

DESAFIOS DE ESCALABILIDADE, LATÊNCIA E CUSTO TRANSACIONAL NAS CRIPTOMOEDAS: BITCOIN, ETHEREUM, CARDANO E SOLANA - UMA REVISÃO INTEGRATIVA DE LITERATURA

Vivian Almeida Silva
Graduando em Sistemas de Informação – Uni-FACEF
vivian.almeida28@yahoo.com.br

Profa. Me. Débora Pelicano Diniz
Docente do Departamento de Computação – Uni-FACEF
depniz@gmail.com

Resumo

Este artigo apresenta uma revisão integrativa de literatura sobre os conceitos importantes relacionados ao *blockchain* e os principais desafios enfrentados por quatro das principais criptomoedas baseadas em *blockchain*: Bitcoin, Ethereum, Cardano e Solana. A análise concentra-se em três aspectos centrais para a adoção em larga escala dessas tecnologias: escalabilidade, latência e custo transacional. Para tanto, foi conduzida uma busca sistemática no *Google Scholar* e em materiais técnicos especializados, abrangendo publicações entre 2015 e 2025, com critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos. O estudo evidencia que, embora o Bitcoin seja a rede mais consolidada e segura, sua baixa capacidade de processamento e altas taxas limitam sua utilização cotidiana. O Ethereum, após a migração para *Proof of stake*, avançou em desempenho e eficiência, mas ainda enfrenta custos elevados em períodos de alta demanda. O Cardano destaca-se por sua proposta científica e por taxas reduzidas, embora sua adoção seja mais restrita. Já a Solana apresenta alto desempenho e custos mínimos, mas enfrenta críticas quanto à descentralização e estabilidade. Os resultados apontam para a conclusão de que não existe solução definitiva para o chamado “trilema da *blockchain*”, e que cada criptomoeda busca equilibrar de maneira distinta os fatores de segurança, escalabilidade e descentralização.

Palavras-chave: *blockchain*. criptomoedas. custo transacional. escalabilidade. latência.

Abstract

This article presents an integrative literature review on important blockchain-related concepts and the main challenges faced by four of the leading blockchain-based cryptocurrencies: Bitcoin, Ethereum, Cardano, and Solana. The analysis focuses on three key aspects for the large-scale adoption of these technologies: scalability, latency, and transaction costs. To this end, a systematic search was conducted on Google Scholar and specialized technical materials, covering publications between 2015 and 2025, with previously established inclusion and exclusion criteria. The study highlights that, although Bitcoin is the most established and secure network, its low processing capacity and high fees limit its everyday use. Ethereum, after migrating to Proof of stake, has improved in performance and efficiency, but still faces high costs during periods of high demand. Cardano stands out for its scientific proposal and low

fees, although its adoption is more limited. Solana, on the other hand, offers high performance and minimal costs, but faces criticism regarding its decentralization and stability. The results point to the conclusion that there is no definitive solution to the so-called “Blockchain trilemma,” and that each cryptocurrency seeks to balance the factors of security, scalability, and decentralization differently.

Keywords: blockchain. cryptocurrencies. latency. scalability. transaction cost.

1 Introdução

O avanço acelerado das tecnologias digitais tem impulsionado transformações significativas em diversos setores da sociedade, promovendo mudanças nos modelos de negócio, nas relações econômicas e na gestão de dados. Neste contexto, a tecnologia *blockchain* surge como uma das inovações mais promissoras da atualidade, sendo inicialmente reconhecida como a base para funcionamento das criptomoedas, especialmente o Bitcoin. Com o passar dos anos, seu potencial extrapolou o setor financeiro, sendo amplamente explorado em diferentes áreas, como saúde, logística, educação, indústria, governo e segurança da informação.

A *blockchain* é um sistema distribuído, descentralizado e imutável, que permite o registro seguro e transparente de transações e informações sem a necessidade de intermediários. Por meio de algoritmos criptográficos e mecanismos de consenso, essa tecnologia assegura que os dados sejam registrados de forma permanente e auditável, promovendo maior confiabilidade e segurança para os participantes da rede. Esse modelo rompe paradigmas tradicionais de centralização da informação, promovendo maior autonomia, rastreabilidade e transparência nos registros digitais.

Atualmente, o uso da *blockchain* tem se expandido para aplicações que vão além das transações financeiras, incluindo registros acadêmicos, contratos inteligentes, cadeia de suprimentos, Internet das Coisas (IoT), certificações digitais, auditoria de conformidade com legislações de proteção de dados, e até sistemas eleitorais. Essa versatilidade é impulsionada pela capacidade da *blockchain* de garantir a integridade, a autenticidade e a transparência dos dados, atributos cada vez mais exigidos na sociedade digital contemporânea.

Apesar de seus benefícios, a adoção da *blockchain* ainda enfrenta desafios técnicos, operacionais e regulatórios. Questões como escalabilidade, consumo energético, privacidade, custo de transações e integração com sistemas legados são constantemente discutidos pela comunidade acadêmica e pelas organizações que desejam implementar essa tecnologia. Além disso, existem diferentes modelos de *blockchain* — públicas e privadas —, cujas características técnicas e operacionais devem ser cuidadosamente analisadas conforme a finalidade de uso.

Diante da crescente relevância e da ampla gama de aplicações da *blockchain*, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão integrativa de literatura sobre os conceitos importante relacionados ao *blockchain* e os desafios de escalabilidade, latência e custo transacional encontrados em criptomoedas como Bitcoin, Ethereum, Cardano e Solana, analisando o desempenho dessas tecnologias diante dos desafios propostos, considerando suas especificações técnicas.

Para atingir o objetivo proposto, o artigo foi estruturado da seguinte forma: na Introdução, realizou-se uma breve contextualização do problema, destacando o papel da tecnologia *blockchain* na sociedade contemporânea, bem como os desafios que motivaram a realização da pesquisa. Ainda nessa seção, foi explicitado o objetivo central do estudo e a justificativa de sua relevância acadêmica e prática.

Na Seção 2, apresentam-se os principais conceitos relacionados à *Blockchain*, oferecendo uma visão geral de seus fundamentos técnicos e teóricos, como a descentralização, o funcionamento do livro-razão distribuído, os mecanismos de consenso e a distinção entre *blockchains* públicas e privadas. Essa base conceitual é necessária para compreender os aspectos analisados ao longo do artigo.

Na Seção 3, é descrita a Metodologia adotada, que se caracteriza como uma revisão integrativa de literatura. São detalhados os procedimentos de busca, os critérios de inclusão e exclusão de trabalhos, o recorte temporal considerado e as fontes utilizadas para compor o corpus de análise, assegurando a validade científica da pesquisa.

Na Seção 4, são aprofundadas as discussões sobre as Características da *Blockchain*, evidenciando seus diferenciais em termos de transparência, segurança, imutabilidade e escalabilidade, bem como os limites e dilemas associados ao uso de mecanismos como *Proof of work (PoW)* e *Proof of stake (PoS)*.

Na Seção 5, são abordados os principais desafios que limitam a adoção em larga escala das criptomoedas. Essa seção é subdividida em três partes: Escalabilidade, que analisa a capacidade de processamento das redes; Latência, que trata do tempo de confirmação das transações; e Custo transacional, que discute as taxas cobradas e seus impactos na usabilidade cotidiana.

Na Seção 6, é realizada a Análise Comparativa entre Bitcoin, Ethereum, Cardano e Solana, avaliando como cada uma dessas redes lida com os três desafios centrais. São discutidas suas vantagens e limitações, com apoio de tabelas e quadros que sintetizam os resultados, além de um debate sobre o posicionamento das criptomoedas diante do chamado trilema da *blockchain*.

Por fim, na Conclusão, apresentam-se as principais contribuições do estudo, reforçando a inexistência de uma solução única para o trilema e destacando como cada rede busca equilibrar segurança, descentralização e escalabilidade de maneira distinta. Também são apontadas as lacunas identificadas na literatura e sugeridas possíveis direções para pesquisas futuras, como a integração da *blockchain* com outras tecnologias emergentes e a análise de seu impacto socioeconômico.

2 Metodologia

A revisão integrativa corresponde a um método de pesquisa cuja abordagem tem como objetivo facilitar e melhorar a coleta, extração, análise e síntese de dados. A metodologia adotada fundamenta-se na atualização do modelo de revisão integrativa proposta por Whittemore e Knafl (2005). A revisão integrativa possibilita reunir, analisar e sintetizar resultados de pesquisas teóricas e empíricas sobre determinado tema, proporcionando uma compreensão abrangente e reflexiva do fenômeno investigado, adotando procedimentos metodológicos claros e que podem ser reproduzidos.

Para a primeira etapa proposta por Whittemore e Knafl (2005), que é a definição do problema de pesquisa, foram definidas as seguintes perguntas: Quais conceitos são importantes à respeito de *blockchain*? Quais são os principais desafios relacionados à escalabilidade, à latência e ao custo transacional em criptomoedas baseadas em *blockchain*? Como Bitcoin, Ethereum, Cardano e Solana têm buscado enfrentar esses desafios?

A busca na literatura foi conduzida prioritariamente na base *Google Scholar*, reconhecida como uma das principais fontes de acesso aberto a publicações científicas. Para o levantamento inicial, foram utilizados os descritores “*blockchain* escalabilidade”, “*blockchain* latência” e “*blockchain* custo transacional”, que retornaram aproximadamente 23.500 resultados. Em seguida, a busca foi refinada por criptomoeda específica, resultando em:

- Bitcoin: cerca de 19.632 publicações;
- Ethereum: cerca de 18.739 publicações;
- Cardano: aproximadamente 1.459 publicações;
- Solana: número reduzido de publicações (1.837), evidenciando lacuna de estudos recentes.

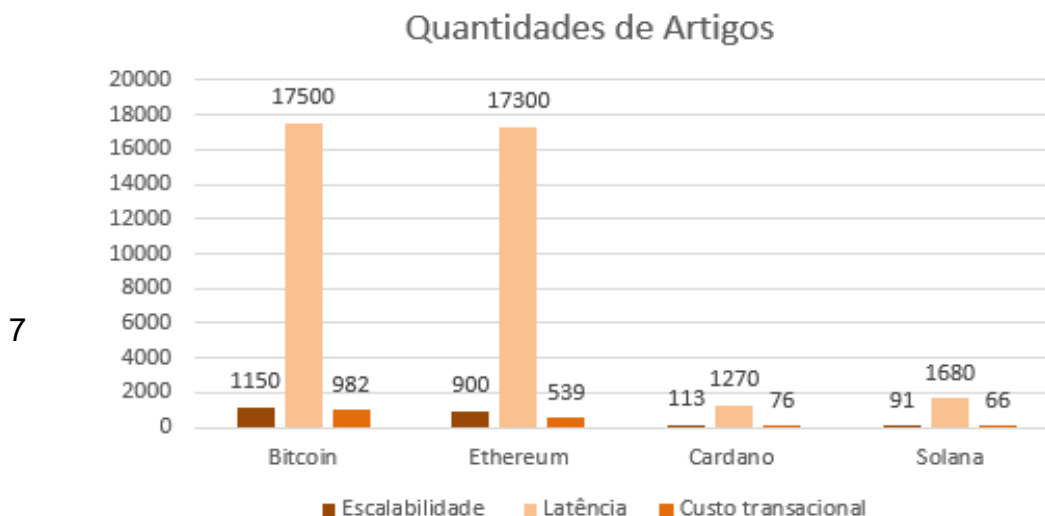
Os resultados estão apresentados no Gráfico 1, permitindo visualizar a diferença entre os resultados encontrados entre as criptomoedas analisadas. Essa diferença de volume foi considerada na seleção final dos artigos, evidenciando a importância de equilibrar a análise entre redes consolidadas e emergentes (Bitcoin e Ethereum) e aquelas com menor representatividade acadêmica (Cardano e Solana).

A busca foi delimitada ao período de 2015 a 2025, justificando-se pela evolução recente da tecnologia *blockchain*, cujo desenvolvimento mais acelerado ocorreu a partir da segunda metade da década de 2010, com o crescimento das criptomoedas de segunda e terceira geração.

Como critério de inclusão, foram selecionados artigos revisados no *Google Scholar*, que apresentassem análises ou discussões relacionadas aos desafios de escalabilidade, latência e custo transacional. Também foram incluídos sites com foco em atualizações do mercado de criptoativos, dissertações e artigos que apresentaram uma análise comparativa entre os três desafios.

Como critérios de exclusão, foram desconsideradas publicações duplicadas, trabalhos sem rigor científico, artigos opinativos ou que não tratassem especificamente dos descritores definidos.

Gráfico 1 Quantidade de artigos por criptomoedas



Fonte: A autora

A análise dos dados coletados foi realizada por meio da análise de conteúdo, buscando identificar categorias temáticas relevantes, conceitos principais, mecanismos de funcionamento e comparações entre os desafios de escalabilidade, latência e custo transacional em criptomoedas como Bitcoin, Ethereum, Cardano e Solana.

Seguindo a metodologia proposta por Whitemore e Knafl (2005), foram selecionadas 12 obras entre revisões e artigos do Google Scholar. Além desses artigos, a coleta das informações foi complementada pelo livro “*Blockchain Basics*” (Drescher, 2017) e o curso de Certificação CCA de Criptoativos da plataforma Blocktrends. Todas as obras utilizadas para a realização da revisão integrativa de literatura estão apresentadas no Quadro 1.

A seguir apresentam-se os conceitos e análises realizadas a partir da revisão integrativa de literatura.

3 Blockchain

A *blockchain* é uma tecnologia que permite a criação de registros imutáveis de transações digitais, distribuídos em uma rede descentralizada. Segundo Drescher (2017), a *blockchain* pode ser compreendida como um sistema estruturado em blocos interligados, onde cada bloco contém um conjunto de transações validadas e um *hash* que o conecta ao bloco anterior. Esse mecanismo garante transparência, integridade e segurança, tornando a tecnologia adequada para diversos tipos de aplicações.

A tecnologia teve suas origens com o movimento Cypherpunks, cujos participantes promoveram o uso de criptografia e privacidade, além de ser uma crítica social que defendia a descentralização do governo sobre as transações financeiras (Blocktrends, 2025). Entre os diversos ativos que atuam na *blockchain*, o Bitcoin, criado por Satoshi Nakamoto em 2008, também surgiu como uma alternativa descentralizada aos sistemas financeiros tradicionais (Nakamoto, 2008). No entanto,

sua aplicabilidade se expandiu para diversos setores, incluindo contratos inteligentes, identidade digital, votação eletrônica, gestão de cadeias de suprimentos e certificação de documentos (Swan, 2015).

Quadro 1 Obras utilizadas na revisão integrativa de literatura

Obra Literária	Autor(es)	Assunto	Ano
<i>Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System</i>	Satoshi Nakamoto	Proposta original do Bitcoin e mecanismo <i>Proof of work</i>	2008
<i>Mastering Bitcoin</i>	Andreas Antonopoulos	Fundamentos técnicos e sociais do Bitcoin	2017
<i>Blockchain: Blueprint for a New Economy</i>	Melanie Swan	Conceitos e aplicações de <i>blockchain</i> em diferentes setores	2015
<i>Blockchain Basics: A Non-Technical Introduction in 25 Steps</i>	Daniel Drescher	Estrutura e funcionamento básico da <i>blockchain</i>	2017
<i>A Decentralized Scalable Blockchain via Sharding</i>	Vukolić, M.	Proposta de escalabilidade por fragmentação (<i>sharding</i>)	2017
<i>Blockchain Challenges and Opportunities: A Survey</i>	Zheng, Z. et al.	Levantamento dos principais desafios e oportunidades da <i>blockchain</i>	2017
<i>Blockchain Consensus: An Analysis of Proof-of-Stake Protocols</i>	Saleh, F.	Estudo sobre <i>Proof of stake</i> e impactos em eficiência	2021
<i>Blockchain Scalability and its Foundations in Distributed Systems</i>	Sabry, M.; Elgamal, T.	Análise de escalabilidade e latência, com destaque para Solana	2020
<i>Aplicações de Blockchain no Setor Público</i>	Silva, J.; Marques, A.	Estudo sobre <i>blockchains</i> privadas e aplicações institucionais	2021
<i>Survey on Security and Privacy Issues of Blockchain Technology</i>	Conti, M. et al.	Análise de segurança, privacidade e desempenho em <i>blockchains</i>	2018
<i>Cardano Settlement Layer: Technical Report</i>	Hoskinson, C.; IOHK Team	Documento técnico sobre a <i>blockchain</i> Cardano e o protocolo Ouroboros	2017
<i>Ethereum White Paper</i>	Buterin, V.	Proposta original do Ethereum e contratos inteligentes	2015

Fonte: A autora

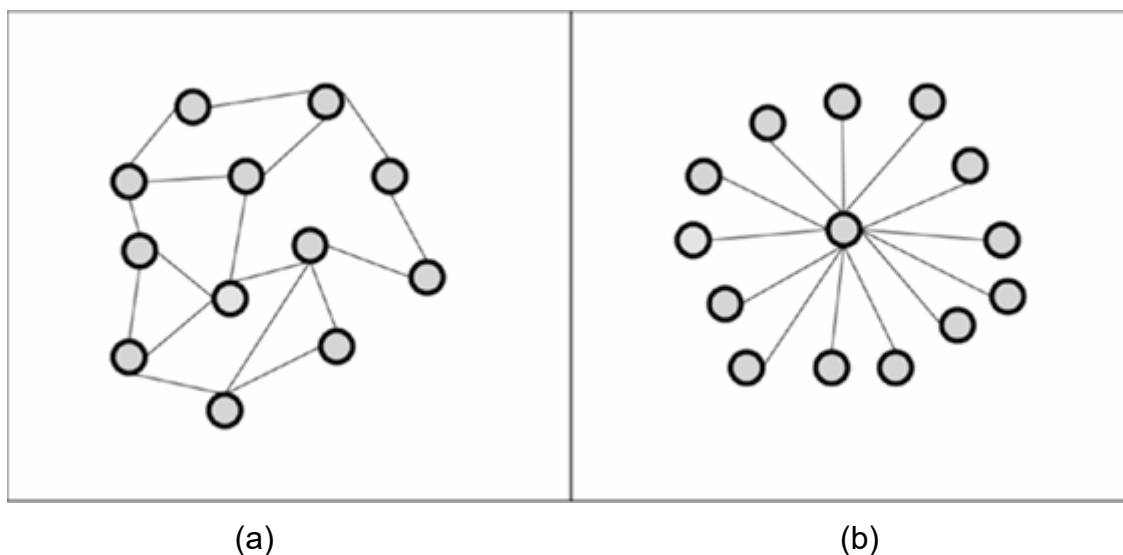
3.1 Características da *Blockchain*

Um dos principais diferenciais da *blockchain* é a descentralização, ou seja, a ausência de uma autoridade central que controle todas as transações. Diferente dos modelos tradicionais, nos quais bancos, empresas ou governos são responsáveis pelo armazenamento e validação de dados, a *blockchain* distribui essas responsabilidades entre os próprios participantes da rede (Antonopoulos, 2017).

Esse modelo descentralizado torna o sistema mais resistente a fraudes e ataques cibernéticos, pois não há um ponto central vulnerável a falhas. Além disso, a tecnologia proporciona maior transparência e confiabilidade, uma vez que todas as transações registradas podem ser verificadas publicamente e não podem ser alteradas de modo retroativo (Zheng et al., 2017).

Na Figura 1 os círculos representam nós e as linhas fazem referência às conexões entre eles. Observa-se que na Figura 1a os nós estão conectados entre si sem a presença de um intermediário, isto é, um nó central que os conecta. Na Figura 1b observa-se que existe um nó central em que os demais nós estão ligados a ele sem que haja conexão entre os demais. A *blockchain* utiliza a rede descentralizada, melhor representada pela Figura 1a.

Figura 1 Formas de conexões digitais



Fonte: Drescher (2017, p. 11)

3.2 Livro Razão

O livro-razão (*ledger*) é o elemento fundamental da *blockchain*, pois ele armazena todas as transações registradas de forma imutável. Diferente de bancos de dados tradicionais, em que um intermediário central controla os registros, na *blockchain* cada participante da rede valida as transações, garantindo confiabilidade sem necessidade de um intermediário (Drescher, 2017).

A imutabilidade do livro-razão é garantida pelo uso de criptografia e mecanismos de consenso, como *Proof of work* e *Proof of stake*. Esses mecanismos evitam alterações indevidas nas informações, pois qualquer modificação exige a aprovação da maioria da rede, isto é, somente se alguém tiver controle de 51% de toda a rede, o que exige um poder computacional imenso. Isso torna a *blockchain* altamente segura para transações financeiras, registros públicos e documentos digitais (Blocktrends, 2025).

O mecanismo de consenso utilizado em *blockchains* como na do Bitcoin, o *PoW* exige que os participantes (mineradores) resolvam problemas matemáticos complexos para validar transações e adicionar novos blocos à rede. Esse processo

consome grande quantidade de energia e exige alto poder computacional, mas garante segurança ao dificultar ataques de gasto duplo – situação em que um mesmo ativo digital é utilizado mais de uma vez de forma fraudulenta, fazendo com que dados sejam manipulados. (Nakamoto, 2008).

O PoW, popularizado pelo Bitcoin, exige que os mineradores resolvam complexos problemas criptográficos para validar transações e adicionar novos blocos à *blockchain*. Esse processo, conhecido como mineração, demanda um alto poder computacional e, conseqüentemente, um consumo significativo de energia elétrica. Embora o PoW seja amplamente reconhecido por sua robustez e segurança, tornando ataques extremamente caros e difíceis de serem realizados, ele enfrenta desafios consideráveis em termos de escalabilidade e sustentabilidade ambiental. O artigo da UFRJ "(In) eficiência energética das redes *blockchains*: o fim do *proof-of-work*?" (Lins Junior, 2023) destaca que o aumento da dificuldade da mineração e a menor recompensa exigem mais poder computacional, resultando em um aumento geral do consumo elétrico. Isso levanta questões sobre a viabilidade a longo prazo de redes PoW em um cenário de crescente preocupação com o impacto ambiental.

Diferente do PoW, o PoS seleciona validadores de blocos com base na quantidade de criptomoedas que possuem e estão dispostos a apostar na rede ou em alguns casos, por sorteio. Esse método reduz o consumo energético e melhora a escalabilidade da *blockchain* (Buterin, 2020).

Em contraste, o PoS seleciona validadores de blocos com base na quantidade de criptomoedas que possuem e estão dispostos a "apostar" (*stake*) na rede. Esse método reduz drasticamente o consumo energético em comparação com o PoW, pois não exige a resolução de problemas computacionais intensivos. Além da eficiência energética, o PoS geralmente oferece maior escalabilidade, permitindo um maior volume de transações por segundo. Criptomoedas como Ethereum (após a transição para Ethereum), Cardano e Solana utilizam o PoS ou variações dele. O artigo "Desafios de escalabilidade e desempenho da *Blockchain* na cadeia de suprimentos global: uma revisão sistemática da literatura" (PUC Minas, 2023) menciona que, embora o PoS seja mais eficiente que o PoW, o consumo energético continua sendo um desafio para a tecnologia *blockchain* em geral, especialmente em larga escala. No entanto, o PoS também apresenta desafios, como a potencial centralização da riqueza, onde validadores com grandes quantidades de criptomoedas podem ter maior influência na rede.

O PoS tem sido amplamente adotado em redes *blockchain* recentes e em atualizações de sistemas mais antigos. O Ethereum, uma das principais plataformas de contratos inteligentes, migrou do PoW para o PoS em sua atualização denominada Ethereum 2.0, visando melhorar a escalabilidade e reduzir o impacto ambiental de suas operações. Além do Ethereum, diversas outras redes utilizam o PoS como mecanismo de consenso, incluindo Cardano (ADA), Solana (SOL), Polkadot (DOT) e Avalanche (AVAX) (Saleh, 2021).

Embora o PoS apresente vantagens significativas, alguns desafios ainda precisam ser abordados. Um dos principais questionamentos refere-se à concentração de riqueza, já que validadores com grandes quantidades de criptomoedas têm maiores chances de serem selecionados para validar transações. Para se tornar um validador nesse mecanismo de consenso, é necessário possuir 32 ETH, a criptomoeda nativa da rede Ethereum (Investopedia, 2025). Além disso, redes

baseadas em *PoS* precisam garantir mecanismos robustos de segurança para evitar ataques e manipulação da rede (King; Nadal, 2012).

A segurança é um pilar fundamental para qualquer rede *blockchain*. O Bitcoin, com seu mecanismo *PoW*, é considerado uma das redes mais seguras devido ao alto custo computacional necessário para realizar um ataque de 51% (Drescher, 2020). No entanto, essa segurança vem com o ônus do alto consumo de energia. As redes *PoS*, por sua vez, buscam garantir a segurança através de mecanismos de penalização para validadores mal-intencionados e incentivos para o comportamento honesto. Embora o *PoS* seja teoricamente mais vulnerável a ataques de concentração de riqueza, a implementação de designs robustos e a descentralização da participação buscam mitigar esses riscos. O artigo "Contrato inteligente: automação dos acordos digitais na rede *blockchain*" (Rosa; Paim, 2024) destaca a segurança como uma das propriedades da *blockchain*, embora não compare diretamente *PoW* e *PoS* nesse aspecto.

3.3 Arquiteturas *Blockchain*

A *blockchain* pública é acessível a qualquer usuário e não requer permissão para participação na rede. Esse modelo é utilizado por criptomoedas como Bitcoin e Ethereum, permitindo que qualquer pessoa valide transações e contribua para a segurança do sistema. A descentralização é um dos principais benefícios desse tipo de rede, pois elimina intermediários e garante maior resistência à censura (Sabry; Elgamal, 2020).

A *blockchain* privada é restrita a um grupo de participantes autorizados, sendo frequentemente utilizada por empresas e governos devido à necessidade de maior controle e eficiência. Diferentemente das *blockchains* públicas, em que qualquer usuário pode acessar e validar transações, nas privadas o acesso é regulado, garantindo maior privacidade e desempenho otimizado. (Zheng et al., 2017).

Segundo Silva e Marques (2020), *blockchains* privadas são preferidas para aplicações governamentais, pois oferecem maior controle sobre dados sensíveis e permitem a conformidade com regulamentações. Um exemplo de aplicação é o uso dessa tecnologia para armazenar registros médicos eletrônicos, garantindo integridade e rastreabilidade das informações, sem expô-las publicamente.

4 Desafios

A adoção de criptomoedas e da tecnologia *blockchain*, apesar do grande potencial de inovação e transformação digital, ainda enfrenta barreiras significativas que comprometem sua utilização em larga escala. Esses desafios não se restringem apenas a questões técnicas, mas também envolvem fatores econômicos, regulatórios e sociais. Entre os principais pontos de atenção estão a escalabilidade, que diz respeito à capacidade das redes processarem um número crescente de transações sem perda de desempenho; a latência, relacionada ao tempo de confirmação e finalização das operações; e o custo transacional, que pode inviabilizar aplicações cotidianas em contextos de alta demanda.

4.1 Escalabilidade

A escalabilidade constitui um dos maiores desafios enfrentados pelas redes *blockchain*, especialmente aquelas de caráter público, como Bitcoin e Ethereum. Esse conceito refere-se à capacidade de uma rede processar um grande número de transações simultaneamente sem comprometer atributos fundamentais como segurança e descentralização (Sabry; Elgamal, 2020). Em outras palavras, quanto maior a escalabilidade, maior será a capacidade da rede de processar operações de forma eficiente, evitando gargalos.

No caso do Bitcoin, por exemplo, a estrutura de blocos limitada e o mecanismo de consenso *Proof of work*, resultam em uma capacidade média de apenas 3 a 7 transações por segundo (TPS), número significativamente inferior quando comparado a sistemas financeiros tradicionais, como a rede da Visa, que pode alcançar até 65 mil TPS (Conti et al., 2018). Essa discrepância evidencia a dificuldade da *blockchain* em competir, em termos de volume transacional, com soluções centralizadas de pagamento.

Para mitigar tais limitações, diferentes estratégias vêm sendo desenvolvidas pela comunidade científica e pela indústria. Uma das principais propostas é a adoção de camadas secundárias (*off-chain*), como a Lightning Network, no caso do Bitcoin, que permite a realização de transações fora da cadeia principal, registrando apenas o resultado final na *blockchain*. Esse modelo reduz a sobrecarga da rede e aumenta a velocidade de processamento, sem alterar diretamente a estrutura do protocolo original (Zheng et al., 2017).

Outra abordagem relevante é o *sharding*, que consiste na fragmentação da rede em subconjuntos menores de nós, capazes de processar transações de forma paralela. Esse modelo é utilizado em *blockchains* mais recentes, como o Ethereum 2.0, e tem o objetivo de multiplicar a capacidade de processamento sem comprometer a segurança criptográfica (Vukolic, 2017). Além disso, a adoção de mecanismos de consenso alternativos, como o *Proof of stake (PoS)*, também tem contribuído para melhorar a escalabilidade, uma vez que elimina a necessidade de cálculos matemáticos intensivos e reduz o tempo de validação dos blocos (Saleh, 2021).

Apesar dos avanços, a escalabilidade ainda enfrenta problemas teóricos e práticos, como o chamado trilema da *blockchain* (representado na Figura 2), segundo o qual é extremamente difícil alcançar simultaneamente alta escalabilidade, descentralização e segurança (Buterin, 2020). Isso significa que, ao priorizar uma dessas dimensões, frequentemente sacrifica-se outra. Dessa forma, a questão da escalabilidade permanece no centro das discussões acadêmicas e técnicas, sendo determinante para o futuro da adoção em larga escala da *blockchain*.

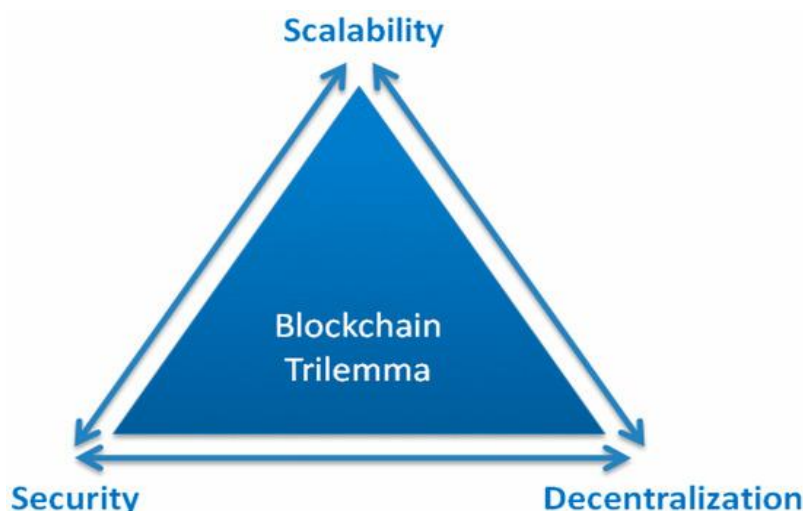
4.2 Latência

A latência em sistemas *blockchain* refere-se ao tempo necessário para que uma transação submetida à rede seja validada, registrada em um bloco e considerada finalizada. Esse fator é crucial, pois impacta diretamente na experiência do usuário e na viabilidade de determinadas aplicações, como sistemas de pagamento em tempo real ou registros críticos de dados (Zheng et al., 2017).

No caso do Bitcoin, o tempo médio de confirmação gira em torno de dez minutos, uma vez que a rede depende da resolução de problemas matemáticos complexos no mecanismo de consenso *Proof of work* (Nakamoto, 2008). Esse intervalo pode ser aceitável em transações de maior valor, mas é impraticável em

situações que demandam resposta imediata, como micropagamentos ou operações em Internet das Coisas (IoT). O Ethereum, por sua vez, conseguiu reduzir a latência média para aproximadamente quinze segundos por bloco em sua versão *PoW*, e para poucos segundos após a migração para *Proof of stake*, no Ethereum 2.0 (Buterin, 2020).

Figura 2 Trilema da *blockchain*



Fonte: (Sabry; Elgamal 2020)

A alta latência também está associada ao problema de *forks* temporários, em que dois blocos são minerados quase simultaneamente, criando ramificações momentâneas da cadeia. Nesses casos, até que a rede resolva o conflito e defina qual bloco será considerado válido, as transações permanecem em estado de incerteza, o que compromete a confiabilidade de serviços sensíveis (Vukolic, 2017).

Como forma de reduzir esse problema, algumas soluções têm sido propostas, como o uso de algoritmos de consenso alternativos ao *PoW*, a exemplo do PoS e do *Practical Byzantine Fault Tolerance* (PBFT), que permitem confirmações quase instantâneas (Androulaki et al., 2018). Outras abordagens incluem o uso de canais de pagamento off-chain, como a *Lightning Network*, que realizam liquidações parciais fora da *blockchain* principal e reduzem drasticamente o tempo percebido pelo usuário (Sabry; Elgamal, 2020).

Portanto, a latência continua sendo um fator determinante para a adoção da *blockchain* em cenários de alta demanda. Sua redução é vista como requisito essencial para que redes descentralizadas consigam competir com sistemas centralizados em termos de agilidade e eficiência.

4.3 Custo transacional

O custo transacional em *blockchain* é definido pelo valor pago pelos usuários para que suas operações sejam processadas e registradas na rede. Esse custo é essencial para remunerar os validadores ou mineradores e evitar o envio de transações desnecessárias que possam sobrecarregar o sistema. No entanto, em

momentos de alta demanda, esse valor pode se tornar proibitivo, comprometendo a acessibilidade da tecnologia (Conti et al., 2018).

No Bitcoin, as taxas variam conforme a congestão da rede, podendo alcançar valores elevados em períodos de grande volume transacional. O Ethereum, antes de sua migração para o PoS, sofria com as chamadas *gas fees*, que em determinados momentos chegavam a dezenas de dólares por transação, inviabilizando seu uso em micropagamentos e aplicações de baixo valor agregado (Buterin, 2020). Esse cenário reforça o dilema de como garantir sustentabilidade econômica para os validadores sem excluir usuários devido ao alto custo.

Para contornar essa limitação, têm sido adotadas estratégias como a otimização dos algoritmos de consenso e a implementação de soluções de escalabilidade, como *sidechains* e camadas secundárias (Zheng et al., 2017). Além disso, *blockchains* mais recentes, como Solana e Cardano, propõem taxas significativamente menores, combinando mecanismos híbridos de validação e maior eficiência no uso de recursos computacionais (Saleh, 2021).

Em síntese, o custo transacional representa não apenas uma questão técnica, mas também um fator econômico e social, já que sua redução é condição necessária para que a *blockchain* seja utilizada em massa como infraestrutura de serviços digitais.

5 Análise das Criptomoedas

A comparação entre Bitcoin, Ethereum, Cardano e Solana demonstra que não existe uma solução única para os desafios enfrentados pela tecnologia *blockchain*. Cada criptomoeda adota estratégias distintas para lidar com questões de escalabilidade, latência e custo, apresentando vantagens em determinados aspectos e limitações em outros. Enquanto algumas priorizam segurança e descentralização, outras buscam maior desempenho e acessibilidade. Dessa forma, a análise evidencia que o desenvolvimento contínuo e a adaptação das redes serão determinantes para sua consolidação como infraestrutura viável em larga escala.

5.1 Bitcoin

O Bitcoin, lançado em 2008 por Satoshi Nakamoto, foi a primeira aplicação prática da tecnologia *blockchain* e continua sendo a criptomoeda mais conhecida e utilizada em escala global. Sua proposta central é atuar como um sistema de dinheiro eletrônico descentralizado, sem necessidade de intermediários, garantindo transparência e segurança nas transações (Nakamoto, 2008). No entanto, sua estrutura técnica enfrenta limitações significativas.

No quesito escalabilidade, a rede processa em média apenas de 3 a 7 transações por segundo (TPS), número bastante inferior ao de sistemas financeiros tradicionais, como a rede Visa, que pode atingir até 65 mil TPS (Conti et al., 2018). Essa discrepância evidencia a limitação do Bitcoin em atender demandas de grande escala, o que o torna inadequado para uso cotidiano em massa, como pagamentos instantâneos em comércios ou microtransações digitais.

Quanto à latência, o tempo médio de confirmação de um bloco é de aproximadamente dez minutos, devido ao mecanismo de consenso *Proof of work*

(*PoW*), em que mineradores competem na resolução de problemas matemáticos complexos (Zheng et al., 2017). Esse intervalo pode ser aceitável em transações de alto valor, mas compromete sua aplicação em contextos que exigem agilidade, como compras em pontos de venda físicos ou operações em Internet das Coisas (IoT).

No que se refere ao custo transacional, em julho de 2025 a taxa média era de US\$ 1,064 por transação (Ycharts, 2025a), equivalente a aproximadamente R\$ 5,90 (Exchangerates, 2025; The Globaleconomy; 2025). Em momentos de maior congestão da rede, esse valor pode ser ainda mais elevado, tornando o Bitcoin pouco acessível para micropagamentos. Assim, embora seja considerado extremamente seguro devido ao alto custo computacional de ataques, o Bitcoin enfrenta entraves técnicos e econômicos que limitam sua escalabilidade e adoção em larga escala.

5.2 Ethereum

O Ethereum, criado em 2015 por Vitalik Buterin, ampliou as funcionalidades da *blockchain* ao introduzir contratos inteligentes (smart contracts) e aplicações descentralizadas (dApps), tornando-se a principal plataforma para inovação no ecossistema (Swan, 2015). Diferente do Bitcoin, que se concentra em transferências financeiras, o Ethereum abriu caminho para soluções complexas, como finanças descentralizadas (DeFi), tokens não fungíveis (NFTs) e organizações autônomas descentralizadas (DAOs).

Inicialmente, sua escalabilidade era limitada a 15 a 30 TPS sob o modelo *Proof of work*. Com a atualização The Merge, em 2022, a rede migrou para *Proof of stake (PoS)*, reduzindo o consumo energético e criando condições para que novas camadas de escalabilidade (como sharding e soluções de segunda camada) possam elevar o desempenho para milhares de TPS (Buterin, 2020; Saleh, 2021).

Em relação à latência, a rede também evoluiu. Sob PoW, o tempo médio de criação de blocos era de cerca de 15 segundos. Após a migração, as confirmações passaram a ocorrer em poucos segundos, o que amplia as possibilidades de uso em aplicações que exigem maior rapidez (Buterin, 2020).

No que se refere ao custo transacional, em julho de 2025 a taxa média foi de US\$ 0,3864, aproximadamente R\$ 2,14 (Ycharts, 2025b). Apesar de menores que as taxas do Bitcoin, em períodos de intensa demanda, como no auge das negociações de NFTs, as “gas fees” chegaram a valores proibitivos, o que evidenciou a necessidade contínua de melhorias na rede. Dessa forma, o Ethereum, mesmo enfrentando custos consideráveis, destaca-se pela flexibilidade e pelo papel central no desenvolvimento de aplicações descentralizadas.

5.3 Cardano

O Cardano, lançado em 2017, foi concebido desde o início com base em pesquisa acadêmica revisada por pares, tendo como diferencial o uso do mecanismo de consenso *Proof of stake Ouroboros*, que visa conciliar segurança, escalabilidade e sustentabilidade (Saleh, 2021). Essa abordagem científica confere ao projeto maior credibilidade e orienta sua evolução em fases cuidadosamente planejadas.

Sua escalabilidade já se mostra superior à de redes anteriores, com capacidade de até 250 TPS, tornando-a mais adequada para aplicações cotidianas

(Saleh, 2021). O modelo *PoS* reduz o consumo energético e facilita a adoção em larga escala, ao mesmo tempo em que mantém a descentralização.

A latência no Cardano é inferior à do Bitcoin, pois os blocos são gerados em intervalos mais curtos. Contudo, variações podem ocorrer em momentos de congestionamento, ainda que a rede mantenha relativa estabilidade (King; Nadal, 2012).

No quesito custo transacional, o Cardano mantém taxas acessíveis, em torno de 0,17 ADA por transação (Reddit, 2021). Considerando a cotação de julho de 2025, isso equivale a cerca de R\$ 0,47 (Exchangerates, 2025; The Globaleconomy, 2025). Esse baixo custo permite que a rede seja atrativa para usuários comuns e projetos de impacto social, como identidade digital e inclusão financeira em países em desenvolvimento. Assim, o Cardano se destaca por combinar eficiência econômica e sustentabilidade, embora sua adoção ainda seja mais limitada em comparação a redes mais consolidadas.

5.4 Solana

A Solana, lançada em 2020, surgiu com a proposta de superar os gargalos de escalabilidade das *blockchains* de primeira e segunda geração. Seu diferencial está no uso de um mecanismo híbrido que combina *Proof of stake* com *Proof of history (PoH)*, permitindo registrar a ordem temporal das transações com maior eficiência (Crypto.com, 2024).

Em termos de escalabilidade, a rede é capaz de processar mais de 50 mil TPS, o que a coloca em patamar comparável a sistemas financeiros tradicionais e superior às demais criptomoedas analisadas. Essa capacidade a torna especialmente adequada para aplicações que exigem alto volume de transações, como jogos baseados em *blockchain* e negociações de alta frequência (Cryptomus, 2025).

No aspecto da latência, a Solana confirma transações em poucos segundos, favorecendo o uso em aplicações em tempo real, como sistemas de pagamento instantâneo ou plataformas de negociação descentralizada (Sabry; Elgamal, 2020). Essa agilidade, somada à escalabilidade, representa um dos maiores diferenciais da rede.

Quanto ao custo transacional, as taxas giram em torno de US\$ 0,0024 a US\$ 0,048, com média próxima de US\$ 0,01, o que equivale a cerca de R\$ 0,055 por transação (Coincodex, 2023; Exchangerates 2025; The Globaleconomy, 2025). Esses valores são extremamente baixos, tornando a Solana competitiva para microtransações. No entanto, a rede enfrenta críticas relacionadas à centralização e a episódios de instabilidade e paralisação, que comprometem sua confiabilidade.

5.5 Comparação entre as criptomoedas

No Quadro 2 estão sintetizados os principais resultados apresentados nas subseções anteriores dessa Seção 5.

Quadro 2 Síntese dos principais resultados analisados

Criptomoeda	Escalabilidade (TPS)	Latência	Custo Transacional (R\$)
Bitcoin	De 3 a 7	10 minutos	R\$ 5,90
Ethereum	de 15 a 30	15 segundos	R\$ 2,14
Cardano	Até 250	20 segundos	R\$ 0,47
Solana	Maior que 50.000	0,4 segundos	R\$ 0,055

Fonte: A autora

6 Síntese da revisão integrativa de literatura realizada

Consolidando tudo o que foi apresentado neste artigo, no Quadro 3 estão sintetizados os estudos incluídos na revisão integrativa.

Quadro 3 – Síntese dos estudos incluídos na revisão integrativa

Autor/Ano	Objetivo do Estudo	Método/Tipo de Estudo	Principais Resultados	Limitações/Observações
Nakamoto (2008)	Propor um sistema de dinheiro eletrônico ponto a ponto sem intermediários	Estudo técnico (<i>white paper</i>)	Introduziu o Bitcoin e o mecanismo <i>Proof of work</i> , garantindo descentralização e segurança	Não aborda escalabilidade ou custos em cenários de uso massivo
Conti et al. (2018)	Analisar os desafios de segurança e escalabilidade do Bitcoin	Revisão teórica	Identificaram limitações severas de TPS (3–7) e gargalos na adoção em massa	Foco restrito ao Bitcoin
Zheng et al. (2017)	Avaliar os princípios e aplicações da <i>blockchain</i>	Revisão sistemática	Destacam transparência, descentralização e desafios de latência e custo	Discussão ainda incipiente sobre <i>blockchains</i> de terceira geração
Vukolić (2017)	Comparar modelos de consenso e propor alternativas para escalabilidade	Estudo teórico	Defende <i>sharding</i> e mecanismos alternativos como solução ao trilema	Pouca evidência prática
Buterin (2020)	Discutir o “trilema da <i>blockchain</i> ” e propor soluções para o Ethereum	Estudo conceitual	Identifica dificuldade de conciliar segurança, escalabilidade e descentralização	Foco no Ethereum; não generalizável

Autor/Ano	Objetivo do Estudo	Método/Tipo de Estudo	Principais Resultados	Limitações/Observações
Saleh (2021)	Analisar a transição para <i>Proof of stake</i> e impactos no desempenho	Estudo analítico	Mostra ganhos em eficiência energética e escalabilidade	Debate sobre centralização ainda em aberto
Sabry & Elgamal (2020)	Avaliar soluções para latência e escalabilidade em <i>blockchains</i> recentes	Estudo de caso (Solana)	Apontam o <i>Proof of history</i> como inovação que aumenta TPS	Questionam confiabilidade da rede
Silva & Marques (2021)	Investigar aplicações de <i>blockchains</i> privadas no setor público	Estudo exploratório	Mostram potencial em registros médicos e administrativos	Não aborda criptomoedas públicas
Antonopoulos (2017)	Explorar fundamentos e implicações sociais do Bitcoin	Livro técnico	Reforça a importância da descentralização e segurança	Discussão menos técnica sobre TPS e taxas

Fonte: A autora

A análise realizada por meio da revisão integrativa de literatura em relação ao trilema da *blockchain* demonstrou que os desafios de escalabilidade, latência e custo transacional continuam sendo obstáculos centrais para a adoção massiva das criptomoedas. No Quadro 4 está apresentada de forma sintética como cada criptomoeda lida com os três eixos do trilema da *blockchain*, evidenciando que cada rede busca soluções de maneira distinta, priorizando determinados aspectos em detrimento de outros.

Quadro 4 – Criptomoeda e o trilema da *blockchain*

Criptomoeda	Segurança	Escalabilidade	Descentralização
Bitcoin	Altíssimo nível de robustez, sem ataques bem-sucedidos ao protocolo; PoW garante segurança criptográfica, mas exige alto consumo energético (Nakamoto, 2008; Conti et al., 2018).	Limitada a 3–7 TPS; principais soluções em desenvolvimento envolvem a Lightning Network (<i>off-chain</i>) (Zheng et al., 2017).	Elevado nível de descentralização, com milhares de nós distribuídos globalmente; porém, concentração em grandes <i>pools</i> de mineração é apontada como risco (Conti et al., 2018).
Ethereum	Segurança robusta, fortalecida após a migração para PoS;	Atualmente em torno de 15–30 TPS, mas com perspectiva de milhares	Rede altamente descentralizada, mas a concentração de ETH em

Criptomoeda	Segurança	Escalabilidade	Descentralização
	contratos inteligentes já sofreram vulnerabilidades em <i>dApps</i> e <i>smart contracts</i> (Buterin, 2020).	após implementação de <i>sharding</i> e soluções de segunda camada (Vukolic, 2017).	grandes validadores pode comprometer o equilíbrio do PoS (Saleh, 2021).
Cardano	Protocolos revisados academicamente (Ouroboros) priorizam segurança matemática; sem registros relevantes de falhas graves (Saleh, 2021).	Até 250 TPS, com design modular que permite expansão gradual; ainda em fases de desenvolvimento (King; Nadal, 2012).	Rede relativamente descentralizada, mas com menor número de validadores em comparação ao Ethereum e Bitcoin; comunidade em crescimento (Saleh, 2021).
Solana	Rede segura em teoria, mas já enfrentou episódios de instabilidade e paralisação temporária; críticas à resiliência em cenários de sobrecarga (Sabry; ELGAMAL, 2020).	Extremamente escalável, com capacidade superior a 50 mil TPS; combinação de PoS e PoH garante rapidez e baixo custo (Zheng et al., 2017).	Considerada menos descentralizada devido à concentração de validadores e infraestrutura mais exigente em hardware (Saleh, 2021).

Fonte: A autora

Complementando as informações apresentadas no Quadro 4, na Figura 3 está apresentado como cada criptomoeda se posiciona em relação aos três eixos trilema da *blockchain*.

Observa-se, pelo que está demonstrado na Figura 3, que não existe uma solução única que atenda simultaneamente aos três eixos do trilema, confirmando que cada *blockchain* prioriza dimensões diferentes de acordo com sua proposta de valor.

O Bitcoin concentra-se entre descentralização e segurança, destacando-se pela robustez de sua rede, sustentada pelo mecanismo de consenso *Proof of work*, contra-ataques e ampla distribuição de validadores, mas sacrifica a escalabilidade (baixa capacidade de transações por segundo), apresentando graves limitações de desempenho e custos elevados em períodos de congestionamento.

O Ethereum busca uma posição mais equilibrada, ampliando a escalabilidade, a eficiência energética e a velocidade das confirmações após a migração para *Proof of stake* e mantendo forte descentralização, embora ainda enfrente custos elevados em momentos de alta demanda.

A Cardano posiciona-se mais próximo da segurança, devido ao embasamento científico e pelas taxas reduzidas, o que o torna atraente para projetos sociais e de inclusão financeira, mas com ganhos moderados em escalabilidade e descentralização em processo de expansão.

A Solana, por sua vez, alcança níveis superiores de escalabilidade, atingindo altas taxas de transações por segundo e custos mínimos, porém com críticas relacionadas à descentralização e a episódios de instabilidade de sua rede.

7 Conclusão

O presente estudo teve como objetivo realizar uma revisão integrativa da literatura sobre os conceitos importantes relacionados ao *blockchain* e os desafios enfrentados pelas criptomoedas Bitcoin, Ethereum, Cardano e Solana, com ênfase em três dimensões centrais: escalabilidade, latência e custo transacional. O objetivo proposto foi atingido, uma vez que foi possível identificar e analisar comparativamente como cada uma dessas redes busca responder ao chamado trilema da *blockchain*, equilibrando de formas distintas os aspectos de segurança, descentralização e desempenho.

A análise revelou que o Bitcoin, pioneiro do setor, mantém-se como a rede mais segura e descentralizada, mas enfrenta severas limitações em termos de escalabilidade e custo, restringindo seu uso cotidiano. O Ethereum, por sua vez, destaca-se pela versatilidade e pelo ecossistema de contratos inteligentes, apresentando avanços significativos com a migração para *Proof of stake*, ainda que as taxas de transação continuem como um ponto crítico. Já o Cardano se sobressai pelo embasamento científico de seu protocolo e pelas taxas acessíveis, mas ainda enfrenta desafios relacionados à expansão de sua adoção. A Solana, finalmente, apresenta forte desempenho em escalabilidade e baixo custo, embora com críticas à descentralização e à estabilidade da rede.

De forma geral, o estudo evidencia que não existe uma solução única para o trilema da *blockchain*. Cada criptomoeda analisada prioriza dimensões específicas, revelando que os caminhos tecnológicos adotados estão diretamente relacionados às propostas de valor e aos objetivos de cada rede. Esse cenário indica que a evolução do setor dependerá tanto de inovações técnicas quanto de decisões estratégicas de governança e da capacidade de atender às demandas reais dos diversos setores econômicos.

Outro ponto importante é que a revisão mostrou lacunas na literatura, principalmente no que diz respeito a análises de longo prazo sobre o impacto socioeconômico das taxas de transação e à resiliência de *blockchains* emergentes em cenários de alta demanda. Além disso, ainda são incipientes os estudos que discutem de forma integrada os efeitos ambientais, regulatórios e sociais associados à adoção dessas tecnologias.

Como trabalhos futuros, sugere-se a realização de pesquisas que aprofundem a análise comparativa entre diferentes mecanismos de consenso, bem como estudos empíricos sobre a performance das redes em situações reais de uso em larga escala. Também se recomenda comparar outras criptomoedas como Aave, Ripple, Tron. Vantagens e desvantagens do trilema da *blockchain* e investigar a latência máxima aceitável no ecossistema da *blockchain*.

Referências

ANDROULAKI, Elli et al. *Hyperledger Fabric: A Distributed Operating System for Permissioned Blockchains*. Proceedings of the Thirteenth EuroSys Conference, 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1801.10228>. Acesso em: 18 mar. 2025.

ANTONONOPOULOS, Andreas M. *Mastering Bitcoin: Unlocking Digital Cryptocurrencies*. O'Reilly Media, 2017. Disponível em: <https://unqlue.it/work/209011>. Acesso em: 20 mar. 2025.

BLOCKTRENDS. *Apostila Certificação CCA – Módulo I*. Disponível em: <https://plataforma.blocktrends.com.br/area/vitrine>. Acesso em: 24 mar. 2025.

BUTERIN, Vitalik. *Ethereum: A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform*. 2020. Disponível em: <https://ethereum.org/en/whitepaper/>. Acesso em: 13 mar. 2025.

COINC0DEX. *Bitcoin Gas Fees vs. Ethereum, Solana and Cardano Gas Fees: Which Is Cheapest?* 2023. Disponível em: <https://coincodex.com/article/24933/bitcoin-gas-fees/>. Acesso em: 20 ago. 2025.

CONTI, Mauro et al. A survey on security and privacy issues of Bitcoin. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 20, n. 4, p. 3416-3452, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317356750_A_Survey_on_Security_and_Privacy_Issues_of_Bitcoin. Acesso em: 24 mar. 2025.

CRYPTO.COM. O que é o *Proof of history* (PoH) da Solana. Disponível em: <https://crypto.com/pt-br/university/what-is-solanas-proof-of-history-sol-consensus-mechanism>. Acesso em: 31 ago. 2025.

CRYPTOMUS. Quanto tempo leva uma transação de criptomoeda. Disponível em: https://cryptomus.com/pt/blog/how-long-does-a-cryptocurrency-transaction-take?srsId=AfmBOorKDp32ZV-e-1b3OnQMLfUzllblUso6fPbEDOMg9DC5kGlVnHsd&utm_medium=organic&utm_source=google&utm_referrer=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. Acesso em: 31 ago. 2025.

DOCS.CARDANO. Slots e blocos no Cardano Node]. Disponível em: <https://docs.cardano.org/about-cardano/learn/cardanonode#:~:text=Slots%20e,Outros%20blocos%20candidatos%20ser%20descartados>. Acesso em: 31 ago. 2025.

DRESCHER, Daniel. *Blockchain Basics: A Non-Technical Introduction in 25 Steps*. Frankfurt: Apress, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4842-2604-9>. Acesso em: 11 mar. 2025.

EXCHANGERATES. *USD/BRL Exchange Rate History 2025*. Disponível em: <https://www.exchangerates.org.uk/USD-BRL-spot-exchange-rates-history-2025.html>. Acesso em: 28 ago. 2025.

INVESTOPEDIA. *Proof-of-Stake (PoS)*. Disponível em: <https://www.investopedia.com/terms/p/proof-stake-pos.asp>. Acesso em: 7 ago. 2025.

KING, Sunny; NADAL, Scott. *Peercoin: Peer-to-Peer Crypto-Currency with Proof-of-Stake*. 2012. Disponível em: <https://peercoin.net/whitepapers/peercoin-paper.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2025.

LINS JUNIOR, S. da C. *(In)eficiência energética das redes blockchains: o fim do proof-of-work?* 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Econômicas) – Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/25472/1/SCLJunior.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2025.

NAKAMOTO, Satoshi. *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. 2008. Disponível em: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2025.

PUC MINAS. *Desafios de escalabilidade e desempenho da Blockchain na cadeia de suprimentos global: uma revisão sistemática da literatura*. 2023. Disponível em: <https://bib.pucminas.br/pergamumweb/download/baa645f0-cdd0-43f0-b692-4619510e5842.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2025.

REDDIT. *Cardano Transaction Fees Explained*. 2021. Disponível em: <https://www.reddit.com/r/cardano/comments/ovf3iv/>. Acesso em: 28 ago. 2025.

ROSA, Ana Caroline da; PAIM, Catiane de Meneses. Contrato inteligente: automação dos acordos digitais na rede *blockchain*. Orientador: Cilene Araújo da Cruz. 2024. 110 f. Trabalho de conclusão de curso (Curso superior de Tecnologia em Gestão da Tecnologia da Informação) – Fatec Itaquaquecetuba, Itaquaquecetuba, 2024. Disponível em: <http://ric-cps.eastus2.cloudapp.azure.com/handle/123456789/33665>. Acesso em: 18 ago. 2025.

SABRY, Mohammad; ELGAMAL, Mohamed. Scalability challenges in *blockchain* networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/20/9372>. Acesso em: 22 mar. 2025.

SALEH, Fahad. *Blockchain without waste: Proof-of-Stake*. *The Review of Financial Studies*, v. 34, n. 3, p. 1156–1190, 2021. Disponível em: <https://academic.oup.com/rfs/article/34/3/1156/5869075>. Acesso em: 21 mar. 2025.

SILVA, Euber Chaia Cotta; MARQUES, Rodrigo Moreno. *Blockchain no setor público: uma revisão sistemática de literatura*. *AtoZ: Novas Práticas em Informação e Conhecimento*, v. 10, n. 3, p. 1–11, 2021. DOI: 10.5380/atoz.v10i3.79903. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/atoz/article/view/79903>. Acesso em: 18 mar. 2025.

SWAN, Melanie. *Blockchain: Blueprint for a New Economy*. O'Reilly Media, 2015. Disponível em: <https://www.oreilly.com/library/view/blockchain/9781491920480>. Acesso em: 19 mar. 2025.

THE GLOBALECONOMY. *Dollar Exchange Rate – Brazil*. Disponível em: https://www.theglobaleconomy.com/Brazil/Dollar_exchange_rate/. Acesso em: 1 set. 2025.

VUKOLIĆ, Marko. The quest for scalable *blockchain* fabric. *Proceedings of the International Workshop on Open Problems in Network Security*, 2017. Disponível em: https://vukolic.github.io/iNetSec_2015.pdf. Acesso em: 22 mar. 2025.

WHITTEMORE, Robin; KNAFL, Kathleen. The integrative review: updated methodology. *Journal of Advanced Nursing*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/7498980_The_integrative_review_Update_methodology. Acesso em: 3 jun. 2025.

YCHARTS. *Bitcoin Average Transaction Fee*. 2025a. Disponível em: https://ycharts.com/indicators/bitcoin_average_transaction_fee. Acesso em: 1 set. 2025.

YCHARTS. *Ethereum Average Transaction Fee*. 2025b. Disponível em: https://ycharts.com/indicators/ethereum_average_transaction_fee. Acesso em: 1 set. 2025.

ZHENG, Zibin et al. An overview of *blockchain* technology: architecture, consensus, and future trends. *Proceedings of the IEEE International Congress on Big Data*, 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8078333>. Acesso em: 23 mar. 2025.