

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

Rocío Mena

October 27, 2024

1 Introducción

El mundo se enfrenta a un desafío ambiental sin precedentes: la gestión insostenible de los recursos naturales. La producción y consumo masivos de bienes generan un volumen creciente de residuos, lo que pone en riesgo la salud del planeta y el bienestar de las generaciones futuras [IPCC2022; pelegri2021ipcc]. En este contexto, la transición hacia una economía circular se presenta como una alternativa viable para mitigar este impacto y construir un futuro más sostenible [clima2022book].

La economía circular es un modelo de producción y consumo que busca maximizar el valor de los recursos a lo largo de su ciclo de vida, minimizando la generación de residuos y reincorporando los materiales al sistema productivo para extender su vida útil [da2022economia; melendez2021economia]. Para lograr este objetivo, es fundamental contar con mecanismos eficientes de trazabilidad que permitan rastrear el flujo de materiales desde su origen hasta su disposición final.

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

Específicamente en el caso del vidrio, su alta reciclabilidad y bajo costo de procesamiento [prodvidrio2024verallia] presentan una oportunidad perfecta para la trazabilidad efectiva en la cadena de suministro. El vidrio es un material clave en la industria del envasado de bebidas y alimentos y a su vez puede

reinsertarse en el ciclo productivo sin perder calidad o pureza. La mejora en los sistemas de trazabilidad no solo facilita la identificación y segregación del vidrio reciclable, sino que también optimiza los procesos de recogida y reciclaje. A su vez, este sistema presenta la oportunidad de generar un circuito tanto de reutilización como de reciclaje de envases de vidrio. Este enfoque disminuye la necesidad de extracción de materias primas vírgenes y disminuye el gasto energético asociado a la producción de nuevos envases, contribuyendo significativamente a la reducción de la huella de carbono y a la promoción de prácticas de producción más limpias. Este ciclo virtuoso no solo beneficia al medio ambiente, sino que también ofrece ventajas económicas a las empresas al reducir los costos asociados con la producción de nuevos envases [prodvidrio2024verallia], lo que a su vez puede traducirse en precios más bajos para los consumidores.

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

1. Identificar oportunidades para la reutilización y el reciclaje: la trazabilidad permite identificar qué materiales pueden ser reutilizados o reciclados en diferentes etapas de la cadena de suministro. Esto puede ayudar a reducir la generación de residuos y aumentar la eficiencia en el uso de recursos.
2. Responsabilizar a las industrias por su impacto ambiental: la trazabilidad permite rastrear el origen de los materiales y el impacto ambiental de su producción y consumo. Esto puede ayudar a responsabilizar a las industrias por su huella ambiental y promover prácticas más sostenibles [melendez2021economia].
3. Promover la transparencia en las cadenas de suministro: la trazabilidad puede ayudar a aumentar la transparencia en las cadenas de suministro, lo que puede generar confianza entre los consumidores y las empresas.

La tecnología blockchain ofrece una solución para la trazabilidad en la cadena de suministro. Una cadena de bloques o blockchain es un registro distribuido e inmutable que permite almacenar y compartir información de manera segura y transparente entre todos los participantes de la cadena [rennock2018blockchain]. Las características de la tecnología blockchain, como su inmutabilidad, transparencia y trazabilidad, la convierten en una herramienta ideal para la gestión sostenible de la cadena de suministro [baralla2023waste; bulkowska2023implementation; alnuaimi2023blockchain].

En este trabajo de tesis, proponemos una solución para mejorar la trazabilidad en la cadena de suministro utilizando tecnología blockchain integrada con otras tecnologías complementarias como Internet de las Cosas (IoT) y sistemas de gestión tradicionales. La propuesta se basa en el desarrollo de una plataforma blockchain fácilmente integrable con sistemas externos para la carga y lectura de información sobre productos y materias primas a lo largo de la cadena de suministros. Esta plataforma es capaz de incorporar datos de distintos sensores

IoT de forma confiable y automatizada en varias etapas de la cadena de suministros. A su vez, se puede incorporar datos a la plataforma de forma manual o automatizada a través de sistemas informáticos de gestión utilizando una API REST, facilitando su adopción. Esta plataforma proporciona una visibilidad completa en tiempo real del movimiento y el estado de los productos a lo largo de la cadena de suministro.

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

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

Esta tesis se estructura en varias secciones: la Introducción (Sección 1) expone la problemática de la trazabilidad en la cadena de suministro, la propuesta de solución y las posibles limitaciones. La Metodología (Sección 2) de investigación describe detalladamente el enfoque que se utilizará para desarrollar y evaluar la plataforma blockchain propuesta. La Revisión de la literatura (Sección 3) expone el estado actual del arte e investigación existente sobre trazabilidad en la cadena de suministro y tecnologías blockchain. El Diseño e implementación de la plataforma blockchain (Sección 4) detalla la arquitectura del sistema, los componentes principales y las funcionalidades. La Evaluación de la plataforma blockchain (Sección 5) presenta los resultados de implementación y evaluación del impacto ambiental. Finalmente, las Conclusiones y trabajo futuro (Sección 5) resumen los hallazgos del estudio y sugieren direcciones para investigaciones futuras.

2 Motivación

El mundo se enfrenta a un desafío ambiental sin precedentes: la gestión insostenible de los recursos naturales. La producción y consumo masivos de bienes generan un volumen creciente de residuos, lo que pone en riesgo la salud del planeta y el bienestar de las generaciones futuras [IPCC2022; pelegri2021ipcc]. 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 [clima2022book]. 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 [da2022economia; melendez2021economia]. Sin embargo, un desafío clave para lograr una economía circular radica en la falta de transparencia y trazabilidad dentro de las cadenas de suministro tradicionales.

Esta falta de visibilidad dificulta la capacidad para identificar oportunidades

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

3 Trabajos existentes sobre trazabilidad y blockchain

Investigaciones previas han explorado diversas tecnologías para mejorar la trazabilidad de la cadena de suministro, incluidos códigos de barras, etiquetas RFID y redes de sensores [schuitemaker2020product]. 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 [schuitemaker2020product].

En los últimos años, la tecnología blockchain ha surgido como una solución prometedora para abordar estas limitaciones [baralla2023waste; bulkowska2023implementation; alnuaimi2023blockchain]. Sus características principales, como el sistema de registro distribuido, la inmutabilidad y la transparencia, la convierten en una plataforma ideal para registrar y rastrear el movimiento de mercancías a lo largo de la cadena de suministro [baralla2023waste]. Numerosos estudios han explorado diversas aplicaciones de la tecnología blockchain para la trazabilidad de la cadena de suministro, demostrando su potencial para mejorar la transparencia y la responsabilidad dentro de estos sistemas. Ejemplos de estas aplicaciones incluyen la creación de un registro inmutable del origen de los productos para verificar su autenticidad y combatir la falsificación [bulkowska2023implementation], el rastreo de materiales a lo largo de la cadena de suministro para apoyar una economía circular [baralla2023waste], la optimización de la logística y la gestión de inventario mediante información en tiempo real [signeblock2024], y la promoción de prácticas sostenibles al identificar productos con menor impacto ambiental [bulkowska2023implementation].

4 Contribución al problema

La investigación existente reconoce el potencial de blockchain para la trazabilidad de la cadena de suministro, pero muchas soluciones propuestas se enfocan únicamente en la tecnología blockchain [baralla2023waste; bulkowska2023implementation; alnuaimi2023blockchain]. Nuestro trabajo va más allá al proponer un enfoque híbrido que integra blockchain con Internet de las cosas (IoT) y sistemas de gestión tradicionales. Esta integración nos permite aprovechar los datos en tiempo real de los sensores de IoT, proporcionando una visión más completa y confiable del movimiento y el estado del producto a lo largo de la cadena

de suministro. Además, nuestra solución incorpora sistemas de gestión tradicionales, asegurando la compatibilidad y facilitando la adopción dentro de las prácticas comerciales existentes. Creemos que este enfoque combinado ofrece una implementación más factible y práctica para mejorar la trazabilidad de la cadena de suministro, en última instancia, contribuyendo a la transición hacia una economía circular sostenible.

A su vez, este trabajo se enfoca específicamente en la cadena de suministro y reciclaje de vidrio. Esta decisión se fundamenta en la importancia del vidrio como material reciclable y la necesidad de mejorar su gestión dentro de la economía circular. En Latinoamérica, el 5% de los residuos sólidos urbanos son vidrio [cepal2021economia], y solo el 20% de este vidrio se recicla [verallia2022whitebook]. 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. Al mejorar la trazabilidad en la cadena de suministro del vidrio, podemos facilitar su reciclaje y promover una economía circular más sostenible en la región. Al visibilizar el flujo de materiales y promover prácticas de reciclaje, y facilitar la información y procesos a los usuarios, podemos 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.

Particularmente enmarcados en la actividad económica principal de nuestra provincia, la producción de vino, esta es una problemática local y concreta que puede ser abordada con una solución tecnológica y tener un impacto real en la economía local. En Mendoza, la producción de vino es una actividad económica importante y la industria del vidrio es un actor clave 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.

Al abordar este caso de estudio específico, esperamos 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 otros materiales reciclables.

5 Problema ambiental

En la actualidad nos encontramos ante un problema ambiental sin precedente: el cambio climático. Este fenómeno, causado principalmente por la actividad humana, ha generado un aumento de las temperaturas medias en el planeta, así como una mayor recurrencia de fenómenos meteorológicos extremos. Estos efectos adversos ya están generando pérdidas y daños tanto en la naturaleza como en las sociedades humanas, exacerbando la vulnerabilidad de los sectores y regiones más expuestos [clima2022book].

Según el consenso científico actual, el aumento de las temperaturas medias que sufre el planeta está causado, casi en su totalidad, por la acumulación de

gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, como resultado de la actividad humana [IPCC2022]. Esta evidencia se fundamenta en el rápido aumento de gases como el dióxido de carbono y el metano, donde aproximadamente dos tercios del dióxido de carbono provienen de la quema de combustibles fósiles, mientras que el metano tiene una contribución significativa desde la agricultura y la gestión de residuos [pelegri2021ipcc].

Las consecuencias del cambio climático en términos del aumento de las temperaturas medias y la mayor recurrencia de fenómenos meteorológicos extremos son significativas, con impactos económicos sustanciales que varían según las regiones y los grupos económicos [IPCC2022]. Estos efectos adversos ya están generando pérdidas y daños tanto en la naturaleza como en las sociedades humanas, exacerbando la vulnerabilidad de los sectores y regiones más expuestos [pelegri2021ipcc].

Para mitigar y revertir los efectos del cambio climático, es esencial implementar políticas globales y locales efectivas. El IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) destaca la necesidad urgente de políticas regulatorias, fiscales, sociales y estructurales que incentiven una transición hacia modelos de producción y consumo más sostenibles. Entre estas medidas se incluyen la internalización de las externalidades de las emisiones de carbono a través de impuestos y sistemas de comercio de emisiones, así como la protección y apoyo a sectores vulnerables frente a los cambios estructurales [IPCC2022].

Sin embargo, el futuro del cambio climático está marcado por una alta incertidumbre. Pelegrí señala varios factores críticos que influirán en la evolución climática futura, como la capacidad de los océanos y la biosfera terrestre para absorber dióxido de carbono, que podría disminuir con el tiempo, convirtiéndose potencialmente en fuentes de emisión en lugar de sumideros. Además, la dinámica de las grandes masas de hielo antártico y la incertidumbre en el ciclo del agua, incluidos los cambios en la formación de nubes y sus efectos en el albedo y el efecto invernadero, complican aún más las proyecciones climáticas [pelegri2021ipcc].

Este panorama subraya la urgencia de una respuesta global coordinada y basada en evidencias científicas. La humanidad enfrenta el desafío de adaptarse a un clima cambiante y mitigar sus impactos negativos. En el informe publicado por el IPCC en 2022, se destaca la importancia de todo tipo de acciones, desde acciones individuales de consumo sostenible hasta políticas internacionales ambiciosas. El informe afirma que todos los niveles de la sociedad tienen un papel crucial en asegurar un futuro sostenible para las generaciones venideras, y enfatiza que es fundamental la colaboración entre los líderes políticos, la sociedad civil y el sector privado para enfrentar este desafío global de manera inclusiva y equitativa [IPCC2022; pelegri2021ipcc]. En este contexto complejo que requiere replantear nuestro modelo de producción y consumo mundial para hacerlo más sostenible y resiliente, la economía circular surge como una modelo prometedor.

6 Economía lineal

La economía lineal es el modelo económico predominante en la actualidad, caracterizado por la extracción de recursos naturales, la producción de bienes y servicios, y la eliminación de residuos. Este enfoque, basado en el paradigma de "usar y desechar", ha sido fundamental para el crecimiento económico y la prosperidad material de las sociedades modernas. Sin embargo, este modelo lineal presenta una serie de limitaciones y externalidades negativas que plantean desafíos significativos para la sostenibilidad ambiental y económica a largo plazo [cerda2016economia].

Uno de los principales problemas asociados con la economía lineal es la generación masiva de residuos y la contaminación ambiental. La producción y el consumo de bienes y servicios generan una gran cantidad de desechos, muchos de los cuales son difíciles de eliminar de manera segura y sostenible. La acumulación de residuos plásticos, químicos y electrónicos en el medio ambiente representa una amenaza significativa para la salud humana y el equilibrio de los ecosistemas naturales [clima2022book].

Además, la economía lineal se basa en la extracción y consumo de recursos naturales finitos, lo que conduce a la sobreexplotación de los ecosistemas y la degradación de los recursos naturales. La deforestación, la pérdida de biodiversidad, la contaminación del agua y la escasez de recursos críticos son algunas de las consecuencias negativas de este enfoque extractivo. A medida que la población mundial y la demanda de recursos continúan creciendo, la insostenibilidad de este modelo se vuelve cada vez más evidente [clima2022book].

Otro aspecto crítico de la economía lineal es su dependencia de los combustibles fósiles y la energía no renovable. La quema de carbón, petróleo y gas natural para la producción de energía es una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo significativamente al cambio climático y sus impactos asociados. La transición hacia fuentes de energía renovable y procesos de producción más eficientes es fundamental para reducir la huella ambiental de la economía lineal y mitigar los efectos del cambio climático [clima2022book; onu2024ods].

7 Economía circular

La economía circular es un enfoque alternativo al modelo económico lineal tradicional, que se basa en la extracción de recursos naturales, la producción de bienes y servicios, y la eliminación de residuos. En contraste, la economía circular 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 [ellenmacarthurfoundation2022]. Este enfoque se basa en los principios de diseño ecológico, la reutilización de materiales y la regeneración de los sistemas naturales, con el objetivo de crear un sistema económico más sostenible y resiliente.

Desde la Revolución Industrial, la economía global ha operado principal-

mente bajo un modelo de "extraer, producir y consumir", caracterizado por la explotación de recursos naturales y la generación masiva de residuos [cerda2016economia]. Este enfoque, aunque ha impulsado un crecimiento económico sin precedentes, ha llevado al agotamiento de recursos críticos y a una crisis ambiental cada vez más evidente.

La economía circular propone un cambio radical al concebir los sistemas productivos y de consumo como ciclos cerrados, donde los materiales y recursos se mantienen en uso durante el mayor tiempo posible, se reciclan y se reutilizan al final de su vida útil [circular2017economia]. Este enfoque no solo busca minimizar la generación de residuos, sino también maximizar el valor de los recursos a lo largo de su ciclo de vida. El eco-diseño juega un papel central en este proceso, promoviendo la creación de productos y servicios que sean más eficientes en el uso de recursos, renovables, reciclables y menos perjudiciales para el medio ambiente.

Para efectuar esta transformación hacia la economía circular, es esencial adoptar no solo innovaciones tecnológicas sino también cambios organizativos y sociales significativos [espanacircular2030]. Esto implica desarrollar nuevos conocimientos y tecnologías que apoyen procesos productivos más eficientes y menos intensivos en recursos. Además, se requiere reestructurar cadenas de valor existentes y fomentar la colaboración entre sectores industriales y actores gubernamentales para promover prácticas empresariales más sostenibles.

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

Un elemento clave dentro de la economía circular son los principios de las "3R": Reducir, Reutilizar y Reciclar [cerda2016economia]. Reducir implica minimizar el consumo de recursos y energía a través de mejoras en la eficiencia y eco-eficiencia. Reutilizar se refiere a la prolongación de la vida útil de productos y materiales mediante el segundo uso y la reparación. Reciclar, por otro lado, implica recuperar materiales valiosos de residuos para reintroducirlos en la cadena productiva.

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

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

8 Cadena de suministro

La cadena de suministro es un concepto fundamental en la economía global, que se refiere al conjunto de actividades y procesos involucrados en la producción, distribución y venta de bienes y servicios. Desde la extracción de materias primas hasta la entrega de productos terminados a los consumidores, la cadena de suministro abarca una amplia gama de actividades y actores, incluidos proveedores, fabricantes, distribuidores, minoristas y consumidores [christopher2016logistics].

La cadena de suministro es un sistema complejo y dinámico que se extiende a lo largo de múltiples etapas y ubicaciones geográficas, con interacciones entre diferentes actores y procesos. La eficiencia y la efectividad de la cadena de suministro son fundamentales para el éxito de las organizaciones en un entorno empresarial cada vez más competitivo y globalizado [christopher2016logistics].

La gestión de la cadena de suministro implica la coordinación y optimización de los flujos de materiales, información y dinero a lo largo de toda la cadena, con el objetivo de satisfacer las necesidades de los clientes de manera eficiente y rentable. Esto incluye la planificación de la demanda, la gestión de inventarios, la programación de la producción, la logística de distribución y la gestión de relaciones con los proveedores y los clientes [christopher2016logistics].

La cadena de suministro es un componente crítico de la economía global, ya que conecta a los productores con los consumidores y facilita el intercambio de bienes y servicios en todo el mundo. La eficiencia y la resiliencia de la cadena de suministro son fundamentales para garantizar la disponibilidad y la calidad de los productos en el mercado, así como para minimizar los costos y los impactos ambientales asociados con la producción y distribución de bienes [christopher2016logistics].

En el contexto de la economía circular, la cadena de suministro juega un papel crucial en la implementación de prácticas sostenibles y circulares. La adopción de principios de economía circular en la cadena de suministro puede ayudar a reducir la generación de residuos, minimizar la extracción de recursos naturales y promover la reutilización y el reciclaje de materiales valiosos [melendez2021economia].

9 Producción y reciclaje de Vidrio

El vidrio es un material ampliamente utilizado en la industria del envasado de alimentos y bebidas debido a sus propiedades únicas como la transparencia, durabilidad y reciclabilidad. La producción de vidrio implica la fusión de materias primas como arena, sosa y caliza a altas temperaturas para formar un material sólido y homogéneo. Este material se moldea luego en envases de vidrio mediante técnicas de soplado o prensado [verallia2022vidrio].

Este material es uno de los pocos que puede reciclarse infinitamente sin perder calidad. Al reciclar vidrio, se puede reutilizar el 100% del material reciclado para producir nuevos envases sin necesidad de añadir materias primas

vírgenes. Esto no solo reduce la generación de residuos y la extracción de recursos naturales, sino que también disminuye la huella de carbono asociada con la producción de nuevo vidrio [verallia2022vidrio].

La cadena de suministro del vidrio abarca múltiples etapas, desde la extracción de materias primas hasta la producción, distribución y reciclaje de envases de vidrio. La trazabilidad en esta cadena es fundamental para garantizar la calidad y sostenibilidad de los productos, así como para promover prácticas de producción y consumo responsables [verallia2022vidrio].

9.1 Producción de Vidrio

Verallia, una empresa internacional especializada en la producción de envases de vidrio para alimentos y bebidas, explica el proceso de producción de envases de vidrio separado en las siguientes etapas [prodvidrio2024verallia]:

1. **Selección de Materias Primas:** Se seleccionan y almacenan arena de sílice, sosa (carbonato de sodio) y caliza (carbonato de calcio).
2. **Dosificación y Mezcla:** Las materias primas se pesan y mezclan en proporciones específicas para formar el lote de vidrio. En esta etapa se puede incluir una proporción de vidrio reciclado molido (calcín) a la mezcla.
3. **Fusión:** La mezcla se funde en un horno a aproximadamente 1550°C durante aproximadamente 24 horas para obtener un líquido homogéneo.
4. **Formación:** El vidrio fundido se corta en gotas y se moldea en las formas deseadas utilizando técnicas como soplado-soplado o prensa-soplado dependiendo del tipo de envase que se está produciendo.
5. **Recocido:** Los envases de vidrio se enfrían lentamente para eliminar tensiones internas y asegurar su resistencia.
6. **Inspección:** Cada envase se inspecciona para detectar defectos y asegurar que cumpla con los estándares de calidad.
7. **Almacenamiento y Distribución:** Los envases aprobados se empaquetan y almacenan para su distribución al cliente final.

9.2 Reciclaje de Vidrio

El vidrio reciclado se utiliza para producir nuevos envases, ahorrando materias primas y energía. El proceso de reciclaje incluye:

1. **Recolección:** Se recogen envases de vidrio usados mediante programas de recogida selectiva.
2. **Clasificación:** El vidrio se clasifica por color y se separa de otros materiales.

3. **Limpieza:** El vidrio se lava y tritura en pequeños fragmentos.
4. **Fundición:** Los fragmentos se funden para formar vidrio reciclado.
5. **Formación:** Se moldea el vidrio fundido en nuevas formas de envases.

9.3 Producción y reciclaje de Vidrio en Mendoza

En Mendoza, la industria del vidrio se centra principalmente en la producción de envases para la industria del vino y otras bebidas, así como frascos para alimentos. En la región se encuentra una única empresa dedicada a la producción y reciclaje de vidrio: Verallia. Esta empresa cubre el 100% de la demanda de botellas y frascos de vidrio de la provincia.

Verallia es una empresa internacional líder en la producción de envases de vidrio para la industria de alimentos y bebidas. La empresa opera en más de 30 países y cuenta con una amplia gama de productos y servicios para satisfacer las necesidades de sus clientes en todo el mundo. En Mendoza, Verallia produce botellas y frascos de vidrio para una variedad de sectores, incluidos el vino, la cerveza, los licores, los alimentos y las bebidas no alcohólicas. La empresa adopta prácticas sostenibles y tecnologías innovadoras para minimizar su impacto ambiental y promover el reciclaje de vidrio [verallia2022vidrio].

A través del programa "Vidrio, una acción transparente" [vidriotransparente2024mendoza], Verallia y el Gobierno de Mendoza fomentan la recolección y reciclaje de vidrio, apoyando a la vez a organizaciones benéficas locales con los ingresos del vidrio reciclado. Este enfoque no solo beneficia al medio ambiente sino que también contribuye a la economía y el bienestar social de la región.

10 Trazabilidad en la Cadena de Suministro

La trazabilidad en la cadena de suministro es un aspecto clave para garantizar la transparencia y la integridad de los productos a lo largo de toda la cadena. La trazabilidad permite a las organizaciones rastrear el origen y el destino de los productos, identificar posibles problemas y tomar medidas correctivas de manera oportuna [cepeda2010trazabilidad]. En el contexto de la economía circular, la trazabilidad en la cadena de suministro es fundamental para garantizar la calidad y la autenticidad de los materiales reciclados y reutilizados, así como para promover la trazabilidad de los productos a lo largo de su ciclo de vida [melendez2021economia].

La trazabilidad en la cadena de suministro se basa en la recopilación y el intercambio de información relevante sobre los productos y los procesos involucrados en su producción y distribución. Esta información puede incluir datos sobre la procedencia de los materiales, las condiciones de producción, el transporte y el almacenamiento, así como la gestión de residuos y la disposición final de los productos. La trazabilidad en la cadena de suministro puede facilitar la identificación de problemas de calidad, la gestión de riesgos y la toma de decisiones informadas en toda la cadena.

La trazabilidad es fundamental en la cadena de suministro por varias razones:

- **Seguridad del consumidor:** Permite la retirada rápida de productos defectuosos o peligrosos del mercado.
- **Cumplimiento regulatorio:** Ayuda a cumplir con las regulaciones gubernamentales y las normativas de la industria, especialmente en sectores como alimentos, medicamentos y productos químicos.
- **Gestión de la calidad:** Facilita la identificación de problemas en la cadena de suministro y permite mejoras en los procesos.
- **Sostenibilidad:** Apoya prácticas de negocio sostenibles al asegurar que los materiales y procesos cumplen con criterios éticos y ambientales.

Implementar la trazabilidad efectiva requiere una combinación de tecnología, estándares y cooperación entre todos los actores de la cadena. Los sistemas de información avanzados, como el código de barras, RFID (identificación por radiofrecuencia) y la tecnología blockchain, son herramientas que se usan actualmente para registrar y acceder a la información del producto en tiempo real [cepeda2010trazabilidad; BISWAS2023128].

10.1 Desafíos de la Trazabilidad

A pesar de sus beneficios, la implementación de la trazabilidad enfrenta varios desafíos:

- **Complejidad técnica:** Integrar sistemas de trazabilidad en cadenas de suministro complejas y geográficamente dispersas puede ser tecnológicamente desafiante.
- **Costos:** La actualización o instalación de nuevos sistemas de trazabilidad puede ser costosa para las empresas, especialmente para las pequeñas y medianas empresas (PYMES).
- **Cooperación entre actores:** Requiere que todos los participantes de la cadena compartan información abiertamente, lo que puede ser impedido por intereses competitivos o falta de confianza.
- **Privacidad y seguridad de datos:** Manejar la gran cantidad de datos generados y asegurar su protección es crucial para evitar problemas de privacidad y seguridad.

Varias industrias han implementado con éxito sistemas de trazabilidad que han resultado en mejoras significativas en eficiencia, seguridad del consumidor y sostenibilidad. Por ejemplo, en la industria alimentaria, la trazabilidad ha permitido identificar rápidamente y reducir el alcance de los retiros de productos contaminados, protegiendo así la salud pública y la imagen de las marcas involucradas.

Un enfoque emergente para abordar los desafíos de la trazabilidad en la cadena de suministro es la tecnología blockchain. La tecnología blockchain ofrece una forma segura y descentralizada de registrar y compartir información en tiempo real, lo que puede mejorar la transparencia, la integridad y la eficiencia de los sistemas de trazabilidad en la cadena de suministro.

11 Tecnología Blockchain

La tecnología blockchain es una tecnología de base de datos distribuida. Esta estructura de datos distribuida mantiene un registro inmutable de transacciones o eventos validados mediante técnicas criptográficas que protegen los datos contra la manipulación. La información de esta base de datos se organiza en transacciones, que son validadas y agrupadas en bloques. Cada bloque, junto con un puntero al bloque anterior, forma una cadena de transacciones interconectadas criptográficamente. Una vez que una transacción se ha añadido a la cadena, generalmente no puede ser modificada ni eliminada porque requeriría cambiar todos los bloques posteriores en la cadena, lo cual es computacionalmente impracticable debido a la distribución y la seguridad criptográfica de la red blockchain. En la Figura 1 se muestra un esquema de cómo se procesa una transacción en una blockchain.

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

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

Esta arquitectura dota a la tecnología blockchain de características como inmutabilidad, transparencia y trazabilidad, que la convierten en una herramienta ideal para la gestión sostenible de la cadena de suministro. La tecnología blockchain ha sido ampliamente adoptada en diversos sectores y aplicaciones, incluyendo la trazabilidad de la cadena de suministro, la autenticación de productos, la gestión de identidad, la votación electrónica, la gestión de activos digitales y la creación de contratos inteligentes.

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

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

11.1 Hyperledger Fabric

Hyperledger Fabric es una plataforma de tecnología ledger distribuida (DLT) de código abierto y diseñada para uso en contextos empresariales ¹. Hyperledger se estableció bajo la Fundación Linux y su sólida comunidad [**androulaki2018hyperledger**].

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

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

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

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

11.2 Ethereum

Ethereum es una plataforma de código abierto basada en blockchain que permite a los desarrolladores crear y desplegar contratos inteligentes y aplicaciones descentralizadas (dApps) ². Ethereum tiene como objetivo ser una computadora mundial descentralizada que ejecute cualquier tipo de aplicación. Esta plataforma es alimentada por su criptomoneda nativa, Ether, que se utiliza para pagar las transacciones y los servicios de la red [**buterin2013ethereum**].

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

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

²<https://ethereum.org/en/learn/>

Los contratos inteligentes en Ethereum se escriben en Solidity [dannen2017introducing], un lenguaje de programación específico de dominio que se utiliza para definir las reglas y la lógica de una aplicación descentralizada. Los contratos inteligentes en Ethereum se ejecutan en la máquina virtual Ethereum (EVM), que es una máquina virtual Turing completa que puede ejecutar cualquier tipo de código. El lenguaje Solidity está inspirado en JavaScript y C++, lo que facilita su aprendizaje para los desarrolladores que ya están familiarizados con estos lenguajes.

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

11.3 Polkadot

Polkadot es una plataforma de blockchain de código abierto que permite la interoperabilidad entre diferentes blockchains ³. Polkadot tiene como objetivo crear una red de blockchain escalable, segura e interoperable que pueda soportar una amplia gama de aplicaciones descentralizadas y contratos inteligentes. Esta plataforma es desarrollada por la Web3 Foundation y posee una sólida comunidad de desarrolladores activos [wood2016polkadot].

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

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

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

11.4 VeChain

VeChain es una plataforma de blockchain de código abierto dedicada a la trazabilidad y que busca asegurar la autenticidad de los productos en la cadena de suministro ⁵. VeChain utiliza una combinación de tecnología blockchain, RFID

³<https://polkadot.network/>

⁴<https://docs.substrate.io/>

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

e Internet de las cosas (IoT) para rastrear el movimiento de productos a lo largo de toda la cadena de suministro, desde la producción hasta el consumidor final. Esta plataforma es desarrollada por la Fundación VeChain y tiene como objetivo mejorar la transparencia y la confianza en la cadena de suministro [she2022vechain].

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

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

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

11.5 Cardano

Cardano es una plataforma de blockchain de código abierto que busca crear una red de blockchain escalable, segura y sostenible ⁶. Cardano tiene como objetivo ser una plataforma de contratos inteligentes de tercera generación que pueda soportar una amplia gama de aplicaciones descentralizadas y contratos inteligentes. Cardano se caracteriza por su enfoque científico y riguroso en su desarrollo, utilizando evidencia formal y revisión por pares para garantizar la seguridad y confiabilidad de la plataforma [hoskinson2017we].

Una de las características distintivas de Cardano es su enfoque en la seguridad y la provisión de garantías formales. Para programar aplicaciones en esta plataforma se utiliza el lenguaje de programación funcional Haskell, que permite la verificación formal de contratos inteligentes y protocolos. También se pueden desarrollar contratos inteligentes utilizando Plutus [chakravarty2019functional]⁷, un lenguaje de programación específico de dominio basado en Haskell que facilita la creación de contratos inteligentes seguros y confiables en Cardano.

Esta plataforma utiliza un protocolo de consenso de PoS, que es más eficiente energéticamente que los protocolos de PoW. La red posee una criptomoneda

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

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

nativa llamada ADA, que se utiliza para pagar las transacciones y los servicios de la red.

11.6 Comparación de tecnologías

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

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

Table 1: Comparación de plataformas blockchain

11.7 Conclusión

Para este trabajo determinamos que la tecnología blockchain es la mejor opción de bases de datos para la trazabilidad en la cadena de suministro de vidrio. Esta elección se fundamenta en las características intrínsecas de la base de datos distribuida, tales como inmutabilidad, transparencia y trazabilidad, que son esenciales para mejorar la transparencia y la responsabilidad en toda la cadena de suministro. Considerando la diversidad de actores y los variados intereses en el sistema, así como la presencia de incentivos y posibles penalizaciones económicas, hay un riesgo latente de fraude y de manipulación de la información. La implementación de blockchain ofrece una solución robusta para estos desafíos, mejorando significativamente la trazabilidad y proporcionando una fuente confiable de información para todos los actores del ecosistema. En caso de inconsistencias, permite identificar rápidamente el origen del problema y facilitar las acciones correctivas.

Además, la adopción de blockchain para este problema permite la integración de contratos inteligentes, que se pueden programar para ejecutar automáticamente transacciones o verificar cumplimientos cuando se satisfacen condiciones predefinidas, por ejemplo, confirmación de entrega de materiales, pago de incentivos y cobro de penalizaciones. Esta funcionalidad reduce la necesidad de intermediarios, disminuyendo los costos operativos y aumentando la velocidad de las transacciones. La seguridad, reforzada por una criptografía avanzada y una estructura descentralizada, garantiza que los datos registrados en la cadena no puedan ser alterados. Esto proporciona un nivel adicional

de confianza y transparencia, crítico para todos los actores involucrados en la cadena de suministro del vidrio.

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

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

12 Políticas orientadas a la sustentabilidad

La transición hacia prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente es uno de los desafíos más significativos y urgentes que enfrentan las sociedades contemporáneas. En este contexto, las políticas públicas orientadas a la sustentabilidad ecológica desempeñan un papel crucial en la modelación de estrategias que no solo buscan mitigar los efectos del cambio climático, sino también transformar la economía global hacia modelos más circulares y regenerativos. Estas políticas están diseñadas para integrar tres dimensiones del desarrollo sostenible: la económica, la social y la ambiental, ofreciendo así una hoja de ruta integral que articula la acción colectiva en torno a objetivos comunes que son tanto ambientales como socioeconómicos [gil2018objetivos].

En el ámbito de América Latina, por ejemplo, se han implementado modelos de economía circular que intentan reformular el uso y gestión de los recursos, promoviendo la reducción, reutilización y reciclaje de materiales [rodriguez2023modelamiento;

cepal2021economia]. Estas iniciativas son fundamentales para enfrentar los retos locales y globales de la gestión de residuos y la preservación de recursos naturales. En este sentido, la Estrategia Nacional de Consumo y Producción Sostenibles de Argentina representa un esfuerzo significativo por parte del gobierno para alinear las prácticas de consumo y producción con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, enfocándose específicamente en el ODS 12, que promueve un consumo y producción responsables [**sostenible2021argentina**].

Sin embargo, a pesar de los avances en la formulación de políticas, la implementación efectiva enfrenta desafíos significativos. La complejidad de las estructuras económicas existentes, la falta de compromiso a largo plazo y las necesidades de inversiones considerables para tecnologías sostenibles son solo algunas de las barreras que estos países deben superar. Además, la eficacia de estas políticas frecuentemente se ve limitada por la falta de coherencia y coordinación entre diferentes niveles de gobierno y sectores de la sociedad, así como por la insuficiencia de indicadores claros y medibles para evaluar el progreso hacia los objetivos propuestos [**gil2018objetivos**].

A pesar de los esfuerzos legislativos y las iniciativas implementadas, es evidente que el impacto real de las políticas públicas orientadas a la sustentabilidad ecológica, aunque positivo en cierta medida, no ha alcanzado el nivel de efectividad esperado [**gil2018objetivos; clima2022book**]. De manera generalizada, el impacto positivo de estas políticas ha sido insuficiente para contrarrestar de manera significativa el impacto ambiental negativo de las sociedades en las que se han implementado, dentro del período acordado. Esto resalta una brecha crítica entre los objetivos propuestos y los resultados tangibles obtenidos, subrayando la necesidad urgente de reevaluar y fortalecer los mecanismos de acción y cumplimiento. La insuficiencia de estas políticas para neutralizar los efectos adversos en el tiempo establecido indica un desafío persistente en la política de desarrollo sostenible global.

En conclusión, mientras que la formulación de políticas públicas orientadas a la sustentabilidad ecológica es un paso vital hacia un desarrollo más sostenible, la clave para su éxito radica en la capacidad de implementar estos marcos de manera efectiva, garantizando que las transiciones hacia modelos circulares y sostenibles sean viables, inclusivas y beneficiosas para cada actor del modelo. A continuación se exploran una serie de políticas específicas implementadas en diversos contextos, evaluando su impacto, efectividad y las lecciones aprendidas en el proceso.

12.1 Evolución de las Políticas de Cambio Climático y la Neutralidad Climática en la Unión Europea

En el marco del Pacto Verde Europeo, la Unión Europea ha otorgado rango legal a su objetivo de neutralidad climática mediante la Ley Europea del Clima, impulsando una serie de políticas innovadoras para su implementación, como el paquete de medidas conocido como Objetivo 55 [**dormido2022cambio**].

12.1.1 De Río a París: Hitos en la Acción Climática

La trayectoria internacional de la acción frente al cambio climático ha evolucionado significativamente desde los acuerdos iniciales en Río de Janeiro en 1992. Este cambio refleja una mayor comprensión de la influencia humana sobre el clima y sus implicaciones económicas, culminando en la adopción de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Los esfuerzos continuaron con el Protocolo de Kyoto en 1997, que estableció por primera vez compromisos de reducción de emisiones de CO₂ para los países desarrollados [dormido2022cambio].

12.1.2 El Acuerdo de París y su Implementación

El Acuerdo de París, firmado en 2015, marca un hito histórico al ser el primer tratado internacional universal sobre el cambio climático. Este acuerdo compromete a sus signatarios a mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 2°C con respecto a los niveles preindustriales y esforzarse por limitar este aumento a 1,5°C. Además, se establecen mecanismos para la mitigación, adaptación y resiliencia ante el cambio climático, incluyendo un marco financiero y técnico para apoyar a los países más vulnerables [dormido2022cambio].

12.1.3 Acciones del G-20 y la Economía Circular

En respuesta a la crisis del COVID-19, los asuntos climáticos han ganado protagonismo en la agenda del G-20, reflejando la urgencia de estas políticas. Los comunicados del G-20 han resaltado la importancia de asignar recursos financieros adecuados para la mitigación del cambio climático y la adopción de tecnologías limpias para alcanzar emisiones cero, así como el acceso a fuentes de energía limpia. Además, se destaca el acuerdo para la reducción de emisiones de metano, consideradas clave en la estrategia de mitigación rápida y económica del cambio climático [dormido2022cambio].

12.1.4 Impuestos al Carbono y Políticas Fiscales Sostenibles

Las recomendaciones del Fondo Monetario Internacional enfatizan la necesidad de un impuesto global al carbono como la medida más eficiente para la descarbonización. A nivel nacional, se sugieren reformas en los subsidios a los combustibles fósiles y el fomento de inversiones en energías verdes, complementadas con transferencias para compensar a los hogares vulnerables por los efectos de la transición energética [dormido2022cambio].

12.1.5 El Pacto Verde Europeo

Adoptado en 2019, el Pacto Verde Europeo es el compromiso programático más reciente de la UE en la lucha contra el cambio climático. Este pacto busca transformar los retos climáticos y ambientales en oportunidades para todas las áreas de actuación, promoviendo una transición justa e integradora hacia una

economía sostenible y climáticamente neutra para 2050. El principal desafío de implementar el Pacto Verde y otras políticas similares radica en la necesidad de una transición justa que compense a las comunidades afectadas por los cambios industriales [dormido2022cambio].

12.1.6 Iniciativa Close the Glass Loop

La iniciativa Close the Glass Loop es un esfuerzo colaborativo para alcanzar una tasa de recolección empaques de vidrio para reciclaje del 90% en la UE para 2030. Este programa no solo promueve la recolección de vidrio, sino que también fomenta el uso del vidrio reciclado en la producción de nuevos envases, cerrando así el ciclo de vida del material. A través de una serie de asociaciones estratégicas y campañas de comunicación intensivas, Close the Glass Loop trabaja para aumentar la conciencia y mejorar las infraestructuras de reciclaje, con el objetivo de transformar la gestión de residuos de vidrio y lograr un cambio sistemático en toda la industria [closetheglassloop2023]. Hasta el año 2024, esta iniciativa ya ha alcanzado una tasa de recolección y reciclaje mayor al 80% en la UE, lo que representa un avance significativo hacia el objetivo final [closetheglassloop2023].

12.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2015 como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, son un marco global compuesto por 17 objetivos interconectados. Estos objetivos representan un esfuerzo global para erradicar la pobreza, proteger el medio ambiente, y garantizar que todas las personas disfruten de paz y prosperidad para 2030. Son el consenso más amplio a lo que la humanidad aspira en cuanto a un futuro deseable y abordan las dimensiones económica, social y ambiental del desarrollo sostenible a través de metas concretas y cuantificables. Los objetivos se materializan en 169 metas concretas medibles a través de 230 indicadores, diseñados para ser aplicados universalmente a todos los países [onu2024ods gil2018objetivos].

Varios ODS están directamente relacionados con la economía circular y la sostenibilidad ecológica, destacando la importancia de:

- **ODS 7: Energía asequible y no contaminante.** Garantiza el acceso universal a servicios energéticos asequibles, confiables, sostenibles y modernos.
- **ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles.** Se enfoca en hacer que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.
- **ODS 12: Producción y Consumo Responsables** — Fomenta prácticas sostenibles que incluyen la reducción del desperdicio mediante la prevención, reciclaje y reutilización.

- **ODS 13: Acción por el Clima** — Insta a la adopción de medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.
- **ODS 14 y 15: Vida Submarina y Terrestre** — Promueven la conservación y uso sostenible de los ecosistemas oceánicos y terrestres, esenciales para la biodiversidad y la sostenibilidad ambiental.

Los ODS ofrecen una visión integradora y global del desarrollo sostenible. Sin embargo, para que esta visión se materialice en acciones efectivas y resultados tangibles, se requiere un compromiso profundo y coordinado a nivel internacional, junto con estrategias adaptadas a las realidades locales de cada país [gil2018objetivos]. Los ODS, como un marco global para el desarrollo sostenible, necesitan acciones concertadas y compromisos políticos claros para ser efectivos. La comunidad internacional debe priorizar estos objetivos dentro de sus políticas nacionales y cooperar a nivel internacional para asegurar que los esfuerzos sean inclusivos y efectivos en todos los sectores de la sociedad [onu2024ods].

A pesar de la amplitud y la ambición de los ODS, han surgido críticas significativas respecto a su estructura y efectividad. La complejidad de su arquitectura y las limitaciones técnicas han sido puntos de preocupación, así como la falta de compromisos específicos y medibles que aseguren su cumplimiento. Los ODS han sido criticados por ser en gran parte retóricos y ambiciosos sin suficientes directrices claras para su implementación, lo que ha generado disparidades en la aplicación entre diferentes países [gil2018objetivos].

Los ODS requieren un cambio significativo en las políticas y prácticas globales, lo cual ha sido un proceso complejo y desigual entre los países. Los estados han encontrado dificultades para avanzar en la implementación de estas metas, debido en parte a la falta de indicaciones claras sobre cómo llevar a cabo estas transformaciones. Además, la voluntariedad de los ODS permite que cada país avance a su propio ritmo, lo que podría resultar en esfuerzos dispersos y no coordinados [gil2018objetivos].

A pesar de la ambición de los ODS sobre el progreso ecológico y la sostenibilidad global, el impacto real hasta la fecha ha sido mixto en comparación con las proyecciones iniciales. Según el análisis presentado en *Clima* [clima2022book], la implementación de los ODS ha enfrentado desafíos significativos, incluyendo la falta de recursos financieros, políticas incoherentes a nivel nacional, y la necesidad de mayor cooperación internacional. Aunque se han hecho avances en algunos sectores, el progreso global hacia metas críticas como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la conservación de la biodiversidad ha sido insuficiente para cumplir con los objetivos establecidos para 2030. Este desfase subraya la necesidad urgente de revisar las estrategias y compromisos, tanto a niveles nacionales como internacionales, para asegurar que los avances hacia la sostenibilidad ecológica no solo sean aspiracionales sino efectivos y tangibles.

12.2.1 Estrategias de Desarrollo Productivo Verde

El capítulo sobre políticas de desarrollo del FUNDAR subraya la importancia de integrar dimensiones económicas, sociales y ambientales en el desarrollo. Busca avanzar hacia una estructura productiva que maximice la eficiencia en el uso de recursos y minimice el impacto ambiental.

Las políticas sostenibles enfrentan limitaciones significativas debido a la complejidad de los sistemas económicos y la falta de un marco regulatorio coherente. La implementación efectiva de estas políticas se ve obstaculizada por estos factores, junto con la resistencia de sectores arraigados y la insuficiencia de inversiones en tecnologías limpias.

12.3 Políticas Sustentables y Gestión de Residuos en América Latina

12.3.1 Introducción a la Economía Circular y su Impacto Macroeconómico

La transición hacia una economía circular en América Latina no solo implica un cambio en la gestión de residuos sino que también ofrece una oportunidad para mejorar la macroeconomía de la región. En el estudio *Modelamiento de los efectos macroeconómicos de la transición a la economía circular en América Latina* [rodriguez2023modelamiento], se exploran los impactos potenciales en el empleo, la huella climática, y el Producto Interno Bruto (PIB) mediante un modelo que simula diferentes escenarios de transición. Este modelo destacó que, con una reducción conservadora en el uso de materiales como el plástico y el cemento, los países podrían ver incrementos en el PIB de hasta 2.2% y mejoras en el empleo de hasta 2.1% para 2030, además de reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), mostrando un potencial para recuperaciones verdes [rodriguez2023modelamiento].

12.4 Políticas Públicas y Avances en la Gestión de Residuos

Según el documento *Economía Circular en América Latina y el Caribe: oportunidad para una recuperación transformadora* [cepal2021economia], la región ha implementado diversas políticas para fomentar la economía circular, que incluyen legislaciones sobre la responsabilidad extendida del productor y prohibiciones de plásticos de un solo uso. Estas políticas buscan no solo reducir la generación de residuos sino también promover la reutilización y el reciclado, integrando aspectos económicos, sociales y ambientales en línea con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible [cepal2021economia].

A pesar de los avances, existen desafíos significativos debido al déficit en infraestructura para la gestión de residuos y las bajas tasas de reciclaje, que están muy centradas en pocos productos, como el papel y el cartón. Estas limitaciones ofrecen, sin embargo, una ventana de oportunidad para mejorar la gestión de

residuos y promover la economía circular a nivel local, utilizando cadenas productivas que potencien el desarrollo sostenible [cepal2021economia].

12.4.1 Estrategias Legislativas y Normativas

La implementación de leyes de responsabilidad extendida del productor en la región ha sido un paso importante para asegurar que los fabricantes asuman una parte del costo y la gestión de sus productos al final de su vida útil. Sin embargo, el impacto de estas políticas aún está limitado por la falta de un sistema integral que involucre a todos los actores, desde consumidores hasta gestores de residuos y el Estado, para garantizar una gestión eficiente de los residuos [cepal2021economia].

Según Rodríguez [rodriguez2023modelamiento], es crucial usar la experiencia adquirida en la modelación inicial para desarrollar modelos más complejos que integren los efectos ambientales. Esto incluye la adaptación del modelo a diferentes contextos macroeconómicos y sectores, lo que permitirá una aplicación más amplia de la economía circular en América Latina. Además, es esencial fortalecer la construcción de indicadores y metas físicas para una transición efectiva hacia la economía circular.

Ambos informes conciden en que la transición hacia la economía circular en América Latina presenta una oportunidad única para alinear los objetivos económicos con los ambientales y sociales, promoviendo un desarrollo sostenible y resiliente. Sin embargo, se requiere una colaboración más estrecha entre los gobiernos, la industria y la sociedad civil para superar los desafíos actuales y maximizar los beneficios de las políticas implementadas. La continuidad en la evaluación y ajuste de las políticas será crucial para garantizar que la región pueda alcanzar los objetivos establecidos para 2030 y más allá [cepal2021economia].

12.5 Políticas Sustentables en Argentina

En Argentina, las políticas de desarrollo sostenible han cobrado una importancia significativa en respuesta a la crisis climática global y a la necesidad de promover un desarrollo económico que sea ambiental y socialmente responsable. Los esfuerzos del país para implementar estas políticas están alineados con los ODS y reflejan un compromiso con la transformación hacia prácticas de producción y consumo sostenibles [dormido2021fundar; sostenible2021argentina].

12.6 Desarrollo Productivo Verde

Según FUNDAR, un laboratorio de políticas públicas argentino, es crucial que el Estado, el mercado y la sociedad civil trabajen conjuntamente para enfrentar los retos ambientales. Este enfoque colaborativo es esencial para diseñar políticas que no solo apunten a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero sino que también fomenten la independencia y el crecimiento económico sostenible de Argentina [dormido2021fundar].

12.7 Estrategia Nacional de Consumo y Producción Sostenibles

La "Estrategia Nacional de Consumo y Producción Sostenibles" representa un esfuerzo significativo por parte del gobierno argentino para integrar la sostenibilidad en todos los aspectos de la cadena de producción y consumo. La estrategia incluye medidas en educación, regulaciones políticas, promoción de tecnologías sostenibles, gestión de recursos y sostenibilidad en la cadena de valor [sostenible2021argentina].

12.7.1 Componentes Clave de la Estrategia

- **Educación y Sensibilización:** Incrementar la conciencia sobre la importancia de prácticas sostenibles.
- **Políticas Regulatorias:** Implementar leyes que incentiven el uso de prácticas y tecnologías sostenibles en la industria.
- **Promoción de Tecnologías Sostenibles:** Apoyar el desarrollo y adopción de tecnologías que minimicen el impacto ambiental.
- **Gestión Sostenible de Recursos:** Fomentar el uso eficiente de recursos y la reducción de residuos.
- **Integración de la Sostenibilidad en la Cadena de Valor:** Aplicar criterios de sostenibilidad en compras públicas y privadas.

La estrategia ha tenido impactos multidimensionales, destacando mejoras en la competitividad económica, conservación de ecosistemas y empoderamiento social. Sin embargo, los desafíos incluyen la necesidad de mayor participación del sector privado y la efectiva implementación de políticas a nivel local y regional [sostenible2021argentina].

La evaluación del impacto real sobre las emisiones de GEI y la efectividad general de las políticas sostenibles en Argentina es un tema de debate. A pesar de los avances, la implementación efectiva de estas políticas enfrenta desafíos significativos, incluyendo la falta de recursos financieros, la resistencia de sectores arraigados y la necesidad de inversiones en tecnologías limpias. La colaboración entre el gobierno, la industria y la sociedad civil será fundamental para alcanzar los objetivos ambientales y de desarrollo sostenible del país [dormido2021fundar; sostenible2021argentina].

13 Programas de Reciclaje de Vidrio en Argentina

En Argentina, diversos programas han sido implementados para fomentar el reciclaje de vidrio, destacando las cualidades sostenibles y reciclables de este material. Estos programas varían en enfoque y escala, pero todos comparten el objetivo común de maximizar el reciclaje de vidrio. Mientras que el vidrio es un material altamente reciclable, en caso de no ser reciclado, puede tardar miles de

años en descomponerse en un vertedero, lo que lo convierte en un material altamente contaminante [cordoba2024vidrio]. Su tasa de reciclaje en Argentina es relativamente baja en comparación con otros países, lo que ha motivado la implementación de estos programas para promover su reciclaje y reutilización [vidriotransparente2024mendoza; innovar2024vidrio; cordoba2024vidrio].

13.1 Verallia - Vidrio una Iniciativa Solidaria

Este programa, mencionado anteriormente, es un esfuerzo conjunto entre Verallia y el Gobierno de Mendoza, conocido como "Vidrio, una acción transparente" [vidriotransparente2024mendoza]. Promueve activamente la recolección y reciclaje de vidrio, beneficiando no solo el medio ambiente sino también la economía local y el bienestar social mediante el apoyo a organizaciones benéficas con los ingresos generados del vidrio reciclado.

13.2 San Isidro + Reciqló

El Municipio de San Isidro, en colaboración con la organización Reciqló, lanzó un innovador programa de reciclado de vidrio a domicilio, el primero de su tipo en el país. Este programa facilita la recolección de vidrio utilizando un camión especial que visita las casas semanalmente. Los vecinos inscritos en el programa depositan sus envases de vidrio en un cajón proporcionado por Reciqló, que luego son recogidos y transportados a la planta de reciclaje. El vidrio reciclado se utiliza posteriormente en proyectos de impacto urbano como el bacheo en frío y la mejora de suelos para espacios verdes [innovar2024vidrio].

13.3 Vidrio Sí, Gracias - Córdoba

El proyecto "Vidrio sí, gracias" en Córdoba es otro ejemplo de iniciativa local que fomenta la participación comunitaria en el reciclaje de vidrio. Este programa no solo ayuda a reducir la cantidad de vidrio que llega a los basurales sino que también involucra a los recuperadores locales en el proceso, garantizando que formen parte activa del proyecto de reciclaje [cordoba2024vidrio].

13.4 Conclusión

Estos programas reflejan un compromiso sustancial con la sostenibilidad y la economía circular, destacando el papel significativo de los municipios o gobiernos locales en la promoción del reciclaje. Sin embargo, aún existen desafíos en términos de concientización, participación y logística que deben abordarse para maximizar el impacto de estas iniciativas.

En la revisión de los programas de reciclaje de vidrio en Argentina, no se han encontrado métricas específicas que indiquen la tasa de adopción o la cantidad exacta de material efectivamente reciclado. Estos programas están diseñados para simplificar la logística del reciclaje para el usuario final, promoviendo la facilidad de entrega y procesamiento del vidrio. Sin embargo, estos sistemas

no garantizan por sí mismos el reciclaje efectivo de los residuos, ni ofrecen incentivos o imposiciones que obliguen a los ciudadanos a participar. En cambio, dependen principalmente de la buena voluntad de los individuos para su éxito. A diferencia de estas iniciativas, programas como Close the Glass Loop en Europa [closetheglassloop2020ue] han demostrado que la implementación de incentivos claros y estrategias más estructuradas puede significativamente aumentar las tasas de reciclaje, sugiriendo que una aproximación más robusta podría ser necesaria para lograr resultados similares en Argentina.

14 Aplicaciones con incentivos al reciclaje

Esta sección explora aplicaciones productivas que utilizan incentivos para fomentar mejores resultados en reciclaje. Estas aplicaciones parten de la idea de que la motivación económica puede ser un factor clave para aumentar la participación ciudadana en el reciclaje. Al ofrecer recompensas tangibles a los usuarios por sus acciones sostenibles, estas aplicaciones buscan cambiar el comportamiento y fomentar hábitos más responsables con el medio ambiente en sus usuarios.

14.1 Reciclos

Reciclos es una aplicación de reciclaje con base en España que funciona como un Sistema de Devolución y Recompensa (SDR). Los usuarios ganan puntos por reciclar latas y botellas de bebida, que luego pueden cambiar por incentivos sostenibles. La app utiliza tecnología de reconocimiento de imágenes y códigos QR para registrar el reciclaje y ofrecer recompensas [reciclos2024].

Características principales

- Facilita el reciclaje mediante una app móvil.
- Ofrece recompensas como movilidad verde, consumo responsable y donaciones a ONGs.
- Utiliza contenedores con tecnología para conectarlos a la app.
- Promueve el consumo responsable limitando las recompensas para evitar el exceso.

14.2 Colmena

Colmena es una plataforma argentina que combina la gestión de residuos con la economía circular y blockchain para crear un sistema de reciclaje incentivado. Los usuarios registran su material reciclable en la app y, al entregarlo en puntos de recogida, reciben la criptomoneda JellyCoin como recompensa [colmena2024].

Características principales

- Ofrece una app móvil para gestionar y registrar residuos reciclables.
- Recompensa a los usuarios con JellyCoin, que puede usarse para adquirir productos o servicios dentro de la plataforma.
- Incorpora un módulo de gestión para centros de reciclaje que incluye sistemas de pesaje electrónicos y gestión de materiales.

14.3 Greenly Points

Greenly Points es una iniciativa en Mendoza, Argentina, que fomenta el reciclaje mediante un sistema de puntos que premia a los usuarios por sus acciones de reciclaje. El programa se integra con establecimientos locales para ofrecer descuentos, promociones y beneficios en transporte público a los usuarios que participan activamente en el reciclaje [greenlypoints2024].

Características principales

- Ofrece una app móvil para registrar reciclajes y acumular puntos canjeables.
- Incentiva el reciclaje a través de un sistema de puntos canjeables.
- Promueve la economía local al vincularse con negocios para ofrecer recompensas.
- Utiliza contenedores con tecnología de identificación de latas y botellas para facilitar el reciclaje.

14.4 Plastic Bank: Integración de Responsabilidad Social y Tecnología Blockchain

Plastic Bank es una iniciativa que combina la responsabilidad social con la tecnología blockchain para mejorar la trazabilidad y el reciclaje del plástico. Esta organización fue fundada en 2013 y desde entonces ha logrado grandes avances en la recolección de plásticos, operando en países como Haití, Brasil, Indonesia, Filipinas y Egipto, y ha recuperado más de 20 millones de kg de plásticos hasta la fecha.

La tecnología blockchain de IBM es pilar de este proyecto. Permite registrar en tiempo real las colecciones de desechos, garantizando transacciones monetarias transparentes y visualización de datos en tiempo real. Esta capacidad tecnológica asegura un seguimiento detallado de los desechos plásticos, permitiendo a las corporaciones documentar y resaltar sus esfuerzos en la reducción de la huella plástica.

Plastic Bank promueve un modelo de economía circular a través de su programa Social Plastic®, que permite a las empresas incorporar plástico reciclado

en la fabricación de nuevos productos. Grandes corporaciones como Marks & Spencer y SC Johnson han establecido asociaciones para utilizar el plástico reciclado como materia prima, lo que no solo contribuye a la sostenibilidad sino también mejora la imagen corporativa asociada con la responsabilidad social [BHUBALAN2022113631]

Los Créditos de Colección de Plástico Social (SPCC), donde cada crédito equivale a 1 kg de desecho plástico prevenido de entrar al océano, funcionan de manera similar a los créditos de carbono. Este sistema no solo incentiva la recolección de plástico como una fuente de ingresos para mitigar la pobreza, sino que también proporciona a las empresas una manera cuantificable y verificable de comprometerse con la reducción de la contaminación plástica.

Plastic Bank no solo ha mejorado la eficiencia y la transparencia en el proceso de reciclaje de plásticos, sino que también ha establecido un sistema de incentivos que beneficia a múltiples actores de la cadena de suministro, desde los recolectores hasta las grandes corporaciones. Esta combinación de tecnología, responsabilidad social y economía circular ha demostrado ser un modelo exitoso para abordar el problema de la contaminación plástica y fomentar prácticas sostenibles en la industria.

14.5 Conclusión

Estas iniciativas incrementan significativamente la adopción del reciclaje entre los ciudadanos, especialmente cuando los incentivos ofrecidos son atractivos y los puntos de reciclaje son accesibles. Estos programas no solo fomentan la participación ciudadana, sino que también dinamizan la economía local a través de incentivos que además de dinero pueden incluir descuentos, productos o servicios, creando así oportunidades para establecer alianzas estratégicas y promover prácticas comerciales sustentables.

Además, estos sistemas proporcionan cierta garantía, aunque no completa, sobre la disposición final de los residuos. La inversión continua en el mantenimiento de las máquinas y/o los sistemas digitales sumado a la financiación a través de los materiales reciclados aseguran la sostenibilidad del sistema a largo plazo. Estos programas permiten colaboraciones estratégicas con recicladores tradicionales y plantas de reciclaje, beneficiando a todos los actores involucrados sin causar perjuicios.

Otro aspecto fundamental de estas iniciativas es la incorporación de aplicaciones móviles intuitivas y fáciles de usar, diseñadas para ser accesibles incluso para usuarios con poca afinidad tecnológica. Esta simplicidad en la interfaz facilita la participación de una amplia gama de usuarios, lo que es crucial para el éxito del programa.

15 Integración de tecnologías para la trazabilidad en la cadena de suministro

La tecnología aplicada a la trazabilidad en la cadena de suministros permite una gestión efectiva y transparente de los procesos y recursos. La integración de múltiples tecnologías combinadas, como las etiquetas RFID junto a sensores IoT, permite una recolección de datos más completa sobre el estado y ubicación de los productos en cada paso del proceso productivo. Particularmente, la interacción entre los sistemas de gestión de la cadena de suministro (SCMs) y la tecnología blockchain crea un registro inalterable, añadiendo una capa de seguridad y verificación cruciales.

Seleccionar la tecnología adecuada requiere analizar las necesidades específicas de cada sector, considerando factores como el tipo de producto y la complejidad de la cadena. Los beneficios de implementar sistemas de trazabilidad incluyen la optimización logística, reducción de costos, aumento de la transparencia para los consumidores, y fortalecimiento de la confianza en las marcas.

Además, permite mejorar la sostenibilidad de los procesos al visibilizar el proceso completo de producción y distribución, facilitando la adopción de prácticas sostenibles y de gestión de residuos. La trazabilidad también reduce los riesgos operacionales al identificar y responder rápidamente a problemas de calidad o seguridad en los productos, minimizando el impacto de posibles retiros de productos, contribuyendo significativamente a la reducción de riesgos operacionales y mejorando la capacidad de reacción frente a problemas de calidad o seguridad en los productos.

En el ámbito de las cadenas de suministro para manufactura, diversas tecnologías han sido implementadas para mejorar la trazabilidad de los productos, cada una ofreciendo características que se adaptan a diferentes necesidades industriales.

15.1 Código de Barras

Los códigos de barras representan una tecnología madura y de bajo costo que permite la identificación individual de productos. Su lectura es rápida y sencilla, lo que facilita la gestión de inventarios. Sin embargo, presentan limitaciones en términos de capacidad de datos y no permiten el seguimiento en tiempo real de los productos [schuitemaker2020product].

15.2 Identificación por Radiofrecuencia (RFID)

Las etiquetas RFID pueden almacenar más información que los códigos de barras y permiten el seguimiento en tiempo real de productos sin necesidad de contacto visual. Aunque su costo es mayor, la capacidad de ofrecer datos detallados sobre el estado y ubicación de los productos a lo largo de la cadena de suministro las hace especialmente valiosas para aplicaciones complejas [schuitemaker2020product].

15.3 Sensores y Dispositivos IoT

Sensores: Los sensores permiten monitorear condiciones ambientales como temperatura, humedad y vibración, asegurando así la calidad y conservación de productos perecederos. Además, permiten detectar desviaciones en la cadena de suministro que puedan comprometer la calidad del producto.

Dispositivos IoT: Los dispositivos IoT conectan objetos físicos a internet, recopilando y transmitiendo datos de ubicación, movimiento y estado de productos. Esta conectividad facilita la trazabilidad en tiempo real y apoya la toma de decisiones informadas mediante el análisis de datos en tiempo real.

15.4 Sistemas de Gestión de la Cadena de Suministro (SCMs)

Software Especializado: El software especializado para la gestión de la cadena de suministro centraliza la información y permite rastrear el movimiento de productos desde el origen hasta el consumidor final, ofreciendo visibilidad y control sobre toda la cadena.

Sistemas ERP y CRM: Estos sistemas integran información de diferentes áreas de la empresa, como producción, ventas y finanzas, mejorando la eficiencia y la colaboración entre departamentos, y facilitando la trazabilidad de productos y materiales.

15.5 Blockchain

La tecnología blockchain proporciona un registro inmutable y transparente de las transacciones, creando un historial completo del movimiento de productos. Permite verificar la autenticidad y el origen de los productos, fortaleciendo la confianza entre los actores de la cadena de suministro y asegurando la integridad de los datos a lo largo de todo el proceso [schuitemaker2020product].

Estas tecnologías, al ser combinadas e integradas en un sistema cohesivo, ofrecen una mejora significativa en la trazabilidad y gestión de los productos a lo largo de la cadena de suministro, alineándose con las prácticas modernas de la Industria 4.0 y las fábricas inteligentes.

16 Aplicaciones de blockchain en la cadena de suministro

La tecnología blockchain ha emergido en los últimos años como una herramienta poderosa para mejorar la trazabilidad en la cadena de suministro. Al ofrecer un registro inmutable y transparente de transacciones, blockchain permite a las empresas rastrear el movimiento de productos desde el origen hasta el consumidor final. Esta tecnología fortalece la confianza entre los actores de la

cadena de suministro al garantizar la autenticidad y la integridad de la información. Numerosos trabajos de investigación han explorado el potencial de blockchain para mejorar la trazabilidad en diferentes sectores, incluyendo la alimentación [ibmfoodtrust2024], la salud, la electrónica y el reciclaje [tang2024statistical; baralla2023waste].

16.1 Signeblock: Tecnología Blockchain para la Trazabilidad

Signeblock es una empresa que ofrece soluciones tecnológicas basadas en blockchain, enfocadas en la transformación digital de empresas. Su solución destacada, Gouze, mejora la transparencia, seguridad, eficiencia y trazabilidad en los procesos de diversas industrias y sectores. Permite conectar, trazar y asegurar procesos a través de una plataforma de trazabilidad con tecnología blockchain [signeblock2024].

Características principales de Signeblock:

- **Trazabilidad y Seguridad:** Registra cada paso del proceso productivo y de distribución en la blockchain, asegurando el acceso personalizado en todos los niveles de la cadena.
- **Gestor Documental:** Centraliza toda la información del producto o procesos en un solo lugar, accesible con un clic.
- **Digitalización y Notarización:** Digitaliza los procesos de control, aumentando la seguridad y la productividad.
- **Certificación Blockchain:** Garantiza la transparencia e inalterabilidad de la información.
- **QR para el Consumidor:** Permite compartir información detallada del producto con los usuarios, fomentando la transparencia y fiabilidad.
- **Reputación de Marca:** Todos los datos de trazabilidad están verificados mediante blockchain, ofreciendo una prueba irrefutable de la calidad de los productos.
- **Etiquetas Inteligentes con Blockchain:** Etiquetas de seguridad inteligentes que, conectadas a la plataforma Gouze, verifican la marca y la calidad de los productos.

17 Tecnología blockchain para la sustentabilidad

La tecnología blockchain ha sido identificada como una herramienta efectiva para mejorar la sostenibilidad en diversos sectores, incluyendo la cadena de

suministro. Particularmente puede utilizarse en la cadena de producción, en la cadena de disposición del producto o incluir ambas etapas.

Varios trabajos ahondan en el último caso: sistemas integrales de trazabilidad desde la producción hasta el reciclaje o disposición final. Por ejemplo, los trabajos de Alnuaimi et al. [alnuaimi2023blockchain], bulkowska et al. [bulkowska2023implementation] y las aplicaciones Colmena [colmena2024] proponen sistemas de trazabilidad basados en blockchain para la gestión de residuos. Estos sistemas permiten rastrear los residuos desde el momento en que el consumidor los descarta hasta su disposición final, pero no abarcan la cadena de producción de los productos.

En esta sección se revisan trabajos y aplicaciones que proponen sistemas de trazabilidad basados en blockchain para lograr una economía circular contemplando el ciclo de vida completo de los productos, desde la producción hasta la disposición final, buscando cerrar el ciclo de forma sostenible y transparente con mayor eficiencia.

17.1 Tecnología blockchain para la gestión de residuos

El trabajo titulado "Waste management: A comprehensive state of the art about the rise of blockchain technology" de Baralla et al. [baralla2023waste], aborda una revisión exhaustiva sobre el uso de la tecnología blockchain en la gestión de residuos. Este estudio busca analizar cómo los sistemas basados en blockchain pueden contribuir a la economía circular y a la mejora en las dimensiones sociales, ambientales, económicas y de salud, identificando también las limitaciones y desventajas que podrían impedir su uso efectivo en el sector de residuos.

Mediante una revisión de literatura, los autores presentan un modelo simplificado que contiene las principales macro-fases del proceso de gestión de residuos. Este modelo propone la blockchain como solución a los problemas comunes de los sistemas actuales de gestión de residuos y como una tecnología facilitadora para la economía circular.

Sin embargo, los autores advierten que para aplicar este modelo en casos reales, es necesario enfocarse en una categoría específica de residuos con una cadena de disposición bien definida. El análisis revela que aproximadamente el 30% de los proyectos revisados en este estudio parecen estar cerrados o haber fracasado, solo el 13% ha desarrollado un prototipo y apenas el 9% está en uso.

En las figuras 2 y 3, los modelos gráficos del documento resumen las aplicaciones de blockchain en las distintas fases de la gestión de residuos dentro de un modelo de economía circular, demostrando cómo esta tecnología puede integrarse para mejorar la eficiencia y transparencia en la gestión de residuos. El sistema propuesto incluye interacciones entre diversos actores como productores, consumidores, recolectores de residuos y autoridades locales, facilitando el monitoreo y la verificación del flujo de residuos, la producción y el reciclaje, además de permitir la implementación de contratos inteligentes que pueden ejecutar transacciones o verificar cumplimientos automáticamente, reduciendo la necesidad de intermediarios y disminuyendo los costos operativos.

[width=1]../assets/baralla-model-1.png

Figure 2: Representación de las macro-fases de un sistema de gestión de residuos aplicando blockchain en un modelo de economía circular. Fuente: Baralla et al. (2023).

[width=1]../assets/baralla-model-2.png

Figure 3: Representación de los componentes principales y actores de un sistema de gestión de residuos basado en blockchain. Fuente: Baralla et al. (2023).

Las conclusiones destacan que la tecnología blockchain puede garantizar la transparencia, inmutabilidad, trazabilidad y permite compartir datos entre los actores del sistema, apoyando una gestión eficaz de los residuos. Además, puede fomentar la participación ciudadana a través de incentivos económicos con la emisión de criptomonedas por participar. Sin embargo, solo el 25% de los estudios revisados proporcionan detalles técnicos sobre su sistema o su implementación, sugiriendo que el interés literario está apenas en sus comienzos. Además, la tecnología blockchain aún está en sus etapas iniciales, con algunos problemas críticos, particularmente para las blockchains públicas, incluyendo la escalabilidad, privacidad de datos, alto consumo de energía y bajo rendimiento.

17.2 Modelo ZERO para el Reciclaje de Plásticos con Tecnología Blockchain

El artículo "Investigating the Applicability of Blockchain Technology and Ontology in Plastics Recycling by the Adoption of ZERO Plastic Model" [sandhiya2020investigating] explora cómo la tecnología blockchain puede revolucionar la industria del reciclaje de plásticos mediante la implementación de un modelo conocido como ZERO. Este modelo utiliza códigos QR, IoT y tecnología blockchain para crear un sistema de trazabilidad inmutable que asegura la transparencia y la responsabilidad a lo largo de todo el proceso de reciclaje.

17.2.1 Descripción del Modelo

El modelo ZERO se centra en superar los desafíos significativos de auditoría al desarrollar un sistema auditable, resistente al fraude y económicamente práctico. Este modelo rastrea los plásticos individuales desde el inicio hasta el final de su ciclo de vida, proporcionando una solución para mejorar la calidad y eficiencia del reciclaje.

Las principales decisiones de diseño en el modelo ZERO incluyen:

- **Uso de Códigos QR:** Cada producto plástico producido se etiqueta con un código QR único que permite la trazabilidad del producto a lo largo de su ciclo de vida hasta su reciclaje.

- **Ontología:** La utilización de la ontología ayuda a reducir ambigüedades conceptuales y mejora la gestión de información en el ciclo de vida del producto.
- **Bines Inteligentes:** Los bins de reciclaje inteligentes aceptan solo plásticos con un código QR activo, garantizando que solo se reciclen materiales apropiados y no se contabilice múltiples veces el mismo residuo.

17.2.2 Implementación Técnica

La implementación técnica del modelo ZERO incluye varias innovaciones clave:

- **QR Grabados Molecularmente:** Los códigos QR se insertan a nivel macromolecular en el polímero, lo que evita daños o manipulaciones y mantiene la integridad del código a lo largo del ciclo de vida del producto.
- **Uso de Blockchain:** La información del producto se registra en una blockchain durante su producción, creando un "gemelo digital" que permite rastrear el producto a lo largo de su vida útil.
- **Máquina con Lector de QR:** Las máquinas de reciclaje están equipadas con lectores de QR que verifican la validez del código antes de aceptar el plástico para reciclaje.
- **Pre-Clasificación Automática:** Gracias a la información del código QR, la máquina clasifica los plásticos según su huella de CO₂ y otros parámetros, facilitando su procesamiento posterior.

17.2.3 Incentivos

El sistema de incentivos del modelo ZERO funciona de la siguiente manera:

- **Recompensas Monetarias:** Los usuarios reciben recompensas monetarias por reciclar, lo que fomenta la participación activa en el proceso de reciclaje.
- **Recompensas para Recolectores:** Los recolectores de basura se benefician de nuevas fuentes de ingresos al entregar plásticos reciclables.
- **Incentivos para Cada Eslabón:** Cada participante en la cadena de reciclaje recibe una recompensa cuando el siguiente eslabón cumple su función, promoviendo así una cadena de incentivos que estimula el cumplimiento y la eficiencia.

Estas características del modelo ZERO demuestran un enfoque innovador y prometedor para abordar el problema del reciclaje de plásticos mediante el uso de tecnología avanzada, alineando los intereses económicos con los objetivos ambientales.

17.2.4 Conclusiones

El modelo ZERO presenta un enfoque integral en la gestión de reciclaje de plásticos, integrando tecnología de blockchain e Internet de las Cosas (IoT) para optimizar y transparentar el proceso. Las principales conclusiones y aspectos relevantes del modelo para este trabajo incluyen:

- **Integración de IoT y Blockchain:** El uso combinado de códigos QR y contenedores inteligentes con tecnología blockchain permite rastrear y recompensar de manera eficiente la recolección de plásticos, garantizando la trazabilidad de cada artículo a lo largo de su ciclo de vida.
- **Recompensas Monetarias:** El sistema ofrece incentivos económicos directos a los usuarios por sus acciones de reciclaje, promoviendo una participación más activa en las prácticas de reciclaje sostenible.
- **Gemelos Digitales para el Rastreo:** Cada producto plástico se trackea individualmente mediante un "gemelo digital" utilizando códigos QR, lo que permite una gestión detallada y personalizada del reciclaje de cada ítem.
- **Beneficios para Recolectores de Basura:** El modelo proporciona nuevas fuentes de ingresos para los recolectores de basura, integrándolos como actores clave en el proceso de reciclaje sin perjudicar a los actores preexistentes del sistema.
- **Incentivos a lo Largo de la Cadena:** Se establece un sistema de recompensas en cascada, donde cada eslabón de la cadena recibe un incentivo cuando el siguiente cumple su función, fomentando la cooperación y el cumplimiento efectivo de cada fase del proceso.

17.3 Uso de Blockchain y Marcadores Moleculares para el Manejo Sostenible de Residuos Plásticos

El trabajo de Bhubalan et al. [BHUBALAN2022113631] explora las aplicaciones del blockchain y los marcadores moleculares en el reciclaje de plásticos para promover una economía circular global. Los autores argumentan que el reciclaje es crucial para mantener bajo el consumo de energías renovables y optimizar la economía, al tiempo que se reduce la competencia por la biomasa. A su vez destacan que a pesar del incremento en la conciencia pública sobre los impactos negativos de la contaminación por plásticos y la participación en programas de reciclaje, los sistemas actuales de gestión de desechos no procesan de manera efectiva los residuos plásticos para su reciclaje y reutilización.

Este artículo se centra en abordar las deficiencias en la gestión de residuos plásticos utilizando tecnología blockchain en combinación con el marcado molecular para rediseñar químicamente los plásticos, logrando así un reciclaje cerrado y manteniendo el valor de los plásticos sintéticos por un tiempo prolongado.

El artículo destaca que la tecnología blockchain facilita la trazabilidad del origen de los plásticos desde su producción hasta su disposición final de manera inmutable, transparente y segura. Además, apoya la economía circular mediante la transparencia de la información, la confiabilidad y la automatización, lo que permite aprovechar efectivamente las iniciativas de economía circular.

A su vez, analiza que el modelo económico circular de los plásticos enfrenta varios desafíos, como la necesidad de clasificar los plásticos basándose en el tipo de polímero y la trazabilidad del uso anterior. Una solución propuesta es el 'pasaporte digital del producto', que cierra la brecha de información al revelar datos verificables sobre el reuso, contenido y potencial de reciclaje del producto.

Los autores fundamentan que la aplicación de polímeros controlados por secuencia en blockchain es una tecnología clave para el reciclaje de plásticos, ya que proporciona un código único para la identificación auténtica y la trazabilidad de las transacciones de productos plásticos, minimizando así los residuos plásticos.

17.3.1 Conclusiones del Artículo

- El artículo destaca la importancia de identificar cada plástico individualmente para su reciclaje mediante tecnologías como el marcado molecular.
- Examina los altos costos asociados con la implementación de la tecnología blockchain, cuestionando su rentabilidad para plásticos de un solo uso.
- Discute cómo los marcadores moleculares podrían mejorar significativamente la trazabilidad y la autenticación de los plásticos reciclados.
- El estudio proporciona una visión integral de cómo la combinación de blockchain y tecnologías avanzadas de marcado puede revolucionar la gestión de residuos plásticos y avanzar hacia una economía circular a escala global.

17.4 Aplicaciones de Blockchain en la Trazabilidad de la Cadena de Suministro para Sustentabilidad

En la actualidad, existen aplicaciones productivas basadas en la tecnología blockchain que están demostrando que se pueden alcanzar mejores resultados en el reciclaje y proporcionar ventajas significativas tanto para productores como para consumidores. Estas aplicaciones abordan la trazabilidad desde el principio de la cadena de suministro, en lugar de comenzar el seguimiento al final de la vida útil del producto.

17.4.1 Circularise

Circularise es una plataforma líder en blockchain que ofrece pasaportes digitales de productos para la trazabilidad de extremo a extremo y el intercambio seguro de datos en cadenas de suministro industriales [circularise2024].

Características destacadas de Circularise:

- **Transparencia en la Cadena de Suministro:** Circularise permite rastrear la sostenibilidad de los productos más allá del primer nivel de proveedores, usando pasaportes digitales que registran el origen del producto, la composición del material, y los datos ambientales, respaldados por la cadena de custodia impulsada por blockchain.
- **Recolección de Datos Primarios:** Facilita la recopilación de datos primarios a lo largo de la cadena de suministro para realizar evaluaciones completas del ciclo de vida (LCA) y calcular la huella de carbono del producto (PCF), estableciendo un registro confiable del impacto ambiental de un producto.
- **Cumplimiento Regulatorio:** Permite reportar contra indicadores clave de desempeño de sostenibilidad y agilizar los procesos de auditoría, compartiendo datos sobre el origen del producto, la huella de carbono, y cumpliendo con regulaciones y certificaciones como la regulación de baterías de la UE.
- **Privacidad de Datos:** Asegura la privacidad de los datos, permitiendo control total sobre qué datos compartir para cumplir con requisitos regulatorios y de clientes, mientras se mantiene información sensible protegida.
- **Integración con ERP:** Ofrece integración con sistemas ERP existentes a través de una API para automatizar el manejo de inventarios en masa y los pasaportes de productos digitales.
- **Apertura e Interoperabilidad:** Adopta un enfoque abierto e interoperable para eliminar silos de datos y conectar de manera fluida los datos a través de cadenas de suministro complejas.
- **Certificación ISCC Plus:** Circulor utiliza una blockchain pública descentralizada para garantizar que las empresas no puedan parecer más sostenibles de lo que son, utilizando la prueba de una afirmación de sostenibilidad a través de activos. Este principio es la base de la confianza en la integridad de los datos.

17.4.2 Circulor

Circulor es una plataforma de SaaS empresarial privada y basada en permisos, que ofrece soluciones avanzadas para la trazabilidad y la sostenibilidad en cadenas de suministro industriales. Utiliza tecnología de blockchain para proporcionar un seguimiento exhaustivo desde la fuente hasta el consumidor final, lo que permite a las empresas demostrar la procedencia responsable, mejorar su desempeño en ESG (Environmental, Social, and Governance), reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y gestionar los riesgos asociados a la cadena de suministro [circulor2024]

Características destacadas de Circulor:

- **Plataforma Intuitiva:** La plataforma incluye interfaces de usuario intuitivas tanto en aplicaciones de escritorio para cargas manuales rápidas, como en aplicaciones móviles que facilitan la adopción del sistema por parte de los usuarios.
- **Integración y Interoperabilidad:** Diseñada para una fácil integración con plataformas empresariales existentes, permite una alimentación de datos sin interrupciones hacia el blockchain mediante APIs RESTful con protocolos de seguridad y autenticación.
- **Contribución a la Investigación y Normativas:** Apoya la interoperabilidad y ha contribuido a establecer las directrices de Blockchain del RMI, además de participar en investigaciones de vanguardia en el área.
- **Trazabilidad de Materiales y Productos:** Sus productos de trazabilidad rastrean el origen de materias primas y el flujo actual de materiales a través de los procesos de producción y transformaciones que sufren dentro de las cadenas de suministro de manufactura y reciclaje.
- **Sostenibilidad y Emisiones:** Circular permite a los clientes medir dinámicamente sus emisiones atribuidas e inherentes en cada etapa de la cadena de suministro, mejorando los enfoques de evaluación del ciclo de vida actual.
- **Apoyo en ESG y Reciclaje en Circuito Cerrado:** La plataforma ayuda a definir los KPI de ESG basados en datos de trazabilidad, permitiendo a los clientes medir y comparar las credenciales de sostenibilidad de sus proveedores y alcanzar objetivos globales de ESG. Además, asegura el reciclaje en circuito cerrado de materiales como electrónicos, plásticos y baterías de vehículos eléctricos, demostrando que los procesos de reciclaje o disposición se llevan a cabo de manera responsable.

17.4.3 Conclusiones

- La integración de tecnologías de trazabilidad desde la etapa de producción ha demostrado ser eficaz para generar mayor consciencia en cada eslabón de la cadena de suministro, contribuyendo así a incrementar las tasas de reciclaje de manera significativa.
- La capacidad de las empresas para certificar sus procesos como sostenibles se ve facilitada sin que esto implique un esfuerzo adicional considerable, permitiendo una validación eficiente de sus prácticas ambientales.
- Estas tecnologías no solo mejoran la sostenibilidad de los procesos mediante una gestión más eficiente de los recursos, sino que también optimizan la utilización de estos a lo largo de todo el ciclo de vida del producto.
- El uso de sistemas de trazabilidad robustos, como el blockchain, permite responsabilizar a los productores por su impacto ecológico, ofreciendo una herramienta transparente y fiable para medir y gestionar dicho impacto.

18 Comparación de Tipos de Residuos para la Economía Circular

En el marco del desarrollo sostenible, la selección del tipo de residuo a manejar en proyectos de economía circular es crucial. Esta decisión no solo afecta la viabilidad del proyecto [baralla2023waste] sino también su impacto ambiental y social. A continuación, se evalúan diferentes tipos de residuos, destacando sus ventajas y desventajas, para determinar cuál podría ser más apropiado para centrar los esfuerzos de recuperación y reciclaje. 4

[width=1]../assets/waste-types-latam.png

Figure 4: Composición de los residuos sólidos urbanos en América Latina. Fuente: CEPAL, 2021.

18.1 Residuos Orgánicos

Los residuos orgánicos, como desechos de alimentos y residuos de jardinería, presentan oportunidades significativas para el compostaje y la producción de biogás. Sin embargo, su descomposición produce metano, un potente gas de efecto invernadero, si no se gestiona adecuadamente.

18.2 Residuos Electrónicos

Los residuos electrónicos contienen metales preciosos y ofrecen oportunidades económicas significativas. No obstante, su reciclaje presenta desafíos debido a la presencia de sustancias tóxicas, lo que requiere procesos de reciclaje especializados y costosos.

18.3 Papel y Cartón

El papel y el cartón son materiales reciclables y biodegradables, lo que los convierte en una opción sostenible. Sin embargo, la calidad del papel reciclado puede ser inferior a la del papel virgen, lo que limita su reutilización en ciertas aplicaciones.

18.4 Plásticos

El reciclaje de plásticos puede reducir la dependencia de los recursos fósiles y disminuir la contaminación. Sin embargo, la variedad de tipos de plástico y la contaminación cruzada pueden complicar los procesos de reciclaje, haciéndolos menos eficientes.

18.5 Textiles

El reciclaje de textiles apoya la sostenibilidad en la industria de la moda. A pesar de esto, la rápida moda contribuye a altas tasas de desechos textiles, y muchos de estos no son reciclables debido a mezclas de materiales y tratamientos químicos.

18.6 Metales

Los metales son altamente reciclables y su recuperación es eficiente en términos de energía. La principal desventaja es la posible degradación de la calidad con ciertos metales no ferrosos, lo que puede limitar su reutilización.

18.7 Vidrio

El vidrio es completamente reciclable y puede ser procesado infinitas veces sin pérdida de pureza o calidad. Sin embargo, la recolección y el transporte del vidrio deben manejarse con cuidado para evitar la contaminación y garantizar la viabilidad del reciclado.

Para ser reciclado, el vidrio debe ser separado por color y tipo, lo que puede ser un desafío en la gestión de residuos. Sin embargo, el vidrio reciclado tiene un alto valor en el mercado y puede ser utilizado para fabricar nuevos envases a menor costo.

18.8 Residuos de Construcción y Demolición

Estos residuos ofrecen un gran potencial de reutilización y reciclaje. El principal reto es la separación efectiva de los materiales en el sitio de demolición, lo cual es esencial para su posterior procesamiento.

18.9 Decisión Final

Para el alcance de este proyecto, se considerará entre plástico y vidrio debido a su relevancia (14% y 5% de la composición de residuos sólidos urbanos en América Latina, respectivamente) y potencial para la implementación de prácticas de economía circular. Se descarta la opción de residuos orgánicos debido a su alta generación de metano y la de residuos electrónicos por su complejidad en el reciclaje. Se descartan también textiles, metales y residuos de la construcción por su menor presencia en la composición de residuos sólidos urbanos en la región. Se descarta papel y cartón por su menor potencial de innovación en comparación con plástico y vidrio. Se realizará un análisis más profundo de estos dos materiales para determinar cuál de ellos ofrece mayores beneficios y posibilidades de implementación efectiva en el contexto local.

19 Comparación entre Vidrio y Plástico

Para una adecuada selección de materiales en proyectos de economía circular, es crucial comprender las diferencias entre los tipos de residuos más comunes. A continuación se presenta una comparación detallada entre vidrio y plástico basada en varios criterios importantes para su gestión y reciclaje.

Criterio	Vidrio	Plástico
Cantidad generada	5%	14%
Variedad de tipos	Baja	Alta
Usos comunes	Envases, ventanas, vajillas	Envases, muebles, electrónica
Complejidad de reciclaje	Baja	Alta
Impacto ambiental	Menor	Mayor
Tasa de reciclaje	Alta	Variable, generalmente baja
Degradación por reciclado	No degrada	Degradación de calidad
Requerimientos de tratamiento	Fundición a alta temperatura	Diversos métodos según tipo
Potencial de mercado para reciclados	Estable	Creciente pero complejo

Table 2: Comparación entre vidrio y plástico en el contexto de economía circular.

Como se puede observar en la tabla 2, el vidrio y el plástico presentan diferencias significativas en términos de cantidad generada, variedad, usos, y complejidad en su reciclaje. Mientras que el vidrio tiene una tasa de reciclaje relativamente alta y un impacto ambiental menor debido a su capacidad de ser reciclado múltiples veces sin pérdida de calidad, el plástico, aunque más versátil y utilizado en una variedad más amplia de productos, enfrenta desafíos significativos debido a su alta variedad y la degradación de calidad con cada ciclo de reciclado. Además, el impacto ambiental del plástico es considerablemente mayor, especialmente por su contribución a la contaminación marina y la dificultad de descomposición.

Debido a estas características, dentro del alcance de este trabajo se elige el vidrio como el material principal para la implementación de prácticas de economía circular en el contexto local. A pesar de su menor presencia en los residuos sólidos urbanos, el vidrio ofrece ventajas significativas en términos de reciclaje, impacto ambiental y viabilidad de mercado para los reciclados.

El reciclaje del vidrio es especialmente relevante en la región de Mendoza, donde la industria vitivinícola es un pilar económico fundamental y el vidrio desempeña un papel crucial en la cadena de suministro de este sector. En esta región opera Verallia Argentina, una de las principales productoras de envases de vidrio del país. Esta empresa, siendo un actor esencial en la cadena de suministro del vidrio, juega un rol significativo en la promoción de la sostenibilidad dentro de la industria vitivinícola y en la economía regional. Actualmente, Verallia implementa prácticas de reciclaje de vidrio, proporcionando una base sólida para la adopción de tecnologías avanzadas y la mejora de los procesos de trazabilidad y gestión de residuos [prodividrio2024verallia]. A lo largo de este estudio, se explorará en profundidad cómo la cadena de suministro del vidrio en

Verallia puede integrarse más efectivamente en la economía circular y cómo las innovaciones en el reciclaje de vidrio pueden maximizar su impacto ambiental y económico.

A lo largo de este trabajo se realizará un análisis más detallado de la cadena de suministro del vidrio y las oportunidades de innovación en el reciclaje de vidrio para maximizar su potencial en la economía circular.

20 Objetivos del Plan de Tesina Final de Carrera

El objetivo general de este plan de tesina final de carrera es el **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 **reciclado de vidrio**.

Como objetivos específicos que aportan al trabajo final de tesina se puede mencionar:

- Entender los procesos de adopción de tecnologías tales como blockchain y las capacidades actuales en la región para el uso de sistemas de trazabilidad.
- En todo lo referido a las Ciencias de la Computación, se busca que la alumna pueda 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.

El desarrollo de esta aplicación prototipo se fundamenta en la necesidad de abordar los desafíos de la trazabilidad en los procesos de reciclaje de vidrio, dentro del marco de la economía circular. La elección de un prototipo se justifica por la viabilidad de mostrar una solución tangible al problema planteado, dentro del alcance esperado de un trabajo final de tesina. Un prototipo funcional permite demostrar las capacidades y ventajas de la tecnología propuesta, así como validar la solución en un entorno controlado antes de avanzar a una implementación más amplia.

La elección de blockchain como tecnología de base se debe a sus características inherentes de inmutabilidad, transparencia y descentralización, que permiten garantizar la integridad de los datos en tiempo real. Estas cualidades facilitan la colaboración entre los diferentes actores de la cadena de suministros, al proporcionar un acceso confiable y seguro a la información sobre la gestión de los residuos. Además, la descentralización de la información permite eliminar intermediarios, mejorar la eficiencia y reducir riesgos de manipulación de datos.

El reciclado de vidrio se seleccionó como caso de estudio debido a su amplio uso en la industria de alimentos y bebidas, su capacidad de reciclaje al 100%, y

los desafíos específicos que enfrenta en la región de Mendoza, donde el proceso es complejo e ineficiente, involucrando a múltiples actores y etapas. Al aplicar soluciones tecnológicas basadas en blockchain, buscamos optimizar la trazabilidad y eficiencia del proceso, generando un impacto positivo tanto en el medio ambiente como en la economía local.

La trazabilidad se ha identificado como un aspecto clave en la gestión de residuos, ya que permite conocer el origen, destino, composición y estado de los residuos en cada etapa del proceso. Contar con esta información facilita la toma de decisiones, permite la identificación temprana de problemas y promueve la mejora continua por parte de los actores involucrados.

La elección de la economía circular como enfoque para el desarrollo del prototipo refuerza el compromiso con la sostenibilidad, promoviendo la reutilización y reciclado de materiales, lo que minimiza el desperdicio y maximiza el valor a lo largo del ciclo de vida de los productos. Este modelo contribuye a la sostenibilidad no solo ambiental, sino también económica y social.

El cumplimiento normativo es otro aspecto crítico para la adopción de nuevos sistemas de reciclaje, debido a que las leyes y regulaciones ambientales establecen requisitos legales para la protección del medio ambiente y la salud pública. Contar con un sistema de trazabilidad basado en blockchain permite verificar el cumplimiento de las normativas vigentes, facilitando la comercialización de productos reciclados y garantizando la transparencia de la información.

En términos de eficiencia operativa, la mejora de la trazabilidad incide directamente en la reducción de costos, tiempos y errores en la gestión de residuos. Esto se traduce en una mayor productividad, competitividad y rentabilidad para los actores de la cadena de suministro, promoviendo una gestión más efectiva y ágil.

Por último, la confianza entre los actores de la cadena de suministros es un factor determinante para el éxito de cualquier iniciativa de reciclaje. La opacidad de la información en los sistemas actuales genera desconfianza, conflictos y pérdidas. Al utilizar blockchain, se proporciona una visión clara y confiable de la información relevante, fomentando la colaboración, coordinación y comunicación entre los actores, mejorando así la gestión integral del reciclaje.

/subsectionAlcance del Proyecto

El presente trabajo de tesina se centra en la **investigación y desarrollo de un prototipo de aplicación** basado en tecnología blockchain, cuyo propósito es mejorar la trazabilidad en los modelos de economía circular aplicados al reciclado de vidrio.

El sistema diseñado permitirá registrar y auditar las transacciones de los residuos de vidrio a lo largo de toda la cadena de suministro, abarcando desde su generación hasta su disposición final. El enfoque principal de este prototipo será la trazabilidad en la **cadena de producción de envases de vidrio**, posponiendo para futuras implementaciones la integración con otros actores involucrados en el reciclado de vidrio.

El enfoque en la cadena de producción de envases de vidrio se justifica en función de los resultados obtenidos en la investigación del estado del arte. Se identificó que en esta primera fase de la cadena no existen soluciones tecnológicas

[width=0.8]../assets/glass-production.png

Figure 5: Diagrama del proceso de producción de envases de vidrio.

locales que aborden de manera efectiva el problema de la trazabilidad. Por otro lado, en las fases posteriores, como la recolección y el reciclado, ya se han implementado soluciones tecnológicas que mejoran la adopción y eficiencia de los procesos, y que podrán ser integradas en futuras fases del proyecto.

21 Metodología de trabajo

En el ámbito del desarrollo de software, la selección de una metodología de trabajo adecuada es un factor determinante para garantizar la eficacia y el éxito de un proyecto. La planificación y ejecución de este trabajo de tesis depende en gran medida de la estructura metodológica que se elija. La selección de una metodología es necesaria considerando que las metodologías no son soluciones universales, sino herramientas que deben ajustarse a las necesidades específicas de cada proyecto, tomando en cuenta aspectos como los objetivos, el alcance, el equipo involucrado y la forma de entrega de los resultados.

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 han considerado tanto metodologías tradicionales como ágiles, 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 en este proyecto.

A lo largo de este análisis, se compararán metodologías clave en función de varios criterios, como la definición de requerimientos, la planificación de actividades, y la flexibilidad frente a cambios. Este enfoque permitirá identificar la metodología más adecuada que permita no solo el cumplimiento de los plazos y los objetivos técnicos, sino también una integración fluida de los distintos aspectos del desarrollo y la entrega final del software.

Con el objetivo de elegir la metodología de trabajo más adecuada para el desarrollo de software de este trabajo de tesis, se analizaron varias metodologías distintas teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Objetivos del trabajo de tesis
- Planificación de actividades
- Alcance del prototipo
- Definición de requerimientos funcionales y no funcionales
- Modalidad de entrega de resultados
- Equipo de trabajo

Se analizaron diferentes metodologías de trabajo para el desarrollo de software, incluyendo metodologías de trabajo tradicionales y metodologías ágiles para determinar cuál se ajusta mejor a este proyecto. Tras la revisión general de metodologías existentes, comparamos en distintos aspectos claves con profundidad un grupo selecto de 5 metodologías que consideramos más adecuadas para el desarrollo de software de este trabajo de tesis tras el análisis previo.

21.1 Metodologías de desarrollo de software

Las metodologías de desarrollo de software pueden clasificarse en dos grandes categorías: prescriptivas y evolutivas. Los modelos prescriptivos o tradicionales, ofrecen una estructura y un orden definidos, orientados a maximizar la previsibilidad y la eficiencia en entornos bien entendidos y con pocos cambios. Estos modelos tradicionales introdujeron disciplina en la práctica de la ingeniería de software, aunque su rigidez puede ser una limitante en proyectos donde los requerimientos son inciertos o susceptibles a cambios frecuentes.

Por otro lado, los modelos de proceso evolutivo y el desarrollo ágil se adaptan mejor a las realidades dinámicas del desarrollo de software moderno. Permiten una iteración continua y la adaptación frente a los cambiantes requerimientos del negocio y la tecnología. El desarrollo ágil, en particular, pone énfasis en la flexibilidad, la colaboración continua con el cliente y la capacidad de responder a cambios con rapidez y eficacia. Los enfoques ágiles son valorados por su capacidad de facilitar la entrega rápida de software funcional y adaptarse a las necesidades cambiantes del proyecto y del mercado.

Existen montones de metodologías de desarrollo de software, cada una con sus propias ventajas y desventajas. Para elegir la metodología adecuada para este trabajo, se filtraron y preseleccionaron 5 metodologías de desarrollo de software que se consideraron más adecuadas para el desarrollo de software de este trabajo de tesis. Estas metodologías son:

- Modelo en cascada
- Modelo en V
- Modelo espiral
- Metodología Scrum
- Metodología Kanban

A continuación, se presenta una descripción y un análisis de cada una de estas metodologías, evaluando sus características, ventajas y desventajas, y su aplicabilidad en función de los requerimientos y condiciones particulares del trabajo de tesis.

21.1.1 Modelo en cascada

La metodología en cascada es uno de los enfoques más antiguos y estructurados en el desarrollo de software. Este modelo es secuencial y lineal, lo cual implica que las fases del proyecto deben completarse en un orden específico sin posibilidad de retorno una vez finalizadas. Estas fases incluyen la especificación de requerimientos, planeación, modelado, implementación, despliegue y mantenimiento. Cada una de estas etapas debe ser completada satisfactoriamente antes de avanzar a la siguiente, garantizando así una planificación clara y una estructura bien definida [pressman2010ingenieria].

[width=]../assets/model-waterfall.png

Figure 6: Modelo en cascada. Fuente: [pressman2010ingenieria]

Este modelo es ideal para proyectos donde los requerimientos son bien conocidos y estables desde el inicio, como en las adaptaciones a sistemas existentes que requieren modificaciones específicas por cambios regulatorios. Sin embargo, este modelo ha sido criticado por su rigidez y por la dificultad que presenta ante la necesidad de adaptarse a cambios durante el desarrollo del software. Problemas como la dificultad de los clientes para expresar todos los requerimientos inicialmente y los riesgos de descubrir errores tardíamente en el proceso son inherentes al modelo en cascada. Estos desafíos pueden llevar a lo que se conoce como "estados de bloqueo", donde la dependencia entre tareas secuenciales causa inactividad y retrasos significativos.

21.1.2 Modelo en V

El modelo en V es una variante del modelo de cascada que añade un enfoque sistemático en la verificación y validación de cada etapa del desarrollo del software [pressman2010ingenieria]. Este modelo sigue un enfoque secuencial, de forma similar al modelo en cascada, sin embargo, se diferencia en que cada fase de desarrollo está emparejada con una fase de prueba correspondiente, formando una estructura en forma de "V". 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 detalladas.

[width=]../assets/model-v.png

Figure 7: Modelo en V. Fuente: [pressman2010ingenieria]

Esta metodología es útil para asegurar que cada componente del software sea validado en paralelo a su creación, permitiendo la detección y corrección temprana de errores. Este enfoque ayuda a minimizar los riesgos al final del proyecto, haciendo del modelo en V una opción fuerte 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.

21.1.3 Modelo espiral

El modelo espiral es un enfoque evolutivo que combina la iteración de los prototipos con la rigurosidad sistemática del modelo en cascada [pressman2010ingenieria]. Este modelo se distingue por su enfoque cíclico que permite el crecimiento incremental de la definición de un sistema mientras se reduce su grado de riesgo. Se caracteriza por su flexibilidad en el manejo de los riesgos y la capacidad de adaptarse continuamente a las necesidades cambiantes del proyecto a través de iteraciones sucesivas.

En el modelo espiral, el desarrollo se organiza en una serie de espirales o ciclos, cada uno de los cuales representa una fase del proyecto. Cada ciclo incluye la planificación, la identificación de riesgos, el desarrollo y la evaluación del prototipo o secciones del software, y la planificación de la siguiente iteración. Los prototipos iniciales suelen ser simples y evolucionan para convertirse en versiones cada vez más completas y complejas del software, a medida que se profundiza en el ciclo espiral.

[width=]../assets/model-spiral.png

Figure 8: Modelo espiral. Fuente: [pressman2010ingenieria]

Una característica clave del modelo espiral es su enfoque en la gestión de riesgos en cada ciclo. En cada paso del proceso, se realiza una evaluación de riesgos, lo que permite identificar y mitigar problemas potenciales antes de que se conviertan en obstáculos significativos. Este enfoque iterativo permite a los desarrolladores y clientes entender mejor y reaccionar a los riesgos en cada nivel de evolución del proyecto. Esta capacidad para adaptarse y evolucionar con el tiempo lo hace particularmente útil en entornos dinámicos y en constante cambio.

El desafío de este modelo radica en que requiere una evaluación continua y experta de los riesgos, y puede ser difícil convencer a los clientes, especialmente en situaciones contractuales, de que el enfoque iterativo y evolutivo es controlable y efectivo. Además, la complejidad en la gestión del proyecto puede aumentar debido a la necesidad de revisiones y ajustes continuos en cada ciclo.

21.1.4 Metodología Scrum

Scrum es una metodología ágil de desarrollo de software que se alinea con los principios del Manifiesto Ágil, promoviendo flexibilidad, colaboración continua, y adaptabilidad a los cambios. Este modelo estructura el desarrollo en ciclos cortos y repetitivos llamados sprints, típicamente de 2 semanas, donde no

se permiten cambios durante el sprint, proporcionando estabilidad mientras se abordan los requisitos seleccionados del backlog, una lista dinámica y priorizada de tareas del proyecto que puede modificarse en cualquier momento [pressman2010ingenieria].

El proceso de Scrum incluye reuniones diarias breves donde cada miembro del equipo responde a tres preguntas fundamentales sobre sus avances, obstáculos, y planes, lo que ayuda a identificar y resolver problemas rápidamente, fomentando la autoorganización y eficiencia del equipo. Al final de cada sprint, se realiza una demostración al cliente del incremento de software desarrollado, facilitando la retroalimentación vital que influirá en los siguientes sprints y asegurando que el producto final cumpla con las expectativas del cliente.

[width=]../assets/model-scrum.png

Figure 9: Metodología Scrum. Fuente: [pressman2010ingenieria]

Scrum es efectivo en entornos donde la incertidumbre es la norma, aceptando el caos como una parte inherente del desarrollo de software y ofreciendo herramientas para gestionarlo de manera efectiva. La iteración continua, evaluación constante de riesgos, y la involucración directa del cliente permiten dirigir proyectos hacia resultados exitosos, incluso en circunstancias desafiantes, haciendo de Scrum una metodología ideal para proyectos que exigen flexibilidad y colaboración estrecha con el cliente.

21.1.5 Metodología Kanban

El método Kanban es un enfoque visual para la gestión del flujo de trabajo. Este método busca optimizar la eficiencia al evitar la sobrecarga de trabajo, eliminando cuellos de botella y desperdicios, y reduciendo los tiempos de espera, lo que a su vez incrementa el rendimiento de los procesos [alaidaros2021kanban].

Kanban se centra en la utilización de un sistema de "pull" (extracción), donde el trabajo solo se inicia cuando hay capacidad disponible, lo que permite una mayor adaptabilidad y respuesta a los cambios en las prioridades del proyecto. Este enfoque se visualiza mediante el tablero Kanban, dividido en columnas que representan diferentes etapas del proceso de desarrollo. Cada tarea o 'tarjeta' se mueve de izquierda a derecha a través del tablero, reflejando su progreso desde el inicio hasta la finalización. Las columnas básicas de un tablero Kanban incluyen "Por hacer", "En progreso" y "Completado", aunque el tablero puede personalizarse agregando columnas adicionales según las necesidades del proyecto.

[width=]../assets/model-kanban.png

Figure 10: Tablero Kanban de ejemplo.

Este método define cinco principios claves para la práctica: limitar el trabajo en progreso, visualizar el flujo de trabajo, medir y gestionar el flujo, hacer

explícitas las políticas del proceso, y utilizar modelos para reconocer oportunidades de mejora. Estos principios ayudan a mantener el enfoque en la eficiencia del flujo de trabajo y en la mejora continua, permitiendo al equipo adaptar sus prácticas y procesos según las necesidades del proyecto y las condiciones del entorno.

Kanban no requiere cambios estructurales grandes para su implementación y se adapta a la situación actual de cualquier organización. Una posible desventaja es que Kanban requiere una disciplina rigurosa y una comunicación constante dentro del equipo para mantener la precisión del flujo visualizado en el tablero y que se corresponda con la realidad, lo que puede ser desafiante en equipos grandes. Además, la falta de fases definidas y la ausencia de revisiones sistemáticas del progreso pueden dificultar la gestión de proyectos a gran escala, donde se requiere una coordinación extensa entre múltiples equipos o disciplinas. A su vez, Kanban puede no ser adecuado para proyectos que enfrentan cambios frecuentes y radicales en los requerimientos, ya que está diseñado para optimizar flujos de trabajo existentes más que para adaptarse a innovaciones constantes.

21.2 Comparación de metodologías

A continuación, se presenta a modo de resumen una comparación de las metodologías de desarrollo de software analizadas en distintos aspectos clave para determinar cuál es la más adecuada para el desarrollo de software de este trabajo de tesis.

22 Ágil (Scrum)

- **Naturaleza del Proyecto:** Ideal para proyectos con requisitos cambiantes y evolución constante.
- **Requisitos del Cliente:** Los requisitos pueden cambiar en cada sprint, permitiendo interacción continua con el cliente.
- **Tamaño del Equipo:** Equipos pequeños (idealmente 5-9 personas), colaborativos y multidisciplinarios.
- **Cultura Organizacional:** Cultura colaborativa, centrada en la mejora continua y la autoorganización.
- **Flexibilidad en Gestión:** Alta flexibilidad para adaptarse a los cambios durante cada sprint (iteración).
- **Documentación:** Documentación mínima, suficiente para facilitar la entrega de valor funcional.
- **Riesgos y Control de Calidad:** Los riesgos se manejan en cada sprint, con pruebas y ajustes continuos.
- **Entregas al Cliente:** Entregas frecuentes (cada sprint), con incrementos de software funcional.

- **Curva de Aprendizaje:** Media. Requiere adaptación a la metodología y roles dentro del equipo.
- **Velocidad de Desarrollo:** Alta. Las iteraciones cortas permiten entregas rápidas y ajustes según la retroalimentación.
- **Manejo de Cambios:** Cambios fáciles de gestionar en cada sprint.
- **Manejo de Riesgos:** Riesgos gestionados en cada sprint, con retrospectivas que permiten mejoras continuas.

23 Ágil (Kanban)

- **Naturaleza del Proyecto:** Proyectos que requieren flujo continuo y flexibilidad para gestionar tareas.
- **Requisitos del Cliente:** Los requisitos pueden ajustarse de manera continua según la demanda y prioridades.
- **Tamaño del Equipo:** Equipos pequeños a medianos, más flexibles en tamaño, ajustando tareas según el flujo de trabajo.
- **Cultura Organizacional:** Cultura flexible y adaptable, con enfoque en la optimización del flujo de trabajo.
- **Flexibilidad en Gestión:** Alta flexibilidad en la gestión del flujo, ajustando la carga de trabajo en función de prioridades.
- **Documentación:** Documentación mínima, enfocada en la visualización del flujo y el progreso.
- **Riesgos y Control de Calidad:** Control continuo del flujo de trabajo, evitando cuellos de botella.
- **Entregas al Cliente:** Entregas continuas, en función de la finalización de tareas o según demanda.
- **Curva de Aprendizaje:** Baja. Fácil de implementar, basado en la mejora continua del flujo de trabajo.
- **Velocidad de Desarrollo:** Alta. Flujo continuo de desarrollo, ajustando la velocidad según prioridades.
- **Manejo de Cambios:** Los cambios se gestionan en función de la demanda, ajustando tareas en el flujo de trabajo.
- **Manejo de Riesgos:** Riesgos manejados de manera continua, ajustando el flujo y reduciendo cuellos de botella.

24 Cascada

- **Naturaleza del Proyecto:** Adecuado para proyectos con requisitos claros y definidos desde el principio.
- **Requisitos del Cliente:** Requisitos fijos desde el inicio, cualquier cambio implica un costo significativo.
- **Tamaño del Equipo:** Equipos medianos a grandes, con roles bien definidos y fases claras.
- **Cultura Organizacional:** Cultura jerárquica y estructurada, con fases bien definidas.
- **Flexibilidad en Gestión:** Baja flexibilidad, difícil de cambiar una vez iniciado el proyecto.
- **Documentación:** Documentación detallada en cada fase del ciclo de vida del desarrollo.
- **Riesgos y Control de Calidad:** Riesgo alto si los requisitos cambian, control de calidad al final del ciclo.
- **Entregas al Cliente:** Una única entrega al final del proyecto.
- **Curva de Aprendizaje:** Baja. Fácil de comprender, pero difícil de ajustar a cambios durante el ciclo.
- **Velocidad de Desarrollo:** Baja a media. El ciclo es largo debido a la rigidez en las fases.
- **Manejo de Cambios:** Cambios difíciles y costosos de implementar una vez que el proyecto ha avanzado.
- **Manejo de Riesgos:** Riesgo alto, ya que los problemas suelen descubrirse al final, durante la fase de prueba.

25 Modelo en V

- **Naturaleza del Proyecto:** Proyectos de alta criticidad, con un enfoque riguroso en calidad y validación.
- **Requisitos del Cliente:** Requisitos claros desde el inicio, con verificación constante.
- **Tamaño del Equipo:** Equipos medianos a grandes, con roles especializados para cada fase.
- **Cultura Organizacional:** Cultura disciplinada y centrada en la calidad, con un fuerte enfoque en la validación y verificación.

- **Flexibilidad en Gestión:** Flexibilidad moderada, cambios difíciles una vez avanzado el proyecto.
- **Documentación:** Documentación extensa, especialmente en fases de pruebas y validación.
- **Riesgos y Control de Calidad:** Riesgo bajo, con verificación y validación constante en cada fase.
- **Entregas al Cliente:** Una única entrega al final, con validación en cada fase.
- **Curva de Aprendizaje:** Media. Se requiere disciplina en verificación y validación.
- **Velocidad de Desarrollo:** Media. Las fases de validación pueden ralentizar el desarrollo.
- **Manejo de Cambios:** Los cambios son complicados, requieren revalidación constante.
- **Manejo de Riesgos:** Riesgo bajo, debido a la verificación y validación constantes en cada fase.

26 Espiral

- **Naturaleza del Proyecto:** Proyectos grandes y complejos, con alto riesgo y múltiples iteraciones.
- **Requisitos del Cliente:** Los requisitos pueden refinarse en cada iteración, ideal para proyectos con incertidumbre.
- **Tamaño del Equipo:** Equipos medianos a grandes, flexibles en roles según los ciclos de iteración y gestión de riesgos.
- **Cultura Organizacional:** Cultura orientada a la gestión del riesgo y adaptación a cambios continuos en cada iteración.
- **Flexibilidad en Gestión:** Alta flexibilidad, con ciclos iterativos que permiten gestionar cambios de forma continua.
- **Documentación:** Documentación formal en cada iteración para gestionar riesgos y validar avances.
- **Riesgos y Control de Calidad:** Riesgo bajo, diseñado específicamente para gestionar riesgos en cada iteración.
- **Entregas al Cliente:** Entregas iterativas, con revisiones parciales hasta completar el proyecto.

- **Curva de Aprendizaje:** Alta. Complejidad en la gestión del riesgo y las iteraciones continuas.
- **Velocidad de Desarrollo:** Media. El proceso iterativo es más largo por la gestión de riesgos y planificación.
- **Manejo de Cambios:** Cambios gestionados de manera continua en cada ciclo, permitiendo ajustes según los riesgos.
- **Manejo de Riesgos:** Riesgo bajo, diseñado para gestionar riesgos en cada iteración de manera efectiva.

26.1 Selección de metodología

En base al análisis realizado, elegimos el modelo en V y Kanban como las metodologías más adecuadas, para el desarrollo de este proyecto de tesis, debido a sus características y beneficios particulares que se alinean con los requisitos y condiciones del proyecto.

En el proceso de elección de metodología, comenzamos prescindiendo el uso de las metodologías que no se ajustaban a las necesidades y características del proyecto. Luego, comparamos las metodologías restantes en función de los aspectos clave mencionados anteriormente, para determinar cuál se ajusta mejor a los objetivos y condiciones del proyecto.

En el proceso de selección de metodologías para este proyecto, en primer lugar, se desestimó el uso Scrum por varias razones específicas. Scrum, aunque es potente en proyectos que requieren flexibilidad y adaptación continua, fue filtrado principalmente porque necesita una presencia activa y constante del cliente o un Product Owner para guiar los sprints, lo cual no es posible en este proyecto. Además, la estructura de equipo pequeño y la falta de roles específicos como Scrum Master y Product Owner complican la implementación de Scrum, que además implica reuniones regulares intensivas que no se alinean con la capacidad del equipo, ya que cobran mayor sentido en proyectos con equipos más grandes con mayor diversidad de roles y responsabilidades con necesidad de sincronización frecuente.

Por otro lado, la metodología en espiral, que se centra en la gestión de riesgos y adaptación a cambios continuos, fue considerada innecesariamente compleja para este proyecto dado que los riesgos y la incertidumbre son relativamente bajos y no justifican el tiempo adicional y la complejidad que esta metodología implicaría. Por estos motivos, se desestimó la metodología en espiral en favor de enfoques más simples y directos.

En base al análisis realizado sobre las metodologías restantes, elegimos el modelo en V y Kanban como las metodologías más adecuadas para el desarrollo de este proyecto de tesis, debido a sus características y beneficios particulares que se alinean con los requisitos y condiciones del proyecto. El modelo en V se seleccionó sobre el modelo en cascada aunque ambos son aplicables a equipos de cualquier tamaño y proyectos de cualquier envergadura. Ambos modelos se centran en la planificación y la documentación, lo cual es apropiado para este

proyecto dado que los requerimientos están claramente definidos y la probabilidad de cambios y de riesgo es baja, gracias a una investigación y análisis exhaustivos realizados previamente.

El modelo en V ofrece la ventaja de validar y verificar cada módulo de software funcional antes de avanzar a la siguiente fase, permitiendo correcciones tempranas en caso de errores o cambios, lo que aumenta la flexibilidad y adaptabilidad del proyecto. Este enfoque de validación continua en cada fase contrasta con el modelo en cascada, que, aunque estructurado, avanza secuencialmente sin permitir el retroceso, lo que puede complicar la corrección de errores detectados en fases tardías. Por lo tanto, el modelo en V es preferido por su capacidad para manejar mejor el riesgo y por ofrecer una estructura que facilita la adaptación y mejora continua del proyecto.

Para este trabajo, este sistema de validación y verificación constante es especialmente valioso, ya que el sistema incluye un componente crítico, como lo es el contrato inteligente de trazabilidad en blockchain, que una vez desplegado, no puede ser actualizado para corregir errores, modificar comportamientos o añadir nuevas funcionalidades. Por lo tanto, es crucial que cada fase del desarrollo sea validada y verificada rigurosamente para garantizar la calidad y la integridad del sistema final antes de su despliegue.

Adicionalmente, se decidió integrar Kanban para la gestión de tareas y el seguimiento del flujo de trabajo durante el desarrollo. Kanban complementará al modelo en V al proporcionar una mayor flexibilidad en la gestión de micro-tareas y prioridades diarias, sin sobrecargar al pequeño equipo de trabajo. Esta metodología es ligera y fácil de implementar, y su naturaleza visual ayuda a mantener una vista clara del avance del proyecto, facilitando el seguimiento y la intervención rápida por parte del tutor y el estudiante.

La combinación de estas dos metodologías permitirá al equipo de trabajo mantener un equilibrio entre la rigurosidad y la flexibilidad, garantizando la calidad y la validación en cada fase del proyecto, mientras se mantiene la adaptabilidad y la eficiencia en la gestión de tareas diarias.

26.1.1 Implementación Conjunta de Metodologías

La implementación conjunta del modelo en V y Kanban será llevada a cabo utilizando un enfoque integrado que capitaliza las fortalezas de ambas metodologías. El modelo en V guiará la estructura general del proceso de desarrollo, asegurando que cada etapa del proyecto, desde la planificación hasta la validación, se ejecute con un enfoque en la calidad y la documentación rigurosa. Paralelamente, Kanban se aplicará dentro de cada etapa del modelo en V para gestionar y visualizar las tareas diarias. Esto permitirá controlar el progreso y hacer ajustes operativos sin comprometer la estructura metodológica del modelo en V. El uso de un tablero Kanban facilitará la visualización del estado de las tareas en tiempo real, promoviendo una gestión ágil que se ajusta a la dinámica del equipo y los requerimientos del proyecto.

La combinación de estas metodologías asegura un balance entre la rigurosidad y la flexibilidad dentro del proceso de desarrollo, permitiendo que el equipo

mantenga una planificación clara y una gestión eficiente de tareas, al mismo tiempo que se enfoca en una entrega final de alta calidad y bien documentado.

26.2 Estrategia de Validación

Implementar el modelo en V para el desarrollo de este trabajo implica seguir un enfoque estructurado y sistemático para las pruebas, que puede abarcar distintos tipos de pruebas, desde pruebas unitarias en cada módulo hasta pruebas de integración, sistema y aceptación. Este enfoque sistémico garantiza que el sistema cumpla con los requisitos técnicos y de negocio, y que sea robusto, seguro y eficiente desde su primera entrega.

Una estrategia de validación en software se refiere al conjunto de actividades planificadas para asegurar que un sistema o producto cumpla con los requisitos esperados y funcione correctamente bajo diferentes escenarios. Esta estrategia proporciona una guía detallada que describe los pasos a seguir durante las pruebas, define cuándo deben realizarse y estima el esfuerzo, tiempo y recursos necesarios para su implementación. La importancia de una estrategia de validación radica en su capacidad para estructurar el proceso de pruebas, evitando así esfuerzos innecesarios, errores no detectados y asegurando la calidad del software [pressman2010ingenieria]

Para garantizar la eficacia de las pruebas, una estrategia de validación debe incluir varios elementos clave, tales como la planificación de pruebas, el diseño de casos de prueba, la ejecución de pruebas y la evaluación de los resultados obtenidos. Este proceso no solo asegura que el software funcione según lo previsto, sino que también permite identificar errores cometidos durante las fases de diseño y desarrollo, mejorando la calidad final del producto.

En el caso del desarrollo basado en el modelo en V, las pruebas se realizan de manera estructurada desde las pruebas de módulos individuales hasta las pruebas de integración, sistema y aceptación. Este enfoque sistemático asegura que el sistema funcione correctamente tanto a nivel de componentes como en su conjunto, permitiendo que el cliente y los usuarios finales participen en la validación y aceptación del sistema antes de su implementación.

[width=]../assets/model-v.png

Figure 11: Modelo en V. Fuente: [pressman2010ingenieria]

El desarrollo de una estrategia de validación eficaz permite evitar errores que podrían pasar desapercibidos en un enfoque de pruebas sin planificación. La validación sistemática permite una medición clara del progreso y asegura que cualquier problema emergente se detecte lo antes posible, optimizando el uso de tiempo y recursos. Al implementar este enfoque, se logra que el sistema sea estable, cumpla con los requerimientos y se entregue en tiempo y forma.

Para cada tipo de pruebas, es habitual definir un plan de pruebas, una lista de casos de prueba y un informe de resultados. Para los distintos tipos de prueba

pueden utilizarse todos o sólo algunos de estos documentos, dependiendo del tipo de prueba, su granularidad y su criticidad.

26.2.1 Pruebas Unitarias

Las pruebas unitarias son pruebas que se aplican a los componentes más pequeños de un sistema, como componentes o métodos individuales. Su objetivo es verificar que cada unidad de código funcione correctamente en aislamiento.

Las pruebas unitarias por lo general se consideran como adjuntas al paso de codificación. El diseño de las pruebas unitarias puede ocurrir antes de comenzar la codificación o después de generar el código fuente. La revisión de la información del diseño proporciona una guía para establecer casos de prueba que es probable que descubran errores en cada una de las categorías analizadas anteriormente. Cada caso de prueba debe acoplarse con un conjunto de resultados esperados [pressman2010ingenieria].

Cada módulo de la arquitectura del sistema se desarrollará y validará de forma independiente antes de integrarse con otros módulos. Estas pruebas se centrarán en la funcionalidad individual de los módulos dentro cada uno de los componentes del sistema, asegurando que cada uno cumpla con los requisitos y expectativas definidos.

Para las pruebas unitarias se utilizan frameworks específicos para cada tecnología y lenguaje de programación. A su vez, estas pruebas se realizan con datos de prueba que cubran diferentes escenarios y casos límite, asegurando que el módulo funcione correctamente en todas las situaciones posibles, tanto normales como excepcionales.

La métrica habitual para evaluar la calidad de las pruebas unitarias es la cobertura de código, que mide el porcentaje de líneas de código que son ejecutadas por las pruebas. Una alta cobertura de código indica que las pruebas unitarias han validado la mayoría de las rutas de ejecución del código, lo que aumenta la confianza en la calidad del software. De todas formas, una alta cobertura de código no garantiza la ausencia de errores, motivo por el cual las pruebas unitarias son utilizadas junto con otros enfoques de pruebas para obtener una validación completa del sistema.

En nuestro trabajo, las pruebas unitarias tendrán el siguiente alcance:

- **Plan de Pruebas Unitarias:** No se realizará un plan de pruebas unitarias formal, ya que estas pruebas se realizarán de forma continua durante el desarrollo de cada módulo. Sin embargo, para cada módulo del sistema se definirá el framework de pruebas a utilizar y el nivel de cobertura mínimo requerido por las pruebas unitarias.
- **Casos de Prueba Unitarios:** No se realizará un documento formal de casos de prueba unitarios, debido a la alta granularidad de las pruebas unitarias. Estos casos se definirán y ejecutarán de forma continua durante el desarrollo de cada módulo. Durante el desarrollo se definirán tantos casos de prueba como sea necesario para cubrir diferentes escenarios y casos límite para alcanzar el nivel de cobertura requerido.

- **Informe de Resultados:** No se realizará un informe formal de resultados de pruebas unitarias, ya que los resultados de las pruebas se documentarán directamente en el código fuente y en el sistema de control de versiones. Los resultados de las pruebas unitarias se pueden utilizar como informe de resultados en todo momento para evaluar el progreso y la calidad del desarrollo.

A continuación, como parte del plan de pruebas, se detallan los frameworks de pruebas unitarias a utilizar para cada tecnología y lenguaje de programación involucrados en el desarrollo del sistema. A su vez se detalla el nivel de cobertura mínimo requerido por las pruebas unitarias para cada módulo del sistema.

Aplicación Frontend

Framework: para las pruebas unitarias del frontend del sistema se utilizará el framework Jest⁸ en conjunto con React Testing Library⁹. Estas dos herramientas suelen utilizarse en conjunto para realizar pruebas unitarias en aplicaciones Next.js y es la recomendación de la documentación oficial de Next.js para realizar pruebas en aplicaciones desarrolladas con este framework¹⁰. Jest es un framework de pruebas para JavaScript que permite escribir pruebas con una API accesible, familiar y rica en funcionalidades que proporciona resultados rápidamente. Jest está bien documentado, requiere poca configuración y puede extenderse para adaptarse a las necesidades del proyecto, a su vez, los repositorios Next.js ya proveen la configuración básica para este framework. React Testing Library es una biblioteca de pruebas específica para React que permite escribir pruebas que se centran en el comportamiento del usuario, en lugar de en la implementación interna de los componentes. Esta biblioteca fomenta las mejores prácticas de accesibilidad y proporciona una API sencilla y eficaz para escribir pruebas de componentes React.

Cobertura Mínima: se requerirá una cobertura mínima del 60% para las pruebas unitarias del frontend del sistema. Este valor se considera adecuado para garantizar que la mayoría de las rutas de ejecución del código estén cubiertas por las pruebas unitarias. A su vez, el frontend de este prototipo es relativamente simple y no es una parte crítica del sistema, sino que se implementará con fines de demostración y validación de la funcionalidad del sistema, por lo que este valor de cobertura es suficiente para garantizar la calidad del código, sin requerir un esfuerzo excesivo en la escritura de pruebas unitarias.

API de Trazabilidad

Framework: para las pruebas unitarias de la API de trazabilidad se utilizará el framework Jest, que está integrado por defecto en el framework Nest.js y es el recomendado por la documentación oficial de Nest.js para realizar pruebas unitarias en aplicaciones desarrolladas con este framework¹¹.

Cobertura Mínima: se requerirá una cobertura mínima del 80% para las pruebas unitarias de la API de trazabilidad. Dado que la API de trazabilidad

⁸<https://jestjs.io>

⁹<https://testing-library.com/docs/react-testing-library/intro>

¹⁰<https://nextjs.org/docs/app/building-your-application/testing/jest>

¹¹<https://docs.nestjs.com/fundamentals/testing>

es una parte crítica del sistema y es responsable de la comunicación con la blockchain y la base de datos SQL, es fundamental garantizar que todas las rutas de ejecución del código estén cubiertas por las pruebas unitarias. Un valor de cobertura del 80% es adecuado para garantizar la calidad del código y minimizar el riesgo de errores en la implementación de la API. Este valor suele utilizarse en la industria como un estándar aceptable para la cobertura de código en aplicaciones críticas.

Contratos Inteligentes

Framework: para las pruebas unitarias de los contratos inteligentes se utilizará el framework Hardhat, que es uno de los frameworks de pruebas más utilizados en la industria para contratos inteligentes en Solidity. Hardhat proporciona un entorno de desarrollo completo para Ethereum, que incluye herramientas para compilar, desplegar y probar contratos inteligentes, así como para simular un entorno de blockchain local para pruebas unitarias¹². Dado que este framework se utilizará para el desarrollo de los contratos inteligentes, también se utilizará para las pruebas unitarias de los mismos.

Cobertura Mínima: se requerirá una cobertura mínima del 100% para las pruebas unitarias de los contratos inteligentes. Dado que los contratos inteligentes son la base del sistema de trazabilidad, son responsables de la ejecución de las transacciones en la blockchain y teniendo en cuenta que una vez desplegados ya no pueden actualizarse, es fundamental garantizar que todos los caminos de ejecución del código estén cubiertos por las pruebas unitarias. Un valor de cobertura del 100% es necesario para garantizar la calidad y la seguridad de los contratos inteligentes, minimizando el riesgo de errores en la implementación de los mismos. Este valor es un estándar en la industria para la cobertura de código en contratos inteligentes críticos.

26.3 Pruebas de Integración

Una vez que los módulos individuales han sido validados, el siguiente paso es probar la integración entre ellos dentro de cada capa y entre las diferentes capas. Las pruebas de integración son una técnica sistemática para construir la arquitectura del software mientras se llevan a cabo pruebas para descubrir errores asociados con la interfaz. El objetivo es tomar los componentes probados de manera individual y construir una estructura de programa que se haya dictado por diseño [pressman2010ingenieria].

Las pruebas de integración se realizan para verificar que los módulos individuales funcionen correctamente juntos, pasando datos y ejecutando operaciones de manera fluida y sin errores. Estas pruebas se realizan siguiendo escenarios de uso que reflejen operaciones típicas y atípicas dentro del sistema, utilizando datos de prueba que simulen el entorno operativo real tanto como sea posible.

El método en V, por su estructura, propicia el uso de pruebas de integración ascendentes, que comienzan la construcción y la prueba con módulos atómicos (es decir, componentes en los niveles inferiores dentro de la estructura

¹²<https://hardhat.org/hardhat-runner/docs/guides/test-contracts>

del programa). Puesto que los componentes se integran de abajo hacia arriba, la funcionalidad que proporcionan los componentes subordinados en determinado nivel siempre está disponible y se elimina la necesidad de representaciones intermedias [pressman2010ingenieria].

Las pruebas de integración en este sistema se realizarán con el objetivo de validar que las interfaces entre los módulos y las capas del sistema funcionen correctamente y que los datos se transmitan de manera adecuada entre ellos. Estas pruebas se centrarán en asegurar que la interfaz de usuario pueda comunicarse eficazmente con la API de trazabilidad y que esta, a su vez, interactúe correctamente con la blockchain y la base de datos SQL.

Para las pruebas de integración se utilizarán datos de prueba que cubran diferentes escenarios y casos límite, asegurando que el sistema funcione correctamente en todas las situaciones posibles, tanto normales como excepcionales. Estas pruebas se realizarán en un entorno de desarrollo de pruebas controlado, simulando el entorno operativo real tanto como sea posible.

En nuestro trabajo, las pruebas de integración tendrán el siguiente alcance:

- **Plan de Pruebas de Integración:** Estas pruebas se realizarán de forma manual y el plan de pruebas de integración únicamente listará los casos de uso a probar.
- **Casos de Prueba de Integración:** Se definirán casos de prueba de integración detallados para cada escenario de uso identificado en el plan de pruebas. Se utilizarán para guiar la ejecución de las pruebas de integración y para documentar los resultados obtenidos. Cada caso de prueba incluirá una descripción del escenario de uso, los datos de prueba a utilizar, los pasos a seguir y los resultados esperados.
- **Informe de Resultados de Integración:** Se generará un informe formal de resultados de pruebas de integración que documente los resultados obtenidos, los problemas identificados y las acciones correctivas tomadas. Este informe se utilizará para realizar ajustes y mejoras necesarias antes de las siguientes etapas de desarrollo y pruebas.

26.4 Pruebas de Sistema

Las pruebas de sistema consisten en una serie de diferentes pruebas cuyo propósito principal es ejercitar por completo el sistema implementado. Estas pruebas evalúan la calidad del sistema en su conjunto y comprueban su rendimiento bajo condiciones reales o simuladas. Aunque cada prueba tenga un propósito diferente, todo el conjunto de pruebas busca verificar que los elementos del sistema se hayan integrado de manera adecuada y que realicen las funciones asignadas. En estas pruebas se evalúan aspectos del sistema como la usabilidad, la confiabilidad, el rendimiento y la seguridad del sistema [pressman2010ingenieria].

Las pruebas de sistema se realizan en un entorno de pruebas controlado que simula el entorno operativo real del sistema, utilizando datos de prueba que reflejen situaciones reales y escenarios de uso típicos y atípicos. Algunas de

estas pruebas se centran en validar que el sistema cumpla específicamente con los requerimientos no funcionales definidos en la etapa de análisis y diseño del sistema, y que sea capaz de realizar las funciones esperadas.

En nuestro trabajo, las pruebas de sistema tendrán el siguiente alcance:

- **Plan de Pruebas de Sistema:** Se definirá un plan de pruebas de sistema que describa los escenarios de uso a probar, los criterios de aceptación y los datos de prueba a utilizar. Este plan de pruebas se utilizará como guía para la ejecución de las pruebas de sistema y para documentar los resultados obtenidos.
- **Casos de Prueba de Sistema:** Se definirán casos de prueba de sistema detallados para cada escenario de uso identificado en el plan de pruebas. Estos casos de prueba se utilizarán para guiar la ejecución de las pruebas de sistema y para documentar los resultados obtenidos. Cada caso de prueba incluirá una descripción del escenario de uso, los datos de prueba a utilizar y los resultados esperados.
- **Informe de Resultados de Sistema:** Se generará un informe formal de resultados de pruebas de sistema que documente los resultados obtenidos, los problemas identificados y las acciones correctivas tomadas. Este informe se utilizará para realizar ajustes y mejoras necesarias antes de la entrega final del sistema.

26.5 Pruebas de Aceptación

Las pruebas de aceptación, por otro lado, son pruebas realizadas por el cliente o el usuario final para determinar si el sistema cumple con los criterios de aceptación definidos previamente al comienzo del proyecto y durante su desarrollo. Estas pruebas se realizan en un entorno de pruebas controlado y se centran en validar que el sistema cumpla con los requisitos del negocio y las expectativas del usuario. Las pruebas de aceptación son esenciales para garantizar que el sistema sea aceptado por el cliente y los usuarios finales y que cumpla con sus necesidades y expectativas.

Debido al alcance de este trabajo académico, no se realizarán pruebas de aceptación formales con el cliente o los usuarios finales. Sin embargo, se realizarán pruebas de aceptación internas junto con las pruebas de sistema para validar que el sistema cumpla con los criterios de aceptación definidos en la etapa de análisis y diseño del sistema. Estas pruebas se realizarán de forma manual en un entorno de pruebas controlado y se centrarán en validar que el sistema cumpla con los requerimientos funcionales del sistema definidos en la etapa de análisis y diseño.

27 Glosario

Blockchain es una estructura de datos distribuida que mantiene un registro inmutable de transacciones o eventos mediante técnicas criptográficas que

protegen contra la manipulación. La información se organiza en transacciones que son validadas y agrupadas en bloques. Cada bloque, junto con un puntero al bloque anterior, forma una cadena de transacciones interconectadas. Una vez que una transacción se ha añadido a la cadena, generalmente no puede ser modificada ni eliminada porque requeriría cambiar todos los bloques posteriores en la cadena, lo cual es computacionalmente impracticable debido a la distribución y la seguridad criptográfica de la red blockchain [rennock2018blockchain].

Distributed ledger technology (DLT) : un ledger es un libro mayor o registro contable que registra todas las transacciones realizadas dentro de un sistema. El término DLT se suele utilizar como sinónimo de Blockchain y se refiere a la base de datos distribuida donde se almacenan todas las transacciones [rennock2018blockchain].

Mecanismo de Consenso es un protocolo utilizado en redes distribuidas, como una blockchain, que permite a los nodos de la red llegar a un acuerdo sobre el estado actual del sistema o sobre qué transacciones son válidas y deben ser agregadas al ledger. El objetivo principal de un mecanismo de consenso es asegurar que todos los participantes de la red lleguen a un consenso o acuerdo sobre la verdad de los datos, incluso cuando algunos participantes puedan ser deshonestos o intenten manipular la red. Un mecanismo de consenso eficaz debe ser seguro, resistente a la censura, tolerante a fallas y verificable en tiempo real [diaz2022protocolos].

Proof of Work (PoW) es un mecanismo de consenso donde los participantes, conocidos como mineros, compiten entre sí para resolver problemas criptográficos complejos y validar transacciones. Este proceso requiere una gran cantidad de poder computacional y consume mucha energía para encontrar la solución correcta primero. Una vez que un minero encuentra la solución, la cadena de bloques la verifica y el bloque con su solución se agrega a la cadena, lo que garantiza que el trabajo realizado sea genuino. El sistema de PoW es seguro debido a la dificultad computacional requerida para alterar la cadena de bloques, mientras que es verificable en tiempo real y no requiere confianza entre los participantes [rennock2018blockchain].

Proof of Stake (PoS) es un mecanismo de consenso donde la cantidad de criptomonedas que un participante posee y decide "bloquear" o "apostar" determina sus posibilidades de ser elegido para validar transacciones y crear nuevos bloques. Este proceso elimina la necesidad de la competencia intensiva en recursos y el consumo de energía asociado con la PoW, ya que no se requiere resolver problemas criptográficos complejos. Los participantes con más monedas (stake) en juego tienen más probabilidades de ser seleccionados para validar transacciones, y si se descubre que están actuando de manera fraudulenta, pueden perder parte o la totalidad de sus criptomonedas apostadas [rennock2018blockchain].

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

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