

Mercado de Espectro com IOTA

Jonas V. Moreira¹, Antônio M. Alberti¹

¹ICT Lab – Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL)
Santa Rita do Sapucaí – MG – Brasil

jonas.vbm@gmail.com, alberti@inatel.br

Abstract. *This article introduces a new Electromagnetic Spectrum Market architecture with the IOTA crypto asset, aiming to share licensed and unlicensed spectrum. Through temporary sales of licensed spectrum transmission rights, primary users are remunerated with IOTAs for leasing their transmission rights to secondary users. IoT devices equipped with sensing capabilities scan a given geographic space to feed the market database with unlicensed spectrum transmission opportunities, remunerating their owners for the verifications. Experimental results show that the architecture is feasible, given that the spectrum negotiation time was on average equal to 181 milliseconds, and the spectrum occupation verification time, performed by IoT devices, was between 5 and 34 seconds, depending on the amount of sensors involved in the operation.*

Resumo. *Este artigo introduz uma nova arquitetura de Mercado de Espectro Eletromagnético com o criptoativo IOTA, visando compartilhamento de espectro licenciado e não licenciado. Por meio de vendas temporárias de direito de transmissão de espectro licenciado, usuários primários são remunerados com IOTAs pelo aluguel de seus direitos de transmissão à usuários secundários. Dispositivos IoT dotados com capacidade de sensoriamento varrem um determinado espaço geográfico, para alimentar o banco de dados do mercado com oportunidades de transmissão de espectro não licenciado, remunerando seus proprietários pelas verificações. Resultados experimentais mostram que a arquitetura é factível, dado que o tempo de negociação de espectro foi em média igual a 181 milissegundos, e o tempo de verificação de ocupação do espectro, feito pelos dispositivos IoT, ficou entre 5 e 34 segundos, dependendo da quantidade de sensores envolvidos na operação.*

1. Introdução

A escassez de faixas de espectro de radiofrequência (RF) livres é um problema notório. Impacta tanto na implantação de novas redes de comunicação, quanto na manutenção das redes já existentes. Este problema existe porque as faixas de espectro seguem uma política de alocação fixa, onde os usuários tem os direitos de transmissão de uma determinada faixa de espectro garantidos por legislação. Com a chegada do 5G, e a implantação massiva de dispositivos IoT, este problema tende a se agravar, pois a quantidade de equipamentos realizando trocas de informação tende a crescer exponencialmente.

Propostas para resolver este problema são pautas de pesquisas que abordam Rádios Cognitivos [Zhang et al. 2017]. Um exemplo é a linha de estudos que envolve

Dynamic Spectrum Access (DSA), onde *Primary Users* (PU), indivíduos com direito legal a certas faixas de espectro de RF, e *Secondary Users* (SU), usuários que procuram por oportunidades de transmissão, mas não tem faixas de frequência licenciada, podem compartilhar faixas de transmissão, oportunisticamente. Outras linhas de pesquisa investigam o compartilhamento de espectro através de outros tipos de tecnologia. Por exemplo: implantação de arquiteturas que utilizam computação em nuvem para prover compartilhamento *as-a-service* [Chen et al. 2019]; Contratos Inteligentes [Bayhan et al. 2018], [Bayhan et al. 2019]; Blockchain [Weiss et al. 2019] e outras *Distributed Ledger Technologies* (DLT) [Ariyaratna et al. 2019], [T. Maksymyuk and Jo 2019].

Este artigo investiga a viabilidade de uma nova arquitetura para compartilhamento de espectro que funcione como um mercado, onde um SU que não tenha faixa de frequência para transmitir, possa comprar direitos temporários de transmissão de um PU, ou aproveitar as oportunidades de transmissão de espectro não licenciadas, identificadas por dispositivos IoT com capacidade de sensoriamento espectral [Guimarães et al. 2021], sem utilizar Rádios Cognitivos. Detentores de direitos de transmissão e dispositivos de IoT, envolvidos em atividades de sensoriamento serão remunerados pela alocação do espectro ocioso, onde os pagamentos são feitos com *Miotas* (milhões de IOTAs) e registrados na rede *Tangle*, da IOTA [Wang et al. 2020], [Pervez et al. 2018].

Para tanto, este artigo está estruturado da seguinte maneira: na Seção 2 são apresentados os trabalhos relacionados. Na Seção 3 são apresentados os atores e componentes-chaves para atacar o problema de micropagamentos por direito de uso de espectro de RF. Na Seção 4 são apresentados os motivos de IOTA ter sido a DLT escolhida como ambiente e moeda do sistema. Na Seção 5 a arquitetura da solução proposta é apresentada. Na Seção 6 é apresentada a prova de conceito desenvolvida para esse artigo, e na Seção 7 os casos de uso criados para validar seu funcionamento. Na Seção 8 é apresentada a análise dos resultados experimentais obtidos, e na Seção 9 é feita a conclusão do trabalho.

2. Trabalhos Relacionados

O uso de Blockchain em mecanismos de compartilhamento de espectro foi explorado de forma teórica pelos autores de [Weiss et al. 2019]. A ideia principal do artigo é explorar o uso de Blockchain para gerenciamento de espectro de rádio, com foco em aplicações para compartilhamento dinâmico de espectro. A solução foi desenvolvida para cobrir quatro maneiras diferentes de se compartilhar espectro: (i) Compartilhamento Cooperativo Primário, no qual os usuários precisam encontrar e aproveitar uma oportunidade de transmissão tão logo ela ocorra; (ii) Compartilhamento Cooperativo Secundário, que funciona como (i), porém com uma maior variedade de transações de espectro (oferta ou arrendamento de espectro), devido a um ambiente secundário de compartilhamento cooperativo. (iii) Compartilhamento Secundário Não Cooperativo, em que o compartilhamento é oportunista e auxiliado 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 ideia de implementar o compartilhamento de espectro *as-a-service* é apresentada em [Chen et al. 2019], em um trabalho chamado *Full-Spectrum Blockchain-as-a-Service* (FSBaaS). Para isso, duas blockchains diferentes são utilizadas, uma centralizada e uma descentralizada, com o objetivo de aproveitar as melhores características de cada

uma delas. As duas blockchains compartilham o mesmo *Business Network Manager*, que analisa e gerencia toda a rede, e um executor de contrato inteligente, que é responsável pela execução da lógica de negócios. Os clientes acessam informações da rede como status do nó, hashes de bloco e dados de transação por meio de APIs RESTful. Os autores avaliaram o FSBaaS em um ambiente simulado. No experimento, as blockchains centralizadas e descentralizadas implementam os mesmos requisitos de negócios, a fim de simular uma rede de leilões de carros. Um proprietário de carro coloca seu veículo na rede e cria um anúncio de leilão. O comprador invoca uma lista de veículos, e faz um lance. No final, o proprietário transfere o veículo associado ao usuário que fez o lance mais alto. 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 em blockchains centralizadas e descentralizadas, apresentando um tempo de provisionamento de recursos entre 2 e 91 segundos.

A ideia de usar contratos inteligentes para oferecer sensoriamento de espectro *as-a-service*, denominado pelos autores como Spass, é explorada em [Bayhan et al. 2018] e [Bayhan et al. 2019]. 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 funciona 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. 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. O tempo de execução varia porque o contrato roda na rede Ethereum. Na época da pesquisa, segundo o autor, o tempo mínimo estava em torno de 30 minutos.

O compartilhamento de espectro por meio de Blockchain também é explorado em [Ariyaratna et al. 2019]. Este trabalho introduz um novo token digital chamado *Spectral Token*. Ele é empregado para validar e rastrear o uso da banda de frequência 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 frequência pagando à autoridade (por exemplo, FCC). Cada banda de frequência é codificada como um *Spectral Token*. Um usuário primário, que possui uma banda de frequência, 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 frequência livres. Os autores desenvolveram uma solução de prova de conceito (PoC) usando bandas 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 CBRS, IEEE 802.22 WRAN e Small-Cell as a Service. Para um minerador na rede, a latência foi de 3476.98 ms, e para cinco mineradores, a latência foi 1881.13 ms.

Em [T. Maksymyuk and Jo 2019] é proposta uma nova arquitetura de rede que explora o uso de criptomoedas e contratos inteligentes para compartilhamento de espec-

tro. 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 móveis em redes móveis LTE modernas. Cada operador utiliza o espectro não licenciado gastando tokens de sua conta. Uma vez que os tokens são gastos, eles são compartilhados igualmente entre todos os outros operadores participantes, através de 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 com sem tokens em sua conta, perdendo temporariamente o acesso à plataforma, evitando assim um comportamento ganancioso.

3. Problemática e Pontos de Partida

O objetivo desta pesquisa é construir um ecossistema onde um PU possa ser remunerado por ceder uso de espectro de RF mediante uma etiqueta de uso compartilhado, alocando temporariamente seu espectro ocioso para um SU que deseja transmitir, mas que não tem os direitos de transmissão licenciados. Para evitar problemas de interferência, dispositivos de IoT de baixo custo, providos com capacidade de sensoriamento de RF [Guimarães et al. 2021], podem sensorar o meio e alimentar um banco de dados do mercado de espectro com oportunidades de transmissão de espectro não licenciado detectadas.

Partindo destas duas premissas é possível separar os atores de um mercado de espectro em dois grupos: atores externos e atores internos. Os atores externos são usuários compradores e/ou vendedores de espectro; representantes de entidades reguladoras (ex. Anatel); auditores e dispositivos de IoT. Atores internos são os componentes que o sistema precisa implementar para que tal mercado funcione apropriadamente. Sendo assim, é necessário definir quais componentes internos o sistema deve possuir para resolver o problema de uso compartilhado de espectro de RF e mercado de compra e venda digital. Como se trata de uma arquitetura baseada em atores com funções específicas, ela pode ser definida com os princípios da *Service Oriented Architecture* (SOA). A Tabela 1 apresenta a lista de componentes internos necessários para uma solução ao problema proposto e suas respectivas funcionalidades.

4. IOTA

Para realizar uma operação em Blockchain [Nakamoto 2008], é preciso validar o novo bloco gerado durante um período de transações. A validação é realizada por mineradores, e o trabalho não sai de graça. Uma taxa deve ser oferecida aos mineradores, que podem escolher quais transações minerar em um bloco. Isto faz com que as transações tenham custo e possam levar horas para serem concluídas.

IOTA não utiliza a tecnologia Blockchain para armazenar suas transações, nem mineradores. No lugar disso, foi desenvolvida uma tecnologia chamada *Tangle* [Popov 2018], que em resumo também é um livro de registros, mas que armazena as

Tabela 1. Atores internos necessários a uma possível solução ao problema de mercado de espectro de RF.

Serviço	Funcionalidade
Serviço de Sensores	Serviço básico que armazena a identidade dos dispositivos de IoT, provendo funcionalidades básicas de gerenciamento (CRUD) e comunicação do sistema com a rede de dispositivos IoT.
Serviço de Espectro	Serviço básico que provê a operação mais fundamental do mercado - compra e venda de direitos de transmissão em espectro. Interage com uma <i>Distributed Ledger Technology</i> (DLT) [Panwar and Bhatnagar 2020] para registrar negociações e realizar pagamentos.
Serviço de Identidade	Serviço que armazena as identidades dos atores externos do sistema e provê funcionalidades básicas de gerenciamento (CRUD).
Serviço de Auditoria	Serviço que registra todas as atividades executadas no mercado, para auditoria.
Serviço de Mercado	Serviço que implementa as regras de negócio do mercado. Faz a orquestração de todos os serviços para que as funcionalidades do mercado estejam disponíveis para os usuários.

informações em um *Directed Acyclic Graph* (DAG) [Popov 2018]. Na tecnologia *Tangle*, para que uma nova transação seja validada, ela precisa validar duas transações anteriores e inseri-las na rede sem que haja conflito. Isto faz com que a validação das transações seja feita em menor tempo. Em *Tangle*, quanto mais transações, mais validações. Em Blockchain quanto mais transações, maior vai ficando a cadeia de blocos, e mais disputado o trabalho dos mineradores. Isso faz com que conceitualmente *Tangle* seja mais eficaz que Blockchain.

Para a arquitetura proposta nesse artigo, a velocidade da transação é um fator importantíssimo, porque o usuário que precisa de uma faixa de espectro de RF para transmitir, não pode ficar esperando muito tempo 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 a *Tangle* para armazenar informações para o sistema, como por exemplo, o registro de verificação de ocupação de espectro realizado pelos dispositivos IoT. Portanto, IOTA é a DLT e moeda escolhida como forma de pagamento nas transações desse Mercado de Espectro de RF que estamos propondo.

5. Proposta de Arquitetura

A Figura 1 ilustra como os componentes da solução podem ser organizados para alcançar as operações previstas para o Mercado de Espectro de RF. Internamente, o Mercado de Espectro é uma composição de serviços. Estes serviços não são verticalizados, ou seja, eles não funcionam sequencialmente. Cada um deles provê operações específicas e independentes, orquestradas pelo Serviço de Mercado, que implementa as regras de negócio do sistema. Contudo, os serviços também interagem entre si. O Serviço de Auditoria provê um sistema de registro de ações para todos os outros serviços da proposta. Todas as ações realizadas no Mercado de Espectro são registradas na base de dados deste serviço.

O Serviço de Identidade interage com uma rede baseada em DLT, pois além de manter as informações básicas dos usuários, também é responsável pelo registro e manutenção de informações da carteira para compra e venda de bandas de RF. Já o Serviço de Sensores utiliza o Serviço de Identidade, pois os dispositivos IoT são vinculados à um usuário do sistema proposto. Ele utiliza o Serviço de Espectro para enviar medidas de ocupação, e oportunidades de transmissão de espectro não licenciado. Por fim, o serviço de sensores utiliza a rede DLT para realizar os pagamentos das medições aos proprietários dos dispositivos de IoT.

Por fim, o Serviço de Mercado interage com todos os serviços, pois é o responsável

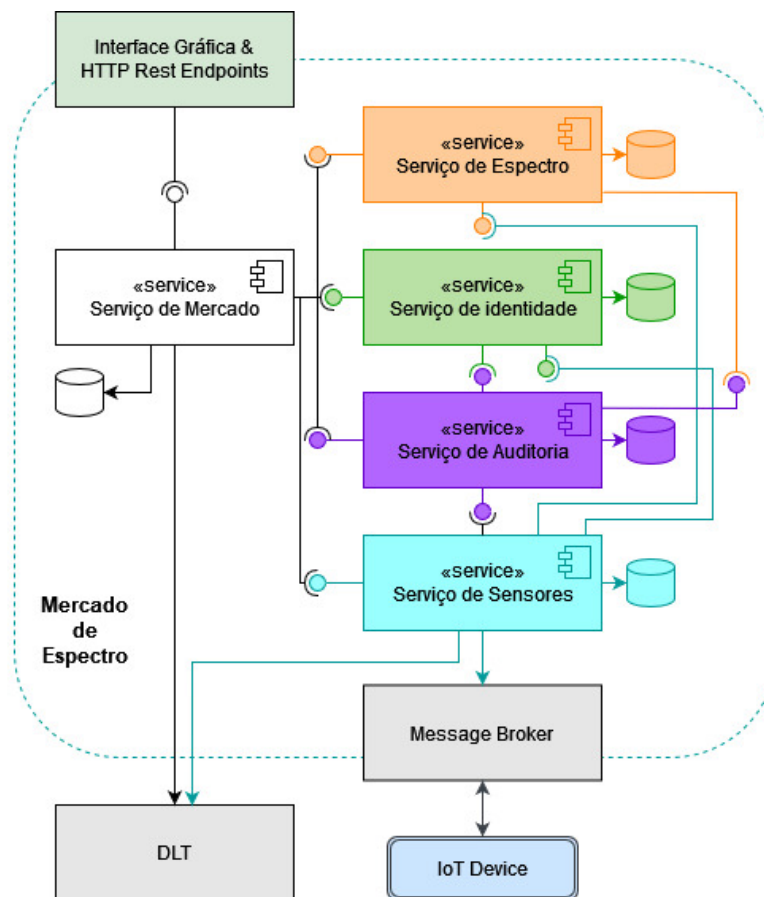


Figura 1. Arquitetura do Mercado de Espectro de RF.

por implementar as regras de negócio do Mercado de Espectro. Além disso, utiliza a rede DLT para realizar os micropagamentos pelas negociações de espectro. Os usuários interagem com o mercado através de Interface Gráfica, e dispositivos IoT interagem com o mercado através de trocas de mensagens utilizando um serviço de mensageria, que por sua vez são tratadas no Serviço de Sensores.

6. Prova de Conceito

Para validar o funcionamento da arquitetura proposta neste trabalho, uma *Proof of Concept* (PoC) foi criada, sob a forma de um projeto de *Minimum Viable Product* (MVP). No MPV, todos os serviços que fazem parte do mercado foram implementados na linguagem de programação Java, utilizando a tecnologia Java Spring Boot. Cada serviço possui seu próprio banco de dados, e disponibiliza através de operações HTTP Rest, suas funcionalidades aos usuários e outros serviços do sistema. Para consumir os serviços e disponibilizá-los de forma interativa aos usuários, uma interface gráfica foi desenvolvida utilizando as linguagens HTML, CSS e Javascript, acessível através de navegador *web*. A troca de mensagens entre os dispositivos IoT e o Serviço de Sensores (Message Broker) é intermediada pelo servidor de mensageria Rabbit MQ, através da troca de mensagens JSON.

A DLT escolhida para o projeto foi a IOTA, onde os argumentos que levaram a sua escolha foram apresentados na Seção 4 deste artigo. Os pagamentos das negociações e

medições de ocupação em tempo real, utilizam a biblioteca Java Iota API, disponibilizada pela IOTA Foundation. Para registrar as transações foi utilizada a rede oficial de desenvolvimento da IOTA, a IOTA Devnet, também disponibilizada pela IOTA Foundation.

7. Casos de Uso

Para testar o desempenho da PoC, o Mercado de Espectro foi preparado para simular dois casos de uso (além das operações básicas necessárias para se chegar até eles). No primeiro caso de uso (TC1), um SU faz uma compra de espectro licenciado de um PU, acessando através de interface gráfica, uma lista com ofertas de espectro fornecidas pelo Serviço de Espectro. Quando o SU efetua a compra, o Serviço de Mercado busca suas informações no Serviço de Identidade, a fim de pegar o endereço de sua carteira e verificar se seu saldo é suficiente para a realizar a compra. Se o SU não tiver saldo, a compra é rejeitada, mas se tiver saldo suficiente, o Serviço de Mercado busca as informações do PU no Serviço de Identidade, e finaliza a compra. No final do fluxo, a compra é registrada no serviço de auditoria, o pagamento é realizado, e o resultado da transação é apresentado ao usuário. A Figura 2 apresenta um diagrama que ilustra esta sequência.

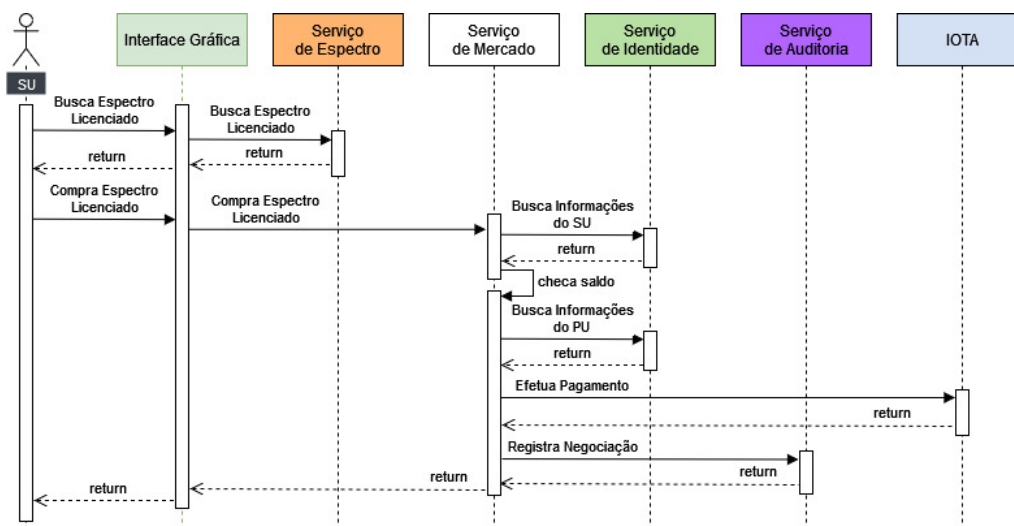


Figura 2. Diagram de Sequência TC1 - Compra de Espectro de RF Licenciado.

No segundo caso de uso (TC2) um SU faz uma compra de espectro não licenciado. Para a sua realização foi necessário desenvolver um simulador de dispositivo IoT, para responder à chamada de execução de verificação de ocupação, com um valor aleatório que representa espectro ocupado ou livre. O fluxo de funcionamento do TC2 é semelhante ao TC1, mas como não se tem certeza que um espectro de RF não licenciado está realmente livre, o comprador realiza uma verificação de ocupação desta faixa de espectro antes de efetivar a compra.

Para realizar a verificação de ocupação, o SU seleciona quantos e quais dispositivos IoT deseja utilizar, sendo esta lista fornecida pelo Serviço de Sensores. Ao iniciar o processo, o Serviço de Sensores busca as informações do SU no Serviço de Identidade, e verifica se tem saldo suficiente para realizar a verificação. Se o SU não tiver saldo, a operação é cancelada, mas se o SU tiver saldo, o Serviço de Sensores envia uma mensagem aos dispositivos selecionados, através do serviço de mensageria Rabbit MQ.

O simulador de dispositivos IoT vai receber as mensagens, e responder com o resultado da verificações, também utilizando o Rabbit MQ. O Serviço de Sensores, ao receber as respostas dos IoTs, remunera os proprietários dos dispositivos, registra o resultado das verificações na rede IOTA e no Serviço de Auditoria, e então apresenta o resultado ao usuário, que pode finalizar a compra ou não, de acordo com a ocupação do espectro. Se o SU optar por não finalizar a compra, o TC2 é finalizado. Se optar por efetivar a compra, o fluxo segue a mesma sequência do TC1. A Figura 3 apresenta o diagrama de sequência da verificação de ocupação de espectro de RF não licenciado.

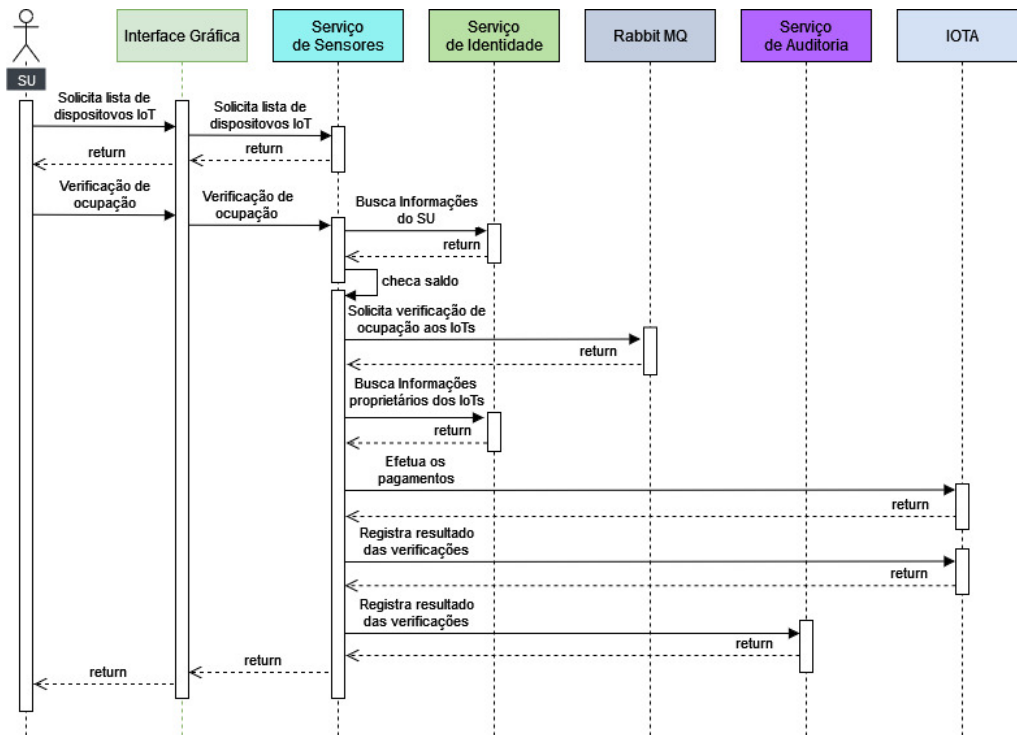


Figura 3. Diagram de Sequência TC2 - Verificação de ocupação de espectro de RF não licenciado.

8. Análise de Funcionamento

Para analisar o desempenho da PoC, todos os serviços e a interface gráfica do Mercado de Espectro foram hospedados em um servidor Apache Tomcat 9.0, instalados em uma máquina Windows 10, com CPU Core I7 2.3 GHZ e 8GB de memória RAM. Um servidor RabbitMQ Broker foi instalado na mesma máquina (versão 3.9.8 com Erlang 24.1.4), com configurações padrão. As transações de espectro e medições de ocupação em tempo real foram registradas na rede IOTA Devnet, através de requisições HTTPS realizadas no *host* nodes.devnet.iota.org, na porta 443.

As evidências de funcionamento foram coletadas através da ferramenta Console, do Eclipse; e da ferramenta Monitorador de Rede, nativamente disponível no modo de desenvolvedor do navegador Mozilla Firefox. No TC1, onde um usuário efetua uma compra de espectro licenciado, o teste foi executado com um tempo total de 325 milissegundos. A Figura 4, coletada do Monitorador de Rede, apresenta em detalhes todas as atividades de rede executadas desde o momento em que o usuário inicia a compra, até ela ser concretizada. A Figura 5, coletada da ferramenta Console do Eclipse, apresenta as evidências

Durante as simulações dos casos de teste TC2, que utilizam os simuladores de IoT, foi observado um *delay* de sistema durante a ativação do simulador. Este atraso é aleatório, e acontece durante o início de sua ativação, independente da quantidade de sensores simulados, que impacta nos resultados da verificação de ocupação.

9. Conclusão

Este artigo introduz uma nova arquitetura para compartilhamento de espectro, através do Mercado de Espectro de RF com IOTA. Os resultados apresentados comprovam que a proposta é válida, uma vez que o tempo total para se realizar uma transação de espectro (licenciado e não licenciado), e registrá-la na rede *Tangle* da IOTA levou entre 104 a 325 milissegundos, com tempo médio de 181 milissegundos. Consideramos esse valor adequados para uma solução ao problema levantado.

Verificações de ocupação de espectro (utilizadas na negociação de espectro não licenciado) foram realizadas por simuladores de dispositivos de IoT, levando entre 5 a 34 segundos para responderem a uma requisição, onde o tempo aumenta conforme a quantidade de sensores envolvidos no processo.

10. Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP, com recursos do MCTIC, processo No 01245.010604/2020-14, sob o projeto Sistemas de Comunicações Móveis de 6ª Geração (6G) do Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, Brasil. Os autores também agradecem ao CNPq e FAPEMIG.

Referências

- Ariyaratna, T., Harankahadeniya, P., Isthikar, S., Pathirana, N., Bandara, H. M. N. D., and Madanayake, A. (2019). Dynamic spectrum access via smart contracts on blockchain. In *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6.
- Bayhan, S., Zubow, A., Gawlowicz, P., and Wolisz, A. (2019). Smart contracts for spectrum sensing as a service. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, PP:1–1.
- Bayhan, S., Zubow, A., and Wolisz, A. (2018). Spass: Spectrum sensing as a service via smart contracts. In *IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages 648 – 660.
- Chen, Y., Gu, J., Chen, S., Huang, S., and Wang, X. S. (2019). A full-spectrum blockchain-as-a-service for business collaboration. In *2019 IEEE International Conference on Web Services (ICWS)*, pages 219–223.
- Guimarães, D. A., Pereira, E. J. T., Alberti, A. M., and Moreira, J. V. (2021). Design guidelines for database-driven internet of things-enabled dynamic spectrum access. *Sensors*, 21(9).
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. *The Cryptography Mailing*.

- Panwar, A. and Bhatnagar, V. (2020). Distributed ledger technology (dlt): The beginning of a technological revolution for blockchain. In *2nd International Conference on Data, Engineering and Applications (IDEA)*, pages 1–5.
- Pervez, H., Muneeb, M., Irfan, M. U., and Haq, I. U. (2018). A comparative analysis of dag-based blockchain architectures. In *2018 12th International Conference on Open Source Systems and Technologies (ICOSST)*, pages 27–34.
- Popov, S. (2018). The tangle. *IOTA Foundation*.
- T. Maksymyuk, J. Gazda, L. H. and Jo, M. (2019). Blockchain-based intelligent network management for 5g and beyond. In *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, pages 36–39.
- Wang, T., Wang, Q., Shen, Z., Jia, Z., and Shao, Z. (2020). Understanding intrinsic characteristics and system implications of dag-based blockchain. In *2020 IEEE International Conference on Embedded Software and Systems (ICCESS)*, pages 1–6.
- Weiss, M. B. H., Werbach, K., Sicker, D. C., and Bastidas, C. E. C. (2019). On the application of blockchains to spectrum management. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 5(2):193–205.
- Zhang, L., Xiao, M., Wu, G., Alam, M., Liang, Y.-C., and Li, S. (2017). A survey of advanced techniques for spectrum sharing in 5g networks. *IEEE Wireless Communications*, 24(5):44–51.