

D-MTS: Um Sistema Baseado em *Blockchain* para Compartilhamento Eficiente e Transparente de Infraestrutura de Redes de Telecomunicações

Jeffson Celeiro Sousa^{1,2}, Alan, Veloso², Bruno Evaristo¹
Vinicius Duarte^{1,2}, Mauricio Pinto¹, Antônio Abelem²

¹ Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD)
Campinas – SP – Brasil

²Universidade Federal do Pará (UFPA)
Belém – PA – Brasil

{jcsousa, elderb, viniciusd, mauriciop}@cpqd.com.br,
{aveloso, abelem}@ufpa.br

Resumo. A tecnologia *blockchain* tem se consolidado como uma alternativa descentralizada para garantir segurança, transparência e confiabilidade em processos digitais, impactando diretamente setores estratégicos como o de telecomunicações. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um marketplace descentralizado para compartilhamento de infraestrutura e serviços de telecom, baseado na plataforma Hyperledger Besu. A solução visa otimizar o uso de ativos físicos, como torres, enlaces e redes de acesso, promovendo eficiência operacional e sustentabilidade no setor. Por meio de contratos inteligentes, identidade digital descentralizada e tokenização de ativos, a plataforma automatiza negociações e faturamento, contribuindo para a criação de um ecossistema mais interoperável, auditável e seguro.

Abstract. Blockchain technology has emerged as a decentralized alternative to ensure security, transparency, and trust in digital processes, directly impacting strategic sectors such as telecommunications. This work proposes the development of a decentralized marketplace for the sharing of infrastructure and telecom services, built on the Hyperledger Besu platform. The solution aims to optimize the use of physical assets—such as towers, links, and access networks—promoting operational efficiency and sustainability in the sector. Through smart contracts, decentralized digital identity, and asset tokenization, the platform automates negotiation and billing processes, contributing to the creation of a more interoperable, auditable, and secure ecosystem.

1. Introdução

A blockchain é a mais proeminente implementação de tecnologia de livro de registro distribuído (*Distributed Ledger Technology* ou DLT), utilizando princípios criptográficos e algoritmos avançados para armazenar, trocar e sincronizar dados de forma imutável em uma rede descentralizada. As DLTs possibilitam que os nós em uma rede distribuída alcancem um consenso e registrem dados sem depender de uma autoridade central. Cada bloco de dados é criptograficamente vinculado e protegido contra adulteração e revisão.

Essa estrutura garante a integridade dos dados registrados, oferecendo segurança e confiabilidade aos participantes da rede, uma vez que qualquer tentativa de alteração exigiria a modificação de todos os blocos subsequentes na cadeia, tornando o sistema altamente resistente a manipulações [ITU-T 2019].

A evolução da Blockchain começou com as criptomoedas em 2008, quando Satoshi Nakamoto propôs a criptomoeda Bitcoin como um livro-razão descentralizado, frequentemente denotado como especificação Blockchain 1.0. Mais tarde, na Blockchain 2.0, os contratos inteligentes (*Smart Contracts* ou SC) foram projetados para automatizar os fluxos transacionais entre pares por meio de regras definidas e especificações de configurações de contrato [Saraswat et al. 2022].

A Blockchain 3.0 surgiu com o design de vários aplicativos descentralizados e a adoção da tecnologia para diferentes setores. Nesse momento, a mudança para a Indústria 4.0 permitiu a comunicação orientada por sensores e, portanto, as aplicações de *big data* ganharam atenção. Com a geração e ingestão massiva de dados, os requisitos de segurança e privacidade tornaram-se primordiais [Saraswat et al. 2022]. A mudança da indústria em direção a soluções em blockchain é suportada não apenas pelas vantagens inerentes da tecnologia em segurança, validação e transparência, mas também por plataformas como o Hyperledger Besu que oferecem soluções sob medida para o setor financeiro e permitem o desenvolvimento de aplicações financeiras sofisticadas [Shahrukh et al. 2023].

Este trabalho propõe um modelo inovador de marketplace descentralizado para telecomunicações baseado em blockchain. Utilizando a plataforma Hyperledger Besu, o sistema oferece interoperabilidade, escalabilidade e controle de acesso, enquanto contratos inteligentes automatizam processos operacionais, promovendo segurança, eficiência e redução de custos. A proposta visa resolver desafios estruturais do setor, como fragmentação e subutilização de infraestrutura, ao mesmo tempo em que fomenta a inovação e a entrega de serviços de forma resiliente e adaptável.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados à proposta. A Seção 3 apresenta a descrição da proposta. A Seção 4 apresenta um estudo de caso da proposta. E, por fim, a Seção 5 apresenta a conclusão e trabalhos futuros acerca deste estudo.

2. Trabalhos Relacionados

Em termos de um marketplace para compartilhar, comprar ou vender ativos entre provedores de serviços, destaca-se a iniciativa Catalyst do TMForum.¹ Essa proposta visa uma infraestrutura de auditoria descentralizada para criar casos de uso ágeis e sob demanda. No entanto, embora apresente uma arquitetura promissora, o trabalho carece de implementação prática ou validação da solução proposta, limitando sua aplicabilidade imediata no contexto real.

Na direção da virtualização de infraestrutura e negociação automatizada de espectro, [Maksymyuk et al. 2020] propõem o uso de blockchain em redes móveis 6G para facilitar acordos financeiros entre reguladores de espectro, operadoras móveis (MNOs) e usuários finais. O modelo propõe uma estratégia de comércio de espectro semipersistente, permitindo a aquisição temporária de licenças através de contratos inteligentes e cripto-

¹<https://www.tmforum.org/blockchain-based-telecom-infrastructure-marketplace/>

moedas. O processo é mediado por transações blockchain que atualizam livros-razão distintos para espectro e MNOs, evitando conflitos de alocação.

No contexto de redes de acesso abertas, [Giupponi e Wilhelmi 2022] propõem uma arquitetura O-RAN aprimorada com blockchain para o compartilhamento automático e dinâmico de recursos RAN. A solução inclui integração com sistemas de suporte a negócios (BSS), mecanismos de controle de admissão no SMO, além de um marketplace operado por terceiros para publicação de infraestrutura disponível, utilizando contratos inteligentes para gerenciar os anúncios e as transações.

Explorando a complexidade de múltiplos domínios administrativos, os autores em [Javed e Manges-Bafalluy 2022] apresentam uma arquitetura baseada em blockchain para redes 6G, focando em desafios como registro, oferta de serviços, descoberta, monitoramento de SLA, pagamento e faturamento. A proposta utiliza tecnologias como IOTA Tangle e IPFS para reduzir custos de transação e armazenamento, além de Chainlink para integrar dados off-chain. O modelo combina Ethereum como base segura e descentralizada com transações de baixo custo via IOTA, promovendo um ambiente eficiente para transações de rede.

Uma abordagem inovadora ao fatiamento de redes é proposta pelos autores em [Bandara et al. 2022], com o sistema "Kaputa". Trata-se de um corretor dinâmico que utiliza blockchain e tokens não fungíveis (NFTs) para facilitar a comercialização de fatias de redes 5G. Os recursos — provenientes de operadores de RAN, nuvem e redes de transporte — são orquestrados por contratos inteligentes, convertendo as fatias em NFTs transacionáveis. O sistema é baseado no blockchain Moose, com um modelo NFT (k528) especialmente desenvolvido para representar fatias de rede de forma extensível.

A proposta de [Fernández-Fernández et al. 2023] avança no conceito de mercado descentralizado ao propor uma arquitetura baseada em DLT e contratos inteligentes voltada para a aquisição automatizada de recursos como nuvem, edge, espectro e slices. O modelo contempla uma rede de catálogos de ofertas, com atributos comuns e específicos para diferentes tipos de recursos, baseado em dados reais e seguindo padrões do TMForum. Essa estrutura enfatiza a automação, interoperabilidade e distribuição de ofertas em um ambiente colaborativo.

Com foco na alocação eficiente de recursos, [Afraz e Ruffini 2019] propõem um mecanismo de leilão duplo implementado via Hyperledger Fabric, permitindo a negociação de recursos sem uma autoridade central. O estudo descreve detalhadamente as fases de submissão, pareamento de ofertas e ordenação das transações em blocos, destacando a honestidade como um dos pilares do modelo distribuído.

A continuidade desse trabalho é apresentada por [Afraz e Ruffini 2020], que desenvolvem uma arquitetura distribuída para intermediação de fatias de rede 5G. Utilizando blockchain e leilão duplo como contrato inteligente, o estudo analisa métricas como latência e throughput em uma rede prática baseada em máquinas virtuais, evidenciando os desafios técnicos e o desempenho da rede blockchain em contextos de telecomunicações.

Por fim, [Afraz et al. 2023] introduzem um modelo de leilão inspirado na estratégia de Vickrey, em que o segundo maior lance é selecionado como vencedor, promovendo veracidade nas ofertas. O sistema, distribuído por meio de Hyperledger Fabric, implementa um mecanismo bilateral para negociar fatias de rede entre locatários e pro-

vedores. Cada nó executa uma instância do contrato inteligente, assegurando a execução descentralizada das transações sem intermediários centrais.

Trabalho	Marketplace Descentralizado	Blockchain / DLT	Smart Contract	Suporte à Tokenização	Sistema de Billing B2B/B2C	Identidade Digital Descentralizada
[Maksymyuk et al. 2020]	X	✓	✓	✓	X	X
[Giupponi e Wilhelmi 2022]	✓	✓	✓	X	X	X
[Fernández-Fernández et al. 2023]	✓	✓	✓	X	X	X
[Bandara et al. 2022]	✓	✓	✓	✓	X	✓
[Javed e Mangues-Bafalluy 2022]	✓	✓	✓	X	X	X
[Afraz e Ruffini 2019]	✓	✓	✓	X	X	X
[Afraz e Ruffini 2020]	✓	✓	✓	X	X	X
[Afraz et al. 2023]	✓	✓	✓	X	✓	X
Proposta	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabela 1. Comparativo das Soluções de *Blockchain* aplicadas a Marketplaces de Telecomunicações.

Diferentemente das abordagens previamente analisadas, este trabalho propõe uma arquitetura de marketplace descentralizado voltada ao compartilhamento inteligente de infraestrutura de telecomunicações, integrando fornecedores de serviços (FS) e de ativos (FA) em um ambiente unificado de negociação B2B e B2C. A proposta promove a governança digital do ecossistema por meio da automatização de contratos, rastreabilidade de ativos físicos via tokenização e uso de identidades descentralizadas (DID) para controle de participação e reputação.

Além disso, incorpora mecanismos off-chain para armazenamento de metadados e contratos inteligentes para orquestração de pagamentos, faturamento e liquidação de serviços. Essa abordagem modular e extensível contribui para a sustentabilidade do setor, ao permitir o reaproveitamento de recursos subutilizados e reduzir a necessidade de novas infraestruturas físicas. Em comparação com os trabalhos anteriores, destaca-se pelo alinhamento a padrões abertos, interoperabilidade entre participantes e suporte a modelos flexíveis de monetização de ativos, conforme sintetizado na Tabela 1.

3. Proposta de Mercado Descentralizado

Nesta seção, apresentamos a arquitetura *D-MTS (Decentralized Marketplace for Telecommunication Services)* para um *marketplace* de telecomunicações. A plataforma disponibiliza um catálogo de serviços e ativos de telecomunicações e integra funcionalidades para facilitar a escolha e contratação de serviços de infraestrutura de redes. Incorpora, ainda, um sistema de faturamento baseado em *blockchain*, assegurando transparência e segurança nas transações. Este componente permite aos usuários visualizar e simular a performance de redes 5G e 6G, apoiando decisões sobre quais serviços ou ativos contratar com base em simulações realistas de desempenho de rede.

A arquitetura propõe um *marketplace* descentralizado de serviços e ativos de telecomunicações, conforme ilustrado na Figura 1. O objetivo é permitir que fornecedores de ativos (FAs) e fornecedores de serviços (FSs) possam ofertar seus recursos para contratação por clientes, tanto em modelos B2B quanto B2C, de forma segura, automatizada e auditável, utilizando tecnologia *blockchain* permissionada baseada no Hyperledger Besu.

3.1. Visão Geral da Arquitetura

A Figura 1 ilustra a plataforma D-MTS para a indústria de telecomunicações, conectando consumidores, fornecedores de serviços de rede móvel e provedores de ativos em um ecossistema integrado para negociação de serviços e ativos de telefonia móvel. O

marketplace atua como a plataforma para todas as interações, abrigando um catálogo diversificado que inclui serviços de telefonia móvel e ativos como torres, antenas, baterias, RANs, Core de Rede e faixas de espectro.

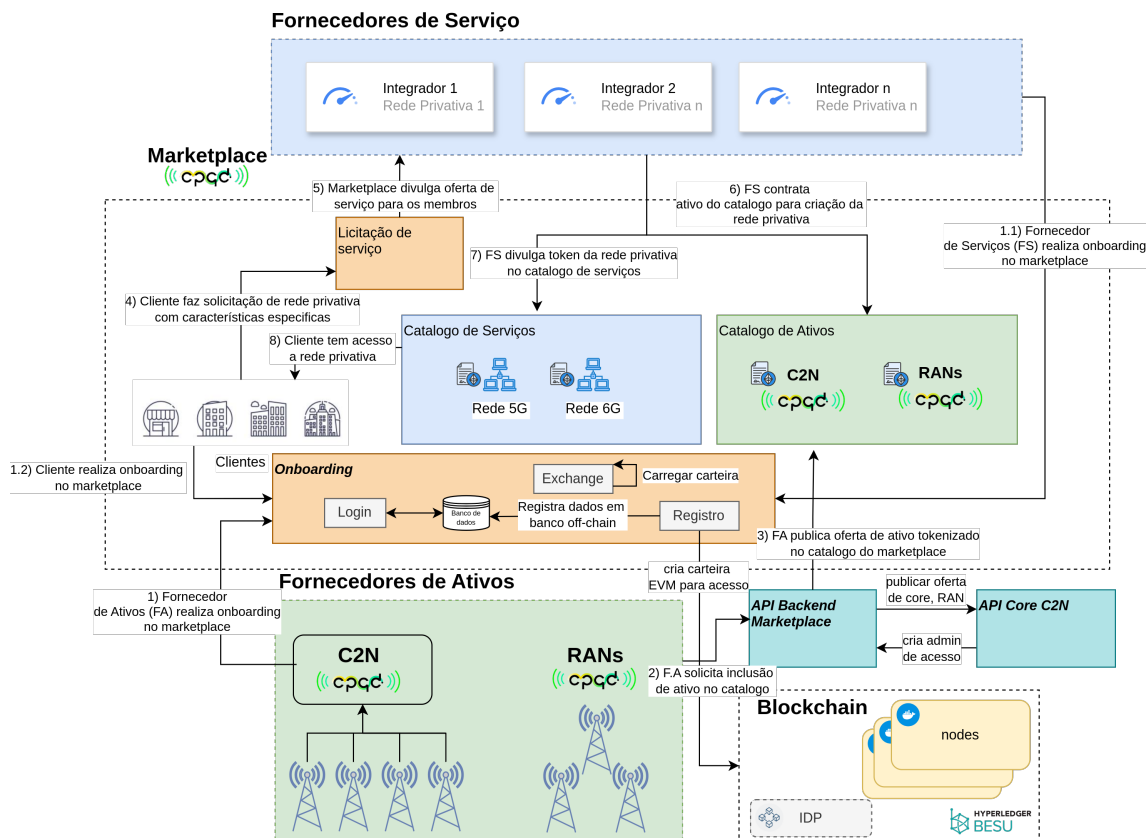


Figura 1. Arquitetura da Proposta.

A proposta contempla um ecossistema de comercialização composto por três tipos principais de participantes: (i) **Fornecedores de Ativos (FAs)**, responsáveis pela disponibilização de elementos de rede como C2N e RANs; (ii) **Fornecedores de Serviços (FSs)**, que orquestram e compõem serviços utilizando ativos disponibilizados no catálogo; e (iii) **Clientes**, que acessam o catálogo de serviços para contratação sob demanda, com foco em redes privadas.

O fluxo é composto por oito etapas principais, descritas a seguir:

- 1. Onboarding dos Participantes:** Inicialmente, FAs, FSs e clientes realizam seu cadastro no marketplace. Esse processo inclui a criação de carteiras EVM, carregamento de tokens e autenticação por meio de um provedor de identidade descentralizada (IDP). As informações de registro são armazenadas em banco off-chain, garantindo escalabilidade sem comprometer a integridade dos dados.
- 2. Inclusão de Ativos no Catálogo:** Após o onboarding, os FAs solicitam a inclusão de seus ativos no *Catálogo de Ativos* por meio das APIs *Backend Marketplace* e *Core C2N*. Os ativos incluem, por exemplo, unidades de rede RAN e elementos de core (C2N), que são tokenizados para posterior negociação.
- 3. Publicação de Ofertas de Ativos:** Uma vez validados, os ativos são publicados como ofertas tokenizadas no catálogo do marketplace, podendo ser contratados

por FSs para compor redes privadas e outros serviços de conectividade.

4. **Solicitação de Serviço pelo Cliente:** O cliente acessa o *Catálogo de Serviços*, visualiza ofertas como redes 5G e 6G, e realiza uma solicitação de rede privada com parâmetros específicos, como localização, banda, SLA e tempo de contratação.
5. **Licitação de Serviço:** O marketplace dissemina essa solicitação entre os FSs habilitados, promovendo um processo competitivo de licitação. Essa dinâmica pode ser implementada por meio de contratos inteligentes com lógica de leilão ou matching de requisitos.
6. **Contratação de Ativos pelo FS:** O FS vencedor da licitação seleciona e contrata os ativos necessários do catálogo para atender à demanda do cliente, iniciando a composição da rede privada.
7. **Tokenização da Rede Privativa:** Após a montagem da rede, o FS publica no *Catálogo de Serviços* um token representando a rede privada provisionada, o qual referencia os ativos utilizados e o SLA acordado com o cliente.
8. **Entrega do Serviço:** O cliente recebe acesso à rede privada contratada. O ciclo completo, desde o onboarding até a entrega, é auditado e validado na blockchain, garantindo transparência, segurança e rastreabilidade.

3.2. Componentes Técnicos

A arquitetura é suportada por diversos componentes fundamentais:

- **Catálogo de Ativos:** Contém elementos físicos tokenizados, como C2N e RANs, disponibilizados pelos FAs.
- **Catálogo de Serviços:** Lista ofertas compostas por FSs, como redes privadas 5G/6G, acessíveis por clientes.
- **Hyperledger Besu:** Rede blockchain permissionada usada para autenticação, contratos inteligentes e registro das transações.
- **Smart Contracts:** Automatizam a lógica de publicação, contratação, composição e liquidação de serviços.
- **APIs Backend Marketplace / Core C2N:** Interfaces RESTful que facilitam a integração de ativos e serviços ao catálogo.
- **IDP (Identity Provider):** Responsável pela gestão da identidade digital descentralizada dos participantes.

3.3. Camada de contrato inteligente

A plataforma proposta utiliza o *Hyperledger Besu* para integrar a *Ethereum Virtual Machine (EVM)* no *front-end*, empregando a biblioteca *Ethers.js* para o desenvolvimento de DApps personalizados. O processo inicia com a criação de um contrato inteligente em *Solidity*, seguido pelo seu carregamento e execução no EVM através do *Hyperledger Besu*. A aplicação *web front-end* interage com o contrato inteligente utilizando a biblioteca *Ethers.js*. Este método tem sido utilizado para desenvolver uma variedade de DApps na rede *Ethereum*, incluindo jogos, *exchanges* e mercados [Dannen 2017]. As principais funcionalidades foram organizadas em 5 contratos, representados na Tabela 2 cada um responsável por uma parte do ciclo de vida do serviço:

O conjunto de contratos inteligentes proposto compõe o núcleo da automação e governança do marketplace descentralizado. O fluxo inicia-se com o `Contract Registry`,

Algorithm 1 Fluxo Geral de Contratos Inteligentes do Marketplace

```

1: ContractRegistry
2: Definir enum Role { CLIENT, SERVICE_PROVIDER,
   ASSET_PROVIDER }
3: Mapear endereços para profiles[address] → Profile
4: function REGISTERPARTICIPANT(address, did, role)
5:   if não registrado then
6:     Criar perfil com papel e DID

7: AssetTokenContract
8: Herda de ERC721
9: function MINTASSET(owner, location, assetType)
10:   Criar novo token para ativo físico (C2N, RAN)
11:   Armazenar metadados no mapeamento
12: function MARKASUNAVAILABLE(tokenId)
13:   Atualiza disponibilidade do ativo

14: ProvisioningContract
15: Mapear usuários para CoreConfig: cores, UPFs, NMS, modelo de instalação
16: function CONFIGURECORE(user, c4g, c5g, cDual, upfs, upfLoc, nms, model)
17:   Armazenar configuração personalizada
18: function GETCORE(user)
19:   Retorna configuração salva

20: HireAsset
21: Herda de ERC721
22: function PUBLISHSERVICE(provider, tokens, fqdn, slas)
23:   Criar token de serviço composto
24:   Salvar ativos utilizados, SLA e FQDN
25: function GETSERVICE(serviceId)
26:   Retorna dados do serviço

27: Telecoin
28: Definir PaymentModel { SUBSCRIPTION, PAYG, LICENSE }
29: function REGISTERAGREEMENT(id, client, sp, ap, amt, model)
30:   Registrar contrato de pagamento
31: function SETTLE(id)
32:   Recuperar valores
33:   Transferir pagamentos entre FS e FA proporcionalmente

```

responsável por registrar participantes e seus papéis no ecossistema (cliente, fornecedor de serviço ou fornecedor de ativo), vinculando-os a identificadores descentralizados (DID). Em seguida, o contrato Asset Token Contract permite que ativos físicos, como unidades C2N e RANs, sejam tokenizados em conformidade com o padrão ERC721, garantindo unicidade e rastreabilidade no catálogo de ativos disponíveis.

Tabela 2. Resumo dos contratos inteligentes e suas responsabilidades

Contrato	Função Principal	Interações Chave
ContractRegistry	Gerenciar cadastro e perfis com base em identidade descentralizada (DID).	Onboarding de participantes, controle de acesso e verificação de identidade.
AssetTokenContract	Tokenização de ativos físicos (como C2N e RANs), associando-os a identificadores únicos.	Publicação no catálogo de ativos, visibilidade, negociação e rastreabilidade.
CoreProvisioningContract	Armazenar configurações técnicas detalhadas dos recursos solicitados, como cores, UPFs e NMS.	Entrada e recuperação de parâmetros técnicos para composição e instalação.
HireAsset	Representar a rede privativa como serviço composto, publicado e tokenizado no catálogo.	Composição de ativos, definição de SLA, vinculação a FQDN e publicação no catálogo de serviços.
Telecoin	Gerenciar liquidação de pagamentos entre os agentes (FS e FA) de forma transparente e automatizada.	Regras de divisão de receita com base no modelo de monetização, com distribuição via contrato.

A configuração dos recursos técnicos contratados é armazenada no `ProvisioningContract`, que registra os parâmetros como número de cores, UPFs, tipo de gerenciamento (NMS) e modelo de instalação (cloud, on-premises ou híbrido). Com esses ativos configurados, o integrador pode compor um serviço completo usando o `HireAsset`, que publica a rede como um token de serviço, incluindo SLAs e ponto de acesso (FQDN). Por fim, o contrato `Telecoin` automatiza a liquidação dos pagamentos entre fornecedores, aplicando regras de divisão de receita conforme o modelo de monetização escolhido (assinatura, pay-as-you-go ou licença). Esses contratos operam de forma coordenada, garantindo transparência, segurança e interoperabilidade ao ecossistema proposto.

4. Estudo de Caso: Cenário de Contratação e Provisionamento de Rede Privativa

Esta seção apresenta um cenário prático de utilização da arquitetura proposta, ilustrado na Figura 2, onde um integrador de redes acessa o *marketplace* para compor uma rede privativa sob demanda. O fluxo compreende desde a seleção de componentes técnicos até o provisionamento e ativação da rede contratada, destacando o papel do catálogo de ativos e serviços, bem como os contratos inteligentes responsáveis pela automação dos processos.

4.1. Descrição do Cenário

O integrador inicia o processo acessando o catálogo de ativos no marketplace (passo 1 da Figura 2), onde pode visualizar diferentes ofertas de elementos de core de rede (C2N), organizadas por níveis de serviço, como por exemplo: **Essencial**: voltada para redes menores, pilotos ou aplicações industriais específicas, **Avançado**: atende empresas de médio porte com múltiplas instâncias e maior capacidade e **Operadora**: destinada a ambientes críticos, com alta disponibilidade e desempenho garantido.

Além dessas opções, o integrador pode optar por **personalizar a instalação** conforme suas necessidades. Ao selecionar uma oferta, o usuário é direcionado a uma jornada de configuração técnica.

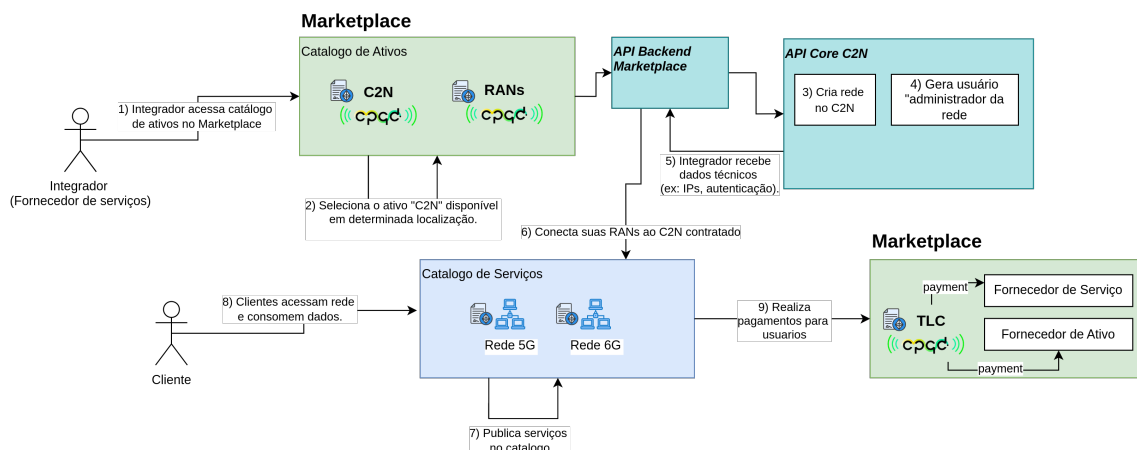


Figura 2. Arquitetura da Proposta.

4.2. Etapas do Cenário

- Seleção do Core de Rede:** o integrador escolhe o número de instâncias de core (1, 2, 3 ou mais), a tecnologia associada a cada instância (4G, 5G ou 4G/5G) e o tipo de ambiente desejado (máquina dedicada ou infraestrutura compartilhada).
- Configuração dos UPFs:** em seguida, define se deseja utilizar UPFs adicionais (além do UPF principal), em quais cores cada UPF estará vinculado, e se a localização será local ou remota, conforme os requisitos de desempenho e latência.
- Seleção do NMS (Network Management System):** o integrador escolhe entre instalação dedicada ou compartilhada e informa os dados necessários para criação das credenciais administrativas e do domínio (FQDN).
- Modelo de Instalação:** é possível optar por três abordagens: *Cloud*, *On-premises* ou *Híbrido*. Caso a opção não seja *Cloud*, o sistema exige que o integrador forneça as especificações de hardware e rede para que o marketplace gere os ativos de instalação (como pacotes configurados).
- Modelo de Precificação:** o integrador escolhe entre três modelos: *assinatura*, *pay-as-you-go* ou *licença perpétua*, de acordo com o perfil de uso e tipo de negócio.
- Revisão da Configuração e Pagamento:** o sistema apresenta um resumo detalhado da contratação, incluindo número e tipo de cores, UPFs associados, modelo do NMS, tipo de instalação e valor total. O integrador confirma a contratação e realiza o pagamento.
- Provisionamento e Ativação:** se o modelo for *Cloud*, o backend do marketplace verifica a disponibilidade da infraestrutura e executa o provisionamento automático, entregando as credenciais e o endereço de acesso ao portal C2N. Para os modelos *On-premises* ou *Híbrido*, o sistema fornece os pacotes de instalação (e.g., arquivos tar.gz) ou realiza o acesso remoto mediante chave privada.
- Publicação e Consumo de Serviço:** após a configuração, o integrador publica sua rede privativa como serviço no catálogo (passo 7). Clientes interessados podem contratar e consumir essa rede (passo 8), acessando os dados conforme seus contratos.
- Liquidação e Pagamentos:** o sistema executa os contratos inteligentes de pagamento (passo 9), remunerando automaticamente o Fornecedor de Serviço (FS) e o Fornecedor de Ativo (FA) com base no modelo de precificação acordado.

Todo o ciclo descrito é auditável, automatizado e transparente por meio de contratos inteligentes registrados na rede permissionada baseada no Hyperledger Besu. As interações de negócio são codificadas logicamente, desde a criação de carteiras até a distribuição de receitas entre os participantes. O uso de identidades digitais descentralizadas (DID) garante segurança e confiabilidade em cada etapa do processo, eliminando a dependência de intermediários e promovendo eficiência operacional.

A arquitetura D-MTS permite a distribuição transparente e automatizada de recursos físicos e serviços digitais, eliminando intermediários e reduzindo ineficiências operacionais. A rastreabilidade via tokenização dos ativos, aliada à divisão programável de receitas, fomenta um ecossistema mais justo e auditável. Além disso, ao reutilizar ativos subutilizados (como antenas, torres e RANs), o modelo promove práticas sustentáveis na operação de redes — contribuindo para reduzir o impacto ambiental e os custos de expansão da cobertura.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este artigo propõe uma arquitetura descentralizada para o compartilhamento inteligente de ativos e serviços de telecomunicações, baseada em contratos inteligentes e identidade digital descentralizada. A solução promove automação, transparência e interoperabilidade em ambientes B2B e B2C, destacando-se por incorporar tokenização de ativos físicos, pagamentos programáveis e personalização de recursos.

Do ponto de vista da governança digital, a proposta contribui para modelos mais distribuídos e auditáveis de gestão de infraestrutura crítica. Já sob a ótica da sustentabilidade, o uso de blockchain para rastrear, reutilizar e monetizar ativos físicos reduz o desperdício e promove eficiência no uso de recursos de rede. Tais avanços são estratégicos em um cenário de crescente demanda por conectividade e racionalização de investimentos em telecomunicações.

5.1. Trabalhos Futuros

Como trabalho futuro, pretende-se expandir a proposta com a implementação completa dos contratos inteligentes e sua integração com um protótipo funcional da plataforma. Também é prevista a realização de testes de desempenho com métricas como latência, uso de recursos e escalabilidade, além da avaliação do consumo de *gas* em diferentes cenários operacionais.

Além disso, pretende-se explorar mecanismos de governança descentralizada para decisão sobre políticas de publicação de ativos, resolução de disputas e atualização de regras de negócio, aumentando a resiliência e a autonomia do sistema. Por fim, será explorado o uso de oráculos para integração com dados externos (off-chain), como medições de QoS e SLAs operacionais. Também gostaríamos de investigar indicadores de sustentabilidade no uso da infraestrutura compartilhada, incluindo métricas de reaproveitamento de ativos e redução de emissões indiretas associadas à expansão de redes.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio dado a este trabalho pelo MCTI-Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, com recursos financeiros do FUNTTEL e administrado pela FI-NEP, especificamente no âmbito dos projetos AERF - Ações Estratégicas para Redes do

Futuro, Contrato 01.22.0471.00, Referência 1508/22 e TECSEG - Desenvolvimento de tecnologias e metodologia para avaliação e investigação de segurança de redes e aplicações de governo digital, Contrato 01.21.0163.01, Referência 1196/21. E foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através dos Processos 405940/2022-0, 400111/2023-3, 444978/2024-0, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) através dos projetos 2023/00811-0, 2023/00673-7, 2021/00199-8 (CPE SMARTNESS), 2020/04031-1 e 2018/23097-3.

Referências

- Afraz, N. and Ruffini, M. (2019). A distributed bilateral resource market mechanism for future telecommunications networks. In *2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pages 1–6.
- Afraz, N. and Ruffini, M. (2020). 5g network slice brokering: A distributed blockchain-based market. In *2020 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, pages 23–27.
- Afraz, N., Wilhelmi, F., Ahmadi, H., and Ruffini, M. (2023). Blockchain and smart contracts for telecommunications: Requirements vs. cost analysis. *IEEE Access*, 11:95653–95666.
- Bandara, E., Shetty, S., Mukkamala, R., Rahman, A., Foytik, P., Liang, X., and Keong, N. W. (2022). Kaputa - blockchain, non-fungible token and model card integrated 5g/6g network slice broker and marketplace. In *MILCOM 2022 - 2022 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, pages 559–564.
- Dannen, C. (2017). *Dapp Deployment*, pages 149–157. Apress, Berkeley, CA.
- Fernández-Fernández, A., Coronado, E., Erspamer, A., Samaras, G., Theodorou, V., and Siddiqui, S. (2023). Unlocking the path toward intelligent telecom marketplaces for beyond 5g and 6g networks. *IEEE Communications Magazine*, 61(3):28–34.
- Giupponi, L. and Wilhelmi, F. (2022). Blockchain-enabled network sharing for o-ran in 5g and beyond. *IEEE Network*, 36(4):218–225.
- ITU-T (2019). Technical specification fg dlt d1.1 - distributed ledger technology terms and definitions. Technical report, TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF IT.
- Javed, F. and Mangues-Bafalluy, J. (2022). Blockchain and 6g networks: A use case for cost-efficient inter-provider smart contracts. In *2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 602–608.
- Maksymyuk, T., Gazda, J., Volosin, M., Bugar, G., Horvath, D., Klymash, M., and Dohler, M. (2020). Blockchain-empowered framework for decentralized network management in 6g. *IEEE Communications Magazine*, 58(9):86–92.
- Saraswat, D., Verma, A., Bhattacharya, P., Tanwar, S., Sharma, G., Bokoro, P. N., and Sharma, R. (2022). Blockchain-based federated learning in uavs beyond 5g networks: A solution taxonomy and future directions. *IEEE Access*, 10:33154–33182.

Shahrukh, M. R. H., Rahman, M. T., and Mansoor, N. (2023). Exploration of hyperledger besu in designing private blockchain-based financial distribution systems. *arXiv, Computer Science - Cryptography and Security*.