

Uso de Blockchain na Rastreabilidade de Produtos: Uma Revisão Sistemática da Literatura

Edvaldo Ribeiro Alves
Departamento de Computação (DC)
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Recife, Brasil
edvaldo.ribeiro@ufrpe.br

Fernando Antonio Aires Lins
Departamento de Computação (DC)
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Recife, Brasil
fernandoaires@ufrpe.br

Abstract—In recent times, Blockchain has ceased to be exclusively associated with the digital currency Bitcoin and has expanded its applications to a variety of sectors such as healthcare, product traceability, the Internet of Things, and education. Traceability is becoming increasingly crucial in various sectors due to a combination of factors involving security, transparency, sustainability, and operational efficiency. Traceability has become an essential strategic tool to ensure safety, enhance transparency and efficiency, and meet regulatory and ethical demands. However, a gap has been observed in the current literature concerning the review and analysis of research initiatives focused on product traceability using Blockchain, particularly detailing how Blockchain operates in this context and the improvements the technology brings to this environment. Although there are studies exploring the application of Blockchain technology in different areas, the current literature lacks a comprehensive synthesis specifically addressing product traceability. This gap is particularly relevant given the growing interest and importance of traceability in the supply chain to ensure transparency, authenticity, and product safety. Therefore, this work aims to fill this gap by providing an analysis of existing research initiatives in this area. The present work seeks to comprehensively explore the implications of this combination, analyzing how Blockchain can transform the way products are tracked and managed. In this context, the main contribution of this paper is a systematic review of existing research on Blockchain-based systems developed to enhance traceability. This involves understanding how Blockchain is applied to track and verify the improvements it brings to those who adopt this combination. This systematic mapping also offers an overview of current research trends in this area. Additionally, it sheds light on research and innovation challenges that remain open in this area.

Palavras-chave—Blockchain, rastreabilidade, processos, produtos alimentícios, agroindústria e suprimentos verde.

I. INTRODUÇÃO

A interseção entre processos, produtos alimentícios, agroindústria e a cadeia de suprimentos tem sido objeto de crescente atenção, impulsionada pela necessidade de garantir a procedência, autenticidade e segurança dos produtos. No cenário atual, a rastreabilidade de produtos representa um desafio significativo, com sistemas tradicionais muitas vezes sendo incapazes de proporcionar uma visibilidade completa de toda a cadeia.

Neste contexto, surge como oportunidade interessante a tecnologia Blockchain [1]. Ela se destaca por sua proposta

de ser uma tecnologia inviolável, transparente, descentralizada e imutável que armazena transações operando baseada em *hashes* criptográficos. Blockchain trabalha em conjunto com mecanismos de contratos inteligentes, que oferecem flexibilidade para lidar com eventos que estejam fora do padrão, identificando e solucionando inconsistências. Como Blockchain é um registro transacional, ela pode documentar as mudanças no ciclo de vida de qualquer material fornecido.

Embora algumas iniciativas interessantes tenham sido propostas e estejam sendo utilizadas neste momento, existe uma lacuna referente a revisão sistematizada nesta área. O artigo visa trabalhar a lacuna, através da realização de um estudo de mapeamento sistemático focado na rastreabilidade de produtos por meio da tecnologia Blockchain. O objetivo é identificar de que forma Blockchain vem sendo aplicada no campo da rastreabilidade de produtos e quais benefícios traz para este tipo de setor. Além disto, se busca verificar possíveis tendências na área e também desafios em aberto.

O artigo está estruturado da forma que se segue. A Seção II aborda os conceitos básicos relevantes para o entendimento deste trabalho. A Seção III descreve a metodologia adotada nesta pesquisa. Por sua vez, a Seção IV apresenta o protocolo da revisão sistemática. Por sua vez, a Seção V apresenta o resultado da execução do protocolo (Apresentação dos Trabalhos). A Seção VI discute os resultados obtidos e apresenta as respostas para as questões levantadas no protocolo da revisão. Por fim, a Seção VII apresenta as conclusões e trabalhos futuros deste artigo.

II. CONCEITOS BÁSICOS

Esta Seção apresenta conceitos básicos relacionados às principais tecnologias envolvidas neste trabalho: Blockchain, rastreabilidade e contratos inteligentes.

A. Blockchain

Blockchain surgiu com uma proposta de ser uma tecnologia aplicada no gerenciamento e garantia de imutabilidade de dados digitais. Contudo, atualmente, existem diversos campos em que esse sistema é aplicado, como, por exemplo, transporte, Internet das Coisas, gestão de energia e registro eletrônico de saúde. Uma vantagem importante de Blockchain é ser uma rede compartilhada, contendo vários servidores com

as mesmas informações processando transações. Basicamente, Blockchain seria um sistema de gerenciamento de dados no qual “blocos” de informações coletadas de fontes descentralizadas podem ser combinadas para formar uma “cadeia”.

Blockchain tem propriedades interessantes, que tornam sua aplicação atrativa para vários tipos de sistemas. Entre suas propriedades destaca-se a imutabilidade, que refere-se à incapacidade de alterar ou apagar dados uma vez que eles foram registrados em uma Blockchain. Isso ocorre devido à estrutura de funcionamento dessa tecnologia, que organiza as transações em blocos encadeados e protegidos por complexos algoritmos criptográficos. Cada bloco contém, além das transações, um “hash” criptográfico único que representa seu conteúdo, além de uma referência ao hash do bloco anterior, criando uma cadeia de blocos interdependentes.

Blockchain trabalha com um livro digital distribuído, fazendo com que as transações sejam conhecidas para todos os seus usuários. Existem três princípios fundamentais para a tecnologia Blockchain: (i) hash criptográfico, (ii) assinatura digital (com base em chaves públicas e privadas) e (iii) mecanismo de consenso distribuído (mineração) [2].

B. Rastreabilidade

A rastreabilidade tem se tornado um componente essencial em diversos setores, desde a indústria alimentícia até a farmacêutica, passando por tecnologia e logística. A capacidade de rastrear a origem, o histórico e o movimento de produtos ao longo da cadeia de suprimentos não apenas assegura a qualidade e a segurança dos produtos, mas também aumenta a confiança dos consumidores e facilita a conformidade regulatória. A rastreabilidade permite a identificação rápida de problemas, a redução de riscos e a implementação de ações corretivas eficazes, sendo, portanto, crucial para a manutenção da integridade e da reputação das empresas.

Nos últimos anos, a introdução da tecnologia Blockchain tem revolucionado o campo da rastreabilidade [3]. Com sua natureza imutável e descentralizada, Blockchain proporciona um registro transparente de todas as transações e movimentações de um produto em uma cadeia produtiva. Esse avanço tecnológico permite que todos os participantes da cadeia de suprimentos tenham acesso a um histórico confiável e verificável, eliminando a possibilidade de fraudes e adulterações. Além disso, a implementação de Blockchain na rastreabilidade aumenta a eficiência operacional, reduz custos e melhora a transparência, fortalecendo a confiança entre produtores, distribuidores e consumidores.

A adoção de Blockchain nesta circunstância representa um marco significativo no avanço da rastreabilidade, transformando-a em uma ferramenta ainda mais poderosa e indispensável para as indústrias contemporâneas.

C. Contratos Inteligentes

Contratos inteligentes podem ser explicados como códigos de software que representam as regras de negócios, onde estes códigos são especificados por uma linguagem de alto nível. Com o uso deste conceito, duas ou mais entidades envolvidas

podem registrar, com maior nível de segurança, um contrato em uma rede pública, sem exigir apoio de terceiros [4]. Ao eliminar intermediários, os contratos inteligentes reduzem custos, aumentam a transparência e aceleram processos, tornando-se uma peça fundamental na transformação de vários setores.

Contratos inteligentes podem ser utilizados em uma variedade de contextos, desde transações financeiras e contratos legais até a automatização de processos em cadeias de suprimentos. O potencial disruptivo da utilização destes contratos na simplificação e otimização de transações tem potencial para continuar moldando o panorama dos negócios e das operações descentralizadas.

III. METODOLOGIA

Como destacado anteriormente, a principal contribuição deste artigo é um mapeamento sistemático, que foi realizado com o auxílio da StArt (State of the Art through Systematic Review) [5]. O que motivou a escolha desta plataforma foi a automação de várias etapas do processo de revisão sistemática, como a importação de referências, a remoção de duplicatas, e a categorização de estudos. A Figura 1. Segue um fluxo estruturado para auxiliar a realização de revisões sistemáticas da literatura de maneira eficiente e organizada. O processo é dividido em várias etapas que orientam o pesquisador desde a definição do protocolo até a análise dos resultados.



Figura 1. Fluxo do Start

A primeira camada se inicia com o controle de Planejamento; o planejamento é instanciado através do protocolo. Depois, na segunda camada, se inicia a Execução, que tem a Identificação dos Estudos (onde é feito as buscas), passando pelo processo de Seleção (levantamento primário deste processo de Execução), e chegando na última etapa da Execução, encerrando com a Extração. Finalmente o fluxo se conclui com a terceira camada, Sumarização, que seria a escrita do relatório ou artigo.

A. Definição das Questões de Pesquisa

De acordo com o escopo proposto para este trabalho, as seguintes perguntas de pesquisa são propostas.

RQ1 - Como Blockchain tem sido aplicada para fornecer suporte a soluções de rastreabilidade?

RQ2 - Quais são os benefícios para Rastreabilidade com uso de Blockchain?

B. Realização da Busca

O processo de busca foi realizado utilizando palavras-chave relacionadas ao tema central do trabalho, empregando várias camadas de pesquisa. A pesquisa foi conduzida em portais acadêmicos que agregam artigos, teses, dissertações e periódicos científicos.

C. Triagem de Artigos Relevantes

Consideramos, em primeiro lugar, a remoção de todos os artigos duplicados. Artigos que não continham informações no título, resumo e palavras-chave também foram removidos. Focou-se apenas em artigos nos idiomas inglês e português.

D. Pesquisa de Resumos por Palavras-chave

Nesta atividade, foi feita uma síntese de todos os artigos relevantes usando as palavras-chave de acordo com a técnica utilizada em [6]. Ao se avaliar os resumos dos artigos, foram identificadas as principais palavras-chave e as referências presentes em cada artigo.

A Tabela I apresenta uma lista de palavras-chave utilizadas para realizar buscas em bases de dados acadêmicas, como ACM, IEEE e Google Acadêmico. Essas palavras-chave foram escolhidas para abranger os principais termos relacionados ao estudo.

Tabela I
CONSULTAS PARA PESQUISA

Base de dados científico	Strings de busca
ACM	"Blockchain"AND "traceability"AND (Products OR foods) AND (law suit OR agroindustrial) AND (chain OR green supplies)
IEEE	"Blockchain"AND "traceability"AND (Products OR foods) AND (chain OR green supplies)
Google acadêmico	"Blockchain"AND "traceability"AND (products Or foods) And (law suit Or agroindustrial) And (chain Or green supplies)

E. Extração e Mapeamento de Dados

Nesta fase do processo se buscou extrair as informações necessárias para a avaliação dos trabalhos. Ao todos, se adotou cinco parâmetros de revisão, conforme exibido na Tabela II. Os critérios de revisão foram inicialmente testados em uma amostra de cinco artigos e, em seguida, aplicados ao restante dos textos para a extração de dados.

Tabela II
CRITÉRIOS PARA REVISÃO DE ARTIGOS

Critério	Descrição
Título	Título do trabalho
Tipo de artigo	Conferência, Workshop, revista ou capítulo de livro
Tópico do artigo	A área temática e o assunto
Data da publicação	Ano de publicação
Finalidade do artigo	O Objetivo do artigo

Adicionalmente, foram adotados critérios de inclusão e exclusão, e estes critérios estão descritos nas Tabelas III e IV.

Tabela III
CRITÉRIOS DE REVISÃO PARA OS ARTIGOS

CI1	Serão incluídos trabalhos que utilizem rastreabilidade Blockchain
CI2	Serão incluídos trabalhos públicos e disponíveis integralmente nas bases científicas buscadas
CI3	Será incluído o rastreamento de alimentos
CI4	Serão incluídos trabalhos extraídos da ferramenta Start com *Score acima de 60

Tabela IV
CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO

CE1	Serão excluídos trabalhos com títulos repetidos
CE2	Serão excluídos trabalhos duplicados
CE3	Serão excluídos trabalhos que não apresentem resumo/abstract
CE4	Serão excluídos trabalhos redundantes de mesma autoria
CE5	Serão excluídos trabalhos que não abordem cadeia de suprimentos e alimentos
CE6	Serão excluídos trabalhos que não forem encontrados integralmente na base de busca

IV. PROTOCOLO DA REVISÃO SISTEMÁTICA

O protocolo da revisão foi realizado através do fluxo da plataforma Start. Este fluxo é reconhecido por proporcionar uma condução eficiente de revisões sistemáticas, possibilitando inclusive uma documentação detalhada e padronizada [5]. As etapas do protocolo são descritas a seguir.

- **Execução:** As buscas nas bases de dados são realizadas manualmente ou diretamente pela ferramenta, e os resultados são importados para o StArt. Os resultados são disponibilizados no repositório da ferramenta para as próximas etapas. No caso deste trabalho, foram importadas as referências de bases de dados bibliográficas (como ACM, IEEE e Google Acadêmico). Filtramos e aplicamos os critérios de inclusão e exclusão para refinar os estudos relevantes. Os estudos selecionados foram avaliados, e também foram analisando para verificar sua relevância à pesquisa. Após isto, se extraíram as informações importantes dos estudos (como resultados e metodologias). Esta etapa visa organizar e processar os estudos, garantindo resultados consistentes e relevantes na revisão.
- **Identificação dos estudos:** São utilizados nesta etapa os parâmetros definidos anteriormente para ajudar na identificação dos artigos. São utilizados, por exemplo, palavras-chave, idiomas de preferência e intervalo temporal.
- **Seleção:** Foram coletados um total de 727 artigos. Nesta fase, os artigos serão analisado através dos

seus títulos e resumos, com o intuito de saber se está coerente com o que está sendo buscado. Desta forma, se faz a seleção inicial, justificando a aceitação ou não dos artigos com base nos critérios de inclusão e exclusão.

- **Extração:** Nesta última fase, depois de aplicar a etapa de seleção, foram obtidos 95 artigos para serem analisados na extração. Após a análise, resultou na aceitação de 25 artigos e na rejeição de 70.

V. APRESENTAÇÃO DOS TRABALHOS

Após coletar os artigos que atendiam ao escopo do estudo, foi observado um padrão comum entre as aplicações descritas nos mesmos. Com base nesse padrão, foi possível definir uma classificação que facilitou a organização das informações e permitiu uma análise mais direcionada para a extração dos resultados desejados. Assim, os artigos foram categorizados conforme suas principais áreas de aplicação, permitindo um estudo mais estruturado e aprofundado.

A. Categorias encontradas

A Tabela V apresenta seis categorias identificadas durante a análise, cada uma acompanhada por um conjunto de artigos relevantes que abordam os temas correspondentes. Essas categorias foram definidas com base em critérios específicos relacionados ao tópico estudado, com o objetivo de organizar e classificar as principais contribuições da literatura. Cada conjunto de artigos oferece uma visão detalhada dos aspectos centrais discutidos em cada categoria, proporcionando uma base sólida para entender as diferentes abordagens e perspectivas sobre o tema.

Tabela V
CLASSIFICAÇÃO DAS CATEGORIAS

Categorias	Artigos científicos
Rastreabilidade na cadeia de suprimentos	[8] [9] [14] [15] [19] [21] [22] [25] [26] [27] [28] [29] [30]
Autenticação de produtos e ativos	[15] [16] [19] [21] [23] [29]
Rastreabilidade na indústria alimentícia	[10] [14] [15] [16] [21] [25] [28] [29] [30]
Setor farmacêutico e saúde	[18] [23] [24] [27] [28] [29] [30]
Rastreabilidade de ativos digitais	[15] [17] [20] [22] [24] [26] [28] [30] [31]
Contratos inteligentes para rastreabilidade	[6] [8] [9] [11] [12] [13] [14] [18] [20] [25] [26] [27] [30] [31]

As categorias destacadas na tabela são descritas a seguir.

- **Rastreabilidade na Cadeia de Suprimentos.** Esta categoria aborda como a tecnologia Blockchain é empregada para rastrear a origem, produção, distribuição e venda de produtos ao longo da cadeia de suprimentos. A tecnologia oferece uma plataforma descentralizada para registrar transações, garantindo uma visibilidade completa e imutável de todas as etapas do processo.

- **Autenticação de Produtos e Ativos.** Aqui, o foco está na utilização de Blockchain para autenticar produtos e ativos, permitindo aos consumidores e partes interessadas verificar a autenticidade e origem de um item. Blockchain assegura que as informações registradas sejam à prova de adulteração, contribuindo para combater a falsificação e melhorar a confiança do consumidor.

- **Rastreabilidade na Indústria Alimentícia.** Esta categoria se concentra especificamente na aplicação de Blockchain para rastrear alimentos desde a produção agrícola até o consumidor final. O registro transparente e imutável na Blockchain pode permitir a rápida identificação de fontes de contaminação, melhorando a resposta a crises alimentares e fortalecendo a segurança alimentar.

- **Setor Farmacêutico e Saúde.** Nesta categoria, Blockchain é utilizada para rastrear a cadeia de fornecimento de medicamentos e dispositivos médicos, melhorando o nível de garantia da autenticidade e integridade dos produtos. Isso é crucial para combater a entrada de medicamentos falsificados no mercado e assegurar que os pacientes recebam produtos genuínos.

- **Rastreabilidade de Ativos Digitais.** Esta categoria aborda a aplicação de Blockchain na rastreabilidade de ativos digitais, como documentos, certificados e propriedade intelectual. Blockchain proporciona um registro inalterável desses ativos, facilitando a verificação de autenticidade e a prevenção de fraudes.

- **Contratos Inteligentes para Rastreabilidade.** Aqui, o destaque é dado ao uso de contratos inteligentes baseados em Blockchain para automatizar e facilitar processos de rastreabilidade. Esses contratos auto executáveis permitem a implementação de condições pré-programadas, agilizando operações e reduzindo a necessidade de intervenção humana.

Temos na Tabela VI. A comparativa para as seis categorias que utilizam blockchain na rastreabilidade de produtos, com quatro tópicos relevantes, informando as diferenças entre elas.

A Figura 2 apresenta uma visão geral dos estudos encontrados nas categorias. Das 58 publicações analisadas, treze (22,4%) focaram na rastreabilidade na cadeia de suprimentos. Seis artigos (10,3%) trataram da autenticidade de produtos e ativos. Nove (15,5%) focaram a rastreabilidade na indústria alimentícia. O setor farmacêutico contou com sete artigos (12,1%). Nove artigos (15,5%) abordaram a rastreabilidade de ativos digitais. Finalmente, a sexta categoria, que abordou os contratos inteligentes para rastreabilidade, teve quatorze artigos (24,1%).

Tabela VI
DIFERENÇAS ENTRE AS CATEGORIAS

Categoria	Tipo de Blockchain (Público/Privado)	Imutabilidade dos Dados	Transparência e Auditoria	Integração com Contratos Inteligentes
Rastreabilidade na cadeia de suprimentos	Privado ou híbrido	Alta, com visibilidade entre parceiros	Transparência controlada entre partes	Sim, para automatizar o fluxo de informações
Autenticação de produtos e ativos	Público ou privado	Alta, fundamental para validar a origem	Alta, com auditoria de terceiros	Sim, utilizado para validar ativos e transações
Rastreabilidade na indústria alimentícia	Híbrido	Alta, especialmente em processos críticos	Transparência para consumidores e órgãos reguladores	Sim, para automatizar processos de verificação
Setor farmacêutico e saúde	Privado	Alta, exigida por regulamentações	Transparência limitada aos envolvidos	Sim, para rastrear medicamentos e dados clínicos
Rastreabilidade de ativos digitais	Público	Alta, pois é vital para a confiança	Alta, com acesso aberto a todas as transações	Sim, usado em tokens e NFTs para garantir procedência
Contratos inteligentes para rastreabilidade	Público ou privado	Alta, dependendo do uso	Transparente, conforme definido no contrato	Totalmente integrado, automatiza transações e verificações

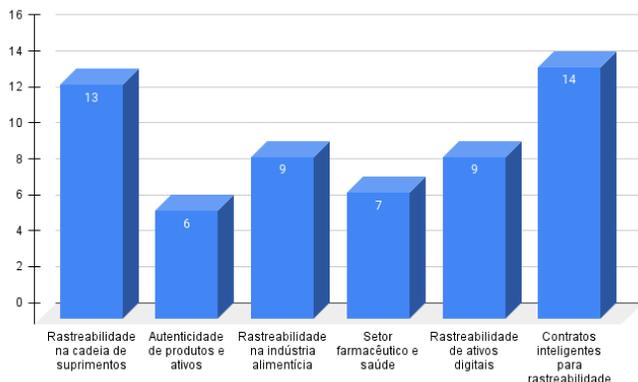


Figura 2. Quantidade de Artigos por Categoria

Temos na Figura 3. Contendo uma cronologia anual entre 2019 a 2023, destacando as pesquisas relacionadas às categorias mencionadas, com a avaliação das tendências de alta e baixa em uma escala de 0 a 100.

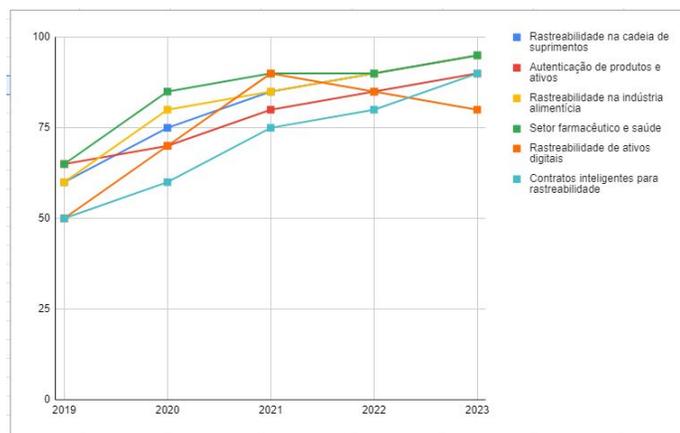


Figura 3. Buscas pelas Categorias

Essas tendências refletem a crescente adoção de tecnologias de rastreabilidade e a demanda por transparência e segurança em várias indústrias nos últimos anos.

VI. DISCUSSÃO

Este mapeamento sistemático proporciona uma visão abrangente das tendências atuais na pesquisa sobre rastreabilidade e Blockchain, destacando não apenas os avanços já realizados, mas também apontando para futuras

oportunidades de inovação. A partir da análise dos artigos escolhidos, se buscou responder às duas questões de pesquisa propostas no trabalho.

A. RQ1 - Como Blockchain tem sido usada para fornecer suporte a soluções de Rastreabilidade?

1) **Rastreabilidade na Cadeia de Suprimentos (Registro Distribuído e Imutável):** Hasan [7], em seu trabalho, utilizou um contrato inteligente baseado em Blockchain que rastreia peças de reposição desde o seu fabricante até o usuário final. Utilizando a tecnologia Blockchain para estabelecer um sistema de controle de estoque para peças de reposição que é seguro, à prova de violações, rastreável, de fácil acesso, imutável, resistente e digno de confiança. Por sua vez, Valencia [8] utiliza a ferramenta Hyperledger Fabric Blockchain para implementar uma rede de testes composta por dois atores, onde cada ator representa uma entidade participante distinta no ambiente simulado. Essas entidades interagem e trocam informações dentro da rede blockchain para testar a funcionalidade e a segurança do sistema, simulando cenários reais de transações e validações em um ambiente controlado. Esta proposta resulta em informações que permanecem inalteráveis em cadeias de blocos, permitindo verificar facilmente o status de um produto em várias etapas da cadeia sem recorrer a terceiros. Caro e Giaffreda [9] propuseram uma estrutura em camadas que utiliza Blockchain e IoT para garantir transparência, auditabilidade e imutabilidade dos registros em um ambiente não confiável. Essa abordagem se torna especialmente relevante em contextos onde a segurança e a confiabilidade dos dados são essenciais, como em redes industriais e cadeias de suprimento, demonstrando o papel de Blockchain na rastreabilidade e na proteção de transações.

2) **Autenticação de Produtos e Ativos (Criptografia e Assinatura Digitais):** Loke [10], em seu estudo sobre autenticação de produtos e ativos, descreve como um sistema criptográfico que foi integrado para prevenir a entrada de localizações fraudulentas na blockchain. Esse sistema oferece uma maior segurança na rastreabilidade, já que a cadeia de blocos fornece um registro imutável e verificável das transações, permitindo a verificação precisa das origens e movimentações dos produtos. Além disso, o autor detalhou uma descrição de trabalho mais aprofundada para futuras análises e referência adicional. A combinação de criptografia e assinaturas digitais, junto com a autenticação multifator, é essencial para garantir a autenticidade e rastreabilidade de

produtos e ativos dentro de uma rede Blockchain, tornando a falsificação muito difícil, como defende Blagoev [11].

3) Rastreabilidade na Indústria Alimentícia (Smart Contracts): O uso de contratos inteligentes em Blockchain para rastreabilidade na indústria alimentícia tem sido discutido por vários autores. Gaudio [12] propõe que esses contratos automatizem as transações e validações, enquanto outros estudiosos apontam que a imutabilidade e transparência proporcionadas pelo Blockchain aumentam a segurança no monitoramento de produtos alimentares. Esses contratos garantem que os alimentos possam ser rastreados desde a fazenda até o consumidor final, proporcionando uma trilha auditável e reduzindo o risco de fraudes ou manipulações ao longo da cadeia de suprimentos. Silva [13] descreve o uso de dados de uma usina em uma cadeia de suprimentos sustentável para criar um contrato inteligente em Solidity 0.4.6, implementado em uma rede Blockchain Ethereum privada, utilizando a plataforma de desenvolvimento Remix. Esse contrato inteligente automatiza e registra todas as etapas do processo de produção alimentícia, garantindo a rastreabilidade dos produtos desde a origem até o consumidor final, sem a necessidade de intermediários. A aplicação de smart contracts na indústria alimentícia facilita o monitoramento de toda a cadeia de suprimentos em tempo real, assegurando que os produtos atendam aos padrões de qualidade e que todas as transações sejam transparentes e seguras.

4) Setor Farmacêutico e Saúde (Consensos Distribuídos): Diversos estudos destacam o papel de Blockchain e consensos distribuídos na rastreabilidade do setor farmacêutico e de saúde. Pham [14] enfatiza que essa abordagem promove a confiança entre os participantes da rede, enquanto outros autores mostram como isso ajuda a prevenir fraudes e garantir que os medicamentos sejam rastreados de forma eficaz ao longo da cadeia de suprimentos. Ao aplicar consensos distribuídos, as empresas farmacêuticas podem melhorar significativamente a transparência e a segurança dos produtos, criando uma trilha auditável que permite rastrear e verificar cada etapa do processo, desde a produção até o consumidor final.

5) Rastreabilidade de Produtos Digitais (Integração de Dados): Buttafoco [15] destaca no seu trabalho que a utilização de IA, IoT e oráculos em contratos inteligentes pela Devoleum representa uma abordagem inovadora para melhorar a eficiência e a confiabilidade na rastreabilidade de produtos digitais. A Devoleum, uma plataforma baseada em blockchain, é projetada especificamente para otimizar a transparência na cadeia de suprimentos, permitindo que produtores, distribuidores e consumidores acompanhem em tempo real o ciclo de vida dos produtos, desde a origem até o destino final. Os oráculos desempenham um papel essencial nessa estrutura, atuando como pontes que conectam os contratos inteligentes do blockchain a fontes de dados

externas, como sensores IoT, registros de transporte e bases de dados de mercado. Com isso, a Devoleum pode capturar e validar dados do mundo físico e digital, garantindo que os contratos inteligentes tomem decisões informadas e automáticas com base em informações confiáveis. Essa integração tecnológica aumenta a precisão na rastreabilidade e previne fraudes, uma vez que cada transação e interação é registrada de forma imutável e acessível a todos os participantes da rede. Por exemplo, a Devoleum garante que qualquer modificação nas condições de armazenamento ou transporte de produtos seja registrada automaticamente, assegurando que os produtos digitais sejam autênticos e não adulterados. Dessa forma, a solução proporciona um nível superior de confiança entre todas as partes envolvidas na cadeia de suprimentos, contribuindo para uma melhor gestão de riscos e maior transparência.

6) Contratos Inteligentes para Rastreabilidade (Acesso Controlado e Permissões): Nascimento [16] implementou um sistema chamado DNAT, que permite que terceiros confiáveis verifiquem se um aplicativo está em conformidade com os padrões de privacidade e gerenciamento de dados, utilizando contratos inteligentes. Com essa abordagem baseada em Blockchain, o sistema garante a integridade do aplicativo antes de seu uso, mesmo em situações onde a confidencialidade não é uma prioridade. Nascimento integrou o controle de acesso e permissões por meio de contratos inteligentes, permitindo que as empresas criem um sistema de rastreamento confiável, onde cada interação é registrada e monitorada de forma transparente, aumentando a confiança entre os participantes da rede. Ahmad [17] por sua vez, afirma que a solução de bloqueio inteligente proposta pelos autores representa uma abordagem inovadora para garantir a integridade e autenticidade das evidências no processo forense. Essa solução integra dispositivos IoT, contratos inteligentes de Blockchain e uma interface Web flexível, permitindo acesso controlado aos dados das evidências. Assim, a rastreabilidade das informações é assegurada, uma vez que cada acesso e modificação é registrado de forma imutável na Blockchain. Essa combinação de tecnologias não apenas aumenta a segurança dos dados, mas também proporciona uma trilha auditável que garante que apenas usuários autorizados possam acessar ou manipular informações sensíveis, reforçando a confiança no processo forense.

B. RQ2 - Quais são os Benefícios para Rastreabilidade com uso de Blockchain?

1) Rastreabilidade na Cadeia de Suprimentos (Transparência e Visibilidade): Hasan [7] afirma que, no seu trabalho a aplicação da tecnologia Blockchain na gestão de peças sobressalentes oferece várias vantagens significativas. Ao registrar permanentemente todas as atividades relacionadas às peças em um livro distribuído, a integridade e a inviolabilidade dos dados são garantidas. Isso permite rastrear todos os movimentos, modificações

e restaurações das peças ao longo de sua vida útil, proporcionando assim maior transparência e visibilidade em toda a cadeia de suprimentos. Essa visibilidade melhora a tomada de decisões, permite uma resposta mais rápida a problemas e facilita a conformidade com regulamentações. Além disso, a transparência proporcionada pela Blockchain reduz o risco de fraudes e erros, uma vez que todas as partes interessadas têm acesso às mesmas informações em tempo real, criando um ambiente de confiança entre os diferentes elos da cadeia de suprimentos. Valencia [8], em seu trabalho, utiliza a tecnologia Blockchain na cadeia de abastecimento para melhorar o nível de garantia de integridade dos dados. Essa abordagem não apenas aumenta a transparência dos dados em todo o processo, mas também resulta em maior segurança e confiabilidade. Com a Blockchain, as partes interessadas podem acessar informações em tempo real, o que permite rastrear cada etapa do processo de forma precisa, reduzindo o risco de fraudes e erros. Além disso, essa transparência aprimorada facilita a colaboração entre os elos da cadeia de suprimentos, permitindo uma melhor gestão de riscos e uma resposta mais ágil a qualquer problema que possa surgir.

2) Autenticação de Produtos e Ativos (Autenticidade e Integridade): Loke [10] enfatiza a importância crítica da integridade dos dados em sistemas baseados em Blockchain, especialmente em aplicações como rastreabilidade de alimentos. Ao reconhecer a imutabilidade dos dados na Blockchain, o autor destaca que essa característica é fundamental para garantir a autenticidade e a confiabilidade das informações. No entanto, Loke também desafia a suposição comum de que a simples implementação de tecnologia Blockchain é suficiente para assegurar a confiabilidade do sistema, apontando para a necessidade de um rigoroso controle de qualidade dos dados de entrada. Essa análise ressalta a complexidade dos desafios enfrentados ao implementar soluções Blockchain em cenários do mundo real e enfatiza a necessidade contínua de vigilância contra fraudes e inconsistências nos dados. Portanto, a integração de Blockchain em sistemas de rastreabilidade não só melhora a autenticidade e a integridade das informações, mas também requer práticas complementares de monitoramento e controle de qualidade para garantir resultados eficazes no mundo real.

3) Rastreabilidade na Indústria Alimentícia (Segurança Alimentar e Rastreabilidade): Muralikumar [18] mostrou no seu trabalho que os sistemas de rastreamento de alimentos têm o potencial de promover a sustentabilidade em diversos aspectos, desde a conscientização dos consumidores até a gestão responsável dos recursos naturais e o fortalecimento das comunidades locais. Ao integrar a tecnologia Blockchain, esses sistemas não apenas garantem a imutabilidade e a transparência das informações, mas também proporcionam uma rastreabilidade precisa e em tempo real dos produtos alimentícios. Isso é fundamental para a segurança alimentar, pois permite identificar rapidamente a origem e o histórico

dos alimentos, minimizando os riscos de contaminação e fraudes. Além disso, a capacidade de monitorar a cadeia de suprimentos de forma eficiente ajuda a construir a confiança dos consumidores e a promover práticas agrícolas sustentáveis, contribuindo para um sistema alimentar mais seguro e resiliente. Por outro lado, Tsang [19] aponta que a implementação do BIFTS (Blockchain-based Integrated Food Traceability System) no PFSC (Public Food Supply Chain) fortalece a segurança e rastreabilidade de alimentos. O BIFTS utiliza Blockchain para registrar e monitorar, em tempo real, todas as etapas da cadeia de suprimentos, garantindo a qualidade e segurança dos produtos alimentares. No contexto do PFSC, isso permite uma resposta rápida a problemas como contaminações e recalls, aumentando a confiança dos consumidores. A transparência proporcionada pela Blockchain facilita o acesso a informações sobre a origem dos alimentos e promove práticas mais sustentáveis na indústria. Além disso, a capacidade de rastrear cada etapa do processo de produção e distribuição em tempo real facilita a detecção e resposta rápida a problemas de segurança alimentar, como contaminações ou recalls, minimizando o impacto sobre a saúde pública. Essa abordagem fortalece a confiança dos consumidores, que podem verificar a origem e a trajetória dos alimentos, promovendo práticas mais sustentáveis e responsáveis na indústria alimentícia. A transparência inerente à Blockchain assegura que as informações estejam acessíveis a todos os participantes da cadeia, tornando a segurança e a sustentabilidade prioridades mensuráveis e visíveis para o público.

4) Setor Farmacêutico e Saúde (Redução de Fraudes e Falsificações): Chen [20] afirma no seu trabalho que a aplicação da tecnologia Blockchain na indústria farmacêutica representa um avanço significativo na luta contra a falsificação de medicamentos e na garantia da segurança do paciente. Ao registrar todas as informações relevantes na Blockchain e assegurar sua integridade por meio de assinaturas digitais, a tecnologia torna os dados imutáveis e à prova de adulteração. Essa característica permite que terceiros verifiquem a legalidade dos dados a qualquer momento e possibilita o rastreamento completo do histórico de produção dos medicamentos, desde sua origem até a chegada ao consumidor final. Assim, a Blockchain não apenas combate a falsificação de medicamentos, mas também promove transparência e confiança na cadeia de suprimentos farmacêutica. Além disso, a rastreabilidade proporcionada pela tecnologia permite que as autoridades de saúde identifiquem rapidamente qualquer lote suspeito, facilitando ações de recall e proteção dos consumidores, o que é essencial para a integridade do sistema de saúde. Runzel [21] observa que o uso da tecnologia Blockchain no sistema de rastreabilidade do mel traz vantagens substanciais, especialmente em relação à segurança alimentar. Ao permitir o rastreamento eficaz dos alimentos até sua origem, a Blockchain fornece uma camada adicional de segurança, mitigando os riscos associados ao consumo de mel fraudulento. Além disso, ao aumentar a responsabilização

dos produtores, o sistema incentiva práticas de produção mais éticas e transparentes, beneficiando a sociedade como um todo. Essa abordagem ajuda a reduzir perdas econômicas decorrentes da venda de produtos falsificados, promovendo um ambiente de maior confiança na cadeia de suprimentos. Misra [22] destaca que a integração da tecnologia Blockchain com sistemas de visão computacional representa uma abordagem poderosa para melhorar a rastreabilidade e autenticidade dos produtos ao longo da cadeia de suprimentos. Ao capturar e armazenar dados precisos sobre cada produto, a Blockchain permite um rastreamento eficaz, evitando desvios e fornecendo transparência em todos os estágios da produção e distribuição. Além disso, ao permitir a validação dos produtos por lojas de varejo e consumidores por meio de aplicações de marcas, a Blockchain reforça a confiabilidade dos produtos, reduzindo o risco de falsificações e protegendo os interesses dos consumidores. Essa abordagem não apenas melhora a segurança da cadeia de suprimentos, mas também promove a confiança do consumidor e a integridade do mercado. Com a rastreabilidade aprimorada proporcionada pela tecnologia Blockchain, os consumidores tem maior confiança na autenticidade dos produtos que adquirem, contribuindo para um ambiente de compra mais seguro e confiável.

5) **Rastreabilidade de Produtos Digitais (Eficiência e Redução de Custos):** Heitlinger [23] demonstra que a tecnologia Blockchain tem um potencial transformador ao promover a autonomia dos sistemas naturais e a proteção dos ecossistemas. Ao fornecer uma plataforma para a autogestão e conservação de áreas como florestas, a Blockchain oferece uma nova perspectiva sobre o uso de tecnologias digitais para promover a sustentabilidade ambiental. Além disso, a rastreabilidade proporcionada pela Blockchain permite um controle mais eficiente dos recursos, reduzindo custos operacionais e melhorando a transparência das transações. Essa abordagem não só beneficia o meio ambiente, mas também traz eficiência à gestão de produtos digitais.

6) **Contratos Inteligentes para Rastreabilidade (Conformidade Regulatória):** Akello [24] propôs o uso de Blockchain para aprimorar os processos de investigação criminal de crimes relacionados com armas de fogo. Uma das principais vantagens é a capacidade de rastreamento transparente de suspeitos e armas ao longo de suas cadeias de custódia. Cada transação, desde a fabricação até a posse e uso, pode ser registrada de forma imutável e transparente em um *ledger* distribuído. Essa abordagem não apenas simplifica a investigação, mas também fortalece a integridade das evidências coletadas, fornecendo um registro confiável e auditável de todos os eventos relacionados ao crime. Além disso, a implementação de contratos inteligentes pode garantir que as normas e regulamentações sejam cumpridas automaticamente, aumentando a conformidade regulatória na cadeia de custódia. Dessa forma, a rastreabilidade proporcionada pela Blockchain, aliada à automação dos

contratos inteligentes, assegura que todos os processos estejam em conformidade com as exigências legais e regulatórias, reduzindo riscos e aumentando a responsabilidade. Dasaklis [25] afirma no seu trabalho que, a integração da tecnologia Blockchain na gestão da cadeia de suprimentos auxilia as empresas a atenderem aos requisitos de due diligence [26] regulatória de forma mais eficaz. Os registros imutáveis e verificáveis garantem a conformidade com normas e regulamentos, reduzindo o risco de fraudes e práticas antiéticas. Além disso, a transparência proporcionada pela Blockchain permite uma auditoria mais precisa e eficiente por parte das autoridades reguladoras, contribuindo para a integridade do sistema como um todo. Os contratos inteligentes, por sua vez, automatizam a execução de regras e regulamentos, assegurando que todas as operações estejam em conformidade sem a necessidade de supervisão manual constante. Com essa combinação, as empresas não apenas garantem a conformidade regulatória, mas também melhoram a eficiência operacional, reduzindo custos associados a auditorias e revisões manuais.

VII. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Através da análise dos resultados deste trabalho, é possível afirmar que a tecnologia Blockchain pode superar as deficiências existentes em sistemas atuais de rastreabilidade, oferecendo uma infraestrutura robusta e descentralizada para registrar e validar transações ao longo da cadeia de suprimentos. Pode-se afirmar que a utilização de Blockchain na rastreabilidade de ativos e produtos proporciona um avanço significativo em termos de transparência, segurança e eficiência. A capacidade de registrar transações de forma imutável e verificar a autenticidade dos produtos em tempo real apresenta benefícios substanciais para diversas indústrias.

Apesar dos resultados promissores, este estudo apresenta algumas limitações. A pesquisa foi conduzida refletindo tendências contemporâneas, e algumas áreas ainda necessitam de avanços adicionais. A interoperabilidade entre diferentes sistemas e a integração com infraestruturas existentes são desafios que precisam ser abordados, segundo autor [27] informa que nos últimos anos, o padrão GS1 de rastreabilidade tem se consolidado como uma tendência crescente, desempenhando um papel crucial na promoção da interoperabilidade entre sistemas em distintos domínios da Internet das Coisas (IoT). Futuras pesquisas devem focar no desenvolvimento de novas soluções tecnológicas para superar essas barreiras.

Além disso, a evolução contínua das aplicações de Blockchain promete impactar positivamente a transparência, segurança e eficiência das cadeias produtivas. Recomenda-se que futuros estudos explorem casos de uso específicos em diferentes setores industriais, investigando como as características únicas de Blockchain podem ser aplicadas para melhorar a visibilidade e a autenticidade nas cadeias de suprimentos em cenários específicos.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Swan, *Blockchain: Blueprint for a new economy*. "O'Reilly Media, Inc.", 2015.
- [2] V. R. Chicarino, E. F. Jesus, C. V. de Albuquerque, and A. A. d. A. Rocha, "Uso de blockchain para privacidade e segurança em internet das coisas," *Sociedade Brasileira de Computação*, 2017.
- [3] T. Mitani and A. Otsuka, "Traceability in permissioned blockchain," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 21573–21588, 2020.
- [4] L. Ribeiro and O. Mendizabal, "Introdução à blockchain e contratos inteligentes," tech. rep., 2021.
- [5] R. A. Gastaldi, "Rs/at: uma abordagem para aplicação de análise temática em revisão sistemática," 2016.
- [6] R. de Almeida Falbo, "Mapeamento sistemático," *Retrieved October*, vol. 7, 2018.
- [7] H. R. Hasan, K. Salah, R. Jayaraman, R. W. Ahmad, I. Yaqoob, and M. Omar, "Blockchain-based solution for the traceability of spare parts in manufacturing," *Ieee Access*, vol. 8, pp. 100308–100322, 2020.
- [8] C. Valencia-Payan, J. F. Grass-Ramírez, G. Ramirez-Gonzalez, and J. C. Corrales, "A smart contract for coffee transport and storage with data validation," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 37857–37869, 2022.
- [9] M. P. Caro, M. S. Ali, M. Vecchio, and R. Giaffreda, "Blockchain-based traceability in agri-food supply chain management: A practical implementation," in *2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture-Tuscany (IOT Tuscany)*, pp. 1–4, IEEE, 2018.
- [10] K. S. Loke and O. C. Ann, "Food traceability and prevention of location fraud using blockchain," in *2020 IEEE 8th R10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*, pp. 1–5, IEEE, 2020.
- [11] I. Blagoev and T. Atanasova, "Problems of ensuring data security in digital management of processes in animal husbandry," in *2022 8th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*, pp. 1–4, IEEE, 2022.
- [12] M. T. Gaudio, S. Chakraborty, and S. Curcio, "Agri-food supply-chain traceability: a multi-layered solution," in *2022 IEEE Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, Intl Conf on Cloud and Big Data Computing, Intl Conf on Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/CBDCCom/CyberSciTech)*, pp. 1–5, IEEE, 2022.
- [13] F. SILVA, A. d. CASTRO, F. da SILVA, and I. YANO, "Uso de blockchain para registro de dados de cadeia de suprimentos verde da indústria sucroenergética," 2020.
- [14] H. Pham, "The impact of blockchain technology on the improvement of food supply chain management: Transparency and traceability: A case study of walmart and atria," 2018.
- [15] O. A. BUTTAFOCO, "Emerging solutions for the improvement of food traceability in the eu: Examining the use of blockchain technology for tracing extra virgin olive oil (evoo)."
- [16] J. R. Nascimento Jr, J. B. Nunes, E. L. Falcão, L. Sampaio, and A. Brito, "On the tracking of sensitive data and confidential executions," in *Proceedings of the 14th ACM International Conference on Distributed and Event-based Systems*, pp. 51–60, 2020.
- [17] L. Ahmad, S. Khanji, F. Iqbal, and F. Kamoun, "Blockchain-based chain of custody: towards real-time tamper-proof evidence management," in *Proceedings of the 15th international conference on availability, reliability and security*, pp. 1–8, 2020.
- [18] M. D. Muralikumar and B. Nardi, "Addressing limits through tracking food," in *Proceedings of the 2018 Workshop on computing within Limits*, pp. 1–9, 2018.
- [19] Y. P. Tsang, K. L. Choy, C. H. Wu, G. T. S. Ho, and H. Y. Lam, "Blockchain-driven iot for food traceability with an integrated consensus mechanism," *IEEE access*, vol. 7, pp. 129000–129017, 2019.
- [20] C.-L. Chen, Y.-Y. Deng, C.-T. Li, S. Zhu, Y.-J. Chiu, and P.-Z. Chen, "An iot-based traceable drug anti-counterfeiting management system," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 224532–224548, 2020.
- [21] M. A. Rünzel, E. E. Hassler, R. E. Rogers, G. Formato, and J. A. Cazier, "Designing a smart honey supply chain for sustainable development," *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 10, no. 4, pp. 69–78, 2021.
- [22] N. N. Misra, Y. Dixit, A. Al-Mallahi, M. S. Bhullar, R. Upadhyay, and A. Martynenko, "Iot, big data, and artificial intelligence in agriculture and food industry," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 9, pp. 6305–6324, 2022.
- [23] S. Heitlinger, L. Houston, A. Taylor, and R. Catlow, "Algorithmic food justice: Co-designing more-than-human blockchain futures for the food commons," in *Proceedings of the 2021 CHI conference on human factors in computing systems*, pp. 1–17, 2021.
- [24] P. Akello, N. Vemprala, N. Lang Beebe, and K.-K. Raymond Choo, "Blockchain use case in ballistics and crime gun tracing and intelligence: Toward overcoming gun violence," *ACM Transactions on Management Information Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 1–26, 2023.
- [25] T. K. Dasaklis, T. G. Voutsinas, G. T. Tsoulfas, and F. Casino, "A systematic literature review of blockchain-enabled supply chain traceability implementations," *Sustainability*, vol. 14, no. 4, p. 2439, 2022.
- [26] P. Howson, *Due diligence: The critical stage in mergers and acquisitions*. Routledge, 2017.
- [27] M. C. Pedroso and R. Zwicker, "Gestão da informação de produtos: base para os relacionamentos na cadeia de suprimentos," *JISTEM-Journal of Information Systems and Technology Management*, vol. 5, pp. 109–134, 2008.