual en la industria para aplicaciones de propósito general.
- Aplicación Frontend: se estableció una cobertura mínima del 60 %. Dado que el frontend del prototipo tiene fines demostrativos y no es una parte crítica del sistema, este umbral se consideró suficiente para garantizar el correcto funcionamiento de la interfaz de usuario sin requerir un esfuerzo excesivo en la escritura de pruebas.

El proceso de pruebas unitarias permitió identificar y corregir algunos errores de manera temprana. En total, se detectaron y gestionaron 7 incidencias durante esta etapa de pruebas, que fueron registradas en Jira. De estas, 5 fueron resueltas, mientras que el resto se desestimó al no representar un fallo crítico ni un caso de uso posible para el sistema. En la Tabla ?? se muestra un resumen de las pruebas unitarias realizadas, mientras que en el Anexo ?? se puede consultar el detalle de la totalidad de casos de prueba.

Tabla 7.2: Resumen de Pruebas Unitarias

Módulo	Coverage Objetivo	Coverage Alcanzado	Cant. de Pruebas	heightContratos Inteligentes
100 %	100 %	100 API Backend		80 %
87.5 %	270 Aplicación Frontend	60 %		62.3 %
250 height				

La ejecución automatizada de las pruebas unitarias proporciona una red de seguridad que facilita la revalidación del comportamiento del sistema, lo cual es relevante en un prototipo que podría expandirse en un futuro. La validación constante de la base de código antes de cualquier despliegue favorece la estabilidad y la calidad del sistema a largo plazo. Una vez que se ha verificado el funcionamiento de cada componente del sistema de forma individual, es posible continuar con la siguiente etapa de validación, donde se verificará la correcta interacción entre los módulos del sistema.

7.2. Pruebas de Integración

Las pruebas de integración se sitúan en la siguiente capa de la pirámide de pruebas. Su objetivo principal consiste en verificar que los distintos componentes y módulos del sistema interactúen entre sí de manera correcta y consistente. A diferencia de las pruebas unitarias, que validan el funcionamiento aislado de una unidad de código, las pruebas de integración evalúan el flujo de datos y las interacciones entre componentes para asegurar que sus interfaces y responsabi-

lidades estén debidamente sincronizadas. Esta etapa de prueba se corresponde con la fase de diseño de componentes del Modelo en V, donde se definen las interacciones entre los módulos del sistema.

Para este proyecto, las pruebas de integración se diseñaron para ser automatizadas y se enfocaron en los puntos de interacción más críticos del sistema. El entorno de prueba se configuró para simular un escenario lo más cercano posible a un entorno real, pero aislado, sin hacer uso de funcionalidades simuladas. Por ejemplo, mientras que durante las pruebas unitarias se simularon los datos que debería retornar la blockchain para probar la funcionalidad de la API, durante las pruebas de integración se utilizaron datos reales obtenidos de un entorno virtual de la red blockchain. De esta manera, se pudo validar que la comunicación entre los módulos funciona correctamente en un contexto más realista.

El proceso de pruebas de integración no detectó fallos críticos en la interacción entre los módulos. Se realizaron pruebas de integración para 7 casos de uso del sistema, los cuales se han documentado en el Anexo ???. La ejecución de estas pruebas proporciona una capa de verificación adicional del sistema y se recomienda realizarlas de forma rutinaria antes de cada despliegue en un entorno productivo para mitigar los riesgos asociados a los cambios en el código que puedan afectar la interacción entre los módulos del sistema. Una vez que se ha validado la interacción de los componentes, la siguiente etapa consiste en verificar que el sistema en su totalidad cumpla con los requisitos funcionales y no funcionales definidos al comenzar el proyecto.

7.3. Pruebas de Sistema

Las pruebas de sistema constituyen la siguiente fase en el ciclo de validación, y tienen como propósito verificar que el prototipo, en su conjunto, cumple con los requerimientos funcionales y no funcionales definidos al comenzar el proyecto. Esta etapa se corresponde con el diseño de arquitectura en el Modelo en V, y su objetivo es evaluar el comportamiento del sistema de manera integral para asegurar que la arquitectura implementada efectivamente logra cumplir los requisitos establecidos.

A diferencia de las pruebas unitarias y de integración, que fueron automatizadas, las pruebas de sistema se ejecutaron de manera manual. En primer lugar, se documentó de forma detallada cada caso de prueba a ejecutarse, incluyendo un título, requerimientos asociados, los pasos a seguir desde la perspectiva de un usuario, los datos de entrada (en caso de requerirlos) y los resultados esperados. Posteriormente, se ejecutó de forma manual cada caso de prueba, siguiendo los pasos definidos y registrando los resultados obtenidos. La metodología consistió en interactuar con la interfaz de usuario (frontend) del sistema y seguir los pasos detallados en el caso. En estas pruebas, se utilizó el sistema completo desplegado en el entorno de pruebas, sin emplear datos simulados ni probar funcionalidades de forma aislada. Esto permitió una validación precisa del comportamiento del prototipo, desde la perspectiva de un usuario, en

un entorno que replicaba la realidad.

A su vez, también se incluyeron pruebas de requerimientos no funcionales en esta etapa, como son la escalabilidad, el rendimiento y la seguridad del sistema. A pesar de las limitaciones de recursos del entorno de pruebas (debido a que se utilizaron plataformas gratuitas), se llevaron a cabo pruebas controladas para validar que el sistema puede cumplir con estos requerimientos en un entorno real. Los detalles y resultados de estas pruebas se documentaron junto con los casos de prueba funcionales en el Anexo ??.

El proceso de pruebas de sistema incluyó un total de 52 casos de prueba y resultó en la identificación de 13 incidencias, las cuales fueron registradas y rastreadas en la herramienta Jira hasta su resolución. La ejecución de estas pruebas permitió identificar y corregir errores, pero también puede servir como una base para futuras pruebas de regresión del sistema, ayudando a prevenir que cualquier cambio o nueva funcionalidad no afecte negativamente el comportamiento actual. Luego de esta etapa, el prototipo ya está listo para ser presentado a un grupo reducido de usuarios, quienes serán responsables de evaluar su funcionalidad durante las pruebas de aceptación.

7.4. Pruebas de Aceptación con Usuarios

La fase final de validación del prototipo corresponde a las Pruebas de Aceptación con Usuarios (UAT, por sus siglas en inglés). Esta etapa se enfoca en verificar que el sistema no solo funcione correctamente a nivel técnico, sino que también satisfaga las necesidades y expectativas del usuario final, tal como se definieron en la etapa de modelado de requerimientos del Modelo en V. En esta instancia, un grupo reducido de usuarios es convocado para utilizar el sistema en un entorno controlado, de forma similar a cómo utilizaría el sistema en su rutina habitual.

Dada la naturaleza de este trabajo como proyecto académico, la obtención de usuarios reales de la industria del vidrio para la ejecución de estas pruebas presentó una limitación. No obstante, se llevó a cabo un experimento controlado con un grupo de usuarios voluntarios del entorno académico. El experimento se realizó en un laboratorio de computación, donde cada usuario voluntario contó con una computadora de escritorio con acceso a Internet, desde donde pudo acceder al frontend del prototipo desplegado en el entorno de pruebas. La metodología de la prueba combinó una fase guiada y una fase libre, creando un entorno mixto, donde los participantes recibieron una guía para ejecutar una serie de casos de prueba predefinidos, seguidos de un período de exploración libre del sistema. Este enfoque permitió validar tanto los flujos de trabajo específicos como la usabilidad general del prototipo. Los participantes evaluaron tanto los requerimientos funcionales (por ejemplo, la capacidad de registrar un lote de vidrio) como los no funcionales (como la facilidad de uso y la transparencia de la información).

La ejecución de las pruebas generó una retroalimentación detallada que se utilizó para identificar y resolver fallos, así como para mejorar la experiencia de usuario (UX) y el diseño de la interfaz. Se registraron en Jira un total de 17 incidencias y 6 sugerencias recibidas para su

posterior seguimiento. Como resultado directo de estas pruebas, se realizaron mejoras en los flujos de navegación, la presentación de los datos de trazabilidad y el diseño visual de la aplicación. En el Anexo ?? se documentan los casos de prueba ejecutados durante el experimento y la retroalimentación completa de los participantes. En las Figuras ?? y ?? se pueden observar fotografías tomadas durante la ejecución del experimento, donde se puede observar a los usuarios voluntarios del experimento utilizando el prototipo.



Figura 7.1: Usuarios interactuando con el prototipo durante prueba guiada



Figura 7.2: Usuarios voluntarios durante el experimento

Al finalizar la etapa de pruebas con usuarios, se llevó a cabo una revisión de los resultados obtenidos. El riguroso proceso de pruebas llevado a cabo, desde las unidades más pequeñas de código hasta la validación con usuarios voluntarios, demostró que el prototipo desarrollado es funcional y está alineado con los requerimientos originales del proyecto. Esta etapa de validación confirma la viabilidad del sistema de trazabilidad del vidrio basado en blockchain,

estableciendo un precedente sólido para su potencial escalabilidad y aplicación en un entorno productivo. La finalización de esta fase marca la conclusión del ciclo de vida del desarrollo del software de este proyecto académico, cuyos principales hallazgos, lecciones aprendidas y oportunidades de mejora se resumen en el siguiente capítulo.

8

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.

Conclusiones

El presente trabajo de tesis ha abordado el desarrollo de un prototipo de aplicación basada en tecnología *blockchain* para la trazabilidad del vidrio, con el objetivo de demostrar la viabilidad de esta herramienta en la implementación de una economía circular. A lo largo del proyecto, se ha navegado por cada una de las fases del modelo en V, desde el análisis y diseño hasta la implementación y las pruebas. Este capítulo final reflexiona sobre los resultados obtenidos, los desafíos encontrados en el camino y las perspectivas futuras que se abren a partir de los aprendizajes y logros alcanzados.

Resultados y Logros del Proyecto

El resultado principal de este trabajo es un prototipo de *software* funcional y robusto que cumple con el objetivo de demostrar la viabilidad de la tecnología *blockchain* en el seguimiento del ciclo de vida del vidrio. El sistema, con su arquitectura modular, fue sometido a pruebas exhaustivas que validaron su correcto funcionamiento, la integridad de los datos y

una experiencia de usuario satisfactoria. La UX y UI del sistema fueron refinadas a partir de la retroalimentación de las pruebas de aceptación, lo que resultó en un diseño pulido y amigable.

Para ilustrar el funcionamiento del sistema, se puede seguir un flujo completo que representa el ciclo de vida del vidrio. Este recorrido comienza con el Productor de Vidrio que registra un nuevo lote, continúa cuando el Productor de Alimentos lo adquiere para embotellar sus productos, sigue con la participación del Consumidor que lo devuelve a un Centro de Reciclaje, y finaliza cuando este último registra la disposición final del material. Cada uno de estos pasos, desde la creación hasta la revalorización, queda registrado en una cadena de bloques, ofreciendo una visión transparente e inmutable de la trazabilidad.

[Imagen o diagrama del flujo completo de la aplicación, mostrando el ciclo de vida de una botella de vidrio.]

La metodología del modelo en V demostró ser idónea para la gestión de un proyecto de esta naturaleza, permitiendo una planificación y un seguimiento detallado de cada fase. A pesar de que la ejecución del proyecto no estuvo exenta de desvíos en el cronograma original, la disciplina en el seguimiento de la planificación y la flexibilidad para adaptarse a los imprevistos fueron cruciales para alcanzar los objetivos. El proceso de desarrollo fue en sí mismo una experiencia de aprendizaje, validando que el enfoque modular y las prácticas de ingeniería de software son aplicables y eficientes incluso en un contexto de equipo unipersonal.

Desafíos y Lecciones Aprendidas

La ejecución de este proyecto presentó una serie de desafíos que se convirtieron en valiosas lecciones. A nivel metodológico, la aplicación rigurosa de una metodología de equipo en un contexto de trabajo individual puso a prueba la disciplina y la capacidad de organización. Se aprendió que el uso de herramientas como Jira, incluso en un equipo unipersonal, es un mecanismo efectivo para mantener el control y la visibilidad del progreso. De igual manera, la resolución de la metodología de pruebas con usuarios, en ausencia de participantes reales, evidenció la importancia de la creatividad para simular entornos de validación realistas.

En el ámbito técnico, el trabajo fue un desafío interesante debido a la implementación de la tecnología *blockchain* sin experiencia previa. Si bien la tecnología se demostró accesible y con un valor real, impone ciertas restricciones que requieren una adaptación en el diseño del *software*. El principal aprendizaje técnico fue la necesidad de diseñar el sistema considerando las particularidades de la interacción con la *blockchain*, como el manejo de eventos en lugar de la consulta de datos directos. Además, la ejecución completa de un proceso de pruebas de calidad sin experiencia previa demostró la importancia de la documentación y la consistencia en los procedimientos.

Por otro lado, los contratiempos logísticos, como los viajes y las obligaciones académicas, si bien desviaron la planificación original, también aportaron una perspectiva enriquecedora al problema. La investigación de campo en Europa, en particular, permitió obtener una visión global de la problemática de la economía circular del vidrio, reforzando la relevancia del pro-

yecto y demostrando la aplicabilidad de la solución propuesta en un contexto internacional.

Perspectivas Futuras y Oportunidades de Mejora

Este prototipo de *software*, si bien se circumscribe a un contexto académico, ha sentado las bases para un desarrollo futuro de mayor alcance. Una de las principales oportunidades reside en la **extensión de la solución** para abarcar la trazabilidad de otros materiales de valor dentro de una economía circular, como el PET y el aluminio. La arquitectura modular del sistema está preparada para esta expansión, lo que permitiría que el prototipo sirva como base para una solución más integral. Además, la implementación de un piloto en una región con una industria vitivinícola consolidada, como Mendoza, podría validar el sistema en un entorno real.

En cuanto a las **mejoras de la plataforma**, el sistema actual podría evolucionar para superar las barreras de entrada para los actores de la cadena. Esto podría lograrse mediante el desarrollo de aplicaciones independientes y especializadas para cada rol (productor, reciclador, etc.), reemplazando la interfaz de usuario actual con soluciones a medida que simplifiquen su uso. Asimismo, la integración del sistema con sensores en las líneas de producción de las fábricas podría automatizar la carga de información, eliminando la posibilidad de errores humanos y aumentando la confiabilidad del registro. Finalmente, el sistema podría ser mejorado para permitir la trazabilidad de elementos desde cualquier punto de la cadena, sin necesidad de comenzar desde el principio.

En conclusión, este trabajo ha demostrado la viabilidad técnica y funcional de una aplicación de trazabilidad de vidrio basada en *blockchain*. El prototipo desarrollado no solo cumple con los objetivos planteados, sino que también sirve como un *proof of concept* para un futuro sistema capaz de impulsar la transparencia y la sostenibilidad en la industria. La tecnología demostró su capacidad para ser un motor de cambio en el camino hacia una economía circular más eficiente, confiable y responsable.

Página intencionalmente dejada en blanco.

Apéndices

Página intencionalmente dejada en blanco.



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 (OpenAPI).
- Detalles sobre la implementación de los smart contracts.
- Información sobre las pruebas realizadas.
- Detalles sobre la configuración del entorno de desarrollo.

La documentación de la API está disponible en el siguiente enlace: [enlace a la documentación de la API]



ENTREVISTA A VERALLIA

Para obtener una comprensión profunda de la situación del reciclaje de vidrio, particularmente en la provincia de Mendoza, se realiza una investigación de campo. Como punto de partida, se lleva a cabo una revisión en internet de sitios web, artículos de diarios locales y boletines oficiales para documentar programas de reciclaje activos en la región y la presencia de empresas productoras relevantes. A continuación, se realiza una entrevista semiestructurada con Lucía J., responsable del Área de Medio Ambiente de Verallia, la principal empresa productora de envases de vidrio en la región de Mendoza. La entrevista se condujo de manera telefónica, utilizando preguntas guía predefinidas, pero con flexibilidad para explorar temas emergentes durante la conversación. La conversación fue grabada con consentimiento previo y luego transcripta, complementándose con notas tomadas durante la entrevista.

Durante la etapa de investigación y recopilación de información para el desarrollo de este trabajo, luego de definir el alcance, se llevó a cabo una entrevista con una representante de Verallia, la principal empresa fabricante y manufacturadora de la fabricación de envases de vidrio en Mendoza, principal proveedora de la industria vitivinícola local.

La entrevista se realizó con Lucía, quien es parte del equipo de sostenibilidad de Verallia Argentina en Mendoza. Previo a la entrevista fue informada sobre el contexto de este trabajo y la finalidad de la entrevista y dio consentimiento para que la información compartida fuera incluida en este trabajo.

La conversación se centró en conocer los procesos actuales de producción y reciclaje de vidrio en Verallia, las iniciativas sostenibles que la empresa está implementando y las oportunidades para mejorar la trazabilidad y la gestión de residuos en la cadena de suministro de la empresa.

La entrevista fue realizada por teléfono, tuvo una duración aproximada de 45 minutos y fue grabada. La modalidad de la entrevista fue semiestructurada, permitiendo una conversación fluida y la posibilidad de profundizar en temas relevantes a medida que surgían. Previo a la entrevista, se preparó una lista de preguntas que abarcaban los siguientes temas:

A continuación se presenta un resumen de las preguntas realizadas y las respuestas obtenidas:

Preguntas: - Contame cómo es el proceso que hacen ustedes - El vidrio reciclado de dónde sale - Qué hacen cuando les llega el vidrio, viene clasificado o lo clasifican ustedes? - Cómo se involucran sus clientes - Hay alguna reglamentación o restricción para poder reciclar? - Les serviría que el vidrio llegara en cantidad y preclasificado? - Qué les interesaría de un sistema como este? Qué le serviría a tu empresa? Qué tanto les serviría un sistema de trazabilidad? Creen que sería factible incorporar un sistema de estas características? - Cuánto vuelve en relación a lo que venden? - Sabés si alguno de tus clientes tienen algún programa particular o compromiso con lo sustentable.

Respuestas: Recolectores urbanos recogen vidrio. No hay cultura de reciclado en Arg. En el camion va junto y en la planta lo separan. En otros paises hasta el usuario separa. No hay una politica gral en Mza, es por cada municipio. A ellos les vende el vidrio los recolectores en negro. Necesitan que sean en blanco. Tienen 2 empresas que cuando compran el vidrio lo limpian. La limpieza es manual y cara. Tienen su nueva propia planta de limpieza. No se puede reciclar vidrios de distintos colores juntos. V reciclan botellas y frascos. El vidrio limpio va directo a la linea de producción.

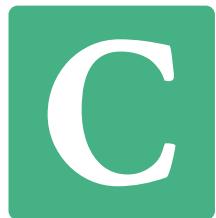
V accion transparente es puertas afuera y Lucia es puertas adentro. Hay 32 campanas de la acción transparente. El muni retira y ellos compran y reciben. Campañas de entradas al cine. 3 o 4 eventos al año. También fomentan que los empleados reciclen. Concientizar y fomentar el reciclado. Las campañas dan un aporte mínimo de vidrio. No acompañan las políticas. Mucho viene de recicladores y pymes. Bodegas a veces traen poco y las campañas traen poco. Sale más barato la materia prima que comprar y limpiar vidrio para reciclaje. Intermediarios por los que están en negro. Tienen que clasificar ellos. A veces descartan mucho por los altos niveles de plomo. La planta de limpieza clasifica. Separan por color y por no sé qué más. Mati de reciclaje. Separan tapas etiquetas basura. No saben de dónde vienen. Competencia Katorini? Hay suficiente oferta Cuál es la legislación para comprar vidrio? Es interna o internacional? Podría venir de greenly la entrega (centralizamos a los recicladores). Estilo punto verde.

Los clientes suyos querrían sumarse a una campaña? A ustedes les serviría? Vendría ya clasificado. Podrían hacerse convenios.

Cuánto fue el objetivo este año? Menor al del año pasado.

- Les serviría un sistema de trazabilidad? - La empresa podría participar localmente de un experimento o no se puede?Sí - Les ponen marcadores impresos a las botellas? Eso puede servir

para después reciclar y pagás mejor tu vidrio. - Qué nivel de trazabilidad tienen los envases? Tienen numero de molde y la marca abajo - La limpieza siempre es necesaria antes re-usarse el calcín



VIAJE DE INVESTIGACIÓN

Aprovechando una oportunidad profesional, se realizó un viaje de investigación de dos semanas a Europa. Durante este viaje, se visitaron y estudiaron sistemas de reciclaje y programas de incentivos de reciclaje en tres países europeos. Las actividades incluyeron visitas a centros verdes, interacciones con organizaciones involucradas en el reciclaje, exploración de redes de comercios circulares u orientadas a la sustentabilidad, y encuentros con organizaciones dedicadas a promover la economía circular. Los hallazgos y observaciones de este viaje, documentados a través de notas y fotografías, se detallan en el Apéndice.

—

En el mes de noviembre de 2024, durante la etapa de definición del alcance de este trabajo, oportunamente (por motivos profesionales ajenos a este trabajo) se realizó un viaje de investigación a Europa para conocer de primera mano los sistemas de reciclaje y economía circular implementados en diferentes países. Los resultados de esta experiencia resultaron ser enriquecedores para este trabajo de tesis, a pesar de haber generado un retraso en su planificación.

Este viaje tuvo como objetivo principal aprender sobre las mejores prácticas en la gestión de residuos y el reciclaje, así como explorar la viabilidad de implementar un sistema similar en ciudades de latinoamérica. A continuación, se detallan los aspectos más relevantes de la experiencia:

- Se visitaron 3 ciudades: Madrid (España), Amsterdam (Países Bajos) y Berlín (Alemania), cada una con sus propios sistemas de reciclaje y gestión de residuos.
- En Madrid, no tienen DRS, se observó la mecánica de recolección diferenciada y las categorías de recolección en origen. Se concluyó que entre los países visitados, España es el que menos ha avanzado en la implementación de sistemas de reciclaje y economía circular. A su vez, cabe

destacar que la sustentabilidad y economía circular sí es un tema de interés y preocupación en la sociedad española, pero aún no se han implementado sistemas de recolección diferenciada ni DRS. España ha implementado la Ley REP hace algunos años y en 2025 se comenzó el plan para la implementación de DRS debido a que no alcanzaron sus metas de reciclaje de los últimos años.

- En Amsterdam se usa el sistema DRS, donde los consumidores pagan un depósito por las botellas de vidrio y plástico y latas, que se les devuelve al devolverlas en una RVM, ubicadas en las principales cadenas de supermercados. Con esta técnica se fomenta el hábito de reciclaje de envases en los ciudadanos, al incluirlo como un paso extra al proceso de ir de compras al supermercado. Este sistema ha demostrado ser efectivo para aumentar las tasas de reciclaje y reducir la cantidad de residuos. El problema hallado es que en la ciudad, los tachos de basura son vandalizados por recolectores informales para buscar botellas y latas (quienes usan el dinero obtenido para poder comprar comida diariamente), lo que genera un problema de higiene. Tuvimos la oportunidad de visitar un centro verde, y descubrimos que en esta ciudad las altas tasas de recuperación y reciclaje no se reduce a los envases, sino que también se aplica a otros tipos de residuos como papel, cartón, metales, electrodomésticos y muebles. En este centro verde se reciben los residuos reciclables y se clasifican para su posterior reciclaje. Es lo normal para los ciudadanos dirigirse a estos centros para entregar sus residuos o muebles y electrodomésticos en desuso. Respecto a la recolección diferenciada, se observó que los ciudadanos separan sus residuos en diferentes contenedores ubicados en la vía pública, y la recolección se realiza de manera semanal, de a un material por vez. Cada material se recoge una vez por semana. Los vecinos reclaman que la frecuencia de recolección es insuficiente, ya que los tachos se llenan rápidamente y no hay espacio para más residuos, que quedan expuestos en la vía pública junto a los contenedores. Es notorio que los ciudadanos contemplan el reciclaje como parte de su rutina diaria, y la separación de residuos es una práctica común. Además, se observó que los ciudadanos están muy concientizados sobre la importancia del reciclaje y la reducción de residuos. A su vez, se intentó indagar con el destino final de los residuos reciclables, y se nos informó que la mayoría de los materiales reciclables son procesados en el país, pero que son exportados a otros países fuera de Europa para su disposición final y se desconoce el destino final de los mismos o si realmente son reciclados.

- En Alemania

En orden de evolución 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 REALIZADAS

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 y col., 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 y col. 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 y col. «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 y col. «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 y col. «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 y col. «Implementation of Blockchain Technology in Waste Management». En: Energies 16.23 (2023), pág. 7742.
- [9] Eiman Alnuaimi y col. «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] Unknown. Pending Reference. Jul. de 2025. URL: <https://google.com>.
- [14] Satoshi Nakamoto. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. Original Bitcoin whitepaper. Oct. de 2008. URL: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [15] Farhana Akter Sunny y col. «A systematic review of blockchain applications». En: Ieee Access 10 (2022), págs. 59155-59177.
- [16] Gautami Tripathi y col. «A comprehensive review of blockchain technology: Underlying principles and historical background with future challenges». En: Decision Analytics Journal 9 (2023), pág. 100344.
- [17] Vitalik Buterin y col. «Ethereum white paper». En: GitHub repository 1 (2013), págs. 22-23.
- [18] Alejandro Bartolomeo y col. «Introducción a la tecnología blockchain: su impacto en las Ciencias Económicas». En: Ponencia presentada en Jornadas de Ciencias Económicas. Buenos Aires 7.8 (2020).
- [19] V Verma. «An overview of Blockchain Technology: Past & Future». En: Eduzone: International Peer Reviewed/Refereed Multidisciplinary Journal 12.1 (2023), págs. 100-104.
- [20] Hamed Taherdoost. «Smart contracts in blockchain technology: A critical review». En: Information 14.2 (2023), pág. 117.
- [21] Jovan Kalajdjeski y col. «Databases fit for blockchain technology: A complete overview». En: Blockchain: Research and Applications 4.1 (2023), pág. 100116.
- [22] Charles Hoskinson. «Why we are building Cardano». En: IOHK (accessed 18 December 2017) <https://whycardano.com> (2017).
- [23] Karthik Kumar Vaigandla y col. «Review on blockchain technology: architecture, characteristics, benefits, algorithms, challenges and applications». En: Mesopotamian Journal of CyberSecurity 2023 (2023), págs. 73-84.
- [24] Abdel-Aziz Ahmad Sharabati y col. «Blockchain technology implementation in supply chain management: a literature review». En: Sustainability 16.7 (2024), pág. 2823.
- [25] Abderahman Rejeb y col. «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.
- [26] Alberto Díez Arias y col. «Web 3.0 y Blockchain en la Educación Secundaria». En: (2023).
- [27] Michael JW Rennock y col. «Blockchain technology and regulatory investigations». En: Practical Law Litigation 1 (2018), págs. 35-44.

- [28] Juan Esteban Torres Castro y col. «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>.
- [29] Emilio Cerdá y col. «Economía circular». En: Economía industrial 401.3 (2016), págs. 11-20.
- [30] Ellen MacArthur Foundation. What is a circular economy? 2014. URL: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview> (visitado 25-06-2024).
- [31] Elli Androulaki y col. «Hyperledger fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains». En: Proceedings of the thirteenth EuroSys conference. 2018, págs. 1-15.
- [32] Chris Dannen. Introducing Ethereum and solidity. Vol. 1. Springer, 2017.
- [33] Gavin Wood. «Polkadot: Vision for a heterogeneous multi-chain framework». En: White paper 21.2327 (2016), pág. 4662.
- [34] Zongda She. «Vechain: A renovation of supply chain management—A look into its organization, current activity, and prospect». En: Proceedings of the 2022 International Conference on Educational Informatization, E-commerce and Information System, Macao, China. 2022, págs. 29-30.
- [35] Manuel Chakravarty y col. Functional blockchain contracts. 2019.
- [36] Verallia. Proceso de fabricación del vidrio. 2024. URL: <https://es.verallia.com/s/proceso-de-fabricacion-del-vidrio?language=es> (visitado 09-07-2024).
- [37] Roger S Pressman. «Inginería de software». En: Un enfoque práctico 7 (2010).
- [38] Hamzah Alaidaros y col. «The state of the art of agile kanban method: challenges and opportunities». En: Independent Journal of Management & Production 12.8 (2021), págs. 2535-2550.

Página intencionalmente dejada en blanco.

