

**Inatel**

*Instituto Nacional de Telecomunicações*

Projeto e Especificação de um  
Mercado de Negociação de  
Espectro de Radiofrequência

JONAS VILASBÔAS MOREIRA

JUNHO / 2023





**PROJETO E ESPECIFICAÇÃO DE  
UM MERCADO DE NEGOCIAÇÃO  
DE ESPECTRO DE RADIO-  
FREQUÊNCIA**

**JONAS VILASBÔAS MOREIRA**

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Telecomunicações.

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti.

Moreira, Jonas Vilas Boas.

M838p

Projeto e Especificação de um Mercado de Negociação de Espectro de Radiofrequência / Jonas Vilas boas Moreira. – Santa Rita do Sapucaí, 2023. 73 p.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti

Dissertação de Mestrado em Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

1. Compartilhamento dinâmico de espectro 2. Acesso dinâmico ao espectro 3. IOTA 4. DLT 5. Mercado de comercio de espectro 6. Mestrado em Telecomunicações. I. Alberti, Antônio Marcos II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_,  
pela comissão julgadora:

---

Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti  
INATEL

---

Prof. Dr. Marcelo Pellenz  
PUCPR

---

Profa. Dra. Victoria Souto  
INATEL

---

**Coordenador do Curso de Mestrado**  
Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito



*“Ouça os conselhos e esteja pronto  
para aprender; assim um dia você  
será sábio”*

---

*Provérbios 19.20*





*Aos meus pais,  
meus primeiros grandes professores.*



# Agradecimentos

Agradeço inicialmente a minha família, que sempre acreditou na minha capacidade, me motivou e me deu suporte em todas as minhas decisões e em todos os momentos de minha vida. Meus pais Benedito Jorge Moreira e Ana Maria Vilasbôas Moreira, minha irmã Ana Elisa Vilasbôas Moreira e minha tia Benedita Mendes Vilasbôas - a famosa tia Dita (*in memoriam*). Sem o investimento inicial que a tia Dita proporcionou para que fosse possível iniciar meus estudos, jamais teria chegado tão longe. Agradeço a Deus todos os dias por fazer parte desta família.

Agradeço também a todos os meus amigos, que me apoiaram e tiveram paciência comigo durante todo este processo. Muitas vezes a vontade era de estar junto, mas para alcançar algo que poucos alcançam, é necessário um esforço que poucos estão dispostos a empregar. Obrigado por estarem sempre comigo!

Ao meu orientador, Professor Dr. Antônio Marcos Alberti, um homem com uma visão certamente a frente de seu tempo, muito obrigado por compartilhar seu conhecimento em cada conversa informal, reunião e correções de artigos e trabalhos. O senhor tem todo meu respeito. Foram anos de muito esforço e dedicação, mas com toda certeza saio uma pessoa melhor no final dessa jornada.

Ao Professor Dr. Dayan Adionel Guimarães e ao meu amigo doutorando Elivander J. T. Pereira, que contribuíram imensamente na fase de desenvolvimento do projeto e publicação de artigos, muito obrigado pela disponibilidade de ajudar sempre que foi necessário. O conhecimento de vocês foi imprescindível nesta conquista.

A minha querida madrinha Gisele Moreira dos Santos, uma das pessoas mais queridas em minha vida, muito obrigado por sempre torcer por mim, por todas as orações, e por me apoiar nesta caminhada!

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os meus professores, de curso técnico, faculdade, pós graduação e mestrado, que não citarei por nome para não criar uma lista muito extensa, e também não cometer a injustiça de deixar alguém de fora. Obrigado por compartilharem seus conhecimentos, servirem de exemplo e me motivar a ser uma pessoa melhor.

*Jonas Vilasbôas Moreira*



# Sumário

<b>Sumário</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b>	<b>xv</b>
<b>Resumo</b>	<b>xvii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	3
1.1.1 Objetivo Principal . . . . .	3
1.1.2 Objetivos Específicos . . . . .	3
1.2 Contribuições e estrutura do trabalho . . . . .	4
<b>2 Fundamentação Teórica</b>	<b>5</b>
2.1 Compartilhamento de espectro . . . . .	5
2.2 IoT como mecanismo de detecção de espectro . . . . .	5
2.3 <i>Blockchain</i> . . . . .	6
2.4 <i>IOTA</i> . . . . .	7
2.5 Contratos inteligentes . . . . .	8
<b>3 Revisão bibliográfica</b>	<b>11</b>
<b>4 Proposta de arquitetura</b>	<b>19</b>
4.1 Considerações iniciais . . . . .	19
4.2 Pontos de partida . . . . .	23
4.3 Atores do sistema . . . . .	23
4.4 Componentes do sistema . . . . .	24
4.5 Modelos de compartilhamento de espectro . . . . .	26
4.6 Visão geral do modelo completo da arquitetura . . . . .	27
<b>5 Decisões de implementação</b>	<b>33</b>
5.1 DLT baseado em <i>blockchain</i> versus DLT não baseado em <i>blockchain</i> .	33

---

5.2	Implementação centralizada versus descentralizada . . . . .	34
<b>6</b>	<b>Do modelo à implementação</b>	<b>37</b>
6.1	Ajuste de escopo antes da implementação . . . . .	37
6.2	Cenário experimental . . . . .	39
6.3	Metodologia de avaliação . . . . .	40
6.4	Resultados . . . . .	42
<b>7</b>	<b>Conclusão</b>	<b>45</b>
7.1	Trabalhos Futuros . . . . .	46
7.2	Desafios e Lições Aprendidas . . . . .	46
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>47</b>

# Lista de Figuras

2.1	Exemplo de uma negociação na <i>blockchain</i> . . . . .	7
2.2	Exemplo de uma negociação na rede <i>IOTA</i> . . . . .	8
4.1	Concepção original da arquitetura. . . . .	22
4.2	Modelo de arquitetura do STM. . . . .	28
6.1	Modelo de arquitetura da PoC do STM. . . . .	39
6.2	Diagrama de sequência UC1 - Verificação de ocupação do espectro de RF licenciado não anunciado proativamente. . . . .	41
6.3	Diagrama de sequência UC2 - Compra de espectro de RF licenciado anunciado proativamente. . . . .	41
6.4	Testes da PoC - Resultado dos cem testes executados no caso de teste UC1. . . . .	43
6.5	Testes da PoC - Resultado dos testes de <i>throughput</i> no caso de teste UC2. . . . .	44





# Lista de Tabelas

3.1	Resumo dos aspectos das DLTs. . . . .	17
3.2	Resumo das estruturas de dados das DLTs e uso de SCs. . . . .	17
4.1	Atores da concepção original do projeto. . . . .	20
4.2	Objetos de informação em trânsito entre atores e serviços. . . . .	20
4.3	Comparação entre as principais funcionalidades do STM x Trabalhos Relacionados. . . . .	31



# Lista de Abreviaturas e Siglas

<b>5G</b>	<i>Fifth-Generation of Mobile Telecommunications Technology</i>
<b>AAS</b>	<i>As-a-Service</i>
<b>Anatel</b>	Agência Nacional de Telecomunicações
<b>API</b>	<i>Application Programming Interface</i>
<b>BFT</b>	Tolerância a Falhas Bizantinas ( <i>Byzantine Fault Tolerance</i> )
<b>CBRS</b>	<i>Citizens Broadband Radio Service</i>
<b>CBT</b>	<i>Consensus-Before-Talk</i>
<b>CR</b>	Rádios Cognitivos ( <i>Cognitive Radios</i> )
<b>CSS</b>	Folhas de Estilo em Cascata ( <i>Cascading Style Sheets</i> )
<b>DAG</b>	<i>Directed Acyclic Graph</i>
<b>DLT</b>	Tecnologia de Registro Distribuído ( <i>Distributed Ledger Technologies</i> )
<b>DSA</b>	Acesso Dinâmico ao Espectro ( <i>Dinamic Spectrum Access</i> )
<b>DSL</b>	Registro de Espectro Distribuído ( <i>Distributed Spectrum Ledger</i> )
<b>DSS</b>	Compartilhamento Dinâmico de Espectro ( <i>Dinamic Spectrum Sharing</i> )
<b>FCC</b>	<i>Federal Communications Commission</i>
<b>FSBaaS</b>	<i>Full-Spectrum Blockchain-as-a-Service</i>
<b>HTML</b>	Linguagem de Marcação de Hipertexto ( <i>Hypertext Markup Language</i> )
<b>HTTP</b>	Protocolo de Transferência de Hipertexto ( <i>Hypertext Transfer Protocol</i> )
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<b>IoSD</b>	<i>Internet of Spectrum Devices</i>
<b>IoT</b>	Internet das Coisas ( <i>Internet of Things</i> )
<b>ISM</b>	<i>Industrial, Scientific, and Medical</i>
<b>ISP</b>	Provedores de Serviço de Internet ( <i>Internet Service Providers</i> )
<b>JSON</b>	<i>Javascript Object Notation</i>
<b>LTE</b>	<i>Long Term Evolution</i>
<b>MEC</b>	Computação de Borda Móvel ( <i>Mobile Edge Computing</i> )
<b>MVC</b>	<i>Model-View-Controller</i>
<b>MVNO</b>	<i>Mobile Virtual Network Operator</i>
<b>Ofcom</b>	<i>Office of Communications</i>

<b>PoC</b>	Prova de Conceito ( <i>Proof-of-Concept</i> )
<b>PoW</b>	Prova de Trabalho ( <i>Proof of Work</i> )
<b>PU</b>	Usuário Primário ( <i>Primary User</i> )
<b>RF</b>	Radiofrequência ( <i>Radio Frequency</i> )
<b>SAS</b>	Sistema para Acesso ao Espectro ( <i>Spectrum Access System</i> )
<b>SAT</b>	Transação de Acesso ao Espectro ( <i>Spectrum Access Transaction</i> )
<b>SC</b>	Contrato Inteligente ( <i>Smart Contracts</i> )
<b>SLA</b>	Acordo de Nível de Serviço ( <i>Service Level Agreement</i> )
<b>SOA</b>	Arquitetura Orientada a Serviços ( <i>Service Oriented Architecture</i> )
<b>SSIoT</b>	<i>Spectrum Sensing Internet of Things</i>
<b>STM</b>	Mercado de Negociação de Espectro ( <i>Spectrum Trading Market</i> )
<b>SU</b>	Usuário Secundário ( <i>Secondary User</i> )
<b>WRAN</b>	<i>Wireless Regional Area Network</i>

# Resumo

Moreira, J.V. Projeto e Especificação de um Mercado de Negociação de Espectro de Radiofrequência [dissertação de mestrado]. Santa Rita do Sapucaí: Instituto Nacional de Telecomunicações; 2023.

O compartilhamento do espectro de radiofrequência é crucial para a coexistência de sistemas que utilizam comunicação sem fio em áreas rurais e urbanas. As soluções devem abordar as potenciais ameaças cibernéticas e vulnerabilidades, que surgem do uso de dispositivos de *Internet* das coisas e tecnologias de comunicação sem fio abertas em ambientes inteligentes. Esta dissertação apresenta uma nova arquitetura para compartilhamento dinâmico de espectro de radiofrequência, chamada de mercado de negociação de espectro. O mercado de negociação de espectro pode ser aplicado para fornecer um mercado de espectro de radiofrequência confiável para seus usuários. Por meio de vendas temporárias de direitos de transmissão de espectro licenciado, os usuários principais são remunerados com criptomoedas *IOTA* pelo aluguel de seus direitos de transmissão a usuários secundários. A verificação da ocupação do espectro é realizada nesta arquitetura por dispositivos de *Internet* das coisas equipados com capacidade de sensoriamento, que escaneiam o meio e alimentam o banco de dados do mercado com as informações de ocupação do espectro, remunerando os proprietários dos dispositivos pelo trabalho realizado. A fim de avaliar o desempenho do mercado de negociação de espectro, uma prova de conceito foi desenvolvida e testes funcionais e de desempenho foram realizados. Os resultados experimentais mostram a aplicabilidade do mercado, onde o tempo médio de negociação de espectro fica em torno de 12 segundos. Os testes de *throughput* mostram que a arquitetura do protótipo suporta entre 20 e 24 solicitações simultâneas por minuto, fornecendo uma maneira segura e eficiente de compartilhar recursos de espectro de radiofrequência, o que é crucial para suportar ambientes inteligentes, enquanto conta com tecnologias integradas de informação e comunicação.

**Palavras-Chave:** Compartilhamento dinâmico de espectro, acesso dinâmico ao espectro, *IOTA*, *DLT*, mercado de comércio de espectro, *IoT*, agricultura inteligente, segurança cibernética



# Abstract

Moreira, J.V. Design and Specification of a Radio-frequency Spectrum Trading Market [dissertação de mestrado]. Santa Rita do Sapucaí: Instituto Nacional de Telecomunicações; 2023.

Radio-frequency spectrum sharing is crucial for wireless coexistence in rural and urban areas. Solutions should address the potential cyber threats and vulnerabilities that arise from the usage of IoT and open wireless communication technologies in the smart environments. This article introduces a new architecture for radio-frequency dynamic spectrum sharing called spectrum trading market (STM). STM can be applied to provide a trustable spectrum market for devices. Through temporary sales of licensed spectrum transmission rights, primary users are remunerated with IOTA cryptocurrency for renting their transmission rights to secondary users. The spectrum occupation verification is performed in this architecture by IoT devices equipped with sensing capability, which scan the medium and feed the STM database with spectrum occupancy information, remunerating the IoT owners for the spectrum sensing job. A proof of concept has been developed, and functional and performance tests have been performed. Experimental results show the STM applicability, yielding an average spectrum negotiation time around 12 seconds. Throughput tests show that the prototype architecture supports between 20 and 24 simultaneous requests per minute, providing a secure and efficient way to share radio-frequency spectrum resources, which is crucial to support smart environments while relying on integrated information and communications technologies.

**Keywords:** *Keywords:* Dynamic spectrum sharing, dynamic spectrum access, IOTA, DLT, spectrum trade market, IoT, smart farming, cybersecurity





# Capítulo 1

## Introdução

A escassez de bandas de espectro de Radiofrequência (*Radio Frequency*, RF) livres é um problema notório, que impacta tanto a implantação de novas redes de comunicações quanto a manutenção das redes já existentes. Esse problema existe porque o uso das bandas de espectro de RF segue uma política de alocação fixa, na qual os usuários têm o direito de transmitir em uma determinada banda de espectro garantido por legislação [1, 2]. Com o advento das *Fifth-Generation of Mobile Telecommunications Technology* (5G) e a implantação generalizada de dispositivos de *Internet das Coisas* (*Internet of Things*, IoT), espera-se que esse problema piore. À medida que o número de dispositivos que trocam informações aumenta exponencialmente, haverá uma demanda maior por bandas de espectro. Portanto, lidar com o problema de escassez de espectro é de suma importância. Nesse contexto, soluções confiáveis para compartilhamento dinâmico de espectro de RF, com detecção de coexistência barata, são altamente desejáveis para promover conectividade sem fio heterogênea para ambientes inteligentes, como por exemplo, em agricultura inteligente, cadeia de produção de alimentos, etc.

Atualmente, propostas para resolver o problema de escassez de espectro abordam pesquisas de Rádios Cognitivos (*Cognitive Radios*, CR) como [2], [3] e [4]. Exemplos práticos dessa linha de pesquisa são as iniciativas de Acesso Dinâmico ao Espectro (*Dinamic Spectrum Access*, DSA), ou Compartilhamento Dinâmico de Espectro (*Dinamic Spectrum Sharing*, DSS), onde um Usuário Primário (*Primary User*, PU) e um Usuário Secundário (*Secondary User*, SU) podem compartilhar bandas de transmissão de forma oportunística. Outras iniciativas de pesquisa estão investigando o compartilhamento de espectro usando outros tipos de tecnologias. Por exemplo: o uso de computação em nuvem para fornecer compartilhamento de espectro *As-a-Service* (AAS) [5], onde usuários podem acessar recursos de compartilhamento através de serviços *web* e as transações são realizadas em *blockchains* centralizadas e descentralizadas; Contrato Inteligente (*Smart Contracts*, SC) [6,7], onde a solicitação de sensoriamento é coordenada através de contratos inteligentes; Computação de Borda Móvel (*Mobile Edge Computing*, MEC) [8], onde o sensoriamento é realizado por dispositivos IoT em computação de borda; *blockchain* [9, 10] onde a tecnologia *blockchain* é utilizada para garantir a segurança e registro imutável das operações; e outros tipos de Tecnologia de Registro Distribuído (*Distributed Ledger Technologies*, DLT) [11–13],

onde o compartilhamento de espectro se dá através de implementações de novas redes DLT, baseadas em *blockchain*. Maiores detalhes sobre estes trabalhos serão apresentados no Capítulo 3. O compartilhamento de espectro para a coexistência de redes móveis e IoT é explorado em [14–17]. Esses trabalhos propõem novos modelos de compartilhamento de espectro para melhorar a eficiência da utilização do espectro e da energia.

Embora existam propostas de compartilhamento confiável de espectro usando DSA, DSS e tecnologias emergentes, como DLT, SC e computação em nuvem, ainda há espaço para novas ideias, pois nenhuma dessas propostas oferecem uma solução que seja ao mesmo tempo confiável, segura e de baixo custo, podendo ser adotada por pequenas e grandes redes. Essas soluções podem ser aplicadas para agricultura precisa, agricultura inteligente e logística de alimentos, uma vez que um mercado confiável de espectro de RF pode melhorar a resiliência contra ameaças cibernéticas e vulnerabilidades. Este trabalho aborda essa lacuna de pesquisa.

Em [18] foi publicado um ponto de partida do presente trabalho. O principal objetivo de [18] é empregar dispositivos de *Spectrum Sensing Internet of Things* (SSIoT) de baixo custo [18] para escanear o ambiente de rádio a fim de encontrar oportunidades de transmissão em bandas de espectro. O objetivo desta dissertação é apresentar uma nova arquitetura de compartilhamento de espectro que funciona como um mercado de negociação, onde um SU que não possui faixa de frequência para transmitir possa comprar direitos temporários de transmissão de um PU, sendo a oportunidade de transmissão identificada pelos dispositivos SSIoT [18].

A rede IoT, composta por esses dispositivos SSIoT [18], é utilizada para buscar oportunidades de transmissão na rede primária e alimentar o mercado de espectro, para que a estratégia de compartilhamento do mercado em uma região possa ser implementada. Os titulares de direitos de transmissão das bandas de espectro licenciadas e dispositivos SSIoT [18] envolvidos em atividades de sensoriamento, serão remunerados quando a alocação de espectro ocioso na rede primária for bem-sucedida, na qual os pagamentos são feitos com criptomoeda *IOTA* e registrados na rede *Tangle* da *IOTA* [19]. Neste contexto, a principal hipótese desta dissertação é que é possível alcançar uma arquitetura de compartilhamento de espectro de baixo custo, orientada para o mercado, autossustentável, auditável e equilibrada, e que funcione sob um modelo ganha-ganha.

As propostas anteriores ao desenvolvimento deste trabalho, abordadas em detalhes no Capítulo 3, empregam direta ou indiretamente a *blockchain* em suas soluções, como por meio de criptomoedas baseadas em *blockchain* [9, 10], ou SC [6, 7], que tem como base a tecnologia *blockchain*. Este tipo de aplicação implica custos e requer o envolvimento de terceiros (mineradores), o que aumenta o ônus geral da solução. Além disso, há a questão do próprio valor da criptomoeda *blockchain*, bem como taxas de transações caras. Embora unidades fracionárias desses ativos digitais possam ser compradas, as trocas normalmente limitam os valores mínimos de retirada, o que pode ser um problema. Além disso, os criptoativos ainda estão sujeitos a alta volatilidade. Ao analisar os gráficos de mercado de uma criptomoeda, fica evidente que seu valor sofre flutuações significativas. No caso dos contratos inteligentes, ainda existe o problema de ter que limitar a quantidade de dados utilizados nas operações de escrita, já que o

custo de realização dos contratos depende da quantidade de dados a serem registrados.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Principal

O objetivo principal desta dissertação é apresentar uma nova arquitetura para compartilhamento de espectro de RF, onde o compartilhamento é realizado através de transações em um mercado digital. Para alimentar o mercado com as bandas de espectro que serão posteriormente negociadas, são utilizados dispositivos IoT equipados com módulos de sensoriamento, que são remunerados pelas informações enviadas ao mercado. As transações realizadas no mercado digital, empregam DLT como meio de pagamento.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

A proposta deste trabalho difere das existentes, pois apresenta um mercado de baixo custo e autossustentável, onde uma pequena taxa está inclusa em todas as negociações, e o valor arrecadado em taxas é usado para cobrir os seus próprios custos de funcionamento. O mercado é auditável, pois todas as ações que ocorrem em seu ambiente são armazenadas para verificação futura. Além disso, o mercado de negociação de espectro funciona em um modelo ganha-ganha, pois será bom para todos os atores, e não somente para um grupo exclusivo de participantes. Em outras palavras, a presente proposta oferece uma utilização mais eficiente das faixas de espectro disponíveis, fornecendo um modelo de compartilhamento seguro e confiável, por meio de um mercado que emprega DLT como meio de pagamento e armazenamento imutável de informações, que não faz uso de equipamentos especializados (como no caso dos CR), e o custo de entrada para qualquer participante não é um obstáculo.

No desenvolvimento da arquitetura proposta são apresentadas questões significativas que impactaram sua implementação, que por fim se tornaram hipóteses implementadas neste trabalho, como por exemplo: Como foi feita a escolha da DLT adotada na solução? Quais seriam as principais diferenças de implementar essa arquitetura usando abordagens centralizadas e descentralizadas? Quais seriam os benefícios e malefícios do uso de contratos inteligentes no mercado? Além disso, o trabalho apresenta a implementação de uma Prova de Conceito (*Proof-of-Concept*, PoC) que é uma versão reduzida de sua arquitetura teórica, mas que realiza as principais ações necessárias para que o compartilhamento de bandas do espectro seja alcançado.

Os resultados dos testes realizados na PoC são satisfatórios para o cenário proposto, pois a implementação se aproxima muito de um cenário de aplicação real, validando o conceito de compartilhamento de espectro por meio de uma arquitetura de baixo custo, confiável e segura, beneficiando todos os participantes do mercado. Esses resultados são importantes para a comunidade científica, pois apresentam novos caminhos para o compartilhamento de espectro, usando DLT, que podem impactar diretamente todos os participantes no cenário de ambientes inteligentes, como cidade inteligente, agricultura, construção, etc.

## 1.2 Contribuições e estrutura do trabalho

As principais contribuições deste trabalho são:

- Revisão bibliográfica de trabalhos que investigam o compartilhamento de espectro com o uso de DLT.
- Apresentação de uso de DLT para armazenamento de verificações de ocupação de espectro, e registro de aluguel temporário de direitos de transmissão em bandas de espectro.
- Argumentação sobre uso de DLT baseado em *blockchain* versus DLT não baseado em *blockchain*.
- Argumentação sobre uso de arquitetura centralizada versus arquitetura descentralizada.
- Modelo de arquitetura teórico, que utiliza DLT no compartilhamento de espectro de radiofrequência.
- Prova de conceito com os elementos essenciais da arquitetura teórica proposta.
- Resultados de testes funcionais e de *throughput*, realizados sob a prova de conceito, que comprovam as principais contribuições.

O restante desta dissertação está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2, são apresentados os termos e definições utilizados ao longo do texto; no Capítulo 3 os trabalhos relacionados são apresentados, e as oportunidades de pesquisa em aberto são discutidas; o Capítulo 4 detalha a arquitetura teórica utilizada para resolver o problema mencionado no Capítulo 1, chamada de Mercado de Negociação de Espectro (*Spectrum Trading Market, STM*), com registro de transação perene e imutável não apenas para aluguel de espectro, como também para sensoriamento de espectro utilizando dispositivos SSIoT; no Capítulo 5 são colocadas as decisões de implementação; no Capítulo 6 é apresentada uma PoC para a arquitetura proposta, bem como os resultados dos testes funcionais e de *throughput* realizados. Resultados experimentais foram obtidos para comprovar as principais contribuições; e no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões sobre a pesquisa.

Como resultado deste trabalho, foi publicado o seguinte artigo:

- J.V. MOREIRA, e A.M. ALBERTI. Mercado de Espectro com IOTA. *Workshop em Blockchain: Teoria, Tecnologias e Aplicações (WBlockchain), SBC 2022*, Fortaleza, CE, Maio 2022.

Ainda, o artigo a seguir encontra-se em avaliação:

- J.V. MOREIRA, D.A. GUIMARÃES, E.J.T. PEREIRA e A.M. ALBERTI. Design and Specification of a Dynamic Spectrum Market. *Ad Hoc Networks* (submetido).

# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

Neste capítulo serão introduzidos alguns termos e tecnologias que foram utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

### 2.1 Compartilhamento de espectro

O compartilhamento de espectro de RF é uma técnica que permite que uma banda de espectro seja compartilhada entre diferentes sistemas. Existem bandas de espectro licenciadas e não licenciadas, e apesar de o recurso espectro de RF ser o mesmo em ambas, os modos de operação são diferentes em cada uma delas. As bandas de espectro licenciadas não possuem a característica de compartilhamento intrínseca que existe nas bandas de espectro não licenciadas [20], pois os direitos de transmissão em bandas de espectro licenciadas pertencem a um usuário exclusivo, garantido por legislação, enquanto as bandas de espectro não licenciadas não têm dono. Para compartilhar bandas de espectro licenciadas, é necessário que o SU na rede secundária identifique uma oportunidade de transmissão na banda de rede primária, e aproveite o espectro ocioso enquanto o PU não estiver transmitindo. Uma pesquisa sobre técnicas de compartilhamento de espectro para IoT é fornecida por Zhang et al. [21].

### 2.2 IoT como mecanismo de detecção de espectro

O termo *Internet* das Coisas (IoT) se refere ao ato de conectar objetos físicos do cotidiano, como uma lâmpada ou um termostato, à *Internet* através de uma rede sem fio, sem intervenção humana. Estes objetos podem ser utilizados para enviar ou receber comandos, ou então realizar alguma atividade de sensoriamento. Normalmente, estes dispositivos da *Internet* das Coisas são citados com o termo inteligente, por exemplo lâmpada inteligente, mesmo que não realizem nenhuma atividade que os façam merecer tal adjetivo.

Aproveitando a popularização desta tecnologia, e a miniaturização de placas e circuitos eletrônicos, uma nova leva de dispositivos IoT surgiu. Mais voltada para fins específicos, como por exemplo, aplicabilidades industriais e acadêmicas, estes dispositivos podem ser equipados com diversos tipos de módulos e sensores, de acordo com

a necessidade de seus usuários. Este foi o ponto de partida para a pesquisa que tem como resultado [18].

Para compartilhar uma banda de espectro licenciada é necessário primeiro identificar se ela está ou não sendo utilizada pelo PU detentor de seus direitos de transmissão. Em [18] é proposto o uso de dispositivos IoT para realizar o sensoriamento do ambiente, a fim de identificar se uma banda de espectro está livre ou ocupada. Este dispositivo IoT com capacidade de sensoriamento espectral foi chamado de SSIoT [18]. Uma vez identificada uma oportunidade de transmissão, um banco de dados é alimentado com as informações do estado atual do espectro. Outros sistemas que não possuem espectro disponível para transmissão, podem consultar esta base de dados a fim de encontrar uma banda de espectro disponível para uso.

Do ponto de vista prático, o dispositivo SSIoT [18] pode ser separado em duas categorias: o dispositivo principal, e os dispositivos secundários. Os dispositivos secundários são quaisquer dispositivos IoT (por exemplo câmeras de segurança, módulos de iluminação, dispositivos de meteorologia, etc) que foram equipados com um módulo de sensoriamento, e são capazes de realizar a verificação de ocupação de espectro. O dispositivo principal não realiza o sensoriamento, ele recebe os dados de sensoriamento enviados pelos dispositivos secundários, processa as amostras, e através de um processo de fusão de dados obtém o veredito final, que representa o estado atual de ocupação de uma faixa de espectro. Após este processo, que acontece na própria rede IoT, o dispositivo principal alimenta a base de dados do mercado de espectro com o resultado final da verificação realizado pelos dispositivos secundários.

O dispositivo SSIoT [18] pode, teoricamente, operar em uma ampla faixa de espectro, onde o alcance depende do *frontend* de RF implementado no *hardware* do dispositivo. O tempo e o custo de verificação estão ligados ao tamanho da faixa de espectro analisada durante o sensoriamento. Por exemplo, para verificar o estado de ocupação de bandas de espectro de 0 a 100 MHz, seria mais rápido e mais barato do que verificar o estado de ocupação de bandas de espectro de 0 a 500 MHz.

## 2.3 Blockchain

*Blockchain* é um tipo de DLT que funciona de forma semelhante a um livro de contabilidade eletrônico, e ganhou notoriedade em 2008 com o surgimento do *Bitcoin* [22], criado por uma pessoa desconhecida que atende pelo pseudônimo de Satoshi Nakamoto. *Bitcoin* é uma versão de dinheiro eletrônico, e permite que transações sejam efetuadas com confiança e segurança, de uma parte para outra, sem a necessidade de qualquer intermediário. Embora os termos *blockchain* e *Bitcoin* pareçam ser intercambiáveis, eles não são. *Bitcoin* é um ativo digital, enquanto *blockchain* é a tecnologia chave por trás do *Bitcoin*.

O funcionamento da *blockchain* é semelhante ao de um livro contábil, mas ao invés de registrar cada transação em uma linha do livro, a transação é armazenada em um bloco, que é conectada a outro bloco, formando a cadeia de blocos. Para adicionar um novo bloco na rede *blockchain*, é necessário um processo conhecido como mineração. Nesse processo, o minerador (que na verdade é um nó da rede) precisa resolver um de-

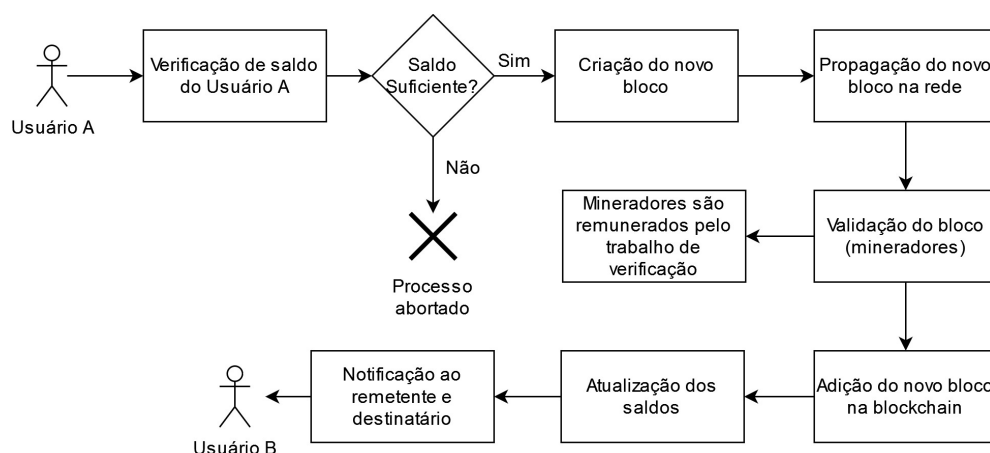


Figura 2.1: Exemplo de uma negociação na blockchain.

safio matemático, a fim de validar o novo bloco, antes que este seja conectado ao grafo de registros imutáveis existente. Esse processo de validação emprega algoritmos de consenso, que garantem que as regras da rede sejam seguidas e que todas as transações ocorram de maneira confiável.

*Blockchain* é um banco de dados descentralizado e distribuído. Significa que o “livro contábil” está espalhado pela rede. Não existe uma cópia única das informações, assim como nenhuma autoridade central para mantê-las. Cada participante da rede tem uma cópia do “livro de contabilidade”. Para realizar uma transação na *blockchain*, o usuário precisa ter uma carteira digital. A carteira é o local onde o ativo digital (por exemplo, o *Bitcoin*) é armazenado. Caso o usuário queira enviar uma certa quantidade de ativos para outro usuário, o seguinte processo ocorre: (i) primeiro verifica-se se o usuário possui fundos o suficiente para prosseguir; (ii) um novo bloco com a transação é criado e disponibilizado para os mineradores realizarem a validação; (iii) o novo bloco é verificado pelos mineradores da *blockchain*; (iv) após a conclusão da verificação, o novo bloco é adicionado à cadeia, e os mineradores são remunerados pelo trabalho de verificação; (v) toda rede *blockchain* é então atualizada com o novo bloco; (vi) o saldo dos envolvidos na transação é atualizado; e (vii) os envolvidos são notificados que a transação foi concluída. A Figura 2.1 ilustra a sequência do processo descrito acima.

## 2.4 IOTA

*IOTA* [19] é um tipo de DLT voltada para a indústria de IoT. A *IOTA* difere de outros tipos de tecnologia DLT porque ao invés de utilizar como base *blockchain* [22], implementa uma tecnologia própria chamada *Tangle* [19], que utiliza como base uma tecnologia de *Directed Acyclic Graph* (DAG). O *Tangle*, assim como a *blockchain*, funciona como um livro contábil, mas diferente da *blockchain*, que salva suas transações em blocos conectados sequencialmente, o *Tangle* utiliza DAG para armazenar as transações realizadas na rede *IOTA*.

Para que uma transação seja validada, ela deve primeiro validar outras duas transações e garantir que não haja nenhum tipo de conflito entre elas. O consenso é alcançado

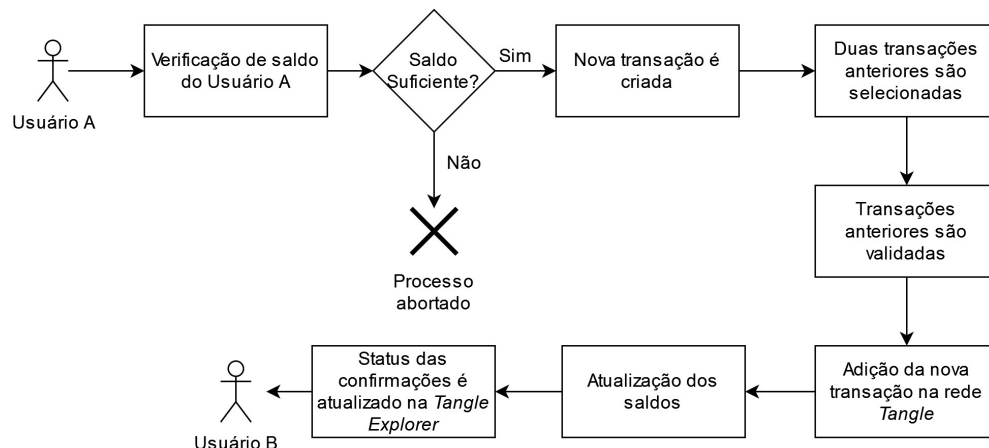


Figura 2.2: Exemplo de uma negociação na rede IOTA.

automaticamente, sem a necessidade de outros participantes. No *Tangle*, todas as operações são de custo zero; e não há limite para o número de operações confirmadas por segundo - quanto mais transações, maior é a velocidade de validação de outras transações.

Analisando o funcionamento da *IOTA* sob uma perspectiva mais técnica, conforme foi dito, para que uma transação seja validada, ela tem que validar outras duas transações primeiro. Porém, se um usuário puder gerar um terço do total de transações da rede, em teoria poderá convencer o restante da rede de que suas transações inválidas são válidas. Como mecanismo de defesa, a *IOTA* checa todas as transações duas vezes, através de um nó centralizado chamado de nó coordenador, até que a rede alcance um volume grande o suficiente para que nenhum usuário seja capaz de alcançar sozinho um terço de suas transações.

A sequência a seguir, ilustra de maneira prática na Figura 2.2, o processo de uma transação na rede *IOTA*: (i) primeiro verifica-se se o usuário tem fundos para prosseguir; (ii) a nova transação é criada; (iii) o remetente seleciona aleatoriamente duas transações anteriores para aprovar; (iv) após a aprovação das duas transações anteriores, a nova transação é adicionada a rede *Tangle*; (v) o saldo dos envolvidos é atualizado; (vi) fluxo de confirmações da transação atual e das transações anteriores recém adicionadas é atualizado na *Tangle Explorer*.

Alshaiikli et al. explorou o uso de DLT para IoT, desde *blockchain* até *IOTA* [23]. Ferraro et al. [24] forneceu uma pesquisa sobre DLT para cidades inteligentes, incluindo *IOTA*.

## 2.5 Contratos inteligentes

Contratos Inteligentes [25] são protocolos auto-executáveis, que permitem que duas partes desconhecidas façam negócios entre si com confiança, sem a necessidade de uma autoridade central ou qualquer outro intermediário. A diferença entre um contrato padrão e um SC é que o SC é um algoritmo digital autoexecutável, que emprega uma DLT em seu funcionamento. Depois que o SC é publicado na rede DLT, ele não pode



ser modificado. Ao utilizar DLT, um SC garante que as cláusulas contratuais serão automaticamente cumpridas de acordo com as condições pré-estabelecidas.

Do ponto de vista técnico, os contratos inteligentes são *softwares* que implementam algoritmos, funções, e manipulam dados, como em um sistema computacional qualquer. A diferença é que tanto a parte lógica dos contratos inteligentes, quanto os dados por ele manipulados, são escritos em endereços específicos de uma DLT, como por exemplo, a DLT do *Ethereum*. Além disso, os contratos inteligentes tem uma carteira de criptoativos, da mesma maneira que usuários convencionais das DLTs. Os usuários podem interagir com os contratos inteligentes sem a intervenção de qualquer intermediário, pois como já foi dito, eles rodam de maneira independente.

Usando um exemplo para explicar essa ideia, o usuário A assina um SC com o usuário B, para transferir uma certa quantia de criptomoedas para o vencedor de uma aposta, baseada em uma partida de futebol. Ao final da partida o contrato será automaticamente cumprido, sendo que a quantidade de criptomoedas acordada no contrato, será transferida do perdedor para o vencedor da aposta, automaticamente e sem qualquer intermediário.



## Capítulo 3

### Revisão bibliográfica

O uso da *blockchain* em mecanismos de compartilhamento de espectro foi abordado de forma teórica em [9]. A ideia principal do artigo, é explorar a aplicação da *blockchain* para gerenciamento de espectro de RF, com foco em aplicações de compartilhamento dinâmico de espectro. A solução foi dividida em quatro categorias principais de compartilhamento de espectro: (i) compartilhamento cooperativo primário, no qual os usuários coordenam seu uso *ex ante*, ou seja, os usuários que desejam utilizar oportunidades de compartilhamento precisam encontrar e aproveitar uma oportunidade o quanto antes; (ii) compartilhamento cooperativo secundário, que funciona como (i), porém com uma maior variedade de transações de espectro (oferta ou arrendamento), devido a um ambiente secundário de compartilhamento cooperativo. Os titulares de direitos de transmissão podem subdividir seus direitos sob quaisquer acordos que escolherem, ou seja, um usuário primário da *blockchain* pode gerenciar uma *blockchain* privada. A *blockchain* pode ser utilizada para coordenar os usuários secundários subsidiários desse usuário primário, sem afetar os outros. Contratos inteligentes se aplicam a este modelo; (iii) compartilhamento secundário não cooperativo, onde o compartilhamento é oportunístico e realizado por rádios cognitivos; e (iv) compartilhamento não cooperativo primário, no qual o uso do espectro não é coordenado antecipadamente — os usuários têm direitos iguais (ou equivalentes) de transmissão e recepção. A principal função da *blockchain* é registrar transações de mercado. Os blocos são tão simples quanto uma oferta de compra ou venda de espectro único. Os dados de comércio de espectro tem um valor de *hash* criptográfico associado a ele, juntamente com o valor do bloco anterior da *blockchain*. Além disso, a *blockchain* armazena um registro dinâmico dos usuários que operam no sistema, que é usado para identificar estações para se comunicar ou complementar o sensoriamento do ambiente local.

O compartilhamento de espectro por meio da *blockchain* também é explorado em [11]. Este trabalho propôs um novo *token* digital chamado *Spectral Token*. Este *token* é empregado para validar e rastrear o uso da banda de espectro de RF licenciada. O *token* evita colisões de uso e garante que os usuários primários recebam um pagamento pelo espectro alugado. Para evitar interferências, os usuários secundários acessam o espectro sequencialmente. A plataforma permite que os usuários obtenham a propriedade de bandas de espectro de RF pagando à autoridade reguladora (por exemplo,

*Federal Communications Commission (FCC)* nos Estados Unidos). Cada banda de espectro de RF é codificada como um *Spectral Token*. Um usuário primário, que possui direitos de transmissão de uma banda de espectro de RF, pode alugá-la a um usuário secundário. O usuário principal pode anunciar a oportunidade de concessão, assim como o usuário secundário pode procurar bandas de espectro de RF livres. Após definido o inicializador da transação, local, prazo e taxa de acesso, a faixa de espectro de RF pode ser negociada através da plataforma. Os autores desenvolveram uma PoC para a solução usando bandas *Industrial, Scientific, and Medical (ISM)* de 2,4 e 5 GHz. A análise de desempenho mostra que o sistema possui características de *throughput* e latência para implementar os casos de uso propostos pela *Citizens Broadband Radio Service (CBRS)*, da União Européia, *Wireless Regional Area Network (WRAN) 802.22 WRAN* da *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* e *Small-Cell AAS*. No entanto, esta PoC não implementa todos os requisitos e recursos propostos. Apenas demonstra que é viável adotar *blockchain* nesse tipo de solução. Não são apresentados mais detalhes sobre informações de transação e blocos da *blockchain*.

A ideia de implementar o compartilhamento de espectro como serviço é apresentada em [5], em um trabalho chamado *Full-Spectrum Blockchain-as-a-Service (FSBaaS)*. Para isso, duas *blockchains* diferentes são empregadas: (i) uma centralizada (contribuição dos autores do artigo) chamada *Blockchain Lite*; e um descentralizada (ii), que emprega *Hyperledger Fabric* [26]. O *Hyperledger Fabric* é um projeto colaborativo iniciado pela *Linux Foundation*, para dar suporte a DLTs descentralizadas. Neste projeto, a *blockchain* centralizada é dirigida a usuários que concordam em ter uma autoridade central para manter um registro completo e verificável, e a *blockchain* descentralizada é focada em usuários que desejam participar do sistema de maneira independente e sem intermediários. A ideia chave por trás de utilizar duas *blockchains* é aproveitar as características tanto das *blockchains* centralizadas quanto das descentralizadas. As duas *blockchains* compartilham o mesmo gerenciador de rede de negócios e o mesmo executor de contratos inteligentes. O gerenciador de rede de negócios analisa e gerencia toda a rede de negócios. O executor de contratos inteligentes é responsável pela execução da lógica de negócios. Os usuários da *blockchain* não mantêm um nó da *blockchain* sozinhos, em vez disso, eles usam um inquilino confiável da *blockchain*. Os dois nós da *blockchain (runtimes)* adotados neste modelo são: (i) *BC Lite*, que suporta até cem inquilinos; e (ii) *BC Fabric*, que pode ser dimensionado para situações de alta disponibilidade e desempenho. *BC Lite* e *BC Fabric* são o núcleo deste modelo. Informações como status do nó, *hashes* dos blocos e dados de transação são compartilhados pelos nós *BC Lite* e *BC Fabric*. Os clientes acessam essas informações oferecidas por meio de *Application Programming Interface (API) RESTful*. A estrutura de blocos da *Blockchain Lite* possui um cabeçalho (ID do bloco e o *hash* do bloco anterior), o conteúdo de todos os blocos anteriores, o *log* de uma ou mais transações e uma assinatura do remetente. Uma estrutura de dados DAG é empregada para organizar os blocos. Os autores avaliaram o FSBaaS em um ambiente simulado. Os experimentos foram realizados usando um número dinâmico de máquinas virtuais representando os nós do sistema; e como resultado, os autores garantem que os resultados são consistentes tanto em *blockchains* centralizadas quanto em *blockchains* descentralizadas.

Em [12] é proposta uma nova arquitetura de rede que explora o uso de criptomoedas e contratos inteligentes para compartilhamento de espectro. A ideia da arquitetura é

lidar com o relacionamento entre operadoras e usuários com base em contratos inteligentes, compartilhando o espectro não licenciado entre operadoras usando uma criptomoeda virtual. Neste modelo, um proprietário de espectro pode emitir *tokens*. Então, o proprietário da infraestrutura terá a oportunidade de acessar o espectro dependendo da quantidade de *tokens* em sua conta. Para garantir a utilização justa do espectro, os autores introduzem uma criptomoeda virtual (que não tem valor em nenhuma moeda fiduciária, pois acreditam que o espectro não licenciado é de uso livre) com valor igual a 180 kHz/s no espectro não licenciado, que corresponde à menor largura de banda que pode ser alocada para usuários em redes móveis de *Long Term Evolution* (LTE). Os autores também especificam dois tipos de contratos inteligentes: (i) contrato entre usuário e *Mobile Virtual Network Operator* (MVNO); e (ii) entre os proprietários da infraestrutura e proprietários do espectro. Os *tokens* são inicialmente distribuídos igualmente entre todas as operadoras de rede que participam do compartilhamento de espectro. Cada operador utiliza o espectro não licenciado gastando *tokens* de sua conta. Uma vez que os *tokens* dos participantes do sistema são gastos, eles são redistribuídos igualmente entre todos os operadores participantes, usando transações na *blockchain*. Se algum operador tentar adquirir mais recursos do que outros, o saldo de sua conta será gasto muito rapidamente e ele ficará sem recursos para adquirir mais direitos de transmissão. Dessa forma, usando a teoria dos jogos, os operadores com comportamento egoísta não poderão utilizar o espectro não licenciado até que seu saldo aumente novamente. Embora este modelo tenha sido simulado pelos autores, para que seu desempenho seja avaliado, não são apresentados maiores detalhes sobre as informações da transação, as características implementadas dos contratos inteligentes e blocos da *blockchain*.

Os autores de [8] aplicaram uma abordagem MEC para desenvolver uma *blockchain* de espectro para *Internet of Spectrum Devices* (IoSD). A ideia principal deste trabalho é apresentar uma forma de monitoramento seguro e imutável de dados de espectro, compartilhamento e posterior realização de customização precisa e confiável de estratégias de espectro. O ciclo básico de operação é dividido em cinco fases: (i) um servidor de espectro emite uma tarefa de detecção de espectro e deposita algumas criptomoedas no IoSD; (ii) os dispositivos de monitoramento de espectro que participam da tarefa formam vários *clusters* espontaneamente, sendo um deles o *head-miner* e os outros os *sensing-miners*. O *head-miner* de cada *cluster* criptografa os dados do espectro com uma chave privada, e os carrega na estação base de borda para formar o bloco de espectro pré-adicionado; (iii) o minerador principal carrega o bloco de espectro pré-adicionado e deposita algumas criptomoedas no IoSD, como recompensas de verificação. Então, dispositivos sem fio pessoais se registram e se tornam mineradores, a fim de realizar a verificação e receber a recompensa; (iv) a última etapa de consenso é realizada entre os *head-miners*, cujos blocos passaram na verificação da fase anterior. O bloco com o menor erro é anexado à *blockchain* de espectro; e (v) uma vez que o minerador principal tenha anexado o bloco à *blockchain* de espectro, a criptomoeda depositada no IoSD é liberada para o *cluster*, e distribuída automaticamente de acordo com a contribuição de cada minerador para a formação do bloco de espectro recém anexado. Uma vez que a tarefa de detecção de espectro é concluída, os dados de detecção de espectro são registrados em uma estrutura de árvore *Merkle* e armazenados na borda do IoSD. Um mecanismo de três estágios foi projetado para

chegar a um consenso ao anexar um bloco à *blockchain* de espectro. O mecanismo de três estágios envolve principalmente (i), (ii) e (iii). O consenso entre os *check-miners* em (iii) é utilizado como um mecanismo de defesa bizantino baseado em distribuição, para determinar se um ataque bizantino ocorreu em (ii) — isso é aceitar ou não o bloco pré-adicionado na *blockchain*. O consenso entre os *head-miners* em (iv), é projetado para determinar qual *cluster* tem o direito de anexar o bloco a *blockchain* e obter a recompensa. Nesse modelo, os dados do espectro servem como transações, e são empacotados para gerar blocos de espectro, que são vinculados em ordem cronológica para formar a *blockchain* de espectro. O conteúdo do bloco de espectro inclui um *nonce* arbitrário, o *hash* do bloco de espectro anterior e o *hash* raiz dos dados de espectro, que estão vinculados na estrutura de árvore *Merkle*.

Em [13] é apresentada uma arquitetura de etiqueta de espectro chamada *Consensus-Before-Talk* (CBT), alavancada por uma DLT. A arquitetura CBT compreende: (i) uma Transação de Acesso ao Espectro (*Spectrum Access Transaction*, SAT); (ii) um Registro de Espectro Distribuído (*Distributed Spectrum Ledger*, DSL); e (iii) um módulo de política de consenso. No CBT, a solicitação de acesso de um usuário secundário é encapsulada no SAT, e trocada com todos os outros usuários secundários. Para cada SAT recebido, o usuário secundário inicia um protocolo de consenso com uma política de consenso predefinida. Uma vez que atinge o consenso com todos os outros usuários secundários, o SAT é verificado e armazenado no DSL local do usuário secundário. O algoritmo de consenso do CBT é baseado na prática de tolerância a falhas bizantinas, garantindo assim as seguintes condições: (i) todos os SAT serão eventualmente conhecidos por todos os usuários secundários; (ii) um SAT inválido não pode ser validado pelos usuários secundários; e (iii) dois usuários secundários não devem discordar sobre a validade e a ordem cronológica de qualquer SAT. O objetivo do consenso é permitir que usuários secundários sigam uma regra de agendamento predefinida de forma distribuída. Para tal, o primeiro pedido de acesso ao espectro de cada utilizador secundário fica associado aos seus *timestamps* verificados, e registados em seu SAT correspondente. Esses SATs são então trocados e verificados por todos os usuários secundários. Após a verificação, os *timestamps* verificados acumulados atingem um consenso, seguindo um algoritmo de consenso predefinido armazenado no módulo de política de consenso dentro de cada DSL. Motivado pelo protocolo *gossip-of-gossip* no *Hashgraph* [27], o algoritmo de consenso CBT é operado localmente em cada usuário secundário. Os autores avaliam numericamente a eficácia da arquitetura proposta, mas não são apresentados mais detalhes sobre informações de transação e blocos da *blockchain*.

Os autores de [10] propõem o *TrustSAS*, um Sistema para Acesso ao Espectro (*Spectrum Access System*, SAS). Essa estrutura sinergiza técnicas criptográficas de última geração com a tecnologia *blockchain*, de uma forma inovadora para abordar questões de privacidade, e cumprir os requisitos de *design* regulatório da FCC. A estrutura proposta compreende três entidades arquiteturais principais: (i) o FCC; que é responsável por fazer cumprir os requisitos regulamentares; (ii) vários bancos de dados para acesso ao espectro, cada um normalmente executado por um administrador diferente; e (iii) vários usuários secundários, incluindo um conjunto de usuários secundários pré-registrados, a serem implantados especificamente para desempenhar o papel de nós âncoras. Esses usuários secundários âncoras fornecem uma rede ponto

a ponto de *backbone* que pode ser descoberta e conectada por novos usuários secundários. No *TrustSAS*, cada registro contém um contrato inteligente, criado pelos bancos de dados durante a definição das regras de uso do canal, como: o número máximo de usuários secundários, autorizados a transmitir simultaneamente em um determinado local; potência máxima de transmissão do usuário secundário; etc. A estrutura depende das *blockchains* autorizadas para acompanhar as atividades do sistema e do *cluster*. *Blockchains* também são adotados como uma plataforma para lidar com acordos entre entidades nos níveis de *cluster* e sistema. Isso é alcançado usando *blockchains* autorizadas subjacentes ao mecanismo de consenso de Tolerância a Falhas Bizantinas (*Byzantine Fault Tolerance*, BFT), que permite que os participantes cheguem a acordos sobre atualizações de blocos, mesmo quando os nós bizantinos estão presentes. Antes de uma entidade enviar e adicionar um bloco a uma *blockchain*, os autores assumem que o bloco é primeiro assinado por seu proprietário e depois validado via BFT pelos validadores da *blockchain*. Quando um usuário secundário deseja ingressar na rede, ele precisa sintonizar o canal de controle e varrê-lo para detectar quaisquer *beacons* transmitidos por qualquer *cluster* próximo. Uma falha na detecção de qualquer *beacon* significa que nenhum *cluster* está próximo, ou todos os *clusters* próximos não estão aceitando novos usuários secundários. Em ambos os casos, os usuários secundários iniciarão um novo *cluster*, e solicitarão um *beacon* de um dos bancos de dados e começarão a aceitar novos membros. Quando o novo usuário secundário detecta um *beacon*, ele invoca um procedimento com o líder do *cluster* para garantir que o usuário secundário seja legítimo, e tenha permissão para ingressar no *cluster*, assim como garantir que o líder também está em uma boa posição. Os usuários secundários recém-admitidos terão que esperar até o próximo período da época para poder participar do *cluster*, e aproveitar os recursos do espectro. Não foram apresentados mais detalhes sobre informações de transações e blocos da *blockchain*.

A ideia de usar contratos inteligentes para oferecer sensoriamento de espectro como um serviço, denominado pelos autores de *Spass*, é explorada em [6] e [7]. O modelo do sistema *Spass* engloba quatro entidades: (i) a rede secundária de usuários; (ii) auxiliares, que são qualquer tipo de dispositivo com capacidade de detecção, que trabalham em troca de benefícios monetários; (iii) contratos inteligentes, que rodam em uma rede *blockchain*; e (iv) os mineradores na rede *blockchain*. A arquitetura adota dois objetivos principais: é implementada sem a necessidade de um terceiro confiável; e deve ser resiliente contra ajudantes maliciosos. Os contratos inteligentes são implementados na rede *Ethereum*, mas segundo os autores, podem ser estendidos a qualquer outro tipo de contrato inteligente. Ao aplicar um mecanismo de punição dentro dos contratos inteligentes, garante-se que os dois principais objetivos sejam alcançados. A interação entre as entidades *Spass* começa quando um usuário secundário, ao transmitir um endereço de contrato inteligente, solicita a detecção de espectro. Um auxiliar, acessando o contrato inteligente transmitido, verifica se ele é capaz de atender ao Acordo de Nível de Serviço (*Service Level Agreement*, SLA) declarado no contrato inteligente. Se for viável para o ajudante, ele se registra no contrato informando seu preço de detecção. O *Spass* então determina o número de auxiliares necessários para atender a precisão de detecção definida pelos reguladores, e seleciona os auxiliares mais baratos para detecção. Os auxiliares selecionados começam a detectar com a taxa de detecção necessária e, após cada evento de detecção, enviam seus dados ao usuário secundário. Os

dados de detecção são compactados no contrato inteligente na rede *Ethereum*. Com base nos relatórios de ajuda, a verificação dos dados e a transferência do ativo monetário acontecem dentro do contrato inteligente. Antes de pagar os ajudantes, o contrato executa um algoritmo de identificação de ajudantes maliciosos, que visa descobrir os ajudantes cuja precisão de detecção não atendem à precisão acordada. Esses ajudantes são adicionados em uma lista como ajudantes maliciosos e estão proibidos de realizar outros serviços. Os ajudantes não incluídos na lista são pagos pelo serviço, e verificados como elegíveis para serem selecionados como ajudantes em outras rodadas de detecção. Em relação ao contrato inteligente *Spass*, ele foi implementado no *Solidity* e possui funções para seleção de ajudantes, identificação de ajudantes maliciosos, relatório de pagamento e detecção, além de parâmetros de SLA como frequência central, taxa de detecção e precisão. Não são apresentados mais detalhes sobre os blocos da *blockchain*.

A proposta de [3] e [4] é apresentar um mecanismo de compartilhamento de espectro, para acesso a largura de banda entre CRs concorrentes. Nesse sentido, os autores propõem um protocolo de verificação da *blockchain*, como método para habilitar e proteger o compartilhamento de espectro em redes CR em movimento. Também é apresentada uma nova moeda virtual chamada *Specoins*, para pagamento do acesso ao espectro. Na rede apresentada pelo artigo, um canal de controle comum está disponível para troca de mensagens de controle entre usuários primários e secundários. O canal de controle é utilizado para divulgar os canais disponíveis e as informações necessárias para acessar o leilão, e para sincronizar as bases de tempo dos CRs. O protocolo de verificação da *blockchain* fornece um mecanismo para conversão entre uma moeda fiduciária e *Specoins*, e vice-versa. Um CR que usa seu poder de processamento para atualizar a *blockchain* será recompensado com *Specoins*, que podem ser usados para alugar o espectro disponível de usuários primários. Portanto, se um usuário secundário tiver *Specoins* para alugar o espectro anunciado por um usuário primário: (i) um mecanismo de quebra-cabeça é anunciado pelo usuário primário. Se o usuário secundário vencer o leilão, o espectro é alugado e a transação é aprovada; (ii) então um bloco será gerado e transmitido para todos os mineradores disponíveis; (iii) o primeiro minerador que quebrar o *hash* terá a capacidade de atualizar a *blockchain*, criptografando a transação com sua chave privada; e (iv) pelo esforço, o minerador é recompensado em *Specoins*. Antes de qualquer troca ou aluguel, um usuário descriptografa a *blockchain* usando sua chave privada, e confirma a disponibilidade dos fundos reivindicados pelo CR que deseja o acesso ao espectro. O mecanismo completo de compartilhamento de espectro possui três algoritmos principais. O primeiro é designado para verificar se a transação pode prosseguir. O segundo diz respeito à atualização da *blockchain*, e o terceiro é projetado para redefinir a *blockchain*, que segundo os autores, é mais barato do que atualizar a *blockchain* por completo. Outro aspecto diferente deste trabalho, é que ele não tem limite em relação à quantidade de moedas existentes na *blockchain*. No que diz respeito ao uso da *blockchain*, seu principal objetivo é registrar todas as transações entre usuários secundários, incluindo: troca de moeda; mineração e atualização; e locação de espectro disponível por meio de leilão. Não são apresentados mais detalhes sobre os blocos da *blockchain*.

A Tabela 3.1 contém o resumo das informações relacionadas às DLTs utilizados nos trabalhos revisados nesta seção. Nela são apresentados os aspectos de definição de



cada DLT, como por exemplo, o tipo de DLT utilizada, se a DLT é pública ou privada, e o consenso utilizado por cada uma delas. A Tabela 3.2 apresenta um resumo da estrutura de dados de cada uma das DLTs utilizadas nos projetos revisados e os dados armazenados nestas estruturas, além de informar se os trabalhos utilizam SCs em suas soluções ou não.

Tabela 3.1: *Resumo dos aspectos das DLTs.*

Referência	Blockchain	Pública/Privada	Consenso
[11]	<i>Ethereum</i>	Privada	Prova de Trabalho ( <i>Oroof of Work</i> , PoW)
[5]	<i>HL Fabric e Blockchain Lite</i>	Ambas	DAG
[12]	X	X	X
[8]	<i>Spectrum blockchain</i>	X	<i>Practical BFT</i>
[13]	X	X	BFT
[10]	X	Privada	BFT
[6] e [7]	<i>Ethereum</i>	Pública	Prova de Trabalho ( <i>Oroof of Work</i> , PoW)
[3] e [4]	<i>Specoin blockchain</i>	Pública	X

Tabela 3.2: *Resumo das estruturas de dados das DLTs e uso de SCs.*

Referência	SC	Estrutura de Dados	Informações Armazenadas
[11]	Sim	<i>Ethereum</i>	X
[5]	Sim	DLT e Banco de dados Mongo	<i>Header</i> (identificação do bloco e o <i>hash</i> do bloco anterior). Conteúdo de todos os blocos anteriores. <i>Log</i> de uma ou mais transações. Assinatura do remetente.
[12]	Sim	X	X
[8]	Não	Árvore <i>Merkle</i>	<i>Nonce</i> arbitrário. <i>Hash</i> do bloco de espectro anterior. O <i>hash</i> raiz dos dados do espectro listados.
[13]	Não	DSL	X
[10]	Sim	Múltiplos bancos de dados	X
[6] e [7]	Sim	<i>Ethereum</i>	X
[3] e [4]	Não	X	X

Ao analisar os dados das Tabelas 3.1 e 3.2, que resumem os aspectos de DLT mais relevantes de cada trabalho citado nesta seção, é possível perceber que todas as propostas exploram o uso da tecnologia *blockchain* em suas soluções, seja através do uso direto, através de uma nova criptomoeda baseada em *blockchain*, ou usando SCs, que são implementados com base em uma *blockchain*. Aplicar a tecnologia *blockchain*

em uma solução significa onerar as transações realizadas no sistema, além de gerar a necessidade de inclusão de terceiros (ou seja, mineradores) na operação, pois são eles que validam as transações incluídas na rede. Para as propostas que utilizam SCs, deve ser considerado um custo extra, pois os SCs precisam pagar uma taxa para rodar, uma vez que a base de seu funcionamento é a tecnologia *blockchain*.

# Capítulo 4

## Proposta de arquitetura

Neste capítulo será apresentada a arquitetura proposta para o mercado de negociação de espectro com *IOTA* (STM). Para começar, serão apresentadas algumas considerações iniciais, que ajudaram a definir o escopo do projeto. A partir destas definições foram identificados os pontos partida, passando pela identificação e descrição dos atores e componentes do sistema, bem como modelos de compartilhamento de espectro, finalizando com um modelo arquitetônico completo para o STM.

### 4.1 Considerações iniciais

Como primeiro passo da fase de pesquisa deste trabalho, foi realizado um estudo inicial para conceber a ideia que serviria de guia para o restante de seu desenvolvimento. O propósito deste estudo foi conceber uma arquitetura que fosse o mais abrangente possível, com todos os atores e objetos de informação que transitariam dentro sistema, que originalmente englobaria compartilhamento de espectro, recursos de infraestrutura de transmissão e serviços de rádio.

A partir deste estudo inicial foram concebidos diversos atores que fariam parte do sistema, envolvendo todos as interações preteridas, que são apresentados com seus respectivos papéis dentro da proposta na Tabela 4.1. Estes atores trocam informações entre si, manipulam dados e fornecem serviços, e as informações em trânsito negociadas entre eles são apresentadas na Tabela 4.2.

Por fim, a relação entre os atores do sistema e as informações trocadas entre eles são apresentadas na Figura 4.1. Nesta figura, os atores listados nos quadros verdes são provedores de informações e serviços, e os atores nos quadros azuis são consumidores de informações e serviços. Alguns atores aparecem tanto nos quadros verdes quanto nos quadros azuis, pois são ao mesmo tempo provedores e consumidores de informações e serviços. Para facilitar o entendimento da relação, os objetos de informação trocados pelos atores estão enumerados nos círculos laranja, e a relação das informações podem ser consultadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.1: *Atores da concepção original do projeto.*

<b>Ator</b>	<b>Papel</b>
Sensoriador	Realizar o sensoriamento espectral.
Base de Dados de Espectro	Manter a base de dados de espectro.
Base de Dados de Infraestrutura	Manter a base de dados de infraestrutura.
Base de Dados de Serviços	Manter a base de dados de serviços.
Geolocalizador	Contextualizar dados e acrescentar metadados.
Operadores de Telecom	Comprar e vender bandas de espectro de RF.
Representantes públicos	Negociar espectro licenciado não utilizado.
Regulador e Licenciador	Atuar em questões ligadas a legislação.
Bolsa de Espectro	Intermediar negociações de espectro.
Bolsa de Serviços de Rádio	Intermediar negociações de serviços de rádio.
Estimador de Zonas de Exclusão	Estimar canais e zonas livres de interferência.
Gerente de Identidade	Gerenciar a identidade dos atores.
Gerente de Políticas	Gerenciar políticas e etiquetas de uso de espectro, serviços e recursos físicos.
Gerente de Tokenização	Gerenciar contratos dentro e fora de DLTs.
Gerente de Infraestrutura	Gerenciar e controlar infraestrutura.
Auditor de espectro	Auditar as bases de dados de espectro.
Auditor de serviços	Auditar as bases de dados de serviços.
Auditor de infraestrutura	Auditar as bases de dados de infraestrutura.
Negociador de Espectro	Comprar e vender espectro de RF.
Operador de Interoperabilidade	Tratar a interoperabilidade entre serviços.

Tabela 4.2: *Objetos de informação em trânsito entre atores e serviços.*

<b>Número</b>	<b>Objeto</b>
1	Dado bruto de nível de energia.
2	Metadado de espectro.
3	Estatísticas de uso de espectro.
4	Série histórica de uso de espectro.
5	Metadado de infraestrutura.
6	Estatísticas de uso de infraestrutura.
7	Série histórica de uso de infraestrutura.
8	Metadado de serviço.
9	Estatísticas de uso de serviço.
10	Série histórica de uso de serviço.
11	Contrato de conectividade tradicional.
12	Contrato de conectividade de IoT.
13	Licença de espectro primário.
14	Espectro licenciado não utilizado (secundário).
15	Contrato de serviço de <i>Broker</i> .
16	Contrato de plataforma de IoT.
17	Contrato de auto-gerência de dispositivos.

Continua na próxima página.

**Tabela 4.2 – Objetos de informação em trânsito entre atores e serviços.**

<b>Número</b>	<b>Objeto</b>
18	Contrato de monitoramento e segurança de infraestrutura.
19	Contrato de monitoramento de desempenho e segurança de serviços.
20	Contrato de monitoramento de desempenho e segurança de espectro.
21	Metadado de qualidade e reputação de atores do mercado.
22	Histórico de licenciamento de espectro primário.
23	Estatísticas de desempenho e segurança de uso de espectro.
24	Histórico de licenciamento de espectro secundário.
25	Histórico de contratos de uso de espectro.
26	Contrato de gerência e controle de rádio terceirizados no varejo.
27	Estimativa de zonas de exclusão no varejo.
28	Contrato de estimativa de zonas de exclusão no varejo.
29	Certificados digitais de identidades.
30	Modelos de políticas.
31	Modelos de etiquetas.
32	Auditoria de Espectro.
33	Auditoria de Serviços.
34	Auditoria de Infraestrutura.
35	Interoperabilidade (tradução de formatos) para sistemas e dados.
36	Serviço de monitoramento de qualidade e desempenho confiável.
37	Serviços terceirizados de controle e gerência no atacado.
38	Estimativa de zonas de exclusão no atacado.
39	Modelos de contratos para dentro e fora das DLTs.
40	Cria novas <i>Tokens</i> .
41	Acompanhamento de contratos e histórico.
42	Estimativas de reputação de atores.

Após a revisão desta ideia inicial, ficou claro que o escopo do projeto estava muito grande para o tempo previsto para o desenvolvimento deste trabalho, então houve uma redução da abrangência do projeto, para que a arquitetura fosse focada somente no compartilhamento de espectro de RF. Além disso, como as bandas de espectro de RF licenciadas e não licenciadas se comportam de maneira prática de um modo completamente diferente uma da outra, o escopo deste trabalho foi tratar somente de compartilhamento de bandas de espectro de RF licenciadas.

Uma vez definida a redução de escopo do projeto, os seguintes atores foram removidos da solução: base de dados de infraestrutura, base de dados de serviços, geolocalizador, bolsa de serviços de rádio, estimador de zonas de exclusão, gerente de tokenização, gerente de infraestrutura, negociador de espectro e operador de interoperabilidade. Os atores base de dados de infraestrutura, base de dados de serviços, bolsa de serviços de rádio e gerente de infraestrutura foram removidos, pois o compartilhamento de serviços de infraestrutura e de rádio deixaram de fazer parte do escopo da pesquisa. Os atores geolocalizador e operador de interoperabilidade foram removidos, pois os dados transitados no mercado já estarão devidamente geolocalizados e padroni-

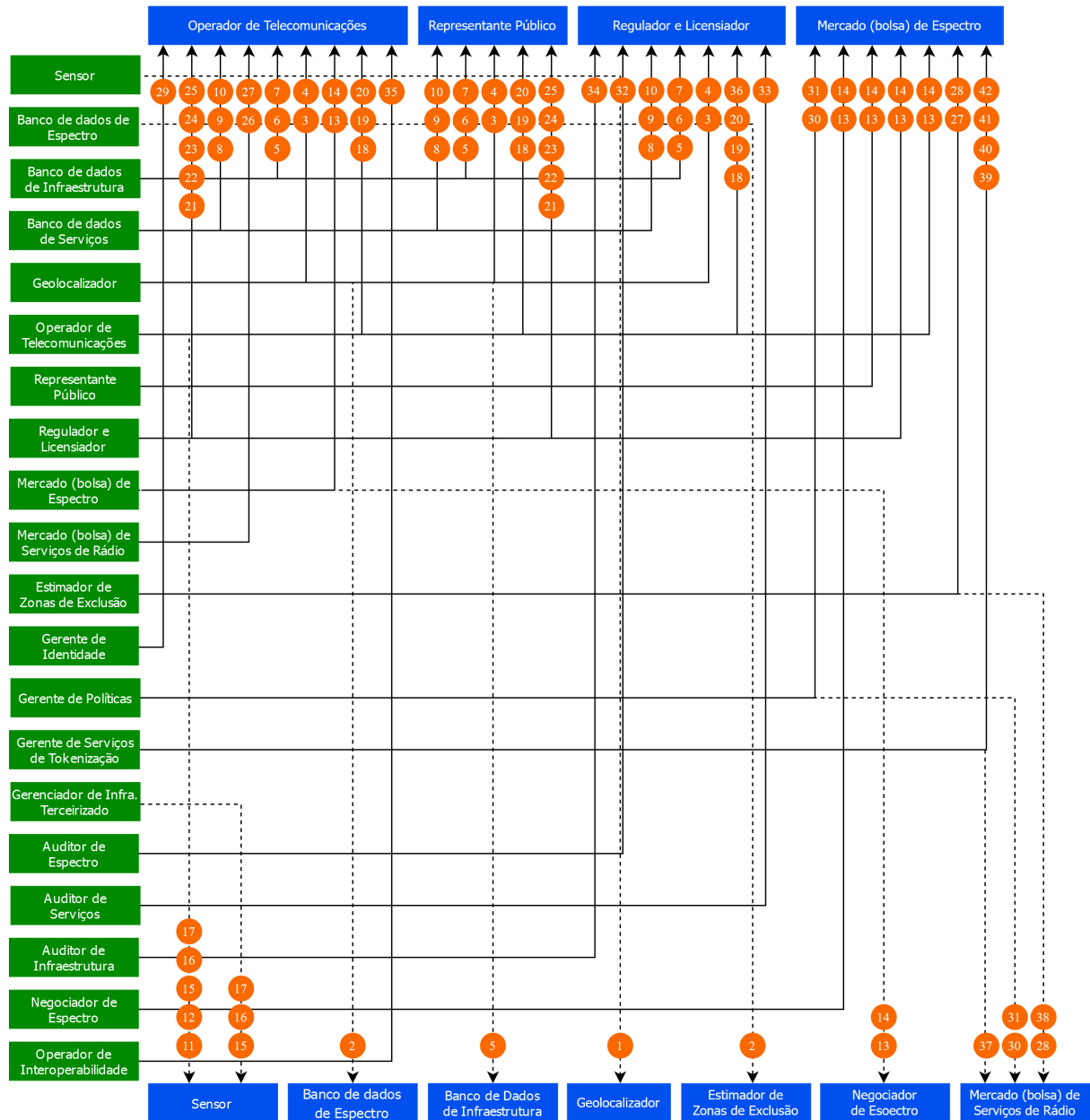


Figura 4.1: *Concepção original da arquitetura.*

zados. O ator gerente de tokenização foi removido, pois o mercado não trabalhará com mais de um tipo de criptomoeda diferente. O ator negociador de espectro foi removido, pois para que o espectro seja melhor aproveitado, seria inviável adicionar um ator que participa do sistema somente a fim de obter lucros financeiros. Por fim, o ator estimador de zonas de exclusão foi removido da ideia inicial devido a sua complexidade, a fim de facilitar o escopo do desenvolvimento.

Depois de reduzir o escopo inicial do projeto, assim como a lista inicial de atores, a segunda fase do trabalho foi iniciada. Nesta segunda fase os atores restantes e os objetos de informação em trânsito trocados entre eles foram revisados, e então transformados em atores ou componentes do sistema, que serão apresentados nas seções seguintes.

## 4.2 Pontos de partida

A principal premissa desta pesquisa é o compartilhamento de bandas de espectro licenciadas entre usuários, através de um mercado digital, que agrupa as vendas de direitos temporários de transmissão em bandas de espectro licenciadas, utilizando dispositivos SSIoT com capacidade de detecção [18] para identificar as oportunidades de transmissão. Doravante, a arquitetura a ser detalhada para atender a essa premissa será denominada *Spectrum Trading Market* (STM).

Para atender ao requisito de compartilhamento de espectro licenciado, o STM precisa fornecer um meio para que os proprietários dos direitos de transmissão de uma determinada faixa de espectro, anunciem sua intenção de vender temporariamente seus direitos e sejam remunerados pelo aluguel do espectro. O STM também precisa fornecer uma maneira de identificar as transmissões nas faixas de espectro licenciadas que estão ociosas, a fim de oferecer possibilidades de transmissão no mercado digital. Essa atividade de identificação é realizada por dispositivos SSIoT com recursos de sensoriamento [18].

Para apoiar os usuários interessados em adquirir as oportunidades de transmissão que melhor atendam às suas necessidades, todas as oportunidades devem estar igualmente disponíveis para todos os usuários, em um único ponto de busca, como em uma bolsa de valores normal. Além disso, é necessário que o STM seja auditável. Todas as ações realizadas no mercado devem ser rastreáveis, de acordo com a legislação local, garantindo que sua operação esteja em conformidade com a segurança e integridade do negócio.

Por fim, é obrigatório que o STM seja autossustentável, ou seja, deve de alguma forma gerar receita (como adicionar uma taxa nas transações STM) de suas operações para cobrir seus próprios custos operacionais.

## 4.3 Atores do sistema

Os atores mais importantes para o STM são os proprietários de direitos de transmissão de faixas de espectro licenciadas, como grandes operadoras de telecomunicações ou forças militares, e usuários que precisam transmitir dados, mas não têm faixas de

espectro disponíveis, como: pequenas operadoras de telecomunicações ou Provedores de Serviço de *Internet* (*Internet Service Providers*, ISP).

Tomando emprestados os termos PU e SU do tema rádios cognitivos, no contexto deste trabalho, os titulares de faixas de espectro também serão chamados de usuários primários (PU) e usuários que não possuem espectro para transmitir seus dados serão tratados como usuários secundários (SU).

A principal motivação para os PUs participarem do STM seria a busca por uma renda alternativa, por meio do arrendamento temporário de seus direitos de transmissão aos SUs, aproveitando o tempo ocioso de seu recurso de transmissão.

A principal motivação para os SUs participarem do STM seria buscar oportunidades de transmissão, sem ter que se preocupar com a aquisição e manutenção de equipamentos de verificação de ocupação do espectro, e mão de obra especializada.

Outro ator identificado para participar do STM seriam os proprietários de dispositivos SSIoT com capacidade de sensoriamento [18], como pequenas operadoras que oferecem infraestrutura IoT em uma cidade. A principal motivação desse ator para participar do mercado seria gerar renda alternativa utilizando seus aparelhos para fazer medições de ocupação de espectro. Mesmo assim, dispositivos específicos podem ser adquiridos e operados como um negócio normal.

Por fim, para que o mercado seja auditável, também está previsto um ator para realizar auditorias. Para esta função, os atores seriam os Reguladores/Licenciadores (por exemplo, FCC nos EUA, *Office of Communications* (Ofcom) no Reino Unido e Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) no Brasil), que realizariam as auditorias de acordo com a legislação local, onde sua principal motivação seria garantir que o compartilhamento realizado pelo STM segue as regras definidas para este tipo de operação.

## 4.4 Componentes do sistema

Para atender as premissas definidas como pontos de partida, o STM precisa prover funcionalidades relacionadas à compra e venda de bandas de espectro, e a verificação de ocupação em determinada banda de espectro, o que demanda interação com dispositivos SSIoT [18] responsáveis por realizar esta verificação.

Em termos de funcionalidades, a primeira coisa a mencionar que se aplica a todos os componentes do STM, é que eles devem fornecer serviços de estatística com séries históricas de uso de serviços, e funções de monitoramento para os atores que têm os papéis apropriados para usar estes recursos.

Como qualquer outro sistema de computação, o STM precisa fornecer um componente de identidade para gerenciar a identidade dos atores que operam no mercado. Este componente é responsável por manter as informações de identidade e perfil de todos os atores do sistema, fornecendo recursos de gerenciamento de perfil. Este componente também deve manter as informações relacionadas às carteiras dos atores nas DLTs, que são utilizadas para fazer e receber pagamentos.

Como o principal ativo do STM é o espectro, ele precisa fornecer um componente



de espectro para gerenciar as informações relacionadas a este ativo. Este componente deve manter um banco de dados com informações do espectro, tais como: frequência; se alguma frequência é licenciada ou não; proprietário (se houver); disponibilidade de espectro para compartilhamento; o valor do aluguel de alguma largura de banda disponível e o período em que essa banda de espectro estará disponível para os compradores. O componente de espectro deve fornecer funcionalidade de gerenciamento de informações de espectro para os atores do STM.

Para alimentar o componente de espectro com oportunidades de espectro licenciadas, os atores que possuem os direitos de transmissão de espectro podem anunciar as oportunidades de compartilhamento diretamente no componente de espectro. Além disso, para alimentar o componente de espectro com oportunidades de transmissão em bandas de espectro licenciadas que estão ociosas e não foram anunciadas proativamente por seus proprietários, o STM deve implementar um componente IoT, que é responsável por manter as informações básicas dos dispositivos SSIoT [18], e realizar a interação de funcionalidades relacionadas à verificação de ocupação da banda do espectro, com dispositivos SSIoT reais [18]. O componente IoT deve fornecer funcionalidades para que proprietários de dispositivos SSIoT com capacidade de sensoramento [18] possam registrar seus dispositivos no STM, para que possam alimentar o banco de dados STM com oportunidades de transmissão e também serem selecionados para realizar a verificação de ocupação.

O STM precisa de um componente de mercado para oferecer as faixas de espectro licenciadas registradas no componente de espectro como negociáveis, bem como para habilitar atores que desejam usar banda de espectro licenciada ociosa. O componente de mercado deve fornecer aos atores funcionalidades básicas de compra e venda de espectro, bem como funcionalidades para os atores realizarem verificações de ocupação do espectro. O componente de mercado deve interagir com uma rede DLT para realizar pagamentos de vendas de espectro, e registrar resultados de verificações de ocupação.

Para completar os componentes essenciais para o STM, também é necessário implementar um componente de auditoria, que deve registrar todas as ações realizadas pelos atores do mercado, de acordo com a legislação local, para que essas informações possam ser verificadas pelos auditores durante os processos de auditoria.

Além dos componentes essenciais que fornecem as funcionalidades básicas necessárias para cumprir as operações de transações de espectro, também existem componentes auxiliares que podem agregar valor ao STM, como componente de política, componente de reputação e componente de contratos.

O componente de política implementa um banco de dados com políticas e regras operacionais, definindo as formas de trabalho do STM. Existem políticas para definir o valor da taxa das negociações, definir a regra que aumenta ou diminui a reputação do usuário no mercado e definir métricas para relatórios de ocupação do espectro. Além disso, o componente de política deve fornecer meios para se implementar, alterar, adicionar e/ou remover dinamicamente regras relacionadas ao compartilhamento, de espectro de acordo com a legislação local.

O componente de reputação mantém um banco de dados com a reputação dos atores, de acordo com as políticas operacionais definidas no componente de política. A reputação dos atores pode aumentar se eles operarem corretamente ou diminuir se eles

não agirem de acordo com as regras. A reputação dos proprietários de dispositivos SSIoT [18] seria afetada de acordo com o desempenho de seus dispositivos. Por exemplo, se o dispositivo fizer uma leitura de ocupação do espectro e relatar um falso positivo ou um falso negativo, o proprietário do SSIoT perde reputação; e se o dispositivo relatar uma leitura de ocupação de espectro correta, a reputação de seu proprietário aumentará.

O componente de contratos é usado para garantir que os atores estejam cientes de suas obrigações dentro do STM, trabalhando sob assinatura de termos de uso. Sempre que alguma regra inserida no componente da política for alterada, adicionada ou removida, o usuário será obrigado a indicar que está ciente do novo modelo de operação.

## 4.5 Modelos de compartilhamento de espectro

O compartilhamento de espectro licenciado no STM ocorre de forma diferente se comparado ao compartilhamento realizado pelos CRs. Nos CRs, o compartilhamento é oportunístico, ou seja, o SU detecta uma oportunidade de transmissão e a realiza até que uma nova transmissão seja iniciada pelo PU. O PU não tem vantagem nesse modelo de compartilhamento, e se o SU não coordenar corretamente o uso compartilhado, pode gerar interferência e perda de qualidade na transmissão do PU e na sua própria transmissão.

No STM, o PU anuncia proativamente seu recurso de espectro ocioso para compartilhar temporariamente seus direitos de transmissão. O tempo de compartilhamento e o valor da locação são previamente definidos no STM. O SU que deseja aproveitar esta oportunidade, faz um pagamento ao PU antes de realizar sua transmissão dentro deste intervalo de tempo predeterminado. O SU obtém um recurso de transmissão que não possuía e o PU é pago pelo aluguel de seu recurso ocioso. Quando o SU termina a negociação, a oportunidade escolhida é removida do banco de dados. Isso é importante para evitar que outro usuário acesse o mesmo recurso de transmissão que já não está mais disponível, e que o PU seja pago por alugar erroneamente esse recurso.

O modelo de compartilhamento pró-ativo pode ser adotado, por exemplo, por um canal de televisão aberta, que possui direitos legais de transmissão em uma faixa de espectro correspondente a canais televisivos, com furos em sua grade de transmissão, permitindo o uso desse tempo de espectro ocioso para alugar temporariamente direitos de transmissão para uma operadora de telecomunicações. A operadora aproveitaria esta oportunidade para aumentar sua capacidade de transmissão.

O STM também incorpora um modelo de compartilhamento de espectro que se assemelha ao compartilhamento fornecido pelos CRs. Esse tipo de compartilhamento é usado quando um ator, que é o proprietário legal dos direitos de transmissão, não faz uma oferta proativa de compartilhamento no STM. Esse tipo de ator não é como as operadoras de telecomunicações, que adquiriram os direitos do espectro por meio de um leilão, investindo muito dinheiro na transação. São atores como operadores de sistemas meteorológicos, que utilizam as faixas do espectro distribuídas pelo governo para realizar suas atividades, e durante a execução dessas atividades não fazem uso contínuo da faixa, nem têm necessidade de lucrar com o espectro adquirido, uma vez

que não houve investimento no recurso. Em termos práticos, o usuário que deseja utilizar o compartilhamento oportunístico deve realizar uma verificação em tempo real, selecionando quantos e quais dispositivos SSIoT [18] deseja utilizar na verificação de ocupação em tempo real. Em seguida, os dispositivos SSIoT selecionados [18] realizam a verificação de ocupação, retornando o resultado para o STM, que com base nos resultados das medições individuais dos dispositivos, gera um veredito sobre o estado de ocupação do espectro. Se o espectro estiver desocupado, o ator paga aos proprietários dos dispositivos SSIoT [18] envolvidos na verificação de ocupação, e começa a usar a oportunidade de transmissão nesta faixa de espectro.

No entanto, para garantir que nos modelos de operação apresentados até aqui o espectro licenciado seja realmente licenciado, a base de dados de espectro do STM deve ser alimentada com informações sobre as faixas de espectro licenciado na região em que o mercado opera. Além disso, para garantir que o modelo de compartilhamento oportunístico não use bandas de espectro licenciadas incorretamente, é necessário que esse registro diferencie atores que desejam monetizar suas bandas de espectro e atores que não desejam. Ao manter esse banco de dados sempre atualizado, o STM pode filtrar as oportunidades de transmissão confiáveis, evitar tentativas fraudulentas e prevenir comportamentos maliciosos.

O STM pode impedir que uma banda de espectro licenciada seja anunciada por outros que não sejam os proprietários dos direitos, usando esse banco de dados atualizado. No entanto, o STM não pode impedir que um SU faça uso oportunístico de uma banda de espectro licenciado sem autorização. Não obstante, o STM permite que o PU faça uma verificação em tempo real de suas bandas de espectro usando os dispositivos SSIoT com capacidade de sensoriamento [18]. Neste modelo, PU usa dispositivos SSIoT [18] para realizar tais verificações.

Por fim, o STM não realiza nenhum tipo de controle, priorização ou otimização de uso de bandas de espectro, ou seja, se o mercado tiver uma determinada quantidade de banda, e dois usuários estiverem precisando da mesma banda, mas por durações de tempo diferentes, o mercado não vai tentar otimizar o uso para obter o maior lucro, ou a distribuição mais igualitária entre todos os participantes. Esse tipo de controle pode ser adicionado no componente de políticas, mas inicialmente não faz parte da arquitetura.

## 4.6 Visão geral do modelo completo da arquitetura

Para completar o modelo de arquitetura do STM, é necessário abordar como seus componentes são integrados e como os atores irão interagir com esses componentes, para que os requisitos levantados nos pontos de partida, possam ser entregues aos participantes do STM como funcionalidades de um sistema de *software*. A Figura 4.2 apresenta uma visão geral completa da arquitetura STM e como seus componentes são integrados.

Todos os componentes do STM funcionam de forma independente e, exceto pelo componente de mercado, nenhum componente implementa regras de negócios. Cada um deles é responsável por uma parte específica do sistema. As funcionalidades desses

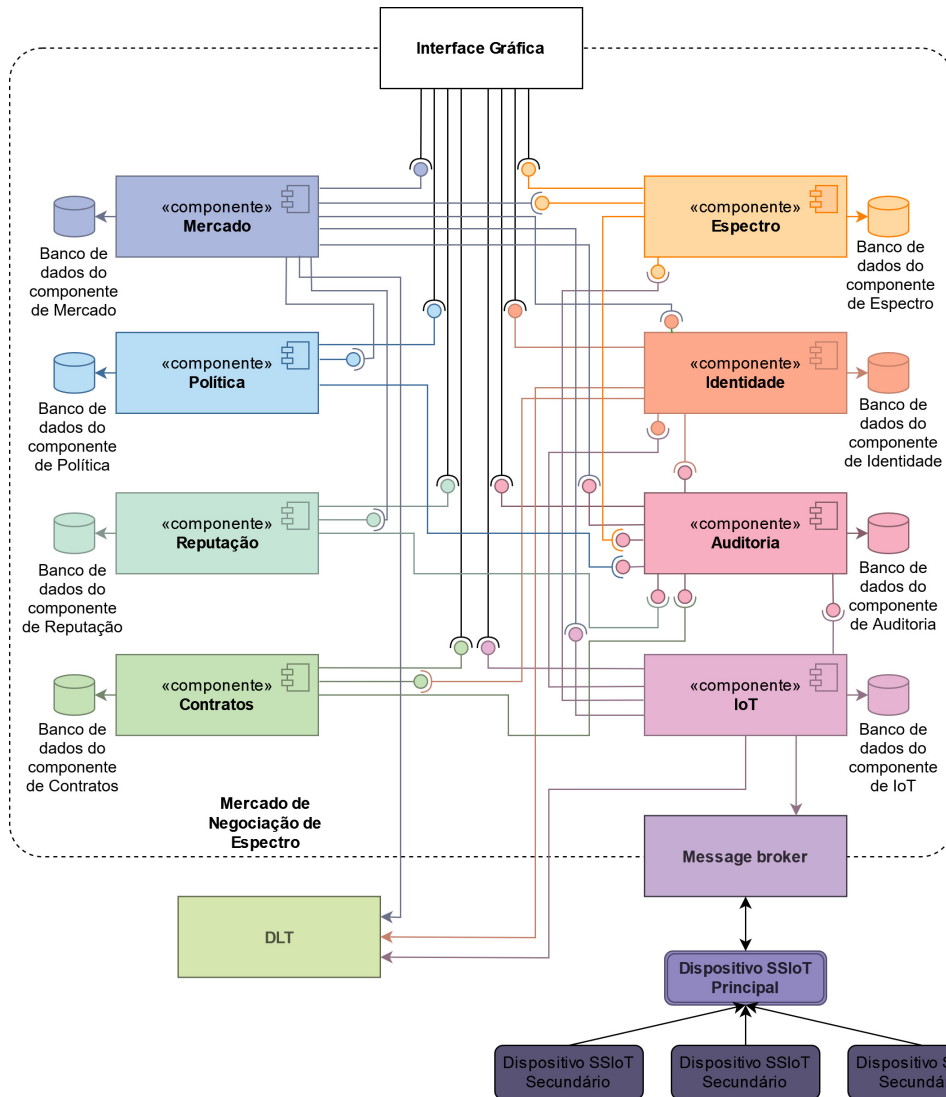


Figura 4.2: Modelo de arquitetura do STM.

componentes são então organizadas e disponibilizadas de forma amigável aos atores do sistema, por meio de uma interface gráfica, que também não implementa nenhuma regra de negócio.

O componente de identidade é acionado sempre que um novo ator é criado, ou quando algum outro componente precisa de informações sobre um determinado ator no sistema. O componente de identidade interage com o componente de contratos para forçar os atores do sistema a aceitar os termos de uso do STM. Além disso, o componente de identidade interage diretamente com a rede DLT, pois é o ponto de conexão entre os atores e suas carteiras na DLT.

O componente de espectro é ativado em diversas situações, principalmente como provedor de informações para outros componentes do STM. As únicas situações em que um ator interage com o componente de espectro, via interface gráfica, é quando um PU deseja adicionar uma nova oportunidade de negociação em banda de espectro licenciada, e quando SUs desejam ver a lista de oportunidades de negócios de bandas de espectro licenciadas.

O componente IoT é utilizado pelos proprietários de dispositivos SSIoT [18], via interface gráfica, quando os dispositivos são cadastrados no mercado, e por um SU quando é solicitada a verificação de ocupação da banda de espectro em tempo real. Para realizar a verificação de ocupação, o componente IoT interage com o componente de espectro para buscar informações do espectro, com o componente de identidade para buscar as informações do usuário e com o componente de política para buscar as métricas necessárias para a verificação. O componente IoT também pode ser utilizado por seus proprietários para escanear o espectro local, identificando oportunidades de transmissão em faixas de espectro licenciadas, e cadastrando-as no componente de espectro, a ser ofertado no STM posteriormente. Além disso, o componente IoT fornece a comunicação básica dos componentes STM com dispositivos SSIoT reais [18] (através de um *broker* de mensagens como *RabbitMQ* ou *Apache Kafka*) e comunicação com a rede DLT, para registrar pagamentos e resultados de verificação de ocupação.

O componente de auditoria é acionado por todos os outros componentes do STM, pois todas as ações realizadas dentro do STM são registradas em seu banco de dados. Os atores, em geral, não interagem diretamente com este componente, pois na maioria das vezes é utilizado de maneira direta por outros componentes. A única exceção acontece quando os atores com a função de auditores, que através da interface gráfica, podem visualizar as informações cadastradas em seu banco de dados durante os processos de auditoria. As informações de auditoria estão disponíveis no banco de dados STM e na DLT.

O componente de mercado oferece funcionalidades de compra e venda de espectro para atores do sistema, por meio da interface gráfica. Portanto, é responsável por implementar as regras de negócio e fluxos de trabalho necessários para que o STM realize as negociações. Ele usa os recursos do componente de identidade para pesquisar as informações dos atores, interage com o componente de espectro para buscar informações de espectro, usa os serviços do componente IoT quando o ator deseja realizar verificações de ocupação do espectro em tempo real, usa os serviços do componente de reputação quando há uma mudança na reputação de um ator, e emprega os

serviços do componente de política para verificar se alguma regra ou política se aplica às negociações. Por fim, o componente de mercado interage com a rede DLT para pagar pelas negociações.

O componente de política funciona basicamente como um provedor de informações para outros componentes do STM, exceto quando uma política é criada, removida ou alterada por um ator com os papéis necessários, via interface gráfica. A mesma situação ocorre com o componente de reputação, que só interage com os atores do sistema, via interface gráfica, quando uma auditoria está sendo realizada e os auditores desejam ver as informações de reputação dos atores. Essa situação se repete com o componente de contratos, que também só interage com os atores do sistema, por meio de uma interface gráfica, quando um contrato é criado, alterado ou removido.

A Tabela 4.3 apresenta uma comparação entre o STM e as propostas abordadas no Capítulo 3. As propostas foram consideradas autossustentáveis se a solução cobre seus custos operacionais; auditável se a solução fornecer os meios para realizar um processo de auditoria; e ganha-ganha se fornece um meio para que todos os atores ganhem algo participando da solução. As propostas foram consideradas voltadas para o mercado digital se o espectro for negociado por meio de um anúncio de empréstimo originado pelo PU por meio de um canal comum, disponível a todos os participantes do sistema, podendo os usuários lucrar com a negociação. Até onde sabemos, este é o primeiro modelo de baixo custo (porque no lugar de CRs a arquitetura usa dispositivos SSIoT com capacidade de detecção [18] ) para compartilhamento de espectro voltado para o mercado digital, autossustentável, auditável e equilibrado, ou seja, funciona sob um modelo ganha-ganha.

A classificação da arquitetura como uma arquitetura de baixo custo se dá pela diferença de valores entre um CR e um dispositivo SSIoT. Ao passo que um CR é um aparelho altamente especializado e fabricado sobre demanda, podendo ter um valor de mercado que alcança dezenas de milhares de reais, um dispositivo IoT equipado com um módulo de sensoriamento teria um custo de mercado que representa uma pequena fração do valor de um CR. O mesmo acontece com o dispositivo SSIoT principal, que faz a fusão das medições dos dispositivos IoT secundários. Apesar do valor de um *frontend* RF variar dependendo de sua potência, o valor final também não alcança sequer uma fração do valor de um CR.

É importante destacar que a Tabela 4.3 classifica os trabalhos de acordo com as informações fornecidas pelos autores. Se uma proposta não foi considerada autossustentável, auditável, ganha ganha ou orientada a mercado, significa que os autores não direcionaram os esforços de suas pesquisas para este mérito, o que não significa que as propostas analisadas não possam ser retrabalhadas para atenderem a estes requisitos.

A arquitetura proposta para prover as funcionalidades do STM, em termos práticos, pode ser implementada tanto por meio de práticas convencionais de programação (por exemplo, *as-a-service*); ou pode ser implementado de forma descentralizada, por meio do uso de contratos inteligentes. Este assunto será melhor discutido no próximo capítulo.

Por fim, é válido mencionar que a arquitetura STM pode ser aplicada como um único ponto de acesso para todos os usuários, por exemplo a nível nacional, ou então pode-se utilizar a ideia de regionalização, e a decisão depende bastante de qual prática

Tabela 4.3: *Comparação entre as principais funcionalidades do STM x Trabalhos Relacionados.*

<b>Referência</b>	<b>Autossustentável</b>	<b>Auditável</b>	<b>Ganha Ganha</b>	<b>Orientado a Mercado</b>
[11]	Não	Não	Não	Sim
[5]	Não	Sim	Não	Não
[12]	Não	Não	Sim	Não
[8]	Não	Não	Não	Não
[13]	Não	Não	Sim	Não
[10]	Não	Sim	Não	Não
[6] e [7]	Não	Não	Não	Não
[3] e [4]	Não	Não	Não	Sim
STM	Sim	Sim	Sim	Sim

de programação vai ser utilizada. Se a implementação da arquitetura for realizada por meio de práticas convencionais de programação, é possível ter uma única instância, ou várias instâncias do STM, a depender da necessidade dos usuários. Por exemplo se a arquitetura fosse adotada a nível nacional, poderia-se ter um único STM para todo o país. Porém, se a arquitetura for adotada regionalmente, não faz sentido ter uma infraestrutura de grande porte, para um número pequeno de usuários, então poderia-se utilizar uma abordagem regional, ou até mesmo municipal. Em contrapartida, se a implementação da arquitetura for realizada através de contratos inteligentes, não faria sentido regionalizar, porque o contrato seria depurado diretamente na rede DLT que hospeda os contratos. Do ponto de vista dos dispositivos SSIoT, é subentendido que estes devem ser municipais ou regionais, pois não seria viável, por exemplo, utilizar um dispositivo SSIoT em um estado, para fazer o sensoriamento espectral de outro estado.





# Capítulo 5

## Decisões de implementação

A ideia por trás deste trabalho é apresentar um modelo prático que implemente as funcionalidades do STM. Porém, antes de entrar nos detalhes da implementação, é necessário responder duas questões que impactam diretamente na forma como o STM poderia ser implementado. Estas perguntas são:

- Qual DLT usar como forma de pagamento para negociações de espectro e verificações de ocupação de espectro em tempo real?
- O STM deve ser implementado por meio de uma arquitetura centralizada ou descentralizada?

### 5.1 DLT baseado em *blockchain* versus DLT não baseado em *blockchain*

Para escolher a DLT que melhor se adapta às premissas propostas para o STM, é importante definir se o STM deve utilizar uma DLT baseada em *blockchain* [22], ou uma DLT não baseada em *blockchain*. A seguir, é apresentada uma breve comparação entre *blockchain* (uma vez que a maioria das DLTs existentes derivam dessa tecnologia) e *IOTA*, que é um exemplo de DLT não baseada em *blockchain*.

Para realizar uma operação em uma DLT baseada em *blockchain*, é necessário validar o novo bloco gerado durante o período de transações. A validação é realizada por mineradores e o trabalho não é gratuito. Uma taxa deve ser oferecida aos mineradores, que podem escolher quais transações minerar em um bloco. Isso significa que as transações podem levar horas para serem concluídas, pois dependem de mineradores, além de terem um custo para serem cadastradas na rede.

A *IOTA* não usa a tecnologia *blockchain* para armazenar suas transações, nem precisa do trabalho dos mineradores. Em vez disso, foi desenvolvida uma tecnologia chamada *Tangle* [19], que em resumo também é uma DLT, mas que armazena as informações em um grafo DAG [19]. No *Tangle*, para que uma nova transação seja validada, ela precisa validar duas transações anteriores e inseri-las na rede sem conflito. Isso faz com que as validações das transações sejam feitas em menos tempo se comparadas à *blockchain* [23]. No *Tangle*, quanto mais transações, mais validações.

Na *Blockchain*, quanto mais transações, maior fica a *blockchain*, e mais disputado é o trabalho dos mineradores. Isso conceitualmente torna o *Tangle* mais eficiente que a *blockchain* [23].

Outro aspecto a ser destacado nessa comparação é o valor de mercado das criptomoedas operadas em cada DLT. Por exemplo, no momento em que este trabalho foi escrito, o *Bitcoin*, a criptomoeda oficial da *blockchain*, estava avaliada em 20.547,70 dólares. O *Ethereum*, uma DLT baseada em *blockchain*, foi avaliado em 1.133,94 dólares. A *IOTA*, neste mesmo período, foi avaliada em 0,28080 dólares. Para que o mercado seja autossustentável, o valor de sua moeda oficial não pode ser impedimento para a entrada de nenhum participante.

Para a arquitetura proposta neste trabalho, a velocidade da transação é um fator muito importante, pois o usuário que precisa de uma banda de RF para transmitir, não pode esperar muito para que sua transação seja validada em um novo bloco da *blockchain*. Além disso, o fato da rede *IOTA* permitir transações de valor zero, abre a possibilidade de utilizar o *Tangle* para armazenar informações para o próprio sistema, como o registro de verificação de ocupação do espectro realizado pelos dispositivos SSIoT [18]. Pelas vantagens apresentadas, o *IOTA* é a DLT e criptomoeda escolhida como forma de pagamento nas transações e verificações de ocupação do espectro no STM.

## 5.2 Implementação centralizada versus descentralizada

A implementação através de modelos convencionais de desenvolvimento de *software* não tem segredos. Em termos simples, um sistema deve ser implementado usando quaisquer paradigmas de desenvolvimento de *software*, tais como: *Model-View-Controller* (MVC), micro serviços, Arquitetura Orientada a Serviços (*Service Oriented Architecture*, SOA), etc. A solução final é então hospedada em um servidor, para que sua funcionalidade possa ser entregue aos usuários. Quando este tipo de arquitetura é empregada, uma importante questão deve ser respondida: quem deve ser responsável pelo STM?

Como o STM é um mercado digital que engloba diferentes tipos de atores, duas opções podem ser utilizadas. Uma delas é deixar os reguladores responsáveis pela manutenção do STM, pois são eles que criam as leis que vão reger o mercado. Outra opção é criar uma aliança entre todos os interessados no STM e eleger dentre esses membros um responsável pela operação e manutenção do STM. Este tipo de implementação tem um custo operacional para manter os servidores onde a solução está hospedada. Para que o STM seja autossustentável nesse estilo de implementação, os custos de operação devem ser cobertos, por exemplo, com pequenas taxas embutidas em todas as transações, para que todos possam ajudar a pagar pelo funcionamento do mercado digital. É por isso que esse tipo de arquitetura é centralizada. Seu sucesso depende, em certa medida, da reputação de seu proprietário.

Implementar o STM através de SCs é uma opção que a princípio parece ser a mais conveniente, já que são autoexecutáveis e não necessitam de uma autoridade central ou qualquer outro tipo de intermediário em sua utilização. Isso significa que o STM

é totalmente descentralizado e não precisa ter um dono. No entanto, existem alguns pontos que devem ser observados antes de utilizar essa tecnologia na solução. Primeiramente, vamos analisá-lo no contexto da *blockchain Ethereum*, já que a maioria das referências discutidas nesta dissertação implementam SCs empregando esta tecnologia. De acordo com os cálculos apresentados em [6] e [7], se o SC for escrever informações, há custos envolvidos nessa atividade. Se houver um custo envolvido na execução do SC, o STM teria que levar em conta esse custo, reduzindo ao máximo as informações armazenadas na rede, para viabilizar a operação. Como consequência, poderia reduzir a qualidade dos dados armazenados, o que não é desejável para um mercado que pretende ser auditável.

Além disso, por menor que seja o valor, para que o mercado seja autossustentável, este custo teria que ser repassado aos atores, aumentando assim o valor tanto das negociações de espectro licenciado quanto das verificações de ocupação de espectro em tempo real. Nesse caso, não seria necessário que o STM cobrasse taxa sobre as transações, pois qualquer operação do STM possuiria uma taxa de operação embutida. Como o valor do *Ethereum* (no momento da redação deste trabalho) ultrapassa mil dólares, esse fator pode ser um impedimento para a criação de um mercado de baixo custo, pois os custos operacionais podem inibir a participação de atores com menor poder aquisitivo.

Como espera-se que os dispositivos SSIoT [18] alimentem proativamente o STM com oportunidades de transmissão de espectro, se o STM for implementado com SCs *Ethereum*, os proprietários de dispositivos SSIoT [18] terão que investir inicialmente no mercado. Dependendo do número de dispositivos de propriedade de um ator e da quantidade de tempo que ele deixará seus dispositivos funcionando para o STM, o custo de entrada pode ser um impedimento. Para ilustrar essa situação com um exemplo, considere o proprietário de um sistema de iluminação inteligente que possui milhares de dispositivos espalhados por uma cidade, que ficam ociosos na maior parte do tempo. Usar esses milhares de dispositivos para detectar o meio e alimentar o banco de dados STM parece uma ótima ideia, mas pode falhar se o proprietário tiver um alto custo de entrada. Comparando por exemplo a mesma situação com um modelo de desenvolvimento convencional (centralizado), os proprietários de dispositivos SSIoT [18] não teriam nenhum custo de entrada.

Nesse contexto, foi descartada a ideia de criar uma nova DLT/criptomoeda exclusiva para o STM, bem como utilizar uma DLT/criptomoeda sem visibilidade de mercado, pois um dos atrativos do STM é dar retorno financeiro para PUs e proprietários de dispositivos SSIoT [18]. Portanto, se a proposta for decidida por uma moeda digital sem valor de mercado, seria como operar de graça, e inviável para esses atores. O mesmo ocorre com a escolha de uma moeda altamente valorizada (e.g. *Bitcoin*), pois seria um impedimento para a participação dos SUs, pois eles usariam essa moeda para pagar pelo compartilhamento de espectro.

Já que a ideia de criar uma nova criptomoeda foi descartada, e como os custos impostos à execução de SCs na rede *Ethereum* (e o valor de mercado da própria *Ethereum*) são altos para uma solução de baixo custo, a primeira implementação prática do STM será de forma centralizada, utilizando uma composição de serviços, onde cada componente presente em sua arquitetura será implementado como um serviço independente.

No entanto, o uso de SCs na arquitetura STM não foi totalmente descartado. Existe uma iniciativa da *IOTA Foundation* que está desenvolvendo contratos inteligentes na rede *IOTA*. No futuro, quando essa tecnologia estiver pronta (atualmente em fase de testes), valeria a pena estudar como implementar o STM usando SCs na rede *IOTA*.

# Capítulo 6

## Do modelo à implementação

Este capítulo aborda o projeto e a implementação da prova de conceito do STM. O capítulo começa com uma discussão sobre redução de escopo, para direcionar uma primeira implementação da proposta em um tempo razoável. Em seguida, é descrita a proposta da PoC do STM. O cenário experimental também é abordado, bem como a metodologia de avaliação utilizada. Por fim, são apresentados resultados e considerações sobre os testes.

### 6.1 Ajuste de escopo antes da implementação

Para validar o funcionamento do STM, foi desenvolvido uma PoC. O objetivo é provar que é possível desenvolver um modelo de arquitetura de compartilhamento de espectro de baixo custo, orientado para o mercado, autossustentável, auditável, equilibrado e que funcione em um modelo ganha-ganha. O escopo da PoC abrange apenas os componentes fundamentais do STM, ou seja, os componentes necessários para realizar uma transação de espectro e interagir com dispositivos SSIoT [18]. Esses componentes, ilustrados na Figura 6.1, são: identidade, espectro, auditoria, IoT e mercado.

Para atingir o objetivo da PoC, são considerados os seguintes pressupostos: (i) todos os atores participantes do mercado são honestos e conscientes de suas obrigações de acordo com o papel que desempenham; (ii) os dispositivos SSIoT [18] enviam apenas leituras válidas de ocupação de bandas de espectro, sem qualquer tentativa de fraude; (iii) não há anúncios fraudulentos de espectro no mercado; e (iv) como a taxa de transação é cobrada após a conclusão do negócio, ou seja, após o ator ter iniciado a transmissão na faixa de espectro, o pagamento dessa taxa não está incluído nos fluxos dos casos de uso da PoC, o único pagamento a ser considerado é o pagamento do SU aos proprietários dos direitos de transmissão das bandas de espectro, e proprietários de dispositivos SSIoT [18].

Todos os componentes foram implementados com a linguagem de programação *Java*, usando a tecnologia *Java Spring Boot* e banco de dados *MySQL*. Cada componente implementado funciona como um serviço independente, e a comunicação entre os componentes ocorre por meio chamadas *Rest* feitas sobre o Protocolo de Transferência de Hipertexto (*Hypertext Transfer Protocol*, HTTP). Todos os componentes

fornecem aos atores funcionalidades básicas de manutenção (criar, recuperar, atualizar e excluir), via chamadas HTTP *Rest*. Foi desenvolvida uma interface gráfica utilizando a Linguagem de Marcação de Hipertexto (*Hypertext Markup Language*, HTML) e Folhas de Estilo em Cascata (*Cascading Style Sheets*, CSS), para agrupar as funcionalidades dos componentes, e oferecê-las em uma interface gráfica amigável aos atores do sistema.

Conforme apresentado no Capítulo 5, a DLT escolhida para o STM é a *IOTA*, e para esta PoC foi selecionada a rede *IOTA Devnet*, fornecida pela *IOTA Foundation*. Essa rede é adequada para desenvolvedores testarem suas soluções, pois permite facilmente a criação de carteiras e negociações entre seus usuários. Ao utilizar a rede *IOTA Devnet* os desenvolvedores tem acesso a um ambiente seguro onde podem testar funcionalidades e realizar transações sem custo, e sem afetar a rede *IOTA* principal. No entanto, no lugar das transações, a PoC adota trocas de mensagens dentro da rede *IOTA*, pois os processos de trocas de mensagens e pagamentos são quase idênticos. A diferença entre um pagamento e uma mensagem é que o pagamento é uma mensagem que contém um valor agregado. As transações não são empregadas, pois exigem uma quantidade alta de *IOTAs*, e na rede *IOTA Devnet* não é possível obter tantos *IOTAs*.

Os componentes de identidade, IoT e mercado interagem com a rede *IOTA Devnet* por meio da biblioteca *Java IOTA API*, também fornecida pela *IOTA Foundation*. A biblioteca *Java IOTA API* fornece funcionalidades para que desenvolvedores possam criar carteiras, registrar mensagens na rede, realizar transações e realizar consultas de saldo em redes *IOTA*, como por exemplo a *IOTA Devnet*.

Para que o componente IoT se comunique com dispositivos reais, é necessário empregar um *message broker*. Portanto, o *RabbitMQ* foi adotado. As mensagens trocadas entre os dispositivos e o componente IoT usam o formato *Javascript Object Notation* (JSON). Por fim, dispositivos SSIoT com capacidade de detecção são objeto de outra pesquisa em andamento [18], não estando ainda disponíveis para experimentos. Portanto, um simulador equivalente foi desenvolvido para simular dispositivos SSIoT [18] no STM. No futuro, dispositivos físicos poderão substituir este simulador, de forma transparente.

O simulador desenvolvido neste trabalho é um algoritmo muito simples, que não tem como objetivo emular o funcionamento de um dispositivo SSIoT real. O simulador funciona como um gerador de estímulos, que escuta a fila do *RabbitMQ* onde o componente IoT publica mensagens, e quando uma solicitação de verificação de espectro é emitida, ele responde com um resultado aleatório (espectro ocupado ou livre) com a mesma distribuição de probabilidade para ambas opções.

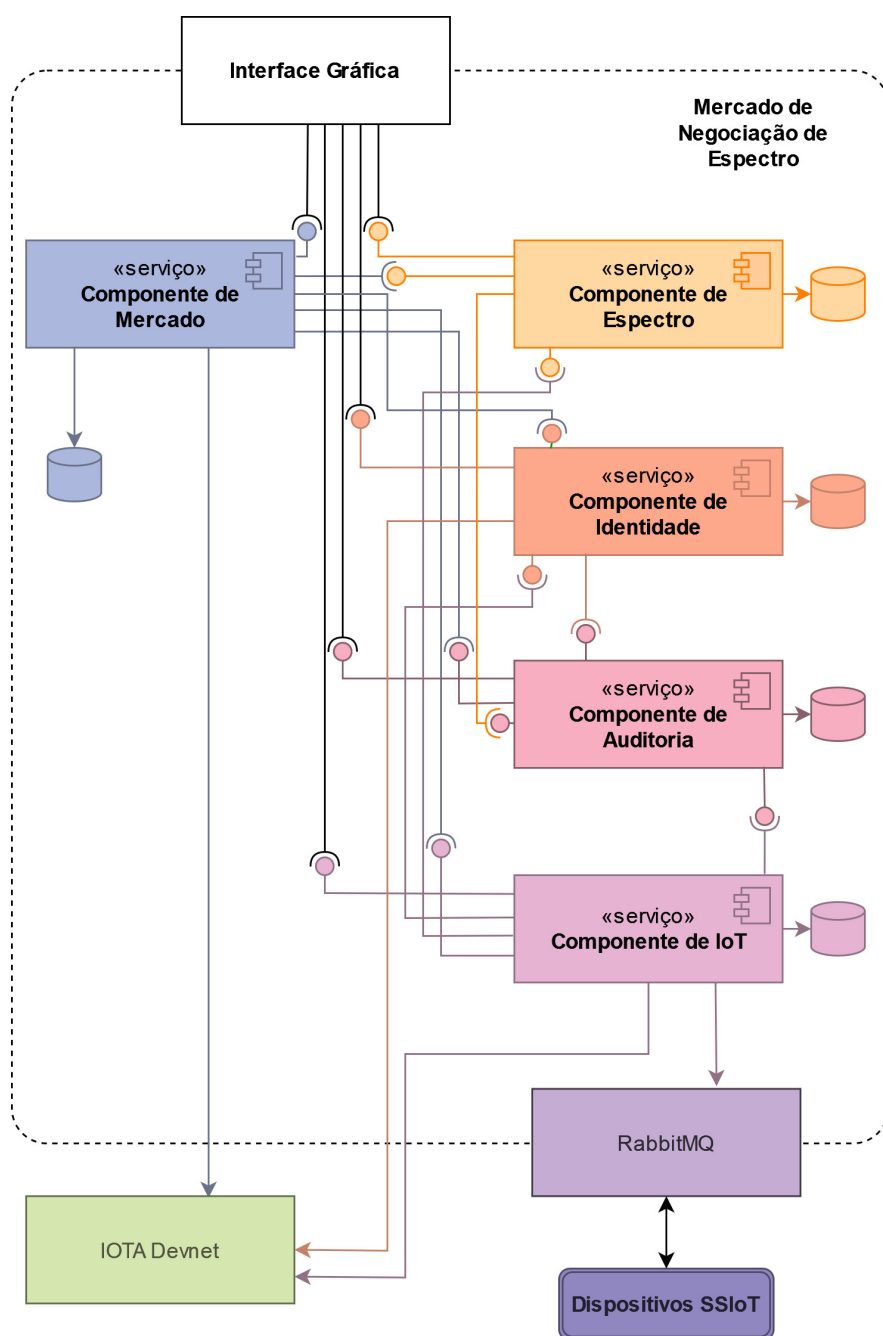


Figura 6.1: Modelo de arquitetura da PoC do STM.

## 6.2 Cenário experimental

Para testar o desempenho da PoC, o STM foi preparado para simular dois casos de uso (além das operações básicas necessárias para chegar até eles). No primeiro caso de uso (UC1), um SU faz uma compra de espectro licenciado que não é anunciado proativamente por seu proprietário. Para a sua realização, foi necessário interagir com um simulador de dispositivos SSIoT, para responder à chamada de execução de verificação de ocupação com um valor aleatório, que representa espectro ocupado ou livre.

Para realizar a verificação de ocupação, o SU seleciona um dispositivo SSIoT [18] de uma lista fornecida pelo componente de IoT. Ao iniciar o processo, o componente de IoT busca as informações do SU no componente de identidade, verificando se o mesmo possui saldo suficiente para realizar a verificação. Se o SU não tiver saldo, a operação é cancelada. No entanto, se o SU tiver saldo suficiente, o componente IoT enviará uma mensagem JSON para o dispositivo selecionado por meio do serviço de mensagens *RabbitMQ*. O simulador de dispositivos SSIoT receberá a mensagem, e responderá com o resultado da verificação, também utilizando o *RabbitMQ*.

O componente de IoT, ao receber a resposta do dispositivo SSIoT [18], além de remunerar o proprietário do dispositivo, também registra o resultado da verificação na rede *IOTA Devnet*. Também armazena os dados de verificação no componente de auditoria, apresentando o resultado ao usuário. Se a banda de espectro estiver livre, o SU poderá utilizá-la, e essa oportunidade será removida da lista. Se a banda de espectro estiver ocupada, o status do espectro será alterado de livre para ocupado, e o banco de dados do componente de espectro será atualizado com o status do espectro mais recente. A Figura 6.2 mostra o diagrama de sequência da verificação da ocupação do espectro.

Na realização dos testes do UC1 foi considerado que cada usuário tinha uma banda de espectro disponível para seu uso, e não havia concorrência entre os participantes, sendo o principal objetivo deste caso de uso a demonstração da arquitetura com todos os seus componentes, de ponta a ponta.

No segundo caso de uso (UC2), um SU efetua uma compra de espectro licenciado de um PU, proativamente anunciada pelo seu proprietário, disponível em uma lista de ofertas de espectro, disponibilizadas pelo componente de espectro, através de uma interface gráfica. Este mesmo fluxo de trabalho se aplica ao caso em que o SU faz uma compra de uma oportunidade de transmissão de espectro identificada por um dispositivo SSIoT, não anunciado proativamente por seu proprietário. Quando o SU efetua a compra, o componente de mercado busca as informações do SU no componente de identidade, a fim de obter o endereço da carteira do SU e verificar se o saldo do SU é suficiente para efetuar a compra. Se o SU não tiver saldo suficiente, a compra é rejeitada. No entanto, se o SU tiver saldo suficiente, o componente de mercado busca as informações do PU no componente de identidade e finaliza a compra. Ao final do fluxo, a compra é registrada no componente de auditoria, o pagamento é registrado no *IOTA Devnet* e o resultado da transação é apresentado ao SU. A Figura 6.3 apresenta um diagrama de sequência ilustrando este fluxo.

### 6.3 Metodologia de avaliação

Para analisar o desempenho da PoC, todos os componentes (identidade, espectro, IoT, auditoria e mercado) e a interface gráfica do STM foram hospedados em um servidor *Apache Tomcat 9.0*, instalado em uma máquina *Windows 10*, com *CPU Core i7 2.3 GHz* e *8 GB de RAM*. Um servidor *RabbitMQ* foi instalado na mesma máquina (versão 3.9.8 com *Erlang 24.1.4*), com configurações padrão. As transações de espectro e as medições de ocupação em tempo real foram registradas na rede *IOTA Devnet*, por meio de solicitações HTTP enviadas ao *host api.lb-0.h.chrysalis-devnet.iota.cafe*,



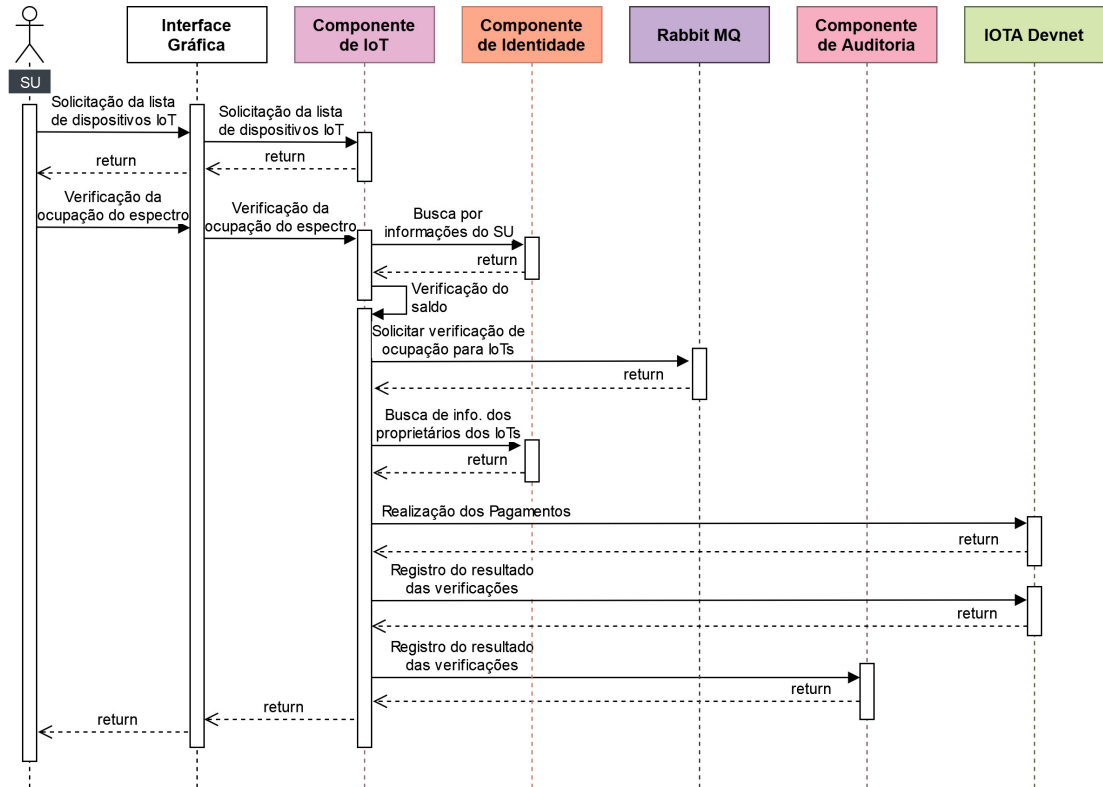


Figura 6.2: Diagrama de sequência UC1 - Verificação de ocupação do espectro de RF licenciado não anunciado proativamente.

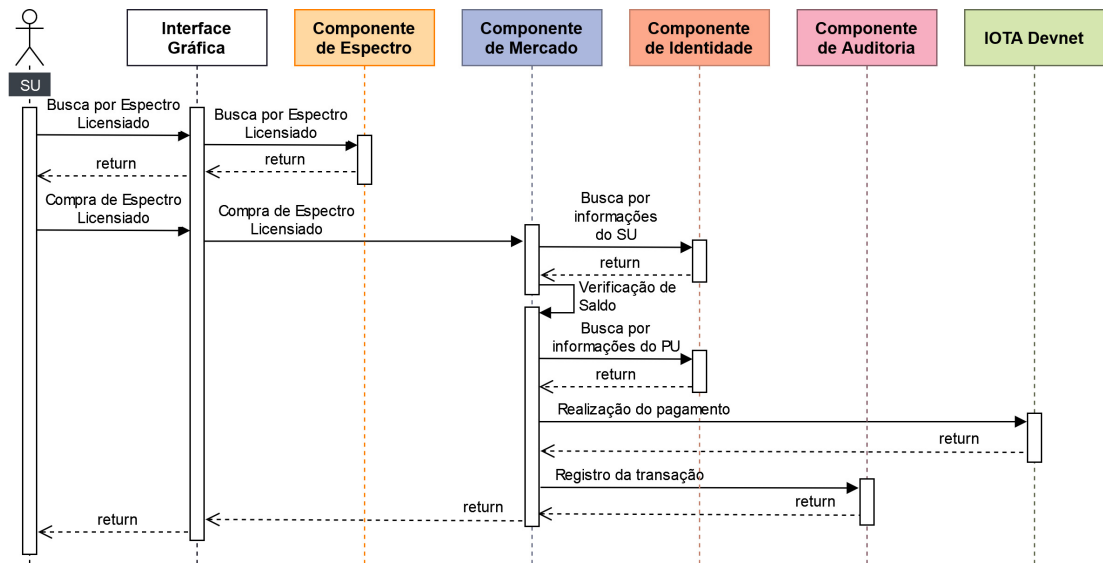


Figura 6.3: Diagrama de sequência UC2 - Compra de espectro de RF licenciado anunciado proativamente.

na porta 443.

Os casos de teste são executados em duas categorias de teste diferentes: os testes funcionais, que fazem parte de um processo típico de qualidade de *software* no qual o STM foi testado em relação à funcionalidades, requisitos e regras de negócios; e os testes de performance, nos quais o STM foi testado com uma grande quantidade de negociações simultâneas, que foram previamente validadas nos testes funcionais.

Os testes funcionais foram executados nos casos de uso UC1 e UC2, enquanto os testes de desempenho foram executados apenas no caso de uso UC2. Os casos de teste UC1 foram excluídos dos testes de desempenho, por não ser possível garantir que o tempo de verificação de ocupação realizado pelo simulador corresponda aos dispositivos reais. No entanto, ainda que não sirva para medir o desempenho, o caso de teste UC1 é útil para demonstrar completamente o fluxo de trabalho básico de negociação de espectro. Um cenário de teste completo usando dispositivos SSIoT reais [18] está planejado para um trabalho futuro.

Nos testes funcionais, um usuário realiza os experimentos interagindo manualmente com o STM. Seu objetivo é demonstrar um fluxo de negociação completo de uma banda de espectro licenciado não proativamente anunciado, incluindo simulador de dispositivo SSIoT para realizar a verificação de ocupação em tempo real. Foram realizados 100 testes, nos quais os dados estatísticos relevantes foram o desempenho financeiro de cada ator que participou das negociações, além de apurações e tempos de negociação. Nesses testes, o tempo de execução da negociação foi medido por meio de uma ferramenta de monitoramento de rede, fornecida nativamente pelo navegador *Mozilla Firefox*. As evidências foram coletadas do *IOTA Tangle Explorer*, fornecido pela *IOTA Foundation*.

Os testes de desempenho foram limitados ao UC2 neste trabalho, uma vez que não emprega a opção de verificação em tempo real antes de efetuar a compra. Ele testa a taxa de transferência do STM com diferentes números de usuários, a fim de obter o número de solicitações que o STM pode atender por minuto. Os testes de *throughput* foram realizados com 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 usuários realizando simultaneamente transações de espectro. Com usuários transacionando simultaneamente é o limite de *hardware* para este tipo de teste no ambiente preparado. Para realizar os testes, foi empregado o aplicativo *Apache JMeter*, fornecido pela *Apache Foundation*.

## 6.4 Resultados

Nos testes funcionais (UC1), um usuário faz uma compra de banda de espectro licenciada, não anunciada proativamente por seu proprietário. Nestes testes, dispositivos SSIoT [18] foram usados para obter o *status* de ocupação do espectro, e o caso de teste completo foi realizado em um tempo médio de 11,957 segundos. O tempo de execução do caso de teste completo mais curto foi de 8,183 segundos e o tempo de execução do caso de teste completo mais longo foi de 29,491 segundos. Separando o tempo deste caso de teste completo em tempo de verificação de ocupação (realizada por dispositivos SSIoT [18]) e tempo de pagamento, foram gastos 8,595 segundos (em média) na verificação de ocupação do espectro em tempo real e 3,213 segundos (em

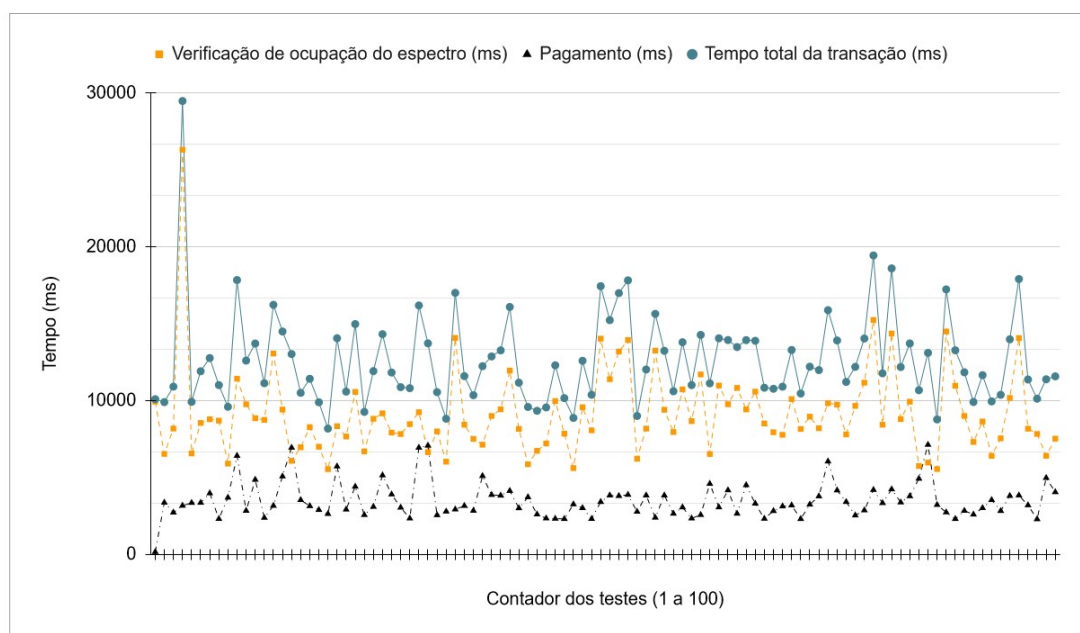


Figura 6.4: Testes da PoC - Resultado dos cem testes executados no caso de teste UC1.

média) no registro do pagamento do aluguel ao proprietário do espectro. Vale recapitular que a verificação da ocupação da banda de espectro realizada pelos dispositivos SSIoT [18], engloba duas operações na rede *Tangle*: uma para realizar o pagamento da verificação ao proprietário do dispositivo SSIoT [18] e outra para salvar o resultado da verificação. O pagamento pelo aluguel do espectro realiza apenas uma transação na rede *Tangle*. O tempo de verificação de ocupação de espectro mais curto foi de 5,545 segundos, enquanto o tempo de verificação de ocupação de espectro mais longo foi de 26,320 segundos. O menor tempo de pagamento ao proprietário do espectro foi de 158 milissegundos, e o maior tempo de pagamento ao proprietário do espectro foi de 7,134 segundos.

O *IOTA Tangle Explorer* apresenta as evidências do registro de execuções de casos de uso na rede *IOTA Devnet*. Ao usar o *hash* da transação na opção de pesquisa deste portal, é possível consultar a transação dentro do *IOTA Devnet*<sup>1</sup>. A Figura 6.4 apresenta os resultados dos cem testes UC1, com tempos de verificação de ocupação realizados por dispositivos SSIoT [18], compra de espectro e tempo total de transação.

Nos testes de *throughput* UC2, em que diferentes números de usuários acessam o sistema simultaneamente para realizar transações de espectro, o resultado para um usuário foi de 20,3 requisições por minuto. Para testes de *throughput* com 10 usuários em diante, até o limite de 100 usuários, não houve muita variação nos resultados, ficando o resultado final entre 22 e 23,9 requisições por minuto. O menor valor de *throughput* encontrado nos testes foi de 22 requisições por minuto, e o maior valor de *throughput* foi de 23,9 transações por minuto. Vale lembrar que as transações de espectro incluem o pagamento da negociação, que é feita na rede *Tangle*. Além disso, nos testes de *throughput*, todas as medidas contemplam a interação nesta rede. A Figura 6.5 apresenta os resultados dos testes de *throughput*.

<sup>1</sup>[b1fae2f175a5255de0018235d9c6c298bbba956e13de2b292047516de4cf0e22](https://explorer.iota.org/b1fae2f175a5255de0018235d9c6c298bbba956e13de2b292047516de4cf0e22)

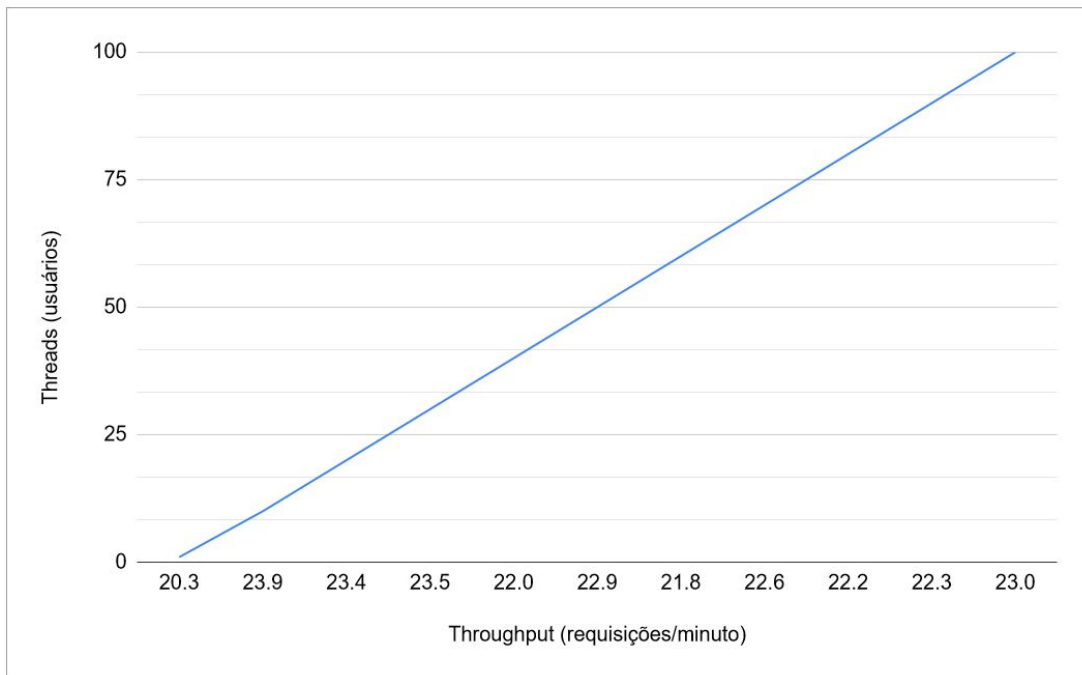


Figura 6.5: Testes da PoC - Resultado dos testes de throughput no caso de teste UC2.

Levando em consideração que a principal hipótese desta dissertação é fornecer um modelo de arquitetura de compartilhamento de espectro de baixo custo, orientado para o mercado, autossustentável, auditável, equilibrado e que funcione em um modelo ganha-ganha, os resultados foram satisfatórios porque: (i) o *hardware* utilizado nos testes é uma máquina de desenvolvimento, portanto, em um servidor real, a eficiência do sistema deve aumentar; (ii) no momento da realização dos testes, a *IOTA Devnet* tinha em média metade das transações da *IOTA Mainnet*, o que nos leva a concluir que em um cenário real as transações STM podem ser mais rápidas; e (iii) o número de usuários simulados nos testes de *throughput* é maior que, por exemplo, o número de empresas brasileiras de telecomunicações, sendo o número de requisições suportadas por minuto, mesmo em ambiente de desenvolvimento, viável para o problema proposto.

# Capítulo 7

## Conclusão

Este trabalho apresentou uma nova arquitetura de baixo custo, para compartilhamento de espectro de rádio licenciado, por meio do Mercado de Negociação de Espectro (*Spectrum Trading Market*, STM) - um mercado de espectro de Radiofrequência (*Radio Frequency*, RF) que emprega *IOTA* como meio de pagamento, e dispositivos de *Spectrum Sensing Internet of Things* (SSIoT), para verificar o estado de ocupação do espectro. Os resultados mostram um tempo médio de transação de espectro de 11,957 segundos. Ao separar o tempo total em tempo de varredura de ocupação e tempo de compra, alcançamos um tempo médio de varredura de ocupação de 8,595 segundos e um tempo médio de compra de 3,213 segundos. Testes de *throughput* mostraram que a Prova de Conceito (*Proof-of-Concept*, PoC) do STM suporta de 20 a 24 requisições simultâneas por minuto, para o *hardware* utilizado nos testes. Para o problema de escassez de espectro de RF apresentado na introdução deste trabalho, o STM se apresenta como uma solução simples, viável e de baixo custo, pois utiliza um modelo de mercado digital, que suporta transações de espectro licenciado auditáveis e autossustentáveis, nas quais todos os participantes ganham.

Aplicar o STM no contexto de telecomunicações nacional seria de grande benefício para todos os participantes deste cenário. Ajudaria os operadores de telecomunicações de pequeno porte a conseguir um recurso escasso, e os operadores de telecomunicações de grande porte a expandir sua capacidade de transmissão, sem burocracia, ao passo que geraria renda alternativa aos portadores de direitos de transmissão em bandas de espectro licenciadas, através do aluguel temporário de seus direitos de transmissão. A consequência disso é um melhor uso do recurso em um cenário benéfico para todos os participantes. Além disso, o STM equipado com dispositivos SSIoT traria um novo propósito para dispositivos de *Internet das Coisas* (*Internet of Things*, IoT) que eventualmente passam horas do dia inativos, e como consequência, uma nova fonte de renda aos seus proprietários.

Até onde sabemos, conforme declarado na introdução deste trabalho, este é o primeiro modelo de baixo custo de uma arquitetura de compartilhamento de espectro, que possui uma PoC que comprova seus resultados. É orientada para o mercado, autossustentável, auditável e equilibrada, trabalhando sob um modelo ganha-ganha. Como próximo passo, a ideia é integrar o STM com o dispositivos SSIoT com capacidade de sensoriamento reais (trabalho em desenvolvimento), e repetir as mesmas sequências de

teste, usando os mesmos casos de uso empregados neste trabalho.

## 7.1 Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento do trabalho foram realizadas duas reduções de escopo, uma delas relacionada a remoção de serviços de rádio e infraestrutura, e outra relacionada à componentes não essenciais para a negociação de espectro. Em um estudo futuro, o STM pode evoluir estas duas ideias. Para que o STM incorpore serviços de rádio e infraestrutura em seu mercado, é necessário uma pesquisa multidisciplinar com especialistas neste assunto, a fim de entender as lacunas práticas de funcionamento deste domínio de conhecimento, e então incorporá-los ao mercado. Por fim, para adicionar os componentes não essenciais ao funcionamento prático da negociação de espectro de RF, é necessário projetar e implementar um sistema de políticas de negociação de espectro, com a ajuda de especialistas no assunto, para que então possam ser desenvolvidos os contratos relacionados ao uso destas políticas, e como consequência o sistema de reputação, que seria baseado na utilização destas políticas durante a realização dos cenários existentes no mercado.

Uma outra possibilidade de trabalho futuro seria investigar a aplicabilidade do STM para a reorganização de bandas de espectro não licenciadas, a fim de organizar a transmissão e distribuir de maneira organizada as bandas de espectro e canais que cada usuário deveria utilizar, aumentando assim o *throughput* da rede, em um cenário mais benéfico para todos.

## 7.2 Desafios e Lições Aprendidas

Para finalizar, durante o desenvolvimento teórico e prático deste trabalho, obstáculos foram encontrados e lições foram aprendidas. Do ponto de vista teórico, os principais obstáculos foram entender o tamanho do escopo da proposta inicial, e conjecturar o tempo necessário para o desenvolvimento do modelo completo. Remover parte da ideia não foi uma tarefa simples, cada remoção teve de ser realizada com cautela, sempre levando em consideração o que se ganha e o que se perde ao remover ou deixar um componente no projeto. Como a ideia principal do STM era ter uma implementação prática, as reduções de escopo foram necessárias, mas incorporar as partes removidas é possível, devido ao desenho da arquitetura. Esta foi a grande lição aprendida neste quesito. Por mais que o escopo tenha sido reduzido, foi melhor pensar grande e implementar o necessário, pois o projeto permite que as partes removidas sejam reincorporadas, sem alteração na arquitetura. O contrário talvez não seja verdade sem uma alteração na arquitetura do projeto. No quesito prático, a principal dificuldade foi encontrar material relacionado à integração de negociações na rede *IOTA* com a linguagem de programação *Java*. É um caminho ainda pouco percorrido, e vários protótipos tiveram de ser desenvolvidos até a solução final ser encontrada.

## Referências Bibliográficas

- [1] X. Hong, J. Wang, C. X. Wang, and J. Shi, “Cognitive radio in 5G: A perspective on energy-spectral efficiency trade-off,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 7, pp. 46–53, 2014.
- [2] L. Zhang, M. Xiao, G. Wu, M. Alam, Y.-C. Liang, and S. Li, “A survey of advanced techniques for spectrum sharing in 5g networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 5, pp. 44–51, 2017.
- [3] K. Kotobi and S. Bilén, “Secure blockchains for dynamic spectrum access: A decentralized database in moving cognitive radio networks enhances security and user access,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, pp. 32–29, March 2018.
- [4] —, “Blockchain-enabled spectrum access in cognitive radio networks,” 04 2017, pp. 1–6.
- [5] Y. Chen, J. Gu, S. Chen, S. Huang, and X. S. Wang, “A full-spectrum blockchain-as-a-service for business collaboration,” in *2019 IEEE International Conference on Web Services (ICWS)*, July 2019, pp. 219–223.
- [6] S. Bayhan, A. Zubow, and A. Wolisz, “Spas: Spectrum sensing as a service via smart contracts,” in *IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, August 2018, pp. 648 – 660.
- [7] S. Bayhan, A. Zubow, P. Gawlowicz, and A. Wolisz, “Smart contracts for spectrum sensing as a service,” *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. PP, pp. 1–1, August 2019.
- [8] J. Yang, G. Ding, X. Chen, L. Zhang, J. Sun, and H. Zhao, “A mobile edge computing enabled spectrum blockchain for the internet of spectrum devices,” in *MOBIMEDIA 2019 - 12th EAI International Conference on Mobile Multimedia Communications*, June 2019.
- [9] M. B. H. Weiss, K. Werbach, D. C. Sicker, and C. E. C. Bastidas, “On the application of blockchains to spectrum management,” *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 5, no. 2, pp. 193–205, June 2019.
- [10] M. Grissa, A. Yavuz, and B. Hamdaoui, “Trustsas: A trustworthy spectrum access system for the 3.5 ghz cbrs band,” in *IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications*, July 2019.
- [11] T. Ariyaratna, P. Harankahadeniya, S. Isthikar, N. Pathirana, H. M. N. D. Bandara, and A. Madanayake, “Dynamic spectrum access via smart contracts on blockchain,” in *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Confe-*

- rence (WCNC), April 2019, pp. 1–6.
- [12] L. H. T. Maksymyuk, J. Gazda and M. Jo, “Blockchain-based intelligent network management for 5g and beyond,” in *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, July 2019, pp. 36–39.
- [13] S. Hyowoon, P. Jihong, B. Mehdi, and C. Wan, “Consensus-before-talk: Distributed dynamic spectrum access via distributed spectrum ledger technology,” in *2018 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, October 2018, pp. 1–7.
- [14] B. Qian, H. Zhou, T. Ma, K. Yu, Q. Yu, and X. Shen, “Multi-operator spectrum sharing for massive iot coexisting in 5g/b5g wireless networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 39, no. 3, pp. 881–895, 2021.
- [15] H. Zhang, S. Leng, F. Wu, and H. Chai, “A dag blockchain-enhanced user-autonomy spectrum sharing framework for 6g-enabled iot,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 11, pp. 8012–8023, 2022.
- [16] W. Lu, P. Si, G. Huang, H. Han, L. Qian, N. Zhao, and Y. Gong, “Swipt cooperative spectrum sharing for 6g-enabled cognitive iot network,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 20, pp. 15 070–15 080, 2021.
- [17] X. Kang, Y.-C. Liang, and J. Yang, “Riding on the primary: A new spectrum sharing paradigm for wireless-powered iot devices,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 9, pp. 6335–6347, 2018.
- [18] D. Guimarães, E. Pereira, A. Alberti, and J. Moreira, “Design guidelines for database-driven internet of things-enabled dynamic spectrum access,” 05 2021.
- [19] S. Popov, “The tangle,” *IOTA Foundation*, April 2018.
- [20] R. Etkin, A. Parekh, and D. Tse, “Spectrum sharing for unlicensed bands,” *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 25, pp. 517 – 528, May 2007.
- [21] L. Zhang, Y.-C. Liang, and M. Xiao, “Spectrum sharing for internet of things: A survey,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 3, pp. 132–139, 2019.
- [22] S. Nakamoto, “Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system,” *The Cryptography Mailing*, 2008.
- [23] M. Alshaikhli, T. Elfouly, O. Elharrouss, A. Mohamed, and N. Ottakath, “Evolution of internet of things from blockchain to iota: A survey,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 844–866, 2022.
- [24] P. Ferraro, C. King, and R. Shorten, “Distributed ledger technology for smart cities, the sharing economy, and social compliance,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 62 728–62 746, 2018.
- [25] S. Wang, Y. Yuan, X. Wang, J. Li, and R. Qin, “An overview of smart contract: Architecture, applications, and future trends,” in *Conference: 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, June 2018, pp. 108–113.
- [26] P. Yuan, X. Xiong, L. Lei, and K. Zheng, “Design and implementation on hyperledger-based emission trading system,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 6109–



6116, 2019.

- [27] L. Baird, “The swirlds hashgraph consensus algorithm: Fair fast byzantine fault tolerance,” *Swirlds Tech Report SWIRLDS TR2016-01*.

