

Rapid Review em Aspectos Avançados de Blockchain para Compartilhamento de Espectro

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

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

²Centro 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 technologies and smart contracts in decentralized spectrum management, focusing on market-based models. Through a Rapid Review (Scopus, 2021–2023) supplemented by snowballing, 35 studies were analyzed to identify advancements in decentralized markets. The results highlight that: Blockchain-based transaction models enable automation and cost reduction; Non-fungible tokens (ERC-721) represent spectrum bands with technical granularity, while ERC-1155 offers hybrid flexibility (fungible/non-fungible); Temporary assignment favors flexibility, while definitive allocation ensures stability for long-term investments. It is concluded that integrating blockchain with dynamic spectrum policies enhances transparency, security, and digital inclusion.*

Resumo. *Este artigo investiga a aplicação de tecnologias blockchain e contratos inteligentes na gestão descentralizada de espectro, com foco em modelos baseado em mercado. Por meio de uma Rapid Review (Scopus, 2021–2023) complementada por snowballing, analisou-se 35 estudos para identificar avanços em mercados descentralizados. Os resultados destacam que: Modelos de transação baseados em blockchain permitem automação e redução de custos; Tokens não fungíveis (ERC-721) representam faixas de espectro com granularidade técnica, enquanto ERC-1155 oferece flexibilidade híbrida (fungível/não fungível); e cessão temporária favorece flexibilidade, enquanto a cessão definitiva assegura estabilidade para investimentos de longo prazo. Conclui-se que a integração de blockchain com políticas dinâmicas de espectro potencializa transparência, segurança e inclusão digital.*

1. Introdução

As redes móveis têm evoluído rapidamente com os avanços das tecnologias 5G e 6G, transformando setores industriais e de serviços, embora a distribuição desigual do espectro de radiofrequência - recurso estratégico, limitado e essencial para essa transformação - reflita disparidades socioeconômicas. Enquanto áreas urbanas apresentam cobertura crescente, como no Brasil, onde 72,29% da população urbana tem acesso ao 5G contra apenas 10,66% nas áreas rurais (diferença de 61%), segundo a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) [Agência Nacional de Telecomunicações 2024], a infraestrutura em regiões rurais permanece negligenciada devido ao desinteresse econômico das operadoras.

Essa desigualdade também se repete no 4G: 99,70% de cobertura urbana frente a 57,69% rural (diferença de 42%), evidenciando um desafio persistente, mesmo com a necessidade crítica de otimizar o uso desse recurso escasso e não escalável [Salahdine et al. 2023].

Algumas iniciativas que buscam resolver a subutilização do espectro são o americano *Spectrum Access System* (SAS), utilizado no *Citizens Broadband Radio Service* (CBRS), e o europeu *Licensed Shared Access* (LSA) [Alsaedi et al. 2023]. Modelos de gerenciamento de espectro como os mencionados são comumente classificados em três categorias: abordagem administrativa de comando e controle, considerada uma abordagem defasada dadas as demandas de conectividade atuais; essa é a abordagem adotada atualmente pela Anatel; mecanismos baseados no mercado, onde o espectro não utilizado é negociado; abordagem de acesso comum não licenciado, onde todos os interessados compartilham o acesso [Alsaedi et al. 2023]. Esta pesquisa busca analisar especificamente a aplicação de blockchain em mecanismos baseados em mercado, pela natureza financeira intrínseca da tecnologia.

Blockchain aliada a contratos inteligentes são soluções promissoras que podem ser usadas para criação de mercados descentralizados que facilitam a negociação de direitos de uso de espectro entre operadora primária (tem a posse primária, por exemplo, adquiriu em leilão da agência reguladora) e secundária (adquire através do mercado secundário, ou seja, não diretamente da agência reguladora) [Perera et al. 2024]. A blockchain, com sua estrutura descentralizada e imutável, garante a segurança e a transparência necessárias para essas transações, enquanto os contratos inteligentes automatizam e executam as condições acordadas entre as partes, sem a necessidade de intermediários [Rajasekaran et al. 2022]. Essas inovações tecnológicas podem transformar o gerenciamento de espectro, promovendo maior eficiência e redução de custos operacionais.

Este estudo examina aspectos avançados dos mercados descentralizados baseados em blockchain para o compartilhamento dinâmico de espectro. Diferentemente de outras revisões existentes [Perera et al. 2024, Alsaedi et al. 2023], esta pesquisa examina os modelos de transação que podem ser utilizados em mercados descentralizados para o compartilhamento dinâmico de espectro, incluindo compra e venda, leilão, e oferta espontânea de compra. Também são exploradas as formas de representação digital dos direitos de uso do espectro, tipicamente por meio de *tokens* fungíveis e não fungíveis, bem como os diferentes tipos de cessão de direitos de uso do espectro, que podem ser temporários ou definitivos, com suas respectivas vantagens e desvantagens. A metodologia utilizada inclui uma *Rapid Review* [Tricco et al. 2015] da literatura recente (2021-2023), com base em artigos obtidos da base de dados Scopus, complementada pela técnica de *snowballing* para garantir uma análise mais abrangente das abordagens mais relevantes na área.

As próximas seções são organizadas da seguinte maneira: Seção 2 detalha a estratégia utilizada para conduzir a *Rapid Review*, incluindo as técnicas de busca e seleção de artigos. Em seguida, a Seção 3 apresenta os conceitos avançados dos mercados descentralizados baseados em blockchain para o compartilhamento dinâmico de espectro como os modelos de transação, representação digital do direito de uso e tipos de cessão do direito. Por fim, a Seção 4 sintetiza os principais achados e aponta direções futuras para o uso de blockchain no gerenciamento de espectro.

2. Metodologia

Para realizar a *Rapid Review* sobre o uso de blockchain e contratos inteligentes em mercados descentralizados para o compartilhamento dinâmico de espectro, foi utilizada a base de dados Scopus, reconhecida por sua ampla cobertura de publicações científicas e por incluir artigos de outras bases importantes, como IEEE Xplore. O período de análise foi delimitado para incluir os três últimos anos (2021 a 2023¹), a fim de garantir que o levantamento reflita o estado da arte e as inovações mais recentes na área. Essa delimitação temporal assegura que a revisão esteja atualizada com as tendências emergentes e as tecnologias mais recentes aplicadas ao compartilhamento dinâmico de espectro.

A *string* de busca foi elaborada com o objetivo de capturar publicações que explorem tanto o aspecto tecnológico quanto mercadológico de blockchain e contratos inteligentes no contexto do espectro. A *string* utilizada foi: *((blockchain) OR (“smart contract”)) AND (spectrum) AND ((marketplace) OR (market) OR (trading) OR (auction) OR (selling) OR (bidding) OR (acquisition) OR (negotiation))*. Essa combinação de termos foi escolhida para garantir que os estudos recuperados cobrissem não apenas as tecnologias de blockchain e contratos inteligentes, mas também os diferentes modelos de transação relevantes para o mercado de espectro, como compra e venda e leilão. Além da busca direta, foi utilizada a técnica de *snowballing* para expandir a análise. Isso envolveu a identificação de artigos adicionais a partir das referências encontradas nas publicações selecionadas inicialmente, garantindo que todos os estudos relevantes fossem considerados.

Após a recuperação dos resultados, os artigos foram analisados quanto à sua relevância para os temas centrais do estudo: blockchain, contratos inteligentes, e modelos de transação no compartilhamento dinâmico de espectro. Apenas publicações que discutiam diretamente a aplicação dessas tecnologias em mercados descentralizados foram incluídas na revisão final, garantindo um foco claro na questão de pesquisa e relevância prática para o campo das telecomunicações e conectividade sem fio. O conjunto dos artigos coletados após a aplicação dessa metodologia pode ser vista na seção a seguir.

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

Esta análise concentra-se em discutir aspectos avançados que não foram abordados em outras revisões da literatura. Aspectos básicos sobre as tecnologias de blockchain e contratos inteligentes podem ser encontrados em revisões anteriores como a de Perera et al. [Perera et al. 2024]. Entre os aspectos avançados abordados neste trabalho estão: os modelos de transação utilizados em mercados descentralizados, como compra e venda, leilão e oferta espontânea de compra; as formas de representação digital da autorização de uso do espectro, que, no contexto do blockchain, são tipicamente realizadas por meio de tokenização, utilizando *tokens* fungíveis e não fungíveis (*Ethereum Request for Comments* 20 e 721, respectivamente); e os tipos de cessão desses direitos ao usuário secundário, que podem ser temporária ou definitiva. A lista dos 35 artigos obtidos a partir da aplicação da metodologia (*Rapid Review* e *snowballing*) pode ser vista na Tabela 1. Os detalhes sobre esses aspectos avançados são descritos nas seções a seguir.

¹Excluiu-se o ano que a pesquisa foi realizada, pois ainda não havia sido concluído.

Tabela 1. Lista de publicações da *Rapid Review* e *snowballing*

Artigo	Ano de Publicação	Fonte	Número de Citações
[Ayepah-Mensah et al. 2023]	2023	Revista	0
[Cheng et al. 2023]	2023	Revista	4
[Eiza et al. 2023]	2023	Conferência	1
[Ghourab et al. 2023]	2023	Revista	1
[Markkandan et al. 2023]	2023	Revista	0
[Reypnazarov et al. 2023]	2023	Conferência	0
[Wang and Zhao 2023]	2023	Revista	0
[Wang et al. 2023a]	2023	Revista	0
[Wang et al. 2023b]	2023	Conferência	0
[Wang et al. 2023c]	2023	Revista	0
[Yang et al. 2023]	2023	Revista	0
[Zhou et al. 2023]	2023	Revista	3
[Abognah and Basir 2022]	2022	Conferência	0
[Bhattacharya et al. 2022]	2022	Conferência	1
[Boateng et al. 2022]	2022	Revista	14
[Hu and Jiang 2022]	2022	Conferência	0
[Liu et al. 2022]	2022	Revista	27
[Polyzos 2022]	2022	Review	0
[Yang et al. 2022]	2022	Conferência	0
[Zhu et al. 2022]	2022	Revista	9
[Jiang et al. 2021]	2021	Revista	11
[Liu et al. 2021]	2021	Revista	3
[Maksymyuk et al. 2021]	2021	Capítulo de Livro	3
[Patel et al. 2021]	2021	Conferência	12
[Wang et al. 2021]	2021	Revista	11
[Weerasinghe et al. 2021]	2021	Revista	26
[Wilhelmi and Giupponi 2021]	2021	Conferência	6
[Xenakis et al. 2021]	2021	Revista	13
[Xue et al. 2021]	2021	Revista	13
[Zhao et al. 2021b]	2021	Revista	0
[Zhao et al. 2021a]	2021	Conferência	0
[Zhu et al. 2021]	2021	Revista	20
[Zheng et al. 2020]	2020	Revista	45
[Ariyathna et al. 2019]	2019	Conferência	47
[Tripathi et al. 2019]	2019	Conferência	0

3.1. Modelo de Transação

Em mercados descentralizados de compartilhamento de ativos, como o espectro de rádio, diferentes modelos de transação são utilizados para facilitar a negociação entre proprietários e compradores. Cada modelo define uma forma específica de como os ativos são oferecidos, negociados e transferidos, influenciando diretamente a eficiência, flexibilidade e acessibilidade das transações. Entre os modelos mais utilizados estão compra e venda, leilão e oferta espontânea de compra, cada um com suas particularidades, vantagens e desvantagens. A escolha do modelo adequado pode depender de fatores como a urgência

da transação, o valor do ativo, a competitividade entre os compradores e a necessidade de flexibilidade nas negociações. A seguir, cada modelo será analisado em mais detalhes, destacando suas características principais e adequação para diferentes cenários.

3.1.1. Compra e Venda

O modelo de compra e venda (Figura 1) 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.

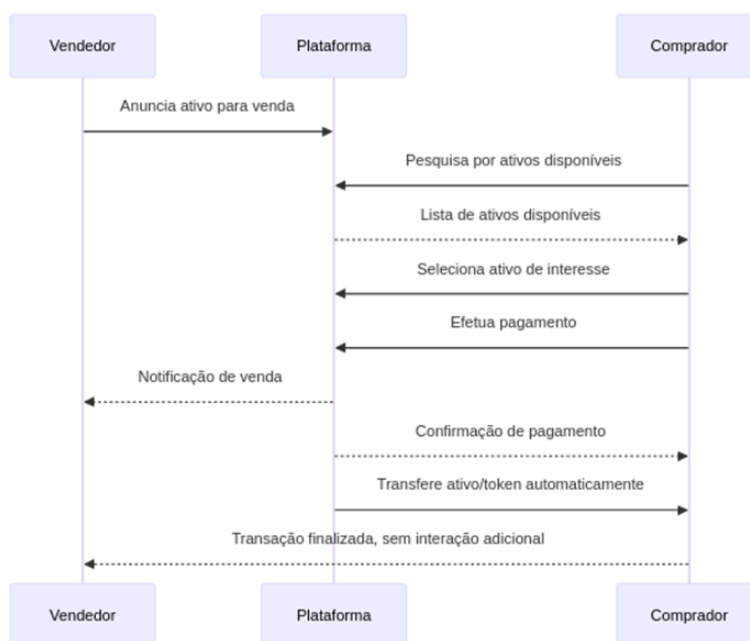


Figura 1. Diagrama de sequência do modelo de transação de compra e venda

3.1.2. Leilão

O modelo de leilão (Figura 2) 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.

3.1.3. Oferta Espontânea de Compra

O modelo de oferta espontânea (Figura 3) permite flexibilidade ao comprador, que pode propor aquisições de ativos não listados, incentivando a reutilização de recursos ociosos.

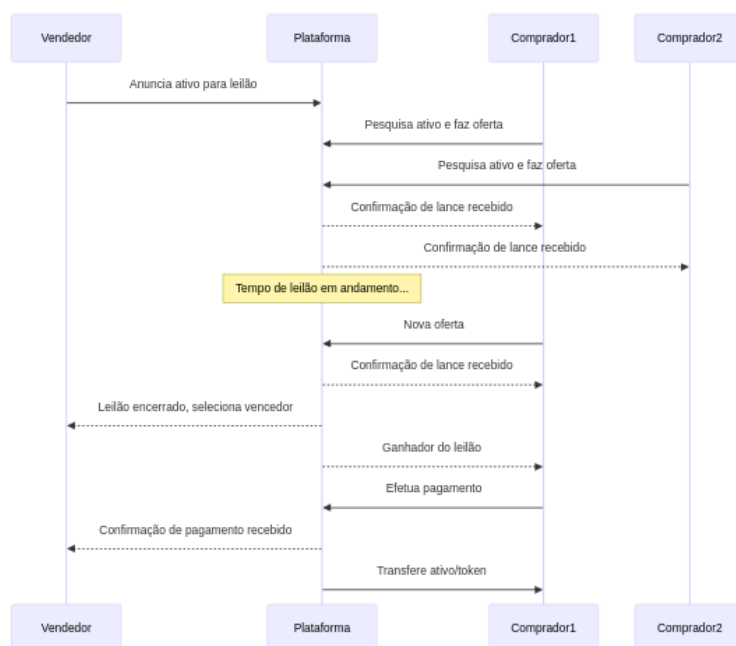


Figura 2. Diagrama de sequência do modelo de transação de leilão.

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.

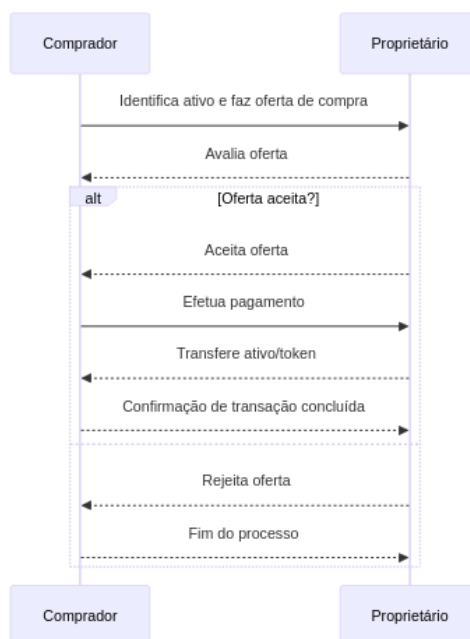


Figura 3. Diagrama de sequência do modelo de transação de oferta espontânea de compra.

Esses três modelos de transação oferecem diferentes benefícios e desafios no mer-

cado de compartilhamento dinâmico de espectro, um resumo da comparação entre eles pode ser visto na Tabela 2. 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.

Tabela 2. Comparação entre os modelos de transação.

Aspectos	Compra e Venda	Leilão	Oferta Espontânea de Compra
Início do processo	Iniciado pelo vendedor, que anuncia o ativo.	Iniciado pelo vendedor, que disponibiliza o ativo para leilão.	Iniciado pelo comprador, que faz uma oferta para adquirir o ativo.
Tipo de negociação	Preço fixo e condições predefinidas pelo vendedor.	Competição entre compradores por lances.	Negociação direta entre comprador e vendedor.
Flexibilidade	Baixa flexibilidade; termos já definidos.	Flexível, pois o preço é ajustado de acordo com os lances dos compradores.	Alta flexibilidade; o comprador pode negociar diretamente o preço.
Velocidade do processo	Rápido, após o anúncio, a compra pode ser feita imediatamente.	Lento, pois é necessário esperar o término do leilão.	Variável, depende da rapidez com que o vendedor responde à oferta.
Papel do vendedor	Define as condições e não precisa participar após o anúncio.	Define o início e o fim do leilão, com pouca intervenção durante o processo.	Decide aceitar ou rejeitar ofertas feitas pelo comprador.
Papel do comprador	Compra o ativo conforme condições definidas.	Compete com outros compradores para fazer o maior lance.	Faz uma oferta espontânea, esperando a resposta do vendedor.
Transparência do preço	O preço é transparente e fixo desde o início.	O preço é dinâmico, determinado pelos lances dos compradores.	O preço pode ser discutido diretamente entre as partes, mas não há comparação com outros compradores.
Vantagens	Simplicidade e rapidez, com termos claros.	Maximiza o valor do ativo por meio de competição entre compradores.	Alta proatividade do comprador e flexibilidade na negociação.
Desvantagens	Falta de flexibilidade; pode levar à subutilização.	Processo lento; favorece compradores com maior poder aquisitivo.	Incerteza e possíveis atrasos na resposta do vendedor; falta de concorrência pode resultar em preços subvalorizados.
Adequado para	Ativos de menor valor ou com demanda estável.	Ativos de alto valor ou com demanda incerta.	Aquisição de ativos ociosos ou não listados previamente.

3.2. Representação Digital

Esta seção aborda os desafios da gestão dinâmica de faixas do espectro de frequência, como a representação digital de atributos complexos (localização, disponibilidade e regulamentações) e a necessidade de transações ágeis entre múltiplos agentes. Para resolvê-los, os *tokens* em blockchain destacam-se como ferramentas capazes de traduzir características físicas e regulatórias em unidades digitais programáveis. Esses *tokens* funcionam como certificados digitais que representam direitos de uso ou propriedade sobre

um recurso, permitindo que faixas de espectro — muitas vezes heterogêneas — sejam negociadas de forma transparente e segura em ambientes descentralizados.

Dois padrões técnicos são essenciais: o ERC-20, que cria *tokens* fungíveis (intercambiáveis e padronizados), ideal para blocos de frequência homogêneos, e o ERC-721, que gera *tokens* únicos (não fungíveis), adequados a faixas com singularidades, como licenças temporárias para operadoras em regiões específicas. A escolha entre eles define a eficiência das transações, a adaptação a regulamentações e as demandas técnicas do compartilhamento dinâmico, consolidando-os como pilares para modelos inovadores de gestão de espectro.

3.2.1. *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.

3.2.2. *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.

3.2.3. *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.

Tanto o padrão ERC-20 quanto o ERC-721 apresentam limitações no mercado de compartilhamento dinâmico de espectro. O ERC-20, por ser fungível, trata todas as faixas de espectro de forma homogênea, desconsiderando suas características individuais, como alcance e capacidade de penetração, o que pode não atender a necessidades específicas de usuários. Já o ERC-721, apesar de permitir a individualização de cada faixa de espectro, introduz maior complexidade e menor liquidez nas transações, já que cada *token* precisa ser negociado de forma independente, tornando o processo mais lento e custoso.

Como alternativa, o ERC-1155 [Ethereum 2018a] oferece uma solução híbrida que combina as vantagens dos dois modelos. Ele permite a criação de *tokens* fungíveis e não fungíveis num único contrato, facilitando a negociação tanto de faixas de espectro homogêneas quanto diferenciadas. Além disso, o ERC-1155 permite criar lotes de NFTs fungíveis entre si, mas não entre diferentes lotes, permitindo que faixas de espectro com características semelhantes sejam tratadas de forma intercambiável, enquanto faixas com propriedades únicas mantêm sua individualidade. Isso proporciona maior flexibilidade e eficiência no mercado, aumentando a liquidez e reduzindo a complexidade das transações sem comprometer a personalização dos ativos.

3.3. 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.

3.3.1. Temporária

Na cessão temporária, o usuário secundário obtém o direito de acesso ao espectro por um período limitado, baseado em condições predefinidas, como a disponibilidade de saldo ou o cumprimento de um prazo acordado. Esse modelo é similar ao conceito de aluguel, no qual o usuário secundário paga pelo direito de uso por um tempo determinado, mas o controle final do espectro permanece com o usuário primário, que retoma o controle ao fim do período.

As vantagens deste modelo incluem maior flexibilidade para o usuário primário, que pode continuar gerenciando o espectro e oferecer acesso temporário a diferentes usuários secundários conforme necessário. Para o usuário secundário, a cessão temporária

oferece uma oportunidade de usar o espectro sem compromissos de longo prazo, o que é ideal para projetos ou operações que demandam espectro de maneira pontual. No entanto, as desvantagens incluem a limitação de controle para o usuário secundário, que não detém o direito definitivo sobre o espectro e pode ter o acesso interrompido assim que o prazo ou condições forem atingidos. Esse modelo também implica uma maior necessidade de monitoramento do uso e das condições de cessão, tanto por parte do usuário primário quanto do secundário.

3.3.2. Definitiva

Na cessão definitiva, o usuário secundário adquire o direito de acesso ao espectro de forma permanente, tornando-se o novo usuário primário. Com isso, ele assume a responsabilidade total pelo espectro e pode, no futuro, vender ou ceder o direito para outros usuários, tornando-se responsável pela gestão e negociação do ativo.

As vantagens da cessão definitiva incluem a segurança e controle completo para o novo proprietário do espectro, que pode utilizá-lo por tempo indeterminado e tomar decisões de longo prazo, sem a necessidade de depender do usuário anterior. Esse modelo também facilita a criação de mercados mais estáveis, onde os ativos (neste caso, o espectro) podem ser negociados como propriedades permanentes, o que incentiva o investimento em infraestrutura e planejamento de longo prazo. No entanto, as desvantagens incluem o fato de que o novo proprietário agora assume toda a responsabilidade pela gestão do espectro, o que pode ser oneroso, e não há flexibilidade para devolver ou alugar o espectro se o ativo não for mais necessário. Além disso, o preço de aquisição tende a ser mais elevado, uma vez que o direito é permanente e completo, o que pode limitar o acesso a esse modelo a usuários com maior poder financeiro.

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.

4. Considerações Finais

Este estudo apresentou uma revisão crítica dos aspectos avançados de mercados descentralizados para compartilhamento dinâmico de espectro, com foco em modelos de transação, tokenização e tipos de cessão. Conforme sintetizado na Tabela 3, a análise comparativa revela que cada modelo (compra e venda, leilão e oferta espontânea) e padrão de *token* (ERC-20, ERC-721, ERC-1155) possui *trade-offs* entre eficiência, flexibilidade e equidade. A tabela destaca, por exemplo, como a cessão temporária favorece acesso democrático a espectro ocioso, enquanto a definitiva assegura estabilidade para investimentos de longo prazo. Essa síntese permite aos *stakeholders* identificar rapidamente a abordagem mais adequada a seu contexto operacional, equilibrando requisitos técnicos, econômicos e regulatórios no gerenciamento dinâmico de espectro.

Categoria	Modelo/ Padrão	Características	Vantagens	Desvantagens	Aplicações Práticas
Modelos de Transação	Compra e Venda	Preço fixo, transação imediata após anúncio.	Simplicidade e rapidez.	Falta de flexibilidade para negociação.	Faixas homogêneas de espectro com demanda estável.
	Leilão	Lances competitivos, preço dinâmico.	Maximiza valor do espectro; transparente.	Processo lento; favorece agentes com maior poder financeiro.	Faixas de alto valor ou demanda incerta.
	Oferta Espontânea	Comprador propõe oferta; vendedor aceita/rejeita.	Flexibilidade; incentiva uso de espectro ocioso.	Incerteza na aceitação; risco de preços desalinhados.	Aquisição de faixas não listadas ou nichos específicos.
Padrões de Token	ERC-20 (Fungível)	Tokens intercambiáveis e padronizados.	Liquidez alta; ideal para lotes homogêneos.	Ignora características técnicas específicas (ex.: alcance).	Blocos de frequência padronizados para uso geral.
	ERC-721 (NFT)	Tokens únicos com metadados personalizados.	Representa atributos exclusivos (ex.: localização).	Complexidade; baixa liquidez.	Licenças temporárias ou faixas com requisitos técnicos especializados.
	ERC-1155 (Híbrido)	Combina fungibilidade e não fungibilidade.	Flexibilidade; eficiência em transações em lote.	Requer gestão cuidadosa para evitar conflitos.	Agrupamento de faixas similares (fungíveis) e faixas únicas (NFTs).
Tipos de Cessão	Temporária	Direito de uso por período limitado.	Flexibilidade para o primário; baixo custo para o secundário.	Controle limitado para o secundário; necessidade de monitoramento constante.	Uso pontual.
	Definitiva	Transferência permanente de direitos.	Estabilidade para investimentos de longo prazo.	Alto custo inicial; responsabilidade total do novo proprietário.	Aquisição estratégica de faixas para expansão de infraestrutura.

Tabela 3. Síntese comparativa dos modelos de transação, padrões de token e tipos de cessão.

As tecnologias de blockchain e contratos inteligentes já estão sendo aplicadas de forma prática no mercado de espectro, mostrando-se eficazes na automação, transparência e segurança das transações. No entanto, há espaço para o desenvolvimento de novos modelos de transação que possam ampliar ainda mais a eficiência e a flexibilidade do compartilhamento de espectro. Trabalhos futuros podem se concentrar na aplicação de novos modelos de transação como “Tudo como um Serviço”, um modelo que poderia otimizar o uso ainda mais o uso do espectro, permitindo uma abordagem sob demanda, flexível e escalável para a alocação e negociação de espectro, de maneira semelhante ao que ocorre em serviços de infraestrutura como nuvem. Essa evolução proporcionaria uma maior otimização do uso do espectro, oferecendo novos serviços e oportunidades de monetização para operadoras e usuários em diferentes escalas.

Diante disso, o estudo conclui que a integração das tecnologias de blockchain com os padrões de compartilhamento de espectro pode ampliar a eficiência, adaptação e sustentabilidade dos mercados descentralizados e colaborativos de espectro. Essa integração permitirá atender às crescentes demandas de conectividade global, promovendo inovação, inclusão digital e novos modelos de negócio em diferentes contextos.

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 pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD) e MCTI-Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, com recursos financeiros do Fundo para o Desenvolvimento Tecnológico das

Telecomunicações (FUNTTEL) e administrados pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), no âmbito especificamente do projeto AERF - Ações Estratégicas para Redes Futuras, Contrato 01.22.0471.00, Referência 1508/22.

Referências

- Abognah, A. and Basir, O. (2022). Distributed spectrum sharing using blockchain: a hyperledger fabric implementation. In *2022 IEEE 1st Global Emerging Technology Blockchain Forum: Blockchain & Beyond (iGETblockchain)*, pages 1–6. IEEE.
- 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*.
- Ariyaratna, T. et al. (2019). Dynamic spectrum access via smart contracts on blockchain. In *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6. IEEE.
- Ayepah-Mensah, D. et al. (2023). Blockchain-enabled federated learning-based resource allocation and trading for network slicing in 5g. *IEEE/ACM Transactions on Networking*.
- Bhattacharya, P. et al. (2022). Trusted 6g-envisioned dynamic spectrum allocation: A reference model, layered architecture, and use-case. In *Emerging Technologies for Computing, Communication and Smart Cities: Proceedings of ETCCS 2021*, pages 405–418. Springer Nature Singapore.
- Boateng, G. O. et al. (2022). Consortium blockchain-based spectrum trading for network slicing in 5g ran: A multi-agent deep reinforcement learning approach. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 22(10):5801–5815.
- Cheng, Z. et al. (2023). A multi-blockchain scheme for distributed spectrum sharing in cbrs system. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 9(2):266–280.
- Eiza, M. H. et al. (2023). Towards trusted and accountable win-win sdwn platform for trading wi-fi network access. In *2023 IEEE 20th Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, pages 1–6. IEEE.
- 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.
- Ghourab, E. M. et al. (2023). Reputation-aware relay selection with opportunistic spectrum access: A blockchain approach. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 4:389–403.
- Hu, Q. and Jiang, T. (2022). A smart contract based spectrum trading system for elastic virtual optical networks. In *2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall)*, pages 1–5. IEEE.

- Jiang, M. et al. (2021). Decentralized blockchain-based dynamic spectrum acquisition for wireless downlink communications. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 69:986–997.
- Liu, L. et al. (2022). Spectrum trading and sharing in unmanned aerial vehicles based on distributed blockchain consortium system. *Computers and Electrical Engineering*, 103:108255.
- Liu, M. et al. (2021). Fair and smart spectrum allocation scheme for iiot based on blockchain. *Ad Hoc Networks*, 123:102686.
- Maksymyuk, T. et al. (2021). Ai-enabled blockchain framework for dynamic spectrum management in multi-operator 6g networks. In *Future Intent-Based Networking: On the QoS Robust and Energy Efficient Heterogeneous Software Defined Networks*, pages 322–338. Springer International Publishing.
- Markkandan, S. et al. (2023). Spectrum management in 6g hetnet based on smart contracts and harmonized software-defined networking-enabled approach. *International Journal of Computer Networks and Applications (IJCNA)*, 10(2):231–243.
- Patel, F. et al. (2021). Block6tel: Blockchain-based spectrum allocation scheme in 6g-envisioned communications. In *2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, pages 1823–1828. IEEE.
- Perera, L. et al. (2024). A survey on blockchain for dynamic spectrum sharing. *IEEE Open Journal of the Communications Society*.
- Polyzos, G. C. (2022). Smart contracts for decentralized dynamic spectrum marketplaces. *International Journal of Wireless Information Networks*, 29(3):275–280.
- Rajasekaran, A. S., Azees, M., and Al-Turjman, F. (2022). A comprehensive survey on blockchain technology. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52:102039.
- Reypnazarov, E. et al. (2023). Research of the application of blockchain and smart contract technologies in spectrum management and trading in cognitive radio networks. In *E3S Web of Conferences*, page 03005. EDP Sciences.
- 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.
- Tripathi, M., Phillips, B., and Sorell, M. (2019). Bring your own spectrum (byos)—a tiered architecture supporting flexible spectrum allocation. In *30th European Conference of the International Telecommunications Society (ITS): "Towards a Connected and Automated Society"*, Helsinki, Finland, 16th-19th June, 2019.
- Wang, J. et al. (2021). A secure spectrum auction scheme without the trusted party based on the smart contract. *Digital Communications and Networks*, 7(2):223–234.
- Wang, L. et al. (2023a). Secure spectrum sharing for satellite internet-of-things based on blockchain. *Wireless Personal Communications*, 131(1):357–369.

- Wang, M. et al. (2023b). Fairness oriented spectrum auction for blockchain-assisted dynamic spectrum sharing. In *2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1–6. IEEE.
- Wang, W. and Zhao, Y. (2023). Blockchain-based spectrum management architecture and trading mechanism design for space-air-ground integrated network. *IEEE Communications Letters*.
- Wang, Y. et al. (2023c). Blockchain-based spectrum sharing for fanet cooperative communication. *IEEE Communications Letters*.
- Weerasinghe, N. et al. (2021). A novel blockchain-as-a-service (baas) platform for local 5g operators. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2:575–601.
- Wilhelmi, F. and Giupponi, L. (2021). On the performance of blockchain-enabled ran-as-a-service in beyond 5g networks. In *2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 01–06. IEEE.
- Xenakis, D. et al. (2021). Contract-less mobile data access beyond 5g: fully-decentralized, high-throughput and anonymous asset trading over the blockchain. *IEEE Access*, 9:73963–74016.
- Xue, L. et al. (2021). Stbc: A novel blockchain-based spectrum trading solution. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 8(1):13–30.
- Yang, N. et al. (2023). Lightweight blockchain-based secure spectrum sharing in space-air-ground-integrated iot network. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(23):20511–20527.
- Yang, Y. et al. (2022). Reputation mechanism designed for blockchain empowered dynamic spectrum sharing system. In *2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1191–1196. IEEE.
- Zhao, J. et al. (2021a). Spectrum trading based on blockchain for resource allocation of optical network virtualization. In *Optoelectronics and Communications Conference*, page W1A. 3. Optica Publishing Group.
- Zhao, Z. et al. (2021b). Combinatorial spectrum e-auction for 5g heterogeneous networks: A zether-based approach. *Security and Communication Networks*, 2021(1):1360560.
- Zheng, S., Han, T., Jiang, Y., et al. (2020). Smart contract-based spectrum sharing transactions for multi-operators wireless communication networks. *IEEE Access*, 8:88547–88557.
- Zhou, Y. et al. (2023). An improved spectrum trading design based on dynamic credit aggregate-signature blockchain. *IEEE Wireless Communications Letters*, 12(4):625–629.
- Zhu, K. et al. (2022). Privacy-aware double auction with time-dependent valuation for blockchain-based dynamic spectrum sharing in iot systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(8):6756–6768.
- Zhu, R. et al. (2021). A blockchain-based two-stage secure spectrum intelligent sensing and sharing auction mechanism. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(4):2773–2783.