

Uma Arquitetura Distribuída Baseada em Blockchain Permissionada para Integridade e Governança de Créditos de Carbono REDD+ na Amazônia

Mateus Bastos¹, Alan Veloso², Antônio Abelém¹

¹Instituto de Ciências Exatas e Naturais – Universidade Federal do Pará (UFPA)
R. Augusto Corrêa, 01 - Guamá, Belém - PA, 66075-110

²Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP)
R. Lauro Müller, 116 sala 1103 - Botafogo, Rio de Janeiro - RJ, 22290-906

mateus.araujo@icen.ufpa.br, alan.veloso@rnp.br, abelem@ufpa.br

Abstract. *Voluntary carbon markets based on REDD+ projects face persistent challenges regarding integrity, traceability, and governance, particularly in the Amazon, where issues such as double counting and limited transparency undermine their credibility. This paper proposes a distributed architecture based on permissioned blockchain for the monitoring, verification, and tokenization of carbon credits. The solution integrates official geospatial data with smart contracts on a Hyperledger Besu network, enabling immutable information recording. Load testing performed with the Locust tool, simulating up to 250 concurrent users, demonstrated network stability, yielding average write latencies of approximately 120 ms and read latencies below 10 ms. These results confirm the architecture's technical feasibility in mitigating fraud risks while maintaining operational efficiency suitable for consortium networks.*

Resumo. *Mercados voluntários de créditos de carbono baseados em projetos REDD+ enfrentam desafios recorrentes de integridade, rastreabilidade e governança, especialmente na Amazônia, onde problemas como dupla contagem e baixa transparência comprometem sua credibilidade. Este artigo propõe uma arquitetura distribuída baseada em blockchain permissionada para o monitoramento, a verificação e a tokenização de créditos de carbono. A solução integra dados geoespaciais oficiais e contratos inteligentes em uma rede Hyperledger Besu, permitindo o registro imutável das informações. Testes de desempenho sob carga, simulando até 250 usuários simultâneos com a ferramenta Locust, demonstraram a estabilidade da rede com latências médias de escrita (≈ 120 ms) e leitura (< 10 ms). Tais resultados confirmam a viabilidade técnica da arquitetura para mitigar riscos de fraude com eficiência operacional adequada a redes de consórcio.*

1. Introdução

Os mercados de créditos de carbono constituem mecanismos econômicos voltados à mitigação das mudanças climáticas por meio da compensação de emissões, sendo os projetos REDD+ (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal) particularmente relevantes no contexto amazônico. Entretanto, estudos recentes evidenciam

limitações técnicas e institucionais que comprometem a integridade desses créditos, especialmente nos mercados voluntários.

Conforme apontado por Yang e Park [Yang and Park 2025], falhas nos processos de Monitoramento, Relato e Verificação (MRV), incluindo inconsistências na definição de linhas de base (*baseline*), na contabilização de vazamentos de carbono (*leakage*) e na seleção de reservatórios de carbono (*carbon pools*), podem levar à superestimação das reduções de emissões e à emissão de créditos sem adicionalidade ambiental comprovada, o que é agravado por modelos de certificação centralizados e de baixa auditabilidade técnica. Paralelamente, denúncias de organizações da sociedade civil evidenciam ainda mais as falhas de governança em projetos REDD+, incluindo a ausência de consultas prévias às comunidades tradicionais [Uruataperá 2025].

Sob a ótica de Sistemas Distribuídos, essas limitações decorrem da inadequação de arquiteturas centralizadas para ambientes multiatores, caracterizados pela ausência de confiança prévia, heterogeneidade de fontes de dados e elevados requisitos de integridade, rastreabilidade e não-repúdio. Nesse contexto, tecnologias de registro distribuído, em especial blockchains permissionadas, oferecem propriedades técnicas como imutabilidade, consenso tolerante a falhas bizantinas e controle de acesso, possibilitando o registro auditável e rastreável de dados de MRV provenientes de múltiplas fontes. Essa abordagem reduz riscos de fraude, dupla contagem e manipulação retroativa de informações, sendo particularmente relevante para a detecção e mitigação de vazamentos de carbono, que constituem o foco central deste trabalho.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo projetar e analisar uma arquitetura de sistema distribuído confiável para o suporte à integridade técnica e à governança socioambiental de créditos de carbono REDD+ na Amazônia. A proposta investiga como mecanismos típicos de sistemas distribuídos, como consenso tolerante a falhas bizantinas, imutabilidade criptográfica, separação entre camadas on-chain e off-chain e coordenação entre múltiplos domínios administrativos, podem ser aplicados para atender aos requisitos de MRV (Monitoramento, Relato e Verificação) em um cenário caracterizado por múltiplos atores, baixa conectividade e riscos de inconsistência de dados. As principais contribuições deste trabalho são:

- Um modelo arquitetural de sistema distribuído permissionado para MRV ambiental, que integra monitoramento geoespacial off-chain ao registro imutável on-chain, explorando a separação entre processamento intensivo de dados e ancoragem criptográfica como estratégia de escalabilidade e auditabilidade;
- Um mecanismo de coordenação distribuída para o ciclo de vida de créditos de carbono, no qual contratos inteligentes implementam restrições de consistência global (ex.: prevenção de dupla contagem e rastreabilidade de ativos ambientais), demonstrando como regras de integridade podem ser codificadas como propriedades do sistema distribuído;
- A incorporação de governança distribuída como componente arquitetural do sistema, modelando a interação entre múltiplos domínios administrativos (órgãos públicos, comunidades locais e registradores) e analisando como a blockchain pode atuar como camada de coordenação e de registro auditável de decisões, em vez de apenas como repositório de dados;
- Uma avaliação de viabilidade técnica do sistema proposto, baseada na

implementação de seus principais módulos e na análise do comportamento funcional das operações críticas de registro, verificação e aposentadoria de créditos, discutindo os limites e as implicações da abordagem do ponto de vista de sistemas distribuídos.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 descreve a fundamentação teórica. A Seção 3 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 4 descreve a arquitetura proposta. A Seção 5 apresenta os resultados de validação propostos. A Seção 6 apresenta a discussão dos resultados. Por fim, a Seção 7 conclui o trabalho e aponta perspectivas futuras.

2. Fundamentação Teórica

Esta seção apresenta os fundamentos teóricos que sustentam a proposta, abordando os desafios associados à integridade ambiental dos créditos de carbono, os requisitos de sistemas distribuídos para Monitoramento, Relato e Verificação (MRV) e o uso de blockchain como infraestrutura para rastreabilidade, auditabilidade e governança.

2.1. Créditos de Carbono e Integridade Ambiental

Créditos de carbono correspondem a unidades associadas à remoção ou à não emissão de uma tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e) e são amplamente utilizados como instrumentos de compensação de emissões [Freedman et al. 2009]. A efetividade desses mecanismos depende da integridade ambiental dos projetos, o que exige metodologias robustas de quantificação, verificação e contabilidade.

No plano regulatório, a UNFCCC e o Acordo de Paris estabelecem diretrizes para mecanismos de mitigação climática, com ênfase na integridade ambiental e na prevenção de dupla contagem, conforme disposto no Artigo 6 [United Nations 2025, Edmonds et al. 2019]. No contexto brasileiro, a Lei nº 15.042/2024 institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), criando um mercado regulado que exige infraestruturas digitais confiáveis para registro, rastreabilidade e auditoria [Imprensa Nacional 2024].

Apesar desse arcabouço, estudos recentes apontam fragilidades recorrentes nos mercados voluntários, especialmente em projetos REDD+, incluindo falhas na definição de linha de base, vazamento de emissões e incertezas quanto à adicionalidade [Yang and Park 2025]. Esses desafios evidenciam as limitações de modelos centralizados e reforçam a necessidade de sistemas distribuídos e auditáveis.

2.2. Blockchain como Infraestrutura para MRV

Blockchain é uma tecnologia de registro distribuído que permite o armazenamento imutável, transparente e auditável de dados, reduzindo a dependência de autoridades centrais por meio de mecanismos de consenso [Nakamoto 2008, Di Pierro 2017]. Essas características tornam a tecnologia adequada para aplicações que exigem alta confiabilidade e integridade da informação.

No contexto dos mercados de carbono, a blockchain tem sido explorada como infraestrutura para fortalecer os processos de MRV, garantindo a rastreabilidade completa dos dados ambientais e prevenindo fraudes, como dupla contagem ou alterações

retroativas de registros [Saber et al. 2019]. O uso de contratos inteligentes possibilita a automação de regras relacionadas à emissão, transferência e aposentadoria de créditos de carbono, assegurando que apenas créditos verificados sejam negociados [Buterin et al. 2013, Kirli et al. 2022].

2.3. Tokenização, Oráculos e Governança Distribuída

A tokenização consiste na representação digital de créditos de carbono por meio de *tokens* em blockchain, permitindo negociação programável, rastreabilidade e auditoria transparente, além da incorporação de metadados relevantes, como origem, metodologia e status de aposentadoria [Sorensen 2023].

A confiabilidade desse processo depende diretamente da qualidade dos dados ambientais utilizados nos sistemas de MRV, frequentemente provenientes de imagens de satélite, inventários florestais e sensores ambientais [SA and Severino 2019, Ferreira et al. 2023]. A integração dessas informações ao ambiente blockchain é realizada por meio de *oráculos*, que atuam como ponte entre o mundo físico e o digital. Estratégias como a validação cruzada de fontes e a autenticação criptográfica são essenciais para mitigar riscos de manipulação [Woo et al. 2021, Mitchell et al. 2017].

Por fim, projetos REDD+ envolvem múltiplos stakeholders, exigindo mecanismos de governança transparentes e auditáveis. Modelos de governança distribuída baseados em blockchain permitem registrar decisões e validações de forma verificável, contribuindo para a integridade técnica dos créditos e para práticas alinhadas à sustentabilidade e à justiça climática [Santana and Albareda 2022].

3. Trabalhos Relacionados

A literatura recente tem explorado a aplicação da tecnologia blockchain para mitigar as ineficiências dos mercados voluntários de carbono, com ênfase crescente na tokenização de ativos, integração com mecanismos de Monitoramento, Relato e Verificação (MRV) e governança. Esta seção analisa trabalhos recentes e relevantes, destacando suas abordagens arquiteturais, virtudes e limitações em comparação com a proposta deste artigo.

Caburlão e Rodrigues [Caburlão and Rodrigues 2026] apresentam uma revisão sistemática abrangente sobre o papel da blockchain em projetos REDD+. A principal virtude do trabalho reside no mapeamento detalhado da cadeia causal de falhas de integridade nos sistemas tradicionais de MRV, evidenciando como a opacidade dos dados e os processos manuais culminam na falta de financiamento. Os autores propõem um modelo conceitual de integração de dados de sensores e satélites com contratos inteligentes. Contudo, a deficiência do estudo recai sobre a constatação de que o estado da arte é dominado por propostas puramente teóricas e conceituais. O trabalho não avança para a especificação de uma arquitetura técnica ou para a validação empírica de desempenho sob carga de transações, lacuna que a nossa proposta preenche diretamente ao implementar e testar uma rede permissionada.

Prezioso [Prezioso 2026] avança nessa discussão ao propor a matriz *Sector Tokenisation Opportunity Matrix* (STOM), que reposiciona a tokenização não apenas como uma camada de digitalização, mas como uma infraestrutura financeira de segunda camada. A grande virtude da arquitetura proposta é a modularidade baseada no ciclo

de vida do crédito, utilizando contratos inteligentes para garantir a "aposentadoria programática"(queima) de créditos e a agregação de microprojetos. Apesar da robustez de seu modelo de diagnóstico baseado em dados de registros, a arquitetura proposta por Preziuso possui uma deficiência prática: trata-se de um *framework* econômico e de governança. O autor não propõe uma infraestrutura de rede específica (pública ou permissionada) nem apresenta testes que validem a latência e o *throughput* na execução dessas regras de negócio na blockchain, aspectos que são exaustivamente abordados e testados em nossa implementação com o Hyperledger Besu.

Com um viés mais prático de implementação, Boonrat et al. [Boonrat et al. 2025] desenvolvem a plataforma CarbonCoins, voltada para o engajamento comunitário em projetos florestais. A virtude dessa arquitetura é o seu modelo de duplo token (Carbon Coin para mercado e Forest Coin para governança/distribuição de receitas) totalmente integrado a um sistema Web3, com contratos inteligentes em Solidity que se comunicam com APIs de registros oficiais e integram dados de índices de vegetação (NDVI). Embora apresente uma arquitetura de software (front-end e back-end) funcional e inovadora na distribuição equitativa, a proposta foca majoritariamente na camada de aplicação e na economia dos tokens. A arquitetura carece de discussões profundas sobre o modelo de consenso utilizado, a escalabilidade da rede e a adequação de redes públicas *versus* permissionadas para atores institucionais, além de não apresentar métricas de desempenho sob estresse do sistema.

Em contraste com os trabalhos analisados, a proposta deste artigo preenche a lacuna entre a teoria arquitetural e a viabilidade operacional para arranjos institucionais. Enquanto [Caburlão and Rodrigues 2026] e [Preziuso 2026] permanecem no campo conceitual ou de diagnóstico financeiro, e [Boonrat et al. 2025] foca na aplicação DApp para comunidades, nosso trabalho define rigorosamente a infraestrutura de rede voltada a um consórcio corporativo e governamental. O diferencial reside na escolha e configuração de uma blockchain permissionada (Hyperledger Besu) com consenso determinístico (QBFT), projetada explicitamente para as demandas de privacidade e segurança jurídica de projetos REDD+ na Amazônia. Além disso, a arquitetura integra o processamento geoespacial local (QGIS/Python) off-chain como oráculo para os contratos inteligentes on-chain, e, diferentemente dos estudos citados, comprova a viabilidade técnica através de testes empíricos, demonstrando latência e vazão adequadas para operações críticas de registro e prevenção programática de dupla contagem.

A Tabela 1 sintetiza o comparativo estrutural entre os trabalhos analisados e a arquitetura proposta.

4. Arquitetura Proposta para Rastreamento de Créditos de Carbono

Este capítulo apresenta a arquitetura proposta para mitigar o vazamento de carbono em projetos REDD+, focando no fortalecimento da rastreabilidade, transparência e governança. A solução visa superar falhas recorrentes nos mecanismos de Monitoramento, Relato e Verificação (MRV), como assimetria de informação e baixa auditabilidade, integrando blockchain permissionada, contratos inteligentes e monitoramento ambiental.

Tabela 1. Comparativo das Propostas Arquiteturais para Projetos de Carbono Baseados em Blockchain

Trabalho	Foco Arquitetural	Sistema de Modelo Conceitual	Tipo de Rede/Consenso	Integração MRV	Governança REDD+	Testes Empíricos
[Caburlão and Rodrigues 2026]	Revisão temática e Modelo Conceitual	Sistema de Modelo Conceitual	Não especificado	Teórica (Sensores/IoT/Satélite)	Sim (Governança ecossistêmica)	Não
[Prezioso 2026]	Framework Financeiro e Tokenização		Não especificado	Não detalhada	Sim (Foco em ciclo de vida e gargalos)	Não
[Boonrat et al. 2025]	Plataforma (DApp) com duplo token	Web3	Pública (Ethereum/Solidity)	Sim (Uso de NDVI / Fórmulas de crescimento)	Sim (Engajamento e repasse comunitário)	Não
Este Trabalho	Arquitetura Distribuída		Permissionada (Besu / QBFT)	Sim (QGIS/Python)	Sim (Contexto Amazônico)	Sim

4.1. Visão Geral da Proposta

A principal motivação é o vazamento de carbono, fenômeno que compromete a integridade ambiental de projetos REDD+ ao deslocar o desmatamento para áreas vizinhas [Meitner 2024]. Para solucionar isso, a arquitetura integra monitoramento contínuo a sistemas blockchain, garantindo imutabilidade e verificabilidade aos registros empíricos [Al Sadawi et al. 2021].

A Figura 1 ilustra a organização modular do sistema, evidenciando a separação lógica entre coleta de dados, validação técnica, registro distribuído e comercialização de ativos.

4.2. Descrição da Arquitetura

A arquitetura proposta opera de forma integrada por meio de módulos interdependentes, cada um desempenhando um papel fundamental e sequencial no ciclo de vida dos créditos de carbono.

O módulo de monitoramento ambiental constitui a base empírica do sistema. Ele é alimentado por dados geoespaciais provenientes de fontes oficiais de monitoramento da Amazônia, como os sistemas do INPE/PRODES. A delimitação estrutural das áreas do projeto REDD+ e das zonas de amortecimento, essenciais para detectar o vazamento de carbono, é realizada por meio do processamento de shapefiles e da extração de polígonos delimitadores no QGIS, refletindo as especificidades territoriais do estado do Pará, conforme mostrados na Figura 2 e Figura 3.

Ainda neste escopo de monitoramento, scripts fritos em Python processam as imagens de satélite e os polígonos estabelecidos para calcular índices de cobertura vegetal. Essa integração garante uma quantificação escalável, técnica e auditável da biomassa preservada.

O módulo de verificação atua como um rigoroso filtro metodológico preliminar. Antes de qualquer transação na rede distribuída, os dados originários do geoprocessamento passam por regras de validação técnica. Essa etapa assegura a consistência das informações, corrige eventuais ruídos de sensoriamento remoto e impede a submissão de dados ambientais inconsistentes ou manipulados para a etapa de registro.

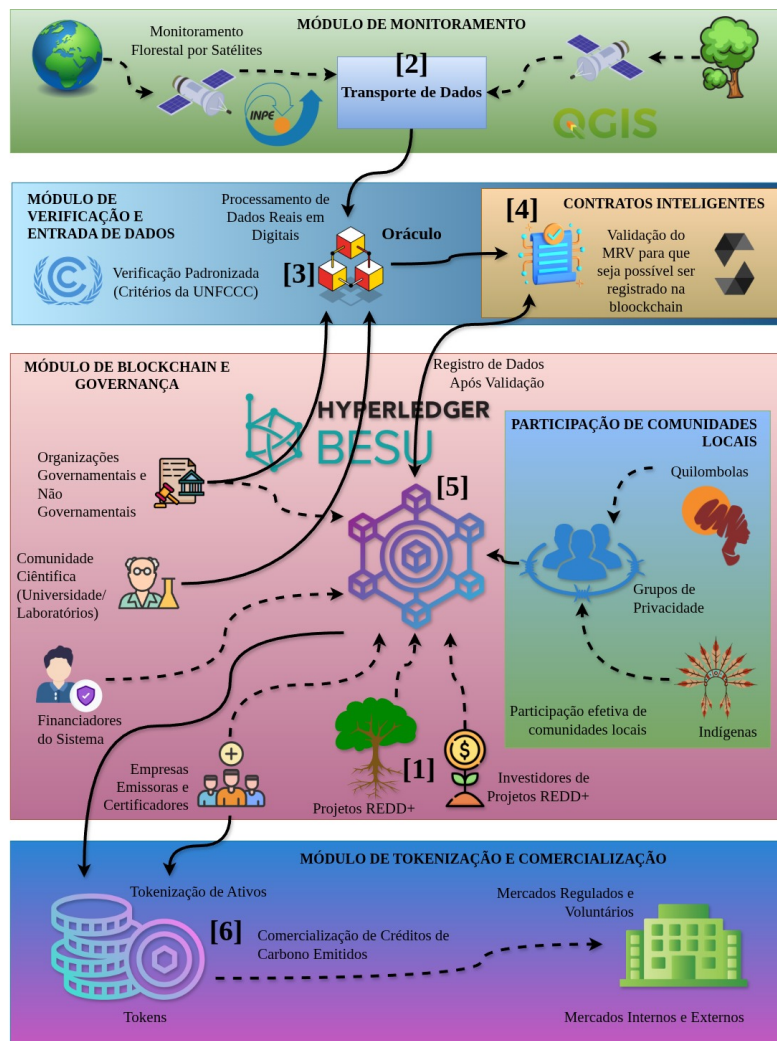


Figura 1. Arquitetura Proposta

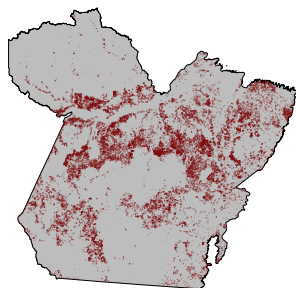


Figura 2. Desmatamento no estado do Pará de 2008 até 2024 [INPE].

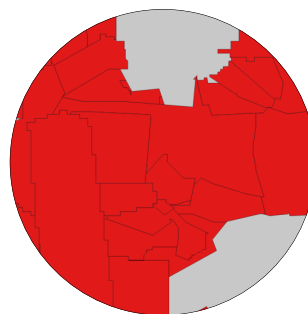


Figura 3. Exemplos de Polígonos de Desmatamento (Ampliado da Figura 2).

O núcleo da solução é o módulo blockchain, que provê uma infraestrutura permissionada e um livro-razão imutável para o sistema. A automação, a transparência e a segurança das operações são garantidas por contratos inteligentes desenvolvidos em Solidity. A arquitetura prevê a separação lógica de responsabilidades nesses contratos:

enquanto determinados módulos gerenciam estritamente o registro contínuo do monitoramento florestal, outros controlam exclusivamente a emissão, a transferência e a aposentadoria (queima) dos ativos.

Por fim, o módulo de governança e atores consolida a interação no ecossistema. Ele engloba os oráculos de dados (responsáveis por injetar as métricas do Python/QGIS de forma segura na blockchain), as instituições validadoras, os auditores independentes e as comunidades locais. Esse modelo descentralizado elimina a dependência de um intermediário centralizador único, promovendo uma gestão ambiental participativa e mitigando severamente os riscos de dupla contagem e fraude [Arshad et al. 2023].

4.3. Fluxo de Funcionamento do Sistema

O ciclo de vida de um crédito de carbono no sistema segue o diagrama da Figura 4:

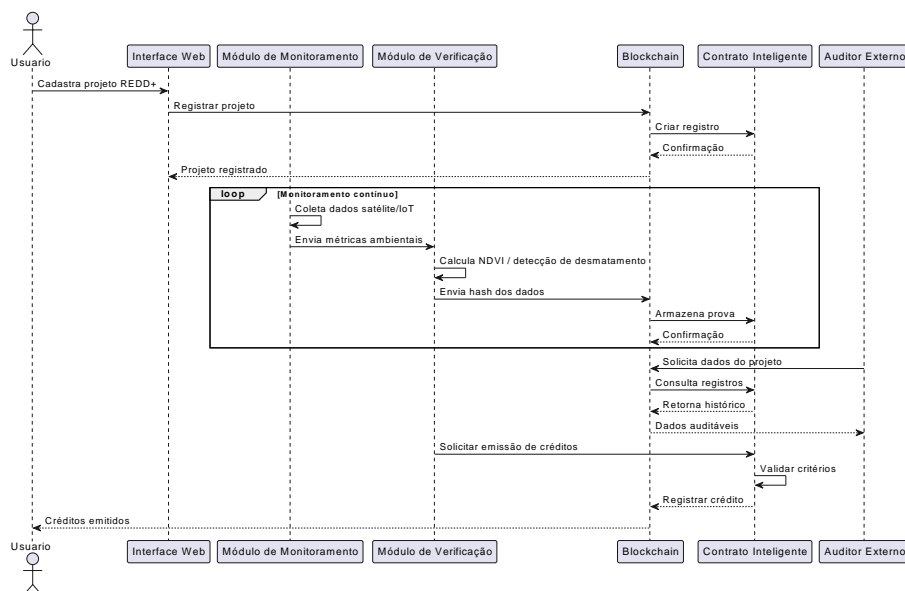


Figura 4. Diagrama de Sequência do Fluxo de Funcionamento do Sistema.

1. **Cadastro (Passo [1] da Figura 1):** Registro das informações metodológicas e da linha de base do projeto REDD+.
2. **Monitoramento e Análise (Passos [2] a [4]):** Coleta periódica de dados, estimativa de reduções de emissões e estruturação em registros digitais padronizados.
3. **Auditoria (Passo [5]):** Validação técnica por instituições independentes. Apenas dados conformes são inseridos definitivamente na blockchain.
4. **Emissão e Transferência (Passo [6]):** Geração de ativos digitais rastreáveis que representam os créditos validados.
5. **Aposentadoria:** Ao ser utilizado para compensação, o crédito é baixado de forma programática, impedindo dupla contagem e garantindo rastreabilidade integral [Yang and Park 2025].

4.4. Escopo e Limitações da Proposta

A arquitetura consiste em uma Prova de Conceito (PoC) desenvolvida em ambiente experimental controlado. Os testes em infraestrutura local validaram com sucesso a execução de contratos inteligentes e o registro distribuído de dados.

Contudo, o escopo limita-se à demonstração de viabilidade técnica. A proposta atual não contempla requisitos de implantação em larga escala, como integração com sistemas governamentais oficiais e validação institucional formal. Trabalhos futuros devem focar na automação via oráculos de dados, interoperabilidade entre redes blockchain e mecanismos de governança descentralizada avançada.

5. Resultados e Discussão

Esta seção apresenta os principais resultados da validação da arquitetura proposta, com foco em sua capacidade de fortalecer a integridade ambiental de projetos REDD+ na Amazônia. A análise enfatiza aspectos centrais acerca de sistemas de registros distribuídos, através de testes de desempenho dos contratos inteligentes implantados na rede.

5.1. Especificações

O ambiente de teste utilizado para validar a arquitetura proposta foi implementado em um notebook equipado com um processador AMD Ryzen 5-5500U de seis núcleos e doze threads, com clock de 2.1 GHz a 4.0 GHz, complementado por 16 GB de memória RAM DDR4 em configuração dual-channel, ambas operando a 3200 MHz, o que atendeu às demandas básicas dos experimentos. O armazenamento ficou a cargo de um SSD NVMe de 516 GB, que garantiu tempos rápidos de boot e carregamento de aplicações. Para o sistema operacional, foi utilizado Ubuntu 24.04.2 LTS (Jammy Jellyfish). Esta escolha permitiu aproveitar a estabilidade e sua compatibilidade com ferramentas open-source essenciais para o desenvolvimento.

5.2. Metodologia de Avaliação e Condução dos Experimentos

Para assegurar a reprodutibilidade da pesquisa e validar a viabilidade técnica da arquitetura proposta, a metodologia de avaliação concentrou-se nos testes de desempenho computacional da infraestrutura de registro distribuído. O núcleo operacional foi implantado em uma rede blockchain permissionada baseada em **Hyperledger Besu**.

O ambiente de testes foi configurado com 4 nós validadores operando sob o algoritmo de consenso *Quorum Byzantine Fault Tolerance* (QBFT¹). A escolha do QBFT justifica-se por sua adequação a redes corporativas permissionadas, pois garante a finalidade imediata das transações, uma propriedade fundamental para evitar bifurcações (*forks*) na rede e assegurar a unicidade e imutabilidade no registro e aposentadoria dos créditos de carbono. Além disso, os contratos foram submetidos a testes automatizados utilizando o *framework Foundry*², amplamente adotado no ecossistema Ethereum para desenvolvimento, teste e auditoria de contratos escritos em Solidity. O Foundry permite a execução de testes determinísticos, a mensuração precisa do consumo de *gas* e a análise do tempo de execução, aspectos fundamentais para avaliar a viabilidade técnica da solução.

Para submeter os contratos inteligentes da arquitetura, especificamente o `forestMonitor.sol` e o `carbonRetirement.sol`, a cenários simulados de estresse, adotou-se a ferramenta de testes de carga **Locust**³. A condução dos experimentos

¹<https://besu.hyperledger.org/private-networks/how-to/configure/consensus/qbft>

²<https://github.com/foundry-rs/foundry>

³<https://locust.io/>

baseou-se em um protocolo de injeção de carga gradual (*step load*). Esse arranjo experimental variou a concorrência na rede de 10 a 250 usuários simultâneos, permitindo avaliar a resiliência da rede e o impacto computacional associado à persistência de estado e ao consenso. Para quantificar os resultados, foram estabelecidas duas métricas centrais de avaliação:

- **Latência:** tempo médio de resposta para a confirmação das transações.
- **Throughput (Vazão):** taxa de transações processadas por segundo, cujo cálculo baseou-se na Equação 1:

$$Th = \frac{\sum_{i=1}^k N_{tx_i}}{\Delta t} \quad (1)$$

Durante a bateria de testes, o comportamento sistêmico foi segmentado e monitorado considerando a natureza das operações: requisições de leitura (*read*) e de escrita (*write*). Essa distinção metodológica permitiu diagnosticar com precisão os limites de processamento e os gargalos de latência sob alta concorrência inerentes ao processo de validação.

5.3. Testes de Gas

Os testes abrangeram os dois contratos centrais do sistema: `CarbonRetirement`, responsável pela aposentadoria programática dos créditos, e `ForestMonitor`, responsável pelo registro e validação de dados de monitoramento florestal. A Tabela 2 detalha o consumo de *gas* por função testada.

Tabela 2. Consumo de gas dos testes automatizados dos contratos inteligentes (Foundry)

Contrato	Teste	Gas
CarbonRetirement	test_RetireCredit_Success()	46 540
CarbonRetirement	test_RevertIf_CallerIsNotOwner()	18 414
CarbonRetirement	test_RevertIf_CreditIsAlreadyRetired()	46 093
ForestMonitor	test_ConstructorSetsNameAndSymbol()	17 415
ForestMonitor	test_CreateForestRecord_Success()	259 963
ForestMonitor	test_RevertWhenGettingRecordForNonExistentToken()	14 422
ForestMonitor	test_TokenIdIncrementsCorrectly()	476 856

5.4. Testes de Desempenho

A Figura 6 correlaciona carga, throughput e latência. O throughput agregado apresentou crescimento linear ($R^2 \approx 0,98$), atingindo 113 RPS sem indícios de saturação na rede Hyperledger Besu. Quanto à latência, operações de leitura (`getforestRecord`) mantiveram-se estáveis (< 100 ms), enquanto operações de escrita (`createforestRecord`) escalaram até 200 ms, evidenciando o custo computacional do consenso e persistência de estado.

Os resultados na Figura 5 indicam estabilidade até 150 usuários. Após este limiar, observou-se um ponto de inflexão crítico: enquanto o throughput continuou a crescer,

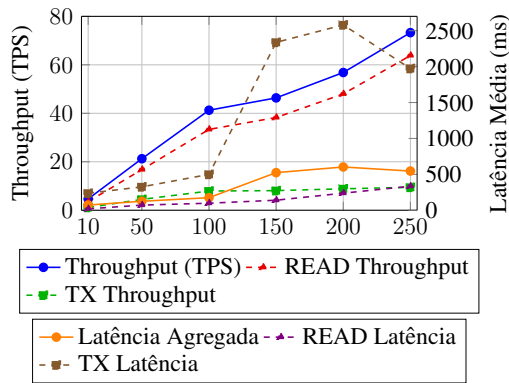


Figura 5. Throughput e latência do contrato `carbonRetirement.sol`

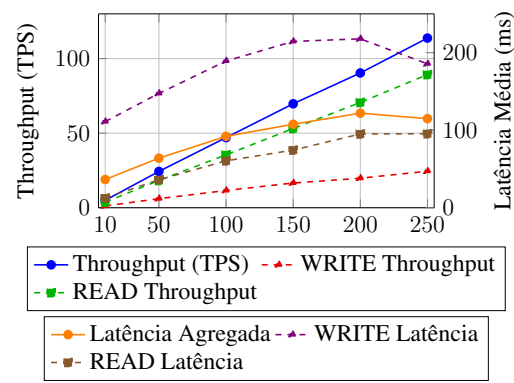


Figura 6. Throughput e latência do contrato `forestMonitor.sol`

a latência de operações de escrita (`retireCredit`) saltou de ≈ 100 ms para picos superiores a 2000 ms. Esse comportamento sugere esgotamento dos recursos de I/O ou da interface RPC do nó validador sob alta concorrência, diferenciando-se do gargalo de consenso observado no contrato anterior.

6. Discussão

Os resultados apresentados na Subseção 5.3 que todos os testes foram executados com sucesso, sem falhas ou casos ignorados, reforçando a correção funcional dos contratos. O contrato *CarbonRetirement* apresentou baixo consumo de *gas* e tempos reduzidos de execução, refletindo a simplicidade e eficiência das operações críticas de aposentadoria de créditos. Em contraste, o contrato *ForestMonitor* apresentou maior consumo de *gas* e maior tempo de execução, comportamento esperado em função da complexidade associada à criação, validação e persistência de registros florestais.

Os resultados presentes na Subseção 5.4 validam a arquitetura, demonstrando correlação linear de *throughput* e estabilidade até a marca de 150 usuários. Observou-se, contudo, uma assimetria crítica sob alta carga: enquanto a escrita manteve latência estável (≈ 120 ms) devido ao determinismo do consenso QBFT, a latência de leitura degradou-se severamente (> 2000 ms) no pico de 250 nós, indicando saturação de I/O na interface RPC. Apesar desse gargalo de consulta, o desempenho de escrita permanece aceitável para o mercado ambiental, onde a finalidade da transação prioriza a segurança jurídica sobre a alta frequência, atendendo aos requisitos operacionais de redes de consórcio.

No quesito integridade, a implementação do contrato *carbonRetirement* comprovou a eficácia da prevenção programática à dupla contagem. Diferente de sistemas centralizados sujeitos a falhas de reconciliação, a arquitetura garante a atomicidade das operações de aposentadoria: qualquer tentativa de reutilizar um *token* já consumido resulta em reversão imediata na EVM, independentemente da carga da rede. Isso transfere a garantia de unicidade do ativo da esfera administrativa para a camada protocolar, eliminando vetores de fraude por reemissão ou venda duplicada dentro do ecossistema permissionado.

Entretanto, os resultados experimentais validam a arquitetura, demonstrando correlação linear de *throughput* e estabilidade até a marca de 150 usuários. Observou-se, contudo, uma assimetria crítica sob alta carga: enquanto a escrita manteve latência estável

(≈ 120 ms) devido ao determinismo do consenso QBFT, a latência de leitura degradou-se severamente (> 2000 ms) no pico de 250 nós, indicando saturação de I/O na interface RPC. Apesar desse gargalo de consulta, o desempenho de escrita permanece aceitável para o mercado ambiental, onde a finalidade da transação prioriza a segurança jurídica sobre a alta frequência, atendendo aos requisitos operacionais de redes de consórcio.

7. Conclusão e Perspectivas Futuras

Este artigo propôs e validou uma arquitetura distribuída para o ciclo de vida de créditos de carbono REDD+ na Amazônia, fundamentada em uma rede blockchain permissionada e contratos inteligentes. A abordagem buscou endereçar o trilema de integridade, rastreabilidade e governança que desafia os mercados voluntários atuais, substituindo a confiança baseada em intermediários por garantias criptográficas auditáveis.

Os experimentos realizados confirmaram que a arquitetura é tecnicamente viável para operar como uma camada de liquidação e auditoria para ativos ambientais. A segregação entre o monitoramento geoespacial e a liquidação *on-chain* permitiu manter a integridade dos registros sem comprometer a eficiência da rede. Os testes de carga validaram a robustez do sistema, apresentando latências de escrita determinísticas (120 ms) e alta vazão para operações de leitura, características essenciais para ambientes de consórcio.

A implementação dos contratos inteligentes `forestMonitor` e `carbonRetirement` demonstrou eficácia na prevenção programática da dupla contagem, garantindo a atomicidade na aposentadoria dos créditos. O modelo de governança distribuída proposto oferece um caminho para reduzir a assimetria de informação entre os atores, embora sua efetividade final dependa da qualidade dos dados injetados na rede. As limitações identificadas residem, portanto, não na camada de registro distribuído, mas na dependência de oráculos externos e na latência de atualização das bases de dados oficiais.

Para evoluir a maturidade da solução em direção a um ambiente de produção, sugerem-se as seguintes linhas de investigação:

- **Automação de Oráculos:** Desenvolvimento de oráculos descentralizados para a ingestão contínua e auditável de dados de sensoriamento remoto, reduzindo a intervenção humana no processo de MRV;
- **Escalabilidade e Consenso:** Avaliação quantitativa do impacto do algoritmo de consenso QBFT em redes com maior número de nós validadores e análise de soluções de *Layer 2* para escalabilidade;
- **Interoperabilidade Regulatória:** Alinhamento dos metadados dos contratos com os padrões emergentes do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) e desenvolvimento de *bridges* para mercados públicos;
- **Validação em Campo:** Realização de projetos-piloto em iniciativas REDD+ reais para avaliar a usabilidade e a aderência do modelo de governança às dinâmicas sociais locais.

Em síntese, a arquitetura estabelece uma base técnica consistente, indicando que sistemas distribuídos podem atuar efetivamente como infraestrutura crítica para mercados de carbono, promovendo integridade técnica e confiança institucional através de código auditável.

Disponibilidade de Artefatos

Os arquivos referentes aos *scripts* e testes deste trabalho encontram-se no repositório pessoal do autor⁴.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio dos auxílios nº 403539/2020-0 e nº 400111/2023-3; e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), sob os auxílios 2023/00811-0, 2023/00673-7, 2021/00199-8 (CPE SMART-NESS), 2020/04031-1 e 2018/23097-3. Também contou com o apoio da Proesp/UFPA.

Referências

- Al Sadawi et al. 2021 Al Sadawi, A., Madani, B., Saboor, S., Ndiaye, M., and Abu-Lebdeh, G. (2021). A comprehensive hierarchical blockchain system for carbon emission trading utilizing blockchain of things and smart contract. *Technological Forecasting and Social Change*, 173:121124.
- Arshad et al. 2023 Arshad, A., Shahzad, F., Rehman, I. U., and Sergi, B. S. (2023). A systematic literature review of blockchain technology and environmental sustainability: Status quo and future research. *International Review of Economics & Finance*, 88:1602–1622.
- Boonrat et al. 2025 Boonrat, P., Hartmann, N., and Werapun, W. (2025). Tokenisation of forest carbon project: a blockchain-based approach for community engagement. *Journal of Tropical Ecology*, 41:e23.
- Buterin et al. 2013 Buterin, V. et al. (2013). Ethereum white paper. *GitHub repository*, 1(22-23):5–7.
- Caburlão and Rodrigues 2026 Caburlão, M. C. and Rodrigues, C. K. d. S. (2026). Blockchain in redd+ projects: Potential and challenges for transparency and efficiency in the forest carbon market. *FinTech and Sustainable Innovation*, pages 1–8.
- Di Pierro 2017 Di Pierro, M. (2017). What is the blockchain? *Computing in Science & Engineering*, 19(5):92–95.
- Edmonds et al. 2019 Edmonds, J., Forrister, D., Clarke, L., Clara, S. d., and Munnings, C. (2019). *The economic potential of article 6 of the Paris Agreement and implementation challenges*. International Emissions Trading Association.
- Ferreira et al. 2023 Ferreira, G., Brito, F. M. S., Correia, N. P. C. M., and Paes, J. B. (2023). Resíduos de biomassa florestal para produção de combustíveis sólidos compactados: uma revisão contextual. *Editora Licuri*, pages 142–152.
- Freedman et al. 2009 Freedman, B., Stinson, G., and Lacoul, P. (2009). Carbon credits and the conservation of natural areas. *Environmental Reviews*, 17(NA):1–19.
- Imprensa Nacional 2024 Imprensa Nacional (2024). Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024 - dou - imprensa nacional. <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-15.042-de-11-de-dezembro-de-2024-601124199>.

⁴<https://github.com/mattbasttos/forest-blockchain-contracts.git>

- Kirli et al. 2022 Kirli, D., Couraud, B., Robu, V., Salgado-Bravo, M., Norbu, S., Andoni, M., Antonopoulos, I., Negrete-Pincetic, M., Flynn, D., and Kiprakis, A. (2022). Smart contracts in energy systems: A systematic review of fundamental approaches and implementations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158:112013.
- Meitner 2024 Meitner, L. (2024). Voluntary carbon markets: A critical assessment. Technical report, Working Paper.
- Mitchell et al. 2017 Mitchell, A. L., Rosenqvist, A., and Mora, B. (2017). Current remote sensing approaches to monitoring forest degradation in support of countries measurement, reporting and verification (mrv) systems for redd+. *Carbon balance and management*, 12:1–22.
- Nakamoto 2008 Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system.
- Preziuso 2026 Preziuso, M. (2026). Tokenisation opportunities in voluntary carbon markets: A sectoral diagnostic. *Journal of Risk and Financial Management*, 19(1):28.
- SA and Severino 2019 SA, C. B. I. A. and Severino, L. (2019). Verification report jarí/pará redd+ project.
- Saberi et al. 2019 Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., and Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International journal of production research*, 57(7):2117–2135.
- Santana and Albareda 2022 Santana, C. and Albareda, L. (2022). Blockchain and the emergence of decentralized autonomous organizations (daos): An integrative model and research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, 182:121806.
- Sorensen 2023 Sorensen, D. (2023). Tokenized carbon credits. *Ledger*, 8.
- United Nations 2025 United Nations (2025). UNFCCC. Disponível em: <https://unfccc.int/j>. Acesso em: 11 jun. 2025.
- Uruatopera 2025 Uruatopera (2025). Ong denuncia violações de direitos no sistema de redd+ do Pará. <https://uruatopera.com/ong-denuncia-violacoes-de-direitos-no-sistema-de-redd-do-para/> Acesso em: 26 jun. 2025.
- Woo et al. 2021 Woo, J., Fatima, R., Kibert, C. J., Newman, R. E., Tian, Y., and Srinivasan, R. S. (2021). Applying blockchain technology for building energy performance measurement, reporting, and verification (mrv) and the carbon credit market: A review of the literature. *Building and Environment*, 205:108199.
- Yang and Park 2025 Yang, D. and Park, H. (2025). Integrity challenges in carbon markets: Comparing unfccc and voluntary redd+ verification in the amazon biome. *Environmental Science & Policy*, 169:104080.