

Aspectos Técnicos Avançados de Blockchain no Gerenciamento de Espectro

Alan Veloso¹, Mateus Bastos¹, Jeffson Sousa^{1,2}, Diego Abreu¹, Antônio Abelém¹

¹ Universidade Federal do Pará (UFPA)
Belém – PA – Brasil

² Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD)
Campinas – SP – Brasil

aveloso@ufpa.br, mateus.araujo@icen.ufpa.br, jcsousa@cpqd.com.br
diego.abreu@itec.ufpa.br, abelem@ufpa.br

Abstract. *This paper investigates the application of blockchain and smart contracts in decentralized spectrum management, focusing on market-based models. Through a Rapid Review (Scopus, 2021–2023) complemented by snowballing, 35 studies were analyzed. Findings show that blockchain enables automation and cost reduction; ERC-721 and ERC-1155 tokens offer diverse ways to represent spectrum rights; and temporary or permanent leases provide different trade-offs. The study concludes that integrating blockchain with dynamic spectrum policies enhances transparency, security, and digital inclusion.*

Resumo. *Este artigo analisa o uso de blockchain e contratos inteligentes na gestão descentralizada de espectro com enfoque em modelos de mercado. A partir de uma Rapid Review (Scopus, 2021–2023) e snowballing, 35 estudos foram examinados. Os achados indicam que blockchain viabiliza automação e redução de custos; tokens ERC-721 e ERC-1155 permitem diferentes formas de representação do espectro; e cessões temporárias ou definitivas trazem diferentes benefícios. Conclui-se que a integração entre blockchain e políticas dinâmicas de espectro amplia a transparência, segurança e inclusão digital.*

1. Introdução

As redes móveis têm avançado com as tecnologias 5G e 6G, transformando setores diversos. No entanto, a distribuição desigual do espectro de radiofrequência — recurso estratégico, limitado e essencial — reflete disparidades socioeconômicas. No Brasil, por exemplo, 72,29% da população urbana tem acesso ao 5G, enquanto apenas 10,66% das áreas rurais estão cobertas, segundo a Anatel [Agência Nacional de Telecomunicações 2024]. No 4G, essa diferença também é significativa: 99,70% de cobertura urbana frente a 57,69% rural [Salahdine et al. 2023]. Essa assimetria decorre, em parte, do baixo interesse econômico das operadoras em regiões remotas.

Para enfrentar a subutilização do espectro, surgem iniciativas como o *Spectrum Access System* (SAS), nos EUA, usado no *Citizens Broadband Radio Service* (CBRS), e o *Licensed Shared Access* (LSA), na Europa [Alsaedi et al. 2023]. Os modelos de gerenciamento se dividem em três categorias: (i) comando e controle, abordagem tradicional ainda vigente no Brasil; (ii) mecanismos de mercado, que viabilizam negociações de espectro ocioso; e (iii) acesso comum não licenciado, em que todos compartilham o espectro. Este

estudo concentra-se na aplicação de blockchain aos mecanismos de mercado, explorando seu potencial para promover eficiência e transparência.

Blockchain, combinada a contratos inteligentes, viabiliza mercados descentralizados onde operadoras primárias (que adquirem o espectro em leilões regulatórios) negociam com operadoras secundárias (que acessam o mercado secundário) [Perera et al. 2024]. A estrutura descentralizada da blockchain garante segurança e imutabilidade, enquanto os contratos inteligentes automatizam as transações sem intermediários [Rajasekaran et al. 2022]. Essas soluções tecnológicas reduzem custos operacionais e ampliam a eficiência no uso do espectro.

Este trabalho analisa aspectos avançados desses mercados descentralizados, com foco em modelos de transação (compra e venda, leilão, oferta espontânea), formas de tokenização (ERC-20, ERC-721, ERC-1155) e tipos de cessão (temporária ou definitiva). A metodologia adota uma *Rapid Review* [Tricco et al. 2015] de artigos recentes (2021–2023) da base Scopus, complementada por *snowballing* para ampliar o alcance da análise. A Seção 2 detalha os conceitos principais, e a Seção 3 apresenta os achados e direções futuras para o uso de blockchain no gerenciamento de espectro.

2. Aspectos Avançados de Mercados Descentralizados Baseados em Blockchain para o Compartilhamento Dinâmico de Espectro

Esta análise foca em aspectos avançados ainda não explorados por revisões anteriores, como a de Perera et al. [Perera et al. 2024], que tratam dos fundamentos de blockchain e contratos inteligentes. Este estudo aborda modelos de transação em mercados descentralizados (compra e venda, leilão e oferta espontânea), formas de tokenização de direitos de uso do espectro (ERC-20 e ERC-721) e tipos de cessão (temporária ou definitiva). A metodologia adotada combinou *Rapid Review* e *snowballing*, resultando em 35 estudos analisados. Os detalhes são apresentados nas seções seguintes.

2.1. Modelo de Transação

Em mercados descentralizados de compartilhamento de ativos como o espectro de rádio, diferentes modelos de transação — como compra e venda, leilão e oferta espontânea — definem como os ativos são negociados e transferidos, impactando diretamente a eficiência, flexibilidade e acessibilidade. A escolha do modelo depende de fatores como urgência, valor do ativo, competitividade entre compradores e necessidade de flexibilidade. A seguir, analisam-se as principais características e aplicações de cada modelo.

2.1.1. Compra e Venda

O modelo de compra e venda oferece a vantagem da simplicidade, com transações diretas em que condições pré-definidas (preço, quantidade) permitem aquisição imediata após o pagamento, transferindo automaticamente o ativo (ou *token*) ao comprador. Contudo, sua principal desvantagem é a falta de flexibilidade, já que os termos fixos impedem negociações personalizadas, como ajustes de preço ou condições de uso, limitando a adaptação às necessidades específicas dos compradores.

2.1.2. Leilão

O modelo de leilão permite maximizar o valor do ativo por meio de lances competitivos, ajustando o preço conforme a demanda, mas exige um período pré-definido para coleta de ofertas, o que prolonga o tempo da transação. Embora plataformas automatizadas (como contratos inteligentes) agilizem a transferência do ativo e o pagamento, a dinâmica competitiva tende a favorecer participantes com maior poder financeiro, ampliando desigualdades ao marginalizar compradores com recursos limitados.

2.1.3. Oferta Espontânea de Compra

O modelo de oferta espontânea permite flexibilidade ao comprador, que pode propor aquisições de ativos não listados, incentivando a reutilização de recursos ociosos. Sua vantagem reside na adaptabilidade das negociações, já que o proprietário avalia e decide sobre cada proposta individualmente. Contudo, a desvantagem é a incerteza inerente: a transação depende exclusivamente da aceitação do proprietário, o que pode gerar atrasos ou recusas, além de riscos de preços desalinhados do mercado devido à ausência de concorrência entre compradores.

Esses três modelos de transação oferecem diferentes benefícios e desafios no mercado de compartilhamento dinâmico de espectro. O modelo de compra e venda é simples e rápido, mas carece de flexibilidade para ajustar as condições da transação. O leilão maximiza o valor obtido, mas pode ser demorado e desfavorecer pequenos usuários. Já a oferta espontânea de compra promove uma maior eficiência na utilização do espectro ocioso, mas depende da disposição e rapidez do usuário primário em aceitar ou rejeitar ofertas. A escolha entre esses modelos dependerá do equilíbrio desejado entre rapidez, flexibilidade, valor de mercado e acessibilidade.

2.2. Representação Digital

Esta seção discute os desafios da gestão dinâmica do espectro, como a representação digital de atributos complexos (localização, disponibilidade, regulamentações) e a necessidade de transações ágeis entre múltiplos agentes. Nesse contexto, *tokens* em blockchain atuam como certificados digitais que representam direitos de uso ou propriedade, permitindo a negociação segura e transparente de faixas heterogêneas em ambientes descentralizados. Os padrões ERC-20 (fungíveis) e ERC-721 (não fungíveis) são fundamentais: o primeiro é indicado para blocos homogêneos, enquanto o segundo se adapta a faixas com características únicas. A escolha entre eles influencia diretamente a eficiência, a conformidade regulatória e a flexibilidade do compartilhamento dinâmico.

2.2.1. Token fungível (ERC-20)

O padrão ERC-20[Ethereum 2015], definido no Ethereum, é uma especificação técnica amplamente adotada para criação de *tokens* fungíveis, garantindo compatibilidade e interoperabilidade entre contratos inteligentes e dApps. Ele estabelece funções essenciais para operações como transferência e aprovação de gastos, impulsionando ICOs e DeFi

ao padronizar a emissão de *tokens*. Em mercados de compartilhamento dinâmico de espectro, o ERC-20 é utilizado para representar direitos de uso, homogeneizando faixas de frequência e facilitando negociações em lotes únicos, aumentando eficiência e liquidez. Contudo, essa abordagem ignora características técnicas específicas (como alcance ou capacidade de penetração), essenciais para aplicações especializadas, limitando sua adequação a casos que demandam propriedades particulares. Assim, embora simplifique processos e promova flexibilidade, a homogeneização pode comprometer necessidades técnicas específicas de usuários.

2.2.2. *Token não fungível (ERC-721)*

O padrão ERC-721 [Ethereum 2018b], utilizado para criação de *tokens* não fungíveis (NFTs), permite representar ativos únicos com propriedades distintas, garantindo individualidade e titularidade exclusiva por meio de funções como transferência de propriedade e consulta de metadados. Diferentemente do ERC-20, que homogeneiza ativos, o ERC-721 é aplicado em mercados descentralizados de bens exclusivos, como faixas de espectro em compartilhamento dinâmico, onde cada *token* pode refletir características técnicas específicas (ex.: penetração urbana ou largura de banda), agregando valor intrínseco. Embora essa abordagem permita negociações mais precisas e personalizadas, ela aumenta a complexidade das transações e reduz a liquidez, já que cada *token* exige avaliação individual. Apesar dos desafios, o ERC-721 é vantajoso em cenários onde a singularidade do ativo é crítica, como na alocação de espectro com requisitos técnicos especializados, equilibrando flexibilidade e eficiência em mercados que demandam granularidade.

2.2.3. *Multi-token (ERC-1155)*

O padrão ERC-1155 [Ethereum 2018a], uma abordagem híbrida que combina fungibilidade (ERC-20) e não fungibilidade (ERC-721) em um único contrato inteligente, permite criar *tokens* fungíveis, não fungíveis ou semi-fungíveis, oferecendo flexibilidade e eficiência em transações digitais. Aplicado a mercados de compartilhamento dinâmico de espectro, ele agrupa faixas similares em lotes fungíveis para negociação simplificada, enquanto representa faixas únicas (ex.: com alcance ou penetração específicos) como NFTs, preservando suas características individuais. Essa dualidade reduz complexidade, aumenta liquidez e otimiza custos de gás via transferências em lote, embora exija gestão cuidadosa para distinguir tipos de *tokens* no mesmo contrato. Apesar dos desafios, o ERC-1155 avança a adaptabilidade de mercados de espectro, equilibrando eficiência operacional e personalização de ativos para necessidades variadas de usuários.

Os padrões ERC-20 e ERC-721 apresentam limitações no compartilhamento dinâmico de espectro: o ERC-20 trata todas as faixas como homogêneas, ignorando diferenças técnicas relevantes, enquanto o ERC-721 individualiza os ativos, mas com maior complexidade e menor liquidez nas transações. O ERC-1155 [Ethereum 2018a] surge como alternativa híbrida, permitindo criar *tokens* fungíveis e não fungíveis em um único contrato. Com isso, faixas semelhantes podem ser agrupadas e negociadas de forma eficiente, enquanto faixas únicas mantêm sua individualidade, combinando flexibilidade, liquidez e personalização no mercado descentralizado de espectro.

2.3. Tipo de Cessão

Nos mercados descentralizados de compartilhamento dinâmico de espectro, o tipo de cessão do direito de acesso ao espectro desempenha um papel crucial no formato das transações e no relacionamento entre os usuários primários e secundários. Dependendo do modelo adotado, a cessão pode ser temporária ou definitiva, e cada um desses tipos traz diferentes implicações em termos de flexibilidade, responsabilidade e controle do espectro.

2.3.1. Temporária

Na cessão temporária, o usuário secundário adquire o direito de uso do espectro por um período limitado, sob condições predefinidas, como tempo ou saldo disponível. Semelhante a um aluguel, o controle permanece com o usuário primário, que retoma o espectro ao fim do prazo. Esse modelo oferece flexibilidade ao primário, permitindo múltiplos acessos temporários, e ao secundário, possibilita uso pontual sem compromissos de longo prazo. Em contrapartida, limita o controle do secundário e exige monitoramento constante das condições de cessão por ambas as partes.

2.3.2. Definitiva

Na cessão definitiva, o usuário secundário adquire permanentemente o direito de uso do espectro, tornando-se o novo proprietário, com total responsabilidade sobre sua gestão e possibilidade de transferi-lo futuramente. Suas vantagens incluem maior segurança jurídica, controle total e incentivo ao investimento em infraestrutura e planejamento de longo prazo. Por outro lado, implica maior custo inicial, ausência de flexibilidade caso o espectro se torne desnecessário e maior responsabilidade na administração do ativo, tornando-se mais acessível a usuários com maior capacidade financeira.

A escolha entre cessão temporária ou definitiva depende das necessidades dos envolvidos e do contexto específico do mercado de espectro. Enquanto a cessão temporária oferece flexibilidade e menor compromisso financeiro, a cessão definitiva proporciona maior controle e segurança de longo prazo, com implicações significativas tanto para a gestão do espectro quanto para a estratégia de uso e monetização dos ativos envolvidos.

3. Considerações Finais

Este estudo revisa mercados descentralizados para compartilhamento dinâmico de espectro, com foco em modelos de transação, tokenização (ERC-20, ERC-721, ERC-1155) e tipos de cessão. A análise mostra que cada modelo (compra e venda, leilão, oferta espontânea) apresenta *trade-offs* entre eficiência, flexibilidade e equidade. A cessão temporária, por exemplo, favorece o acesso democrático ao espectro ocioso, enquanto a definitiva oferece estabilidade para investimentos. A síntese orienta interessados na escolha da abordagem mais adequada, conciliando requisitos técnicos, econômicos e regulatórios.

Blockchain e contratos inteligentes já promovem automação, transparência e segurança nas transações de espectro. Há, porém, espaço para novos modelos, como “Tudo

como um Serviço”, que permitiria alocação sob demanda e escalável, semelhante a serviços de nuvem. Essa evolução pode ampliar a eficiência, gerar novas oportunidades de monetização e viabilizar mercados mais sustentáveis e colaborativos, capazes de atender às crescentes demandas por conectividade, inovação e inclusão digital.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por intermédio da Chamada Pública No 068/2022, pela Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) projeto 2023/00811-0, projeto 2023/00673-7, projeto 2021/00199-8 (CPE SMARTNESS), projeto 2020/04031-1, e projeto 2018/23097-3, e também com o apoio do Fundo para o Desenvolvimento Tecnológico das Telecomunicações (Funttel) e da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) — Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.

Referências

- Agência Nacional de Telecomunicações (2024). Cobertura móvel. Acesso em: 31 out. 2024.
- Alsaedi, W. K. et al. (2023). Spectrum options and allocations for 6g: A regulatory and standardization review. *IEEE Open Journal of the Communications Society*.
- Ethereum (2015). Erc-20 token standard. Acessado: 27 Oct. 2024.
- Ethereum (2018a). Erc-1155 multi token standard. Acessado: 27 Oct. 2024.
- Ethereum (2018b). Erc-721 non-fungible token standard. Acessado: 27 Oct. 2024.
- Perera, L. et al. (2024). A survey on blockchain for dynamic spectrum sharing. *IEEE Open Journal of the Communications Society*.
- Rajasekaran, A. S., Azees, M., and Al-Turjman, F. (2022). A comprehensive survey on blockchain technology. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52:102039.
- Salahdine, F., Han, T., and Zhang, N. (2023). 5g, 6g, and beyond: Recent advances and future challenges. *Annals of Telecommunications*, 78(9):525–549.
- Tricco, A. C. et al. (2015). A scoping review of rapid review methods. *BMC medicine*, 13:1–15.