



ARTIGO DE PESQUISA/RESEARCH PAPER

# Análise de Projetos REDD+ com Gestão de Créditos de Carbono sob Blockchain

## Analysis of REDD+ Projects with Carbon Credit Management under Blockchain

Marcela Ceschim Caburlão  [Universidade Federal do ABC | m.ceschim@aluno.ufabc.edu.br ]

Carlo Kleber da Silva Rodrigues  [Universidade Federal do ABC | carlo.kleber@ufabc.edu.br ]

 Universidade Federal do ABC, Av. dos Estados, 5001, Bangu, Santo André - SP, 09210-580, Brazil

**Resumo.** A credibilidade dos projetos de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+) depende de mecanismos de monitoramento, relatoria e verificação (MRV) transparentes. Para resolver esta questão, a tecnologia Blockchain tem sido considerada em novos projetos REDD+, uma vez que pode aumentar a confiança, a rastreabilidade e a automação para a gestão de créditos de carbono. Neste contexto, este artigo analisa comparativamente três projetos REDD+ com gestão de créditos de carbono sob Blockchain: Ambify, MCO<sub>2</sub> e TreeCycle. Esta análise considera três métricas de desempenho: tráfego médio consumido para finalização de blocos, tempo médio de finalização de blocos, e segurança sistêmica. As duas primeiras métricas são mensuradas a partir de simulações computacionais, enquanto que a terceira métrica é avaliada teoricamente. Os resultados finais demonstram que o projeto Ambify é o de melhor desempenho global, tornando a sua arquitetura a mais competitiva dentre os três projetos analisados. Como principal contribuição, esta pesquisa revela subsídios teóricos e práticos que podem ser utilizados para a análise e desenvolvimento de novos projetos REDD+. Conclusões e trabalhos futuros finalizam este artigo.

**Abstract.** The credibility of Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD+) projects depends on the implementation of transparent monitoring, reporting, and verification (MRV) mechanisms. To address this issue, Blockchain technology has been considered in new REDD+ projects, as it may increase trust, traceability, and automation for carbon credit management. In this context, this paper comparatively analyzes three REDD+ projects with carbon credit management on Blockchain: Ambify, MCO<sub>2</sub> and TreeCycle. This analysis considers three performance metrics: average traffic consumed for block completion, average block completion time, and systemic security. The first two metrics are measured from computational simulations, while the third metric is evaluated theoretically. The final results demonstrate that the Ambify project has the best overall performance, making its architecture the most competitive among the three projects analyzed. As its main contribution, this research reveals theoretical and practical subsidies that can be used for the analysis and development of new REDD+ projects. Conclusions and future work conclude this paper.

**Palavras-chave:** REDD, Blockchain, Crédito de Carbono, Mercado de Carbono

**Keywords:** REDD, Blockchain, Carbon Credit, Carbon Market

**Recebido/Received:** 03 July 2025 • **Aceito/Accepted:** 24 October 2025 • **Publicado/Published:** 06 November 2025

## 1 Introdução

Este artigo analisa comparativamente três projetos de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+): Ambify [Ambipar Group, 2021], MCO<sub>2</sub> [Moss.Earth, 2020] e TreeCycle [Global Tree Project, 2019]. Estes projetos foram escolhidos para esta pesquisa devido à completude de suas documentações técnicas e nível de maturidade de emprego já alcançado [Kotsialou *et al.*, 2022; Marke *et al.*, 2022; Neves, 2025].

Os três projetos acima implementam a gestão de créditos de carbono por meio da tecnologia Blockchain [Marke *et al.*, 2022]. O uso desta tecnologia permite a criação de um banco de dados descentralizado, imutável e auditável, viabilizando sistemas transparentes e seguros para a gestão de créditos de carbono. Isso possibilita uma validação descentralizada dos dados submetidos, acelerando o processo de emissão de créditos de carbono, diminuindo seu custo e aumentando a confiança dos compradores na procedência dos créditos [Howson *et al.*, 2019; Kotsialou *et al.*, 2021].

A análise comparativa conduzida nesta pesquisa avalia três métricas de desempenho: *tráfego médio para finalização*

*de blocos, tempo médio de finalização de blocos, e segurança sistêmica.* Essas métricas estão definidas na Tabela 1. Conjuntamente, essas métricas são capazes de promover a compreensão da eficiência, escalabilidade e segurança dos projetos. As duas primeiras métricas são mensuradas a partir de simulações computacionais, enquanto que a terceira métrica é avaliada teoricamente. Como principal contribuição, esta pesquisa revela subsídios teóricos e práticos que podem ser utilizados para o desenvolvimento de novos projetos REDD+.

O restante deste artigo está organizado como segue. A Seção 2 traz a fundamentação teórica desta pesquisa, contemplando mercado de carbono, projeto REDD+ e tecnologia Blockchain. A Seção 3 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 4 descreve os três projetos sob análise. A Seção 5 traz os experimentos e discute os resultados. Por fim, conclusões e direcionamentos para trabalhos futuros estão na Seção 6. Além disso, para simplificar a leitura, a Tabela 2 apresenta as principais siglas utilizadas neste manuscrito.

Tabela 1. Métricas de desempenho avaliadas.

Métrica	Símbolo	Unidade de medida	Definição
Tempo médio para finalização de bloco	$T_b$	s / bloco	Tempo necessário para que um bloco seja finalizado na rede Blockchain, em segundos, medido a partir do momento em que o bloco é proposto até receber votos ou confirmações suficientes para ser considerado imutável.
Tráfego médio para finalização de bloco	$C_b$	MB / bloco	Tráfego total da rede gerado durante o processo de finalização de um bloco, em MB. Essa métrica soma o tamanho dos dados transmitidos para confirmações, propagação de blocos e outras mensagens relacionadas.
Segurança sistêmica	$S_s$	Teórico	Medida pelo grau de respeito aos princípios de confidencialidade, integridade e disponibilidade (CIA) e de resistência da rede a ataques maliciosos, avaliado pela tolerância a falhas bizantinas do algoritmo de consenso.

Tabela 2. Siglas.

Siglas	Significado
BFT	Tolerância a falhas bizantinas ( <i>Byzantine Fault Tolerance</i> )
BSC	Binance Smart Chain
CIA	Confidencialidade, integridade e disponibilidade ( <i>Confidentiality, Integrity, Availability</i> )
DLT	Tecnologia de registros distribuídos ( <i>Distributed Ledger Technology</i> )
EDP	Entidade Operacional Designada
GEE	Gases de Efeito Estufa
JABS	<i>Just Another Blockchain Simulator</i>
MCO <sub>2</sub>	MOSS Carbon Credit
MRV	Monitoramento, Relatoria e Verificação das reduções de emissões
MVC	Mercado Voluntário de Carbono
PI	Padrão Internacional
PoS	<i>Proof-of-Stake</i>
PoSA	<i>Proof of Staked Authority</i>
PoW	<i>Proof-of-Work</i>
REDD+	Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal
RVE	Reduções Verificadas de Emissões
TPS	Transações por segundo

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 Mercado de carbono

Diante do agravamento das crises climáticas globais, intensifica-se a necessidade de iniciativas que acelerem a transição para modos de desenvolvimento mais sustentáveis, incluindo a adoção de metas de redução de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Contudo, em muitos setores industriais ainda existem limitações tecnológicas para reduzir emissões de GEE em escala comercial. Essa limitação evidencia a importância de mecanismos de compensação de emissões, entre os quais se destaca o mercado de carbono [Kotsialou *et al.*, 2022; Marke *et al.*, 2022; Vilkov and Tian, 2023].

O mercado de carbono é o ambiente sistematizado de negociação de créditos de carbono, unidades intangíveis que representam o equivalente a uma tonelada de CO<sub>2</sub> evitada ou removida da atmosfera. Esse ambiente opera como um

sistema de compensação, onde entidades que removem GEE da atmosfera vendem créditos para empresas emissoras. Em jurisdições com regulamentação que impõe limites de emissões, muitos setores industriais dependem do mercado de carbono para atingir cotas de emissões. Mesmo onde não há obrigatoriedade, muitas empresas sustentáveis utilizam o Mercado Voluntário de Carbono (MVC) para outros objetivos corporativos, tais como: obtenção de certificações climáticas; atendimento a demandas de *stakeholders*; e preparação para futuras regulamentações. Essas empresas utilizam o MVC visando aumentar o seu valor de mercado, devido ao reconhecimento perante os consumidores finais [Aguiar, 2018; Howson, 2019; Kotsialou *et al.*, 2021, 2022].

Para garantir a legitimidade dos créditos de carbono comercializados, foi estabelecida uma série de normas e Padrões Internacionais (PIs) para serem seguidos pelos projetos de Reduções Verificadas de Emissões (RVE). Cada PI fornece me-

tecnologias para monitoramento, relatoria e verificação (MRV) das reduções de emissões, exigindo auditorias independentes para emissão de créditos. Uma das PIs mais utilizadas no Brasil é a *Verified Carbon Standard* (VCS). Os projetos RVE, por sua vez, são desenvolvidos por uma série de atores, incluindo empresas privadas, cooperativas, comunidades locais, organizações não governamentais e governos nacionais ou subnacionais. Eles são categorizados pelo seu tipo de atividade de mitigação, conhecidos como escopos setoriais [Aguilar, 2018; Neves, 2025].

Os projetos RVE enfrentam múltiplos desafios operacionais: custos transacionais elevados, complexidade metodológica e riscos de assimetria informacional. Atualmente, a maior parte das validações dos processos de MRV é realizada manualmente, por meio de documentações submetidas para uma Entidade Operacional Designada (EDP), o que abre margem para erros humanos ou fraudes. Outro risco é a dupla contagem de créditos, em que um projeto submete a mesma quantidade de RVE em diferentes documentos para tentar dobrar seus créditos de carbono e obter mais recursos com a dupla venda [Aguilar, 2018; Vilkov and Tian, 2023].

O diagrama da Figura 1 ilustra o processo de gestão de créditos de carbono, desde a concepção do projeto RVE por uma entidade privada ou governamental, até a compensação das emissões com os créditos comercializados. No diagrama, a EDP depende do país que executa os projetos e do setor ambiental no qual eles se enquadram. A Verra, por exemplo, é a EDP brasileira que valida e certifica projetos do setor florestal brasileiro [Aguilar, 2018; Neves, 2025]. Os passos destacados em verde se referem às etapas documentais, onde residem os principais obstáculos para o devido controle dos créditos de carbono.

## 2.2 Projetos REDD+

Os projetos REDD+ se constituem em um dos mais importantes projetos de RVE desenvolvidos no Brasil. Esses projetos visam a conservação e o reflorestamento de florestas tropicais, integrando incentivos financeiros à preservação de ecossistemas críticos para o equilíbrio climático. Esse tipo de projeto demanda complexos sistemas de MRV para comprovar a adicionalidade e permanência dos estoques de carbono florestal. Geralmente implementados por proprietários de terras privadas ou governos subnacionais (departamentos, províncias ou regiões, dependendo do país), muitos desses projetos dependem da renda gerada pela venda de créditos para se manterem financeiramente viáveis a longo prazo [Howson *et al.*, 2019; Neves, 2025].

O processo de MRV dos projetos REDD+ inicia-se com o estabelecimento da linha de base, envolvendo modelagem de cenários de referência, cálculo preciso do estoque inicial de carbono e análise criteriosa de adicionalidade. Esta fase prova que as reduções de emissões não ocorreriam na ausência do projeto. A fase de monitoramento contínuo combina tecnologias de sensoriamento remoto com verificações presenciais. A verificação, realizada por organismos acreditados, garante a permanência do CO<sub>2</sub>, ausência de deslocamento indesejado de atividades poluidoras e conformidade com os protocolos técnicos [Aguilar, 2018; Marke *et al.*, 2022; Neves, 2025].

Além dos obstáculos comuns a todos os RVE, os projetos REDD+ enfrentam dificuldades particulares. As incertezas

metodológicas nas estimativas de estoque de carbono, combinadas com os custos operacionais de MRV, os conflitos fundiários e os riscos de reversão, representam ameaças constantes à viabilidade dos projetos. Essas ameaças comprometem a confiança de possíveis compradores dos créditos de carbono gerados, dificultando a obtenção de fundos constantes para manter esses projetos a longo prazo [Howson *et al.*, 2019; Kotsialou *et al.*, 2022; Vilkov and Tian, 2023].

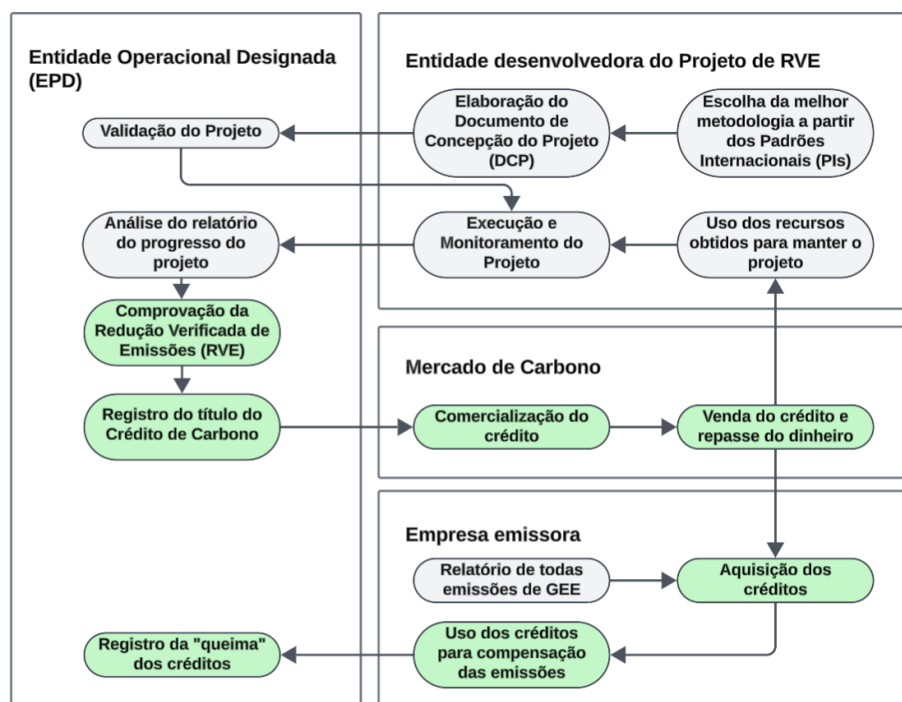
## 2.3 Tecnologia Blockchain

A tecnologia Blockchain permite a construção de bases de dados distribuídas, onde os dados são guardados em réplicas físicas dentro de computadores, i.e., nós processadores, interligados, formando uma rede com topologia *peer-to-peer*. Um sistema baseado em Blockchain possui as seguintes principais propriedades: consenso distribuído, que elimina a validação de uma única entidade centralizada; imutabilidade, que confere maior auditabilidade e segurança; rastreabilidade e não repúdio, devido à obrigatoriedade de assinatura pública para todos os registros; e controle e transparência, que permite que todos os nós da rede possam validar os registros [Reinsberg, 2019; Marke *et al.*, 2022; Rodrigues, 2024].

Em sistemas baseados em Blockchain, os algoritmos de consenso funcionam como protocolos que estabelecem o acordo entre nós distribuídos sobre o estado válido das transações. A seleção do algoritmo de consenso influencia diretamente três características do sistema: escalabilidade, segurança e descentralização. O primeiro algoritmo de consenso criado, *Proof of Work* (PoW), requer que mineradores solucionem desafios criptográficos para validar blocos, com todos os outros nós da rede validando a solução encontrada, oferecendo alta segurança às custas de elevado consumo energético. Outro algoritmo amplamente utilizado é o *Proof of Stake* (PoS), que seleciona validadores com base na quantidade de recursos (*stake*) que os nós possuem, apresentando maior eficiência energética. Para mitigar a centralização gerada pelo PoS, surgiram diversas variações desse algoritmo, como o *Proof of Staked Authority* (PoSA), que combina elementos de PoS com um sistema de reputação para validadores pré-aprovados, buscando um equilíbrio entre descentralização e desempenho [Werth *et al.*, 2023; Bamakan *et al.*, 2020; Rodrigues, 2024].

Outra característica da tecnologia Blockchain são os contratos inteligentes (do inglês, *smart contracts*), programas que implementam acordos entre partes sem necessidade de intermediários. Esses programas imitam contratos em papel, sendo ativados automaticamente em condições pré-definidas e permitindo uma grande gama de aplicações. Para a comercialização de créditos de carbono, o uso de *smart contracts* tem o potencial de acelerar a circulação dos créditos, diminuir custos operacionais e oferecer maior transparência e segurança para os envolvidos [Howson *et al.*, 2019; Reinsberg, 2019; Marke *et al.*, 2022].

Finalmente, na tecnologia Blockchain, todos os dados são armazenados em blocos de transações interligados, formando uma lista encadeada, onde cada bloco referencia o anterior por meio de *hashes* criptográficos. Uma plataforma Blockchain compreende a infraestrutura completa que possibilita o desenvolvimento e execução de aplicações descentralizadas (DApps), contratos inteligentes e ativos digitais.



**Figura 1.** Diagrama de gestão de créditos de carbono. Em verde, estão destacadas as etapas documentais do processo.

Essas plataformas variam em suas arquiteturas, podendo ser permissionadas ou não permissionadas, cada uma com características específicas para diferentes casos de uso [Rodrigues, 2024; Bamakan *et al.*, 2020].

### 3 Trabalhos Relacionados

A seguir são discutidos alguns estudos recentes na literatura sobre projetos REDD+ que utilizam Blockchain. O objetivo é permitir ao leitor ter uma visão geral do estado da arte desta linha de pesquisa. Esses estudos estão sintetizados na Tabela 3, a qual destaca este trabalho em sua última linha.

Em [Howson *et al.*, 2019], os autores focam em como a implementação de sistemas baseados em Blockchain pode solucionar problemas de projetos REDD+. Em específico, os seguintes problemas são analisados: investimento limitado, falta de transparência, distribuição inadequada de recursos e dificuldade em garantir os direitos de comunidades tradicionais e indígenas. Os autores concluem que, por causa das principais características da tecnologia Blockchain, a sua implementação tem potencial de propiciar maior confiança de investidores, melhorar o monitoramento das florestas e possibilitar a participação direta dessas comunidades no mercado de carbono, possibilitando que se beneficiem diretamente dos fundos arrecadados pela venda de créditos de carbono. Todavia, não há detalhamento das implementações tecnológicas.

Em [Kotsialou *et al.*, 2021], os autores exploram as principais vantagens da aplicação de sistemas baseados em Blockchain em projetos REDD+, particularmente aqueles que não contam com financiamento de entidades governamentais. As vantagens são similares às citadas por Howson *et al.* [2019]. Porém, o foco maior do artigo são as dificuldades de se implementar esses sistemas de forma a garantir de fato o respeito dos direitos das comunidades tradicionais e indígenas. Como possível solução, os autores sugerem a criação de um sistema

de análise de riscos e de notificação dos compradores dos créditos de empresas que não respeitem esses direitos. Por fim, eles concluem que muito pouco foi estudado sobre esse tema na literatura, sendo necessária a criação de análises mais aprofundadas. Apesar da crítica, não há detalhamento das implementações tecnológicas.

Em [Kotsialou *et al.*, 2022], os autores analisam os impactos positivos da tecnologia Blockchain em projetos REDD+. Para isso, são considerados 11 projetos privados em diferentes estágios de desenvolvimento. Em sua maioria, eles usam tecnologia Blockchain para gerar *tokens* que representam créditos de carbono ou recursos ambientais. Em especial, o projeto TreeCycle vende *tokens* chamados TREE, com cada um deles representando uma árvore de eucalipto plantada no Paraguai. Ao comprar um TREE, os investidores fornecem o dinheiro necessário para plantar e cuidar dessa árvore, colhendo, ao longo do tempo, os lucros gerados por ela. Os autores concluem que, apesar da crescente quantidade de projetos privados na área, existe uma dificuldade de validar quais deles estão certificando créditos de carbono corretamente, devido a uma falta de transparência quanto à metodologia utilizada. Como nos outros artigos, os autores se limitam a uma análise a nível de regra de negócio, carecendo de um detalhamento técnico de cada projeto.

Em [Marke *et al.*, 2022], os autores explicam como sistemas baseados em tecnologias de registros distribuídos (do inglês, *Distributed Ledger Technologies - DLT*) podem ajudar a gerir os mercados de carbono. Dentre os projetos analisados, os autores consideram o projeto REDD+ MCO<sub>2</sub> da empresa MOSS.Earth, que é o único desse tipo. A partir da plataforma Ethereum, esse projeto criou a criptomoeda MCO<sub>2</sub>, em que cada criptomoeda representa um crédito de carbono oriundo de projetos existentes na floresta amazônica. Os autores concluem que os sistemas baseados em DLT têm o potencial de reinventar o processo pelo qual créditos de carbono são

Tabela 3. Síntese dos trabalhos relacionados.

Referência	Tema	Caracterização
[Howson <i>et al.</i> , 2019]	Benefícios do uso da tecnologia Blockchain em projetos REDD+.	Não há experimentos, restringindo-se a aspectos teóricos.
[Kotsialou <i>et al.</i> , 2021]	Implementação de projetos que respeitem de fato os direitos das comunidades locais.	Não há experimentos, restringindo-se a aspectos teóricos.
[Kotsialou <i>et al.</i> , 2022]	Impactos positivos da tecnologia Blockchain em projetos REDD+ privados.	Não há experimentos, restringindo-se a aspectos teóricos.
[Marke <i>et al.</i> , 2022]	Aplicação de DLTs em projetos do mercado de carbono.	Restringe-se a aspectos de requisitos de negócio e proposição de arquitetura geral, sem validação.
[He and Turner, 2022]	Revisão teórica da literatura sobre o uso de Blockchain na área florestal, incluindo projetos REDD+.	Não há detalhamento de aspectos tecnológicos, restringindo-se apenas a aspectos teóricos.
[Vilkov and Tian, 2023]	Revisão teórica da literatura sobre projetos do mercado de carbono, incluindo projetos REDD+.	Não há experimentos, restringindo-se a aspectos teóricos.
[Neves, 2025]	Abordagem qualitativa para avaliação de projetos REDD+ com uso de Blockchain.	Não há experimentos, restringindo-se a aspectos teóricos.
Esta pesquisa	Análise de aplicações Blockchain em projetos REDD+.	Discussão teórica e experimentos.

gerados e vendidos. Apesar disso, os autores não apresentam experimentos práticos nem comparações teóricas entre diferentes tipos de DLT, focando em definir requisitos de negócio e em propor uma arquitetura geral para a implementação do sistema.

Em [He and Turner, 2022], os autores realizam uma revisão de literatura dos estudos recentes de aplicação da tecnologia Blockchain na área florestal. A partir da revisão, verificou-se que a maior área de aplicação explorada é a de gestão florestal, formada principalmente por projetos REDD+. As conclusões do estudo indicam que a tecnologia Blockchain tem um grande potencial para aumentar a transparência e a eficiência nos projetos REDD+, principalmente quando integrada a outras tecnologias como Internet das Coisas (do inglês, *Internet of Things* - IoT) e Inteligência Artificial. Além disso, o estudo destaca a necessidade de pesquisas mais aprofundadas para compreender os riscos e ameaças associados a cada aplicação em projetos REDD+. Não há detalhamento de aspectos tecnológicos, restringindo-se apenas a aspectos teóricos.

Em [Vilkov and Tian, 2023], os autores realizam uma revisão da literatura, considerando estudos existentes sobre a aplicação da tecnologia Blockchain em projetos das mais diversas áreas do mercado de carbono, incluindo projetos REDD+. Suas descobertas indicam que os projetos REDD+ são um dos que mais se beneficiam das vantagens dessa tecnologia, pois necessitam de uma gestão eficiente e transparente para serem bem-sucedidas. Os autores também apontam que as características de descentralização e imutabilidade da tecnologia Blockchain podem resolver os problemas atuais de *dupla contagem* e de *dupla venda*, que ocorrem com maior frequência em projetos REDD+. Por fim, os autores concluem

a análise levantando pontos que precisam ser aprofundados, como avaliar a qualidade dos projetos sendo lançados com sistemas baseados em Blockchain.

Em [Neves, 2025], o autor realiza uma revisão bibliográfica e documental para analisar o impacto da aplicação da tecnologia Blockchain nos projetos REDD+, tendo como referência o Sistema de Incentivo a Serviços Ambientais (SISA), do Estado do Acre. Essa análise é realizada a partir de revisão bibliográfica e de análise de documentações. Dentre os projetos analisados, encontra-se a Ambify, uma plataforma de compensação de carbono que transforma créditos REDD+ certificados no Brasil em *tokens* fundíveis. O autor conclui que o uso da tecnologia Blockchain pode proporcionar uma abordagem mais holística e transparente para o ecossistema de créditos de carbono, caso seja corretamente aplicada por desenvolvedores que entendem as necessidades dos projetos REDD+ e do mercado de carbono.

Ante o exposto e a partir da síntese apresentada na Tabela 3, é possível dizer que os estudos relacionados à aplicação de Blockchain em projetos REDD+ se direcionam quase que exclusivamente para análises teóricas e de requisitos de negócio. Dito isso, não são apresentadas metodologias sólidas para avaliação de desempenho prático das implementações existentes. Nesse sentido, este trabalho de pesquisa tem seu ineditismo estabelecido por realizar uma avaliação comparativa de desempenho, usando um estudo de caso realista, entre três projetos promissores: MCO<sub>2</sub>, TreeCycle e Ambify. Essas três iniciativas privadas estão situadas na América do Sul, com duas delas envolvendo projetos REDD+ brasileiros. Elas foram escolhidos devido à sua documentação transparente, que detalha a metodologia adotada e fornece uma visão geral da tecnologia Blockchain utilizada.



## 4 Projetos REDD+ sob Análise

Como características comuns, os projetos MCO<sub>2</sub>, TreeCycle e Ambify utilizam a tecnologia Blockchain para geração de *tokens* que representam recursos gerados pelos projetos REDD+ envolvidos, sejam eles créditos de carbono ou ativos físicos. As tecnologias Blockchain usadas em cada projeto foram construídas dentro de plataformas Blockchain já existentes, facilitando transações de troca dos *tokens* com criptomoedas construídas na mesma plataforma.

As plataformas utilizadas são todas resistentes a circuitos integrados de aplicação específica (ASIC - do inglês *Application-Specific Integrated Circuit*), garantindo maior descentralização e acessibilidade na validação de transações. Outra característica em comum é a latência de bloco probabilística, o que implica que um bloco continua sujeito a alterações por um determinado tempo após sua adição à Blockchain, até que a rede chegue a um consenso sobre o estado definitivo desse bloco.

Cada um dos projetos supracitados é apresentado a seguir, ressaltando especialmente a concepção geral e o detalhamento técnico da plataforma utilizada.

### 4.1 MOSS Carbon Credit (MCO<sub>2</sub>)

O MOSS Carbon Credit (MCO<sub>2</sub>) é um projeto pioneiro no mercado de créditos de carbono tokenizados, criado em 2020 pela empresa MOSS.Earth. O projeto criou o *token* MCO2 (para *token*, o numeral 2 não é subscrito), o primeiro lastreado em créditos de carbono. O MCO<sub>2</sub> opera na plataforma Blockchain Ethereum e segue o padrão ERC-20, podendo ser trocado facilmente com outros *tokens* ou criptomoedas que seguem esse mesmo padrão. Cada *token* MCO2 representa um crédito de carbono, que por sua vez equivale a uma tonelada de carbono neutralizada. Ao adquirir MCO<sub>2</sub>, os usuários podem *queimar* (retirar) os *tokens* para receber certificados de compensação, através da plataforma oficial da empresa, compensando suas emissões de gases de efeito estufa [Moss.Earth, 2020].

Atualmente, a empresa MOSS.Earth compra créditos de carbono no MVC e os transforma em *tokens* MCO2. Porém, o plano da empresa é automatizar todo o processo de certificação de créditos em projetos REDD+, transformando-os automaticamente em MCO2. Para isso, a empresa está trabalhando no seu segundo produto, MOSS Forest, que foca em digitalizar e automatizar boa parte dos processos para certificar, medir, relatar e verificar digitalmente projetos REDD+ [Moss.Earth, 2020]. O processo atual de gestão de créditos de carbono é ilustrado pela Figura 2.

O Ethereum é uma das plataformas mais consolidadas para *tokens* e contratos inteligentes, oferecendo um ecossistema robusto e seguro para aplicações descentralizadas. Antes da transição para Ethereum 2.0, em 2022, o Ethereum utilizava o algoritmo de consenso PoW. Com esse algoritmo, a plataforma suportava cerca de 15 transações por segundo, com tempo de criação de bloco de aproximadamente 15 segundos, dependendo do congestionamento. A nova versão do Ethereum fez a troca do algoritmo para o PoS, permitindo que a escalabilidade e a eficiência energética do Ethereum melhorassem significativamente. Ainda não foram realizados estudos sobre a velocidade da plataforma após a troca de al-

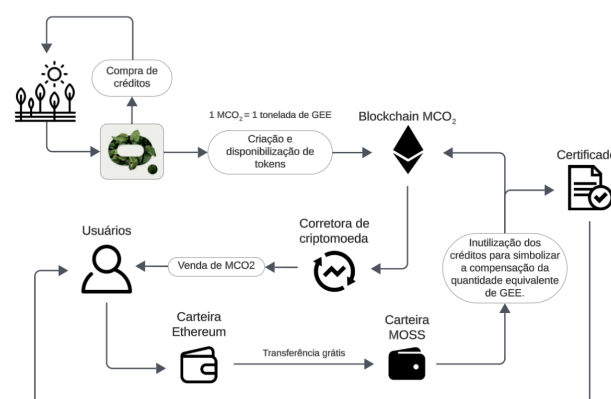


Figura 2. Processo de criação e venda de *tokens* MCO<sub>2</sub>.

goritmo, porém houve uma redução comprovada de 99,5% no consumo de energia da rede [Werth *et al.*, 2023; Pervez *et al.*, 2018].

### 4.2 TreeCycle

O TreeCycle é um projeto que utiliza a tecnologia Blockchain para geração de *tokens*, chamados TREE, que representam árvores de eucalipto reais localizadas no Paraguai. Ao comprar um *token* TREE, o investidor está fornecendo o dinheiro necessário para plantar e manter uma árvore de eucalipto, no projeto de reflorestamento da empresa. Todos os ganhos dessa árvore investida são compartilhados com os investidores ao longo dos anos, prevendo retornos anuais desde o ano do plantio até o ano planejado para a colheita da árvore representada pelo *token* TREE adquirido [Global Tree Project, 2019]. Esse processo é detalhado na Figura 3.

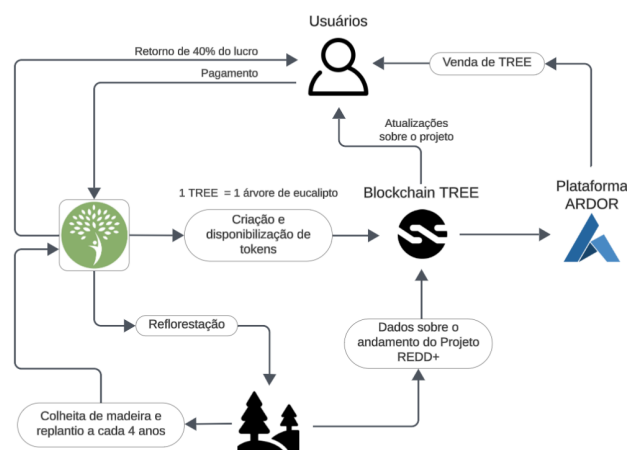


Figura 3. Processo de criação e venda de *tokens* TREE.

O projeto utiliza a plataforma Blockchain IGNIS, uma *child-chain* da Blockchain ARDOR, a qual, por sua vez, é baseada na plataforma NXT. A ARDOR preserva a maioria das características da plataforma NXT, com seu maior diferenciador sendo a possibilidade de criação de plataformas filhas dentro da Blockchain ARDOR. A arquitetura da ARDOR consiste em uma cadeia principal (*parent-chain*) responsável pela segurança e processamento, enquanto as cadeias secundárias (*child-chains*), como a IGNIS, permitem a customização para projetos específicos, garantindo conformidade com a lógica de negócio de cada projeto enquanto se preserva a segurança da *parent-chain*. Dentre todas as *child-chains*, a IGNIS é a única que possui todas as funções da *parent-chain* ARDOR.

Todas as outras restringem o acesso a funções específicas disponibilizadas pela ARDOR, de acordo com a regra de negócio que cada uma atende [Jelurida Swiss SA, 2017].

A plataforma NXT foi criada em 2013 e foi a primeira a empregar o algoritmo PoS. Ela suporta aproximadamente 100 transações por segundo e possui tempo de geração de blocos de aproximadamente 60 segundos, o que pode resultar em tempos de confirmação mais lentos em comparação com outras plataformas mais modernas [Pervez *et al.*, 2018]. No entanto, a plataforma compensa essa limitação utilizando o algoritmo de consenso PoS desde sua concepção, que consome menos energia que o PoW e se alinha com os objetivos de sustentabilidade ambiental do projeto TreeCycle [Global Tree Project, 2019].

### 4.3 Ambify

O Ambify é um projeto baseado na Binance Smart Chain (BSC), uma tecnologia Blockchain conhecida por sua alta escalabilidade e baixos custos de transação. O projeto fornece uma plataforma para a neutralização de créditos de carbono, permitindo a criação, transferência e neutralização de *tokens* ABFY. Esse *token* é utilizado para representar créditos de carbono certificados, garantindo uma comercialização segura e evitando a dupla contagem de créditos. Cada *token* ABFY é lastreado em créditos de carbono previamente adquiridos, permitindo que os usuários neutralizem sua pegada de carbono de forma verificável, como mostrado na Figura 4. Além disso, o Ambify possui o diferencial de permitir o fracionamento desses créditos. Cada ABFY representa um quilo de emissões de gases de efeito estufa evitada, um milésimo de um crédito de carbono, permitindo que empresas menores e pessoas comuns possam compensar sua pegada de carbono com praticidade [Ambipar Group, 2021].

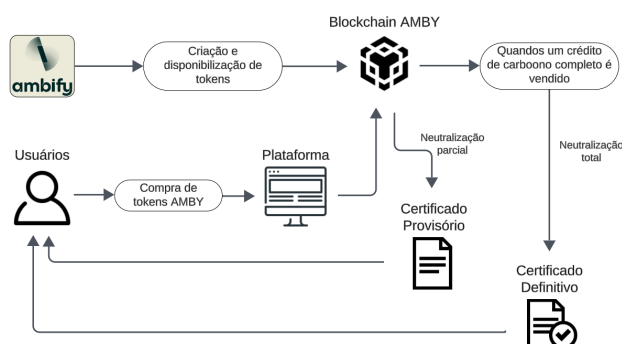


Figura 4. Processo de compra e neutralização de *tokens* na Ambify.

A plataforma BSC, base do ABFY, permite a criação eficiente de *tokens* e contratos inteligentes. Também é compatível com o padrão BEP-20, que exerce função similar ao padrão ERC-20 seguido pelo token MCO2, permitindo que os *tokens* ABFY sejam trocados facilmente por outros que usam o BEP-20. Essa Blockchain suporta cerca de 160 transações por segundo, com tempo de geração de blocos de aproximadamente 3 segundos, o que torna a plataforma a mais rápida entre as Blockchains analisadas. O algoritmo de consenso utilizado pela BSC é o PoSA, que combina elementos de *Proof-of-Authority* (PoA) e PoS [Werth *et al.*, 2023].

## 5 Avaliação de Desempenho

Nesta seção, são avaliados comparativamente os projetos MCO<sub>2</sub>, TreeCycle e Ambify no contexto de MVC. Inicialmente, é feita uma discussão comparativa considerando trabalhos anteriores da literatura. Em seguida, são realizados experimentos considerando as métricas definidas na Tabela 1. Adicionalmente, é feita uma análise teórica da segurança sistêmica de cada um dos projetos. Por fim, as principais limitações desta pesquisa encerram esta seção.

### 5.1 Avaliação - Trabalhos da Literatura

Com base nas documentações de Ambipar Group [2021], Moss.Earth [2020] e Global Tree Project [2019], a Tabela 4 sintetiza os dados técnicos gerais de cada projeto, incluindo suas respectivas plataformas Blockchain e seus algoritmos de consenso. É evidenciada a transição do Ethereum para PoS, que reduziu o consumo de energia da plataforma em 99,5%, ao custo de uma maior centralização. Pode-se ver também que são projetos bem recentes e propostos praticamente no mesmo ano, mas que diferem um do outro nos demais atributos técnicos.

Por sua vez, as Tabelas 5 e 6 complementam a análise, detalhando as características de cada plataforma e algoritmo de consenso utilizado, conforme explicado a seguir. A Tabela 5, baseada nos trabalhos de Pervez *et al.* [2018] e Werth *et al.* [2023], apresenta duas métricas: capacidade de transações por segundo (TPS), que representa a capacidade máxima de transações que a Blockchain consegue processar por segundo; e o tempo de bloco, que indica o número de segundos necessários para criar um bloco. Além disso, a Tabela 6, baseada nos dados dos trabalhos de Bamakan *et al.* [2020] e Werth *et al.* [2023], traz informações dos algoritmos de consenso sob quatro aspectos: taxa de transferência, que reflete a eficiência na validação de operações; o grau de descentralização da rede; a tolerância a falhas bizantinas (do inglês, *Byzantine Fault Tolerance* - BFT), que determina a porcentagem de nós maliciosos ou com mau funcionamento necessários para prejudicar o funcionamento correto da rede; e o consumo energético, fator determinante para a sustentabilidade da solução.

A partir dos dados dessas tabelas, observa-se que o Ambify, desenvolvido na BSC, destaca-se pela alta escalabilidade, com capacidade para 160 transações por segundo (TPS) e tempo de criação de blocos de 3 segundos, viabilizando transações rápidas e de baixo custo. Essa característica é estratégica para atrair pequenas empresas e usuários diversificados, alinhando-se ao propósito do projeto. Seu algoritmo PoSA combina eficiência energética e desempenho, mas à custa de maior centralização, já que a validação depende de um grupo restrito de nós autorizados. Embora essa abordagem favoreça a praticidade, a menor BFT pode representar riscos de segurança em longo prazo.

Em contraste, o MCO<sub>2</sub>, baseado no Ethereum, prioriza descentralização e segurança, em detrimento da escalabilidade e eficiência energética. Com apenas 15 TPS e tempo de bloco de 15 segundos, sua performance é inferior à do Ambify. Inicialmente operando com PoW, o Ethereum consumia quantidades significativas de energia. Após a transição para PoS, houve uma redução de 99,5% no consumo, mas com aumento da centralização, concentrando poder nos maiores

**Tabela 4.** Dados gerais de cada projeto analisado.

Projeto	Data de Criação	Token	Plataforma Blockchain	Algoritmo de Consenso
<b>MCO<sub>2</sub></b>	2020	MCO2	Ethereum	PoW & PoS
<b>TreeCycle</b>	2020	TREE	IGNIS	PoS
<b>Ambify</b>	2021	ABFY	BSC	PoSA

**Tabela 5.** Plataformas Blockchain utilizadas pelos três projetos.

Plataforma	Plataforma Base	Transações por segundo	Tempo de bloco (segundos)
<b>Ethereum</b>	Não há	15	≈ 15
<b>IGNIS</b>	NXT	100	≈ 60
<b>BSC</b>	Cosmos	160	≈ 3

**Tabela 6.** Algoritmos de consenso utilizados pelos três projetos.

Algoritmo	Taxa de Transferência	Descentralização	BFT	Consumo energético
<b>PoW</b>	Baixo	Alto	50%	Alto
<b>PoS</b>	Baixo	Médio	50%	Médio
<b>PoSA</b>	Médio	Baixo	33%	Baixo

detentores de *tokens*. A robustez do ecossistema Ethereum, no entanto, oferece maior confiabilidade em comparação à BSC, tornando-o adequado para mercados emergentes, ainda que com limitações em cenários de alta demanda.

Por fim, o TreeCycle, construído sobre a plataforma IGNIS, child-chain da ARDOR que, por sua vez, é baseada na NXT, utiliza PoS desde sua concepção, gerando assim um baixo consumo energético e alinhando-se aos princípios de sustentabilidade do projeto. Com 100 TPS, a plataforma posiciona-se entre o Ambify e o MCO<sub>2</sub> em termos de velocidade. A arquitetura de child-chains da Blockchain ARDOR/IGNIS garante alta BFT, semelhante ao Ethereum, mas o tempo de criação de blocos de 60 segundos pode representar um gargalo operacional. Além disso, o projeto poderia ampliar seu escopo, explorando a geração de *tokens* vinculados a benefícios ambientais adicionais, como preservação da biodiversidade. Atualmente, o foco restrito em *tokens* associados a árvores para colheita, somado à tecnologia adotada, pode limitar sua escalabilidade.

Em síntese, se for necessário priorizar alta velocidade e baixo custo operacional, a melhor escolha é o Ambify, ideal para transações rápidas, porém com maiores riscos de centralização. Caso segurança e confiabilidade sejam prioridades, o MCO<sub>2</sub> oferece robustez e descentralização, ainda que com menor desempenho do que o Ambify. Já o TreeCycle é uma boa escolha para eficiência energética, sendo a mais sustentável, mas seu escopo poderia ser expandido além de *tokens* vinculados a árvores para aumentar seu impacto ambiental. Cada solução reflete um compromisso distinto entre desempenho, segurança e sustentabilidade, devendo a seleção considerar os requisitos específicos do projeto REDD+.

## 5.2 Avaliação Experimental

Avaliar experimentalmente uma rede Blockchain de larga escala apresenta desafios logísticos e econômicos significativos. O alto custo de infraestrutura e a dificuldade de reproduzir cenários controlados em muitos casos tornam esse tipo de estudo impraticável. Diante dessas limitações, esse artigo utiliza simulações computacionais como uma alternativa metodologicamente aceitável, por permitir uma análise adequada

de importantes métricas de desempenho em ambientes realistas, com custo reduzido, controle preciso de variáveis e possibilidade de testes de configurações alternativas, sem os desafios associados às implantações físicas reais.

Dito isso, esta seção está organizada em subseções conforme descrito a seguir. Inicialmente, apresenta-se o simulador JABS. Em seguida, descrevem-se o estudo de caso e a modelagem utilizada nos experimentos. Por fim, são expostos os cenários testados e os resultados obtidos, com análise das métricas de desempenho e discussão das implicações práticas dos achados.

### 5.2.1 Simulador JABS

A avaliação experimental foi conduzida utilizando o simulador JABS (*Just Another Blockchain Simulator*), desenvolvido por Yajam *et al.* [2023]. Este simulador foi selecionado devido ao código aberto, modular e eficiente. Diferentemente de outros simuladores, o JABS oferece suporte a múltiplos algoritmos de consenso e a cenários de simulação customizados, permitindo a modelagem dos projetos aqui analisados.

Implementado em Java, o simulador JABS possibilita a modelagem de diversas configurações de redes Blockchain, permitindo a modificação de parâmetros como algoritmo de consenso, tempo médio de geração de blocos, número de nós participantes e tempo de simulação. O JABS emprega um modelo de simulação por eventos discretos, onde cada evento acontece em um instante específico no tempo, modificando o estado do sistema simulado. O estado é descrito por propriedades como configuração dos nós, memória alocada, blocos gerados, transações pendentes e pacotes em trânsito.

Cada um dos eventos discretos é gerenciado por uma fila de prioridades, onde a execução de cada um pode adicionar novos eventos à fila. Antes e depois de cada evento do sistema é possível gerar um registro dos dados do estado atual do sistema, o que permite a medição das métricas de desempenho  $T_b$  e  $C_b$ , definidas na Tabela 1.

As duas supracitadas métricas foram selecionadas porque conseguem capturar, respectivamente, a eficiência e escalabilidade da rede Blockchain, como evidenciado a seguir.  $T_b$  revela a agilidade da rede em alcançar consenso, essencial



para aplicações que demandam confirmações rápidas, como negociação de créditos.  $C_b$ , por sua vez, expõe a eficiência do protocolo no uso da infraestrutura de rede, um fator decisivo para a escalabilidade em regiões com conectividade limitada. Assim, essas métricas são revelantes em sistemas onde a latência e a largura de banda são limitantes críticos [Vukolić, 2015; Xiao *et al.*, 2020; Yajam *et al.*, 2023].

### 5.2.2 Estudo de caso e modelagem

Para realização dos experimentos computacionais, considera-se um estudo de caso do projeto TreeCycle, que prevê o plantio inicial de 10 milhões de árvores em 12.500 hectares, com potencial expansão para 59.500 hectares e 47 milhões de árvores mediante financiamento adequado [Global Tree Project, 2019].

A estrutura da rede Blockchain foi modelada com dois tipos de nós: mineradores e não mineradores. Os nós mineradores são responsáveis pela validação de transações, criação de créditos, criação de novos blocos e manutenção do consenso na rede. Já os nós não mineradores representam empresas compradoras de créditos de carbono, participantes que apenas enviam e recebem transações, sem participar do processo de criação de créditos.

Para modelar esse estudo de caso, adotou-se uma parametrização em que cada 1.000 hectares corresponde a um nó minerador na rede Blockchain. Além disso, empresas compradoras foram representadas como nós não mineradores. Para representar o sistema do MCO<sub>2</sub>, configurou-se o simulador com o algoritmo de consenso PoS e tempo de geração de bloco de 15 s, aproximando-se das condições da plataforma Ethereum. Para o TreeCycle, manteve-se o mesmo algoritmo com um tempo de geração de bloco de 60 s, simulando o comportamento da plataforma IGNIS. Por fim, o sistema do Ambify foi modelado utilizando o algoritmo de consenso PoSA com tempo de bloco de 3 s, simulando a plataforma BSC.

### 5.2.3 Situações sob análise

Para análise do estudo de caso, são consideradas duas situações. Na primeira, variou-se de 12.000 a 60.000 hectares, mantendo 1.000 empresas compradoras. O objetivo é avaliar a influência do aumento da geração de créditos de carbono no desempenho do sistema. Na segunda, manteve-se 12.000 hectares para uma quantidade de empresas compradoras variada de 100 a 1.000. O objetivo é avaliar a influência do aumento do consumo de créditos no desempenho do sistema.

São realizadas 20 rodadas independentes, empregando sementes aleatórias diferentes para melhor robustez estatística. Como já informado, as métricas analisadas foram o *tráfego médio consumido para finalização de bloco* ( $C_b$ ) e o *tempo médio de finalização de bloco* ( $T_b$ ). Os resultados apresentados nos gráficos correspondem aos valores médios, acompanhados de intervalos de confiança de 95%.

### 5.2.4 Resultados e análises

Os resultados referentes à primeira situação, em que se variou o número de mineradores, são apresentados na Figura 5. A Fig. 5(a) exibe os valores de  $T_b$  para cada quantidade de mineradores, enquanto a Fig. 5(b) mostra os valores de  $C_b$ . Observa-se que os valores de  $T_b$  permanecem constantes para cada projeto, independentemente da escala, indicando que a

carga transacional não impacta significativamente a latência de consenso nos projetos. Os valores de  $C_b$ , por outro lado, aumentam linearmente com o número de mineradores.

De forma análoga, os resultados da segunda situação, com variação na quantidade de compradores, são ilustrados na Fig. 6, sendo  $T_b$  e  $C_b$  apresentados nas Figuras 6(a) e 6(b), respectivamente. A Fig. 6(a) confirma a estabilidade de  $T_b$  e reforça que a latência de consenso é predominantemente influenciada pelo algoritmo e pelo tempo de geração de blocos, e não pela carga transacional. Já a Fig. 6(b) evidencia um crescimento linear de  $C_b$  em função do número de compradores, mas com taxas de crescimento distintas entre os projetos.

Os valores das Figuras 5(a) e 6(a) são sumarizados na Tabela 7, destacando as seguintes constatações: (i) o TreeCycle apresenta o maior  $T_b$ , alinhado com sua taxa mais lenta de geração de bloco; (ii) o MCO<sub>2</sub>, embora utilize o mesmo algoritmo de consenso PoS do TreeCycle, é 3,9 vezes mais veloz devido ao seu tempo de geração de bloco 4 vezes menor; e (iii) o Ambify demonstra o menor  $T_b$ , sendo três ordens de magnitude mais rápido que o TreeCycle, resultado direto de seu algoritmo PoSA que prioriza velocidade em detrimento parcial da descentralização.

**Tabela 7.** Tempos médios de finalização de blocos ( $T_b$ ).

Projeto	Situação 1	Situação 2
Ambify	$0.433 \pm 0.003$	$0.432 \pm 0.004$
MCO <sub>2</sub>	$335 \pm 11$	$332 \pm 10$
TreeCycle	$1277 \pm 81$	$1303 \pm 97$

Os resultados de consumo de tráfego, analisados por meio de regressão linear, são apresentados na Tabela 8. As equações de regressão  $C_b(n)$  revelam que o projeto Ambify consome menor tráfego conforme a um aumento da escala de sua rede Blockchain, indicando sua eficiência no consumo de largura de banda e demonstrando melhor escalabilidade. Os outros projetos apresentam padrões de consumo de tráfego similares em ambos os cenários, revelando que suas diferentes velocidades de geração de bloco não impactaram no consumo de largura de banda da rede.

**Tabela 8.** Resultados da regressão linear para consumo de tráfego,  $C_b(n)$ , onde  $n$  é a quantidade de nós.

Projeto	Situação 1	Situação 2
Ambify	$0.001451n + 1.7360$	$0.001735n + 0.0195$
MCO <sub>2</sub>	$0.002009n + 1.9646$	$0.001965n + 0.0233$
TreeCycle	$0.001966n + 1.9628$	$0.001963n + 0.0234$

Os resultados ressaltam que o Ambify performa melhor em ambas as métricas de escalabilidade e eficiência, reforçando a conclusão de que é o projeto ideal para ambientes de alta demanda. Esse alto desempenho é explicado pelo seu algoritmo de consenso, que prioriza velocidade e baixo consumo energético ao custo de maior centralização. Em contraste, MCO<sub>2</sub> e TreeCycle apresentam desempenhos similares no aspecto de escalabilidade, altamente influenciados pelo algoritmo de consenso PoS, com o MCO<sub>2</sub> apresentando uma melhor eficiência devido a seu menor tempo de geração de bloco.

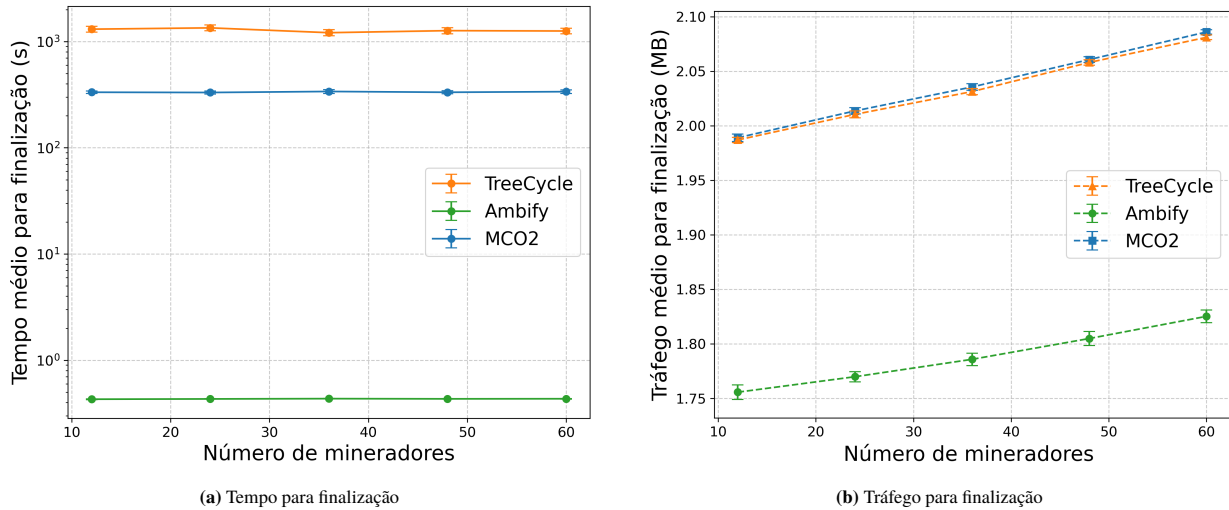


Figura 5. Resultados obtidos pela primeira situação, em que é variado o número de mineradores.

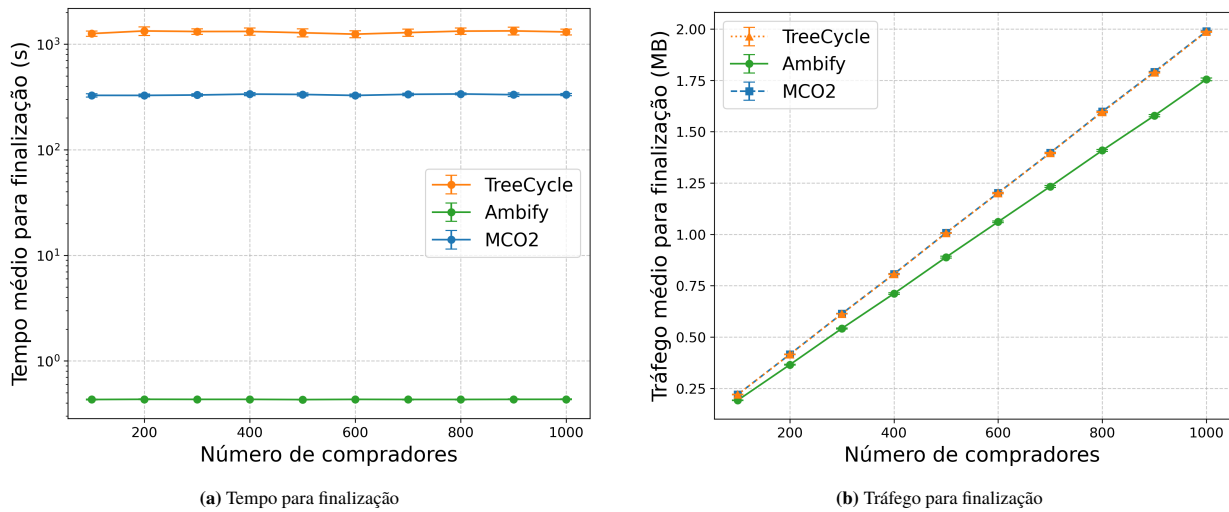


Figura 6. Resultados obtidos pela segunda situação, em que é variado o número de compradores.

### 5.3 Aspectos de Segurança

Em cibersegurança, três princípios fundamentais orientam a segurança da informação, representados pela sigla CIA: Confidencialidade, Integridade e Disponibilidade (do inglês, *Confidentiality, Integrity, and Availability*) [Tchernykh *et al.*, 2019; Aminzade, 2018].

No contexto da tecnologia Blockchain, confidencialidade é alcançada por meio de endereços encriptados, mantendo um pseudoanonimato, mesmo em redes públicas com transações rastreáveis, desde que o endereço encriptado não seja comprometido. A integridade, por sua vez, diz respeito à consistência de dados, sendo garantida pela imutabilidade da tecnologia Blockchain. Por fim, a disponibilidade é garantida pela transparência e replicabilidade das transações em toda rede [Werth *et al.*, 2023; Rashidibajgan and Hupperich, 2024; Rodrigues, 2021]. Portanto, os princípios CIA estão garantidos nos projetos REDD+ baseados em Blockchain, dispensando a realização de experimentos.

Todavia, nesta pesquisa, a avaliação da segurança sistêmica ( $S_s$ ) dos projetos é complementar aos princípios CIA, como explicado a seguir. O nível de segurança das plataformas é aqui avaliado pelo grau de resistência a ataques maliciosos coordenados, como DDoS, ataques majoritários,

gastos duplos ou inundação de transações. Uma métrica para avaliar essa resistência é a BFT, que, como já mencionado, determina a porcentagem de nós maliciosos ou com mau funcionamento necessários para prejudicar o funcionamento correto da rede [Werth *et al.*, 2023; Bamakan *et al.*, 2020].

Como apresentado na Tabela 6, o algoritmo PoSA, utilizado no projeto Ambify, é o mais vulnerável entre os analisados, levando em conta que ataques bem-sucedidos podem ocorrer quando apenas 33% dos nós são comprometidos (i.e., BFT = 33%). Contudo, o projeto compensa essa vulnerabilidade com uma maior escalabilidade e eficiência, como comprovado na Subseção 5.2.4, o que permite aumentar o número de nós participantes e, assim, reduzir o risco de um ataque bem-sucedido. A escolha do algoritmo de consenso adequado para um projeto REDD+ deve, portanto, balancear a  $S_s$  requerida com os requisitos de escalabilidade e eficiência desejados.

### 5.4 Limitações

Embora este estudo forneça uma valiosa análise comparativa de três importantes projetos REDD+ baseados em Blockchain, reconhecemos algumas limitações que restringem parcialmente o escopo e a generalização de nossas descobertas. Isso

ocorre porque existem outros projetos REDD+ com diferentes escopos tecnológicos, modelos de governança e focos ambientais. Consequentemente, as conclusões sobre desempenho e segurança aqui extraídas podem não ser totalmente representativas do panorama mais amplo de projetos REDD+ baseados em Blockchain.

Além disso, nossas simulações se baseiam em um modelo simplificado do contexto do projeto REDD+. Embora essas simplificações tenham sido necessárias para uma comparação controlada e justa, elas não afetam o propósito da avaliação comparativa vislumbrada nesta pesquisa. Naturalmente, um modelo mais complexo, incorporando parâmetros adicionais, pode ser considerado para melhor capturar, em termos de valores absolutos mais precisos, a dinâmica e a natureza frequentemente imprevisível dos mercados de créditos de carbono e da participação na rede. Adicionalmente, novos modelos também podem incluir testes de segurança empíricos para validar a resiliência contra ataques concretos, que aqui foi explorada teoricamente.

Finalmente, nosso foco em métricas de desempenho tecnológico não aborda completamente a avaliação de aspectos ecológicos, sociopolíticos e de governança dos projetos. Questões como impacto ambiental, direitos à terra, distribuição equitativa de receitas para comunidades locais, conformidade regulatória entre jurisdições e a estrutura geral de governança não são analisadas aqui. O avanço neste campo requer uma colaboração interdisciplinar robusta. Esses fatores são, de fato, determinantes cruciais da viabilidade, legitimidade e posição ética de um projeto REDD+ a longo prazo.

## 6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho analisou comparativamente três projetos REDD+ baseados na tecnologia Blockchain: Ambify [Ambipar Group, 2021], MCO<sub>2</sub> [Moss.Earth, 2020] e TreeCycle [Global Tree Project, 2019]. Por meio de simulações computacionais e análise teórica, foi possível examinar o impacto de diferentes arquiteturas de projeto em três dimensões críticas: eficiência operacional, escalabilidade e segurança sistêmica.

Os resultados experimentais mostraram que o projeto Ambify apresenta vantagens significativas em escalabilidade e eficiência, com tempos de finalização de blocos significativamente menores e menor consumo de tráfego em cenários de alta demanda. Esta performance superior se deve à sua arquitetura baseada na plataforma BSC com algoritmo PoSA, otimizado para alta velocidade e baixo custo operacional. Os projetos MCO<sub>2</sub> e TreeCycle, ambos utilizando o algoritmo PoS, apresentaram padrões similares de escalabilidade, porém o projeto MCO<sub>2</sub> apresenta maior velocidade devido ao seu menor tempo de geração de bloco.

Em termos de segurança, evidenciou-se teoricamente que todos os projetos atendem adequadamente aos princípios básicos de confidencialidade, integridade e disponibilidade (CIA). Entretanto, verificou-se que o Ambify apresenta maior vulnerabilidade a ataques majoritários quando comparado aos demais projetos, cujos algoritmos PoS suportam até 50% de nós maliciosos enquanto o PoSA suporta até 33%. Esta limitação é parcialmente compensada pela elevada escalabilidade do Ambify, que permite a incorporação de um número maior de nós na rede, reduzindo assim a probabilidade de sucesso

em tentativas desse tipo de ataque.

Os achados deste artigo permitem, portanto, atingir a seguinte síntese: (1) a tecnologia aplicada pelo projeto Ambify é a mais adequada para atender às necessidades e particularidades dos projetos REDD+ no mercado de carbono. Sua destacada eficiência permite a gestão de créditos de carbono a um baixo custo energético, enquanto sua escalabilidade possibilita o crescimento do escopo dos projetos e a arrecadação de fundos consistentes; (2) Contudo, se a resistência a ataques for um fator crítico, a tecnologia do MCO<sub>2</sub> oferece características mais adequadas. Essa síntese, portanto, evidencia e comprova a importância do alinhamento da implementação da tecnologia Blockchain com os objetivos do projeto REDD+ a ser desenvolvido.

Por fim, como trabalhos futuros, sugerimos os seguintes caminhos: (i) desenvolvimento de modelos integrados para avaliação simultânea de desempenho e segurança; (ii) investigação de plataformas Blockchain alternativas, visando superar as limitações identificadas nas plataformas atuais; (iii) estudos de validação em ambientes operacionais reais, a partir da construção de um *framework* para análise de performance, governança e conformidade regulatória, incluindo uma abordagem interdisciplinar. A evolução desta pesquisa nessas direções poderá viabilizar sistemas mais robustos e inclusivos para a gestão de créditos de carbono sob Blockchain, fortalecendo os mecanismos de compensação de emissões no contexto das mudanças climáticas globais.

## Declarações complementares

### Contribuições dos autores

Todos os autores contribuíram para a concepção deste estudo, bem como realizaram a escrita deste manuscrito. Caburlão realizou os experimentos computacionais. Todos os autores leram e aprovaram o manuscrito final.

### Conflitos de interesse

Os autores declaram que não têm nenhum conflito de interesses.

### Disponibilidade de dados e materiais

Os conjuntos de dados (e/ou softwares) gerados e/ou analisados durante o estudo atual estão disponíveis no repositório público dos autores<sup>1</sup>.

## Referências

- Aguar, M. C. d. (2018). O mercado voluntário de carbono florestal: o caso do redd+ no brasil. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/33037>.
- Ambipar Group (2021). Ambify project - whitepaper. Disponível em: <https://www.ambify.com/wp-content/uploads/2023/06/whitepaper-pt.pdf>.
- Aminzade, M. (2018). Confidentiality, integrity and availability – finding a balanced IT framework. *Network Security*, 2018(5):9–11. DOI: 10.1016/S1353-4858(18)30043-6.
- Bamakan, S. M. H., Motavali, A., and Bondarti, A. B. (2020). A survey of blockchain consensus algorithms performance evaluation criteria. *Expert Systems with Applications*, 154:113385. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113385.

<sup>1</sup><https://github.com/mCaburlao/Analysis-of-REDD-Projects-with-Carbon-Credit-Management-under-Blockchain.git>

- Global Tree Project (2019). Treecycle - whitepaper. Disponível em: [https://treecycle.ch/wp-content/uploads/2023/11/white-paper\\_19.pdf](https://treecycle.ch/wp-content/uploads/2023/11/white-paper_19.pdf).
- He, Z. and Turner, P. (2022). Blockchain applications in forestry: A systematic literature review. *Applied Sciences*, 12(8):3723. DOI: 10.3390/app12083723.
- Howson, P. (2019). Tackling climate change with blockchain. *Nature Climate Change*, 9(9):644–645. DOI: 10.1038/s41558-019-0567-9.
- Howson, P., Oakes, S., Baynham-Herd, Z., and Swords, J. (2019). Cryptocarbon: The promises and pitfalls of forest protection on a blockchain. *Geoforum*, 100:1–9. DOI: 10.1016/j.geoforum.2019.02.011.
- Jelurida Swiss SA (2017). Ignis whitepaper. Disponível em: <https://www.jelurida.com/sites/default/files/JeluridaWhitepaper.pdf>.
- Kotsialou, G., Kuralbayeva, K., and Laing, T. (2021). Forest carbon offsets over a smart ledger. *Available at SSRN 3945521*. DOI: 10.2139/ssrn.3945521.
- Kotsialou, G., Kuralbayeva, K., and Laing, T. (2022). Blockchain's potential in forest offsets, the voluntary carbon markets and redd+. *Environmental Conservation*, 49(3):137–145. DOI: 10.1017/S0376892922000157.
- Marke, A., Mehling, M., and de Andrade Correa, F. (2022). *Governing carbon markets with distributed ledger technology*. Cambridge University Press.
- Moss.Earth (2020). Moss carbon credit mco2 token - whitepaper. Disponível em: <https://v.fastcdn.co/u/f3b4407f/54475626-0-Moss-white-paper-eng.pdf>.
- Neves, R. F. D. (2025). Blockchain e mercado voluntário de carbono redd+ jurisdicional no sistema de incentivo a serviços ambientais do acre. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/51334>.
- Pervez, H., Muneeb, M., Irfan, M. U., and Haq, I. U. (2018). A comparative analysis of dag-based blockchain architectures. *12th International conference on open source systems and technologies (ICOSST)*, pages 27–34. DOI: 10.1109/ICOSST.2018.8632193.
- Rashidibajgan, S. and Hupperich, T. (2024). Utilizing blockchains in opportunistic networks for integrity and confidentiality. *Blockchain: Research and Applications*, 5(1):100167. DOI: 10.1016/j.bcr.2023.100167.
- Reinsberg, B. (2019). Blockchain technology and the governance of foreign aid. *Journal of Institutional Economics*, 15(3):413–429. DOI: 10.1017/S1744137418000462.
- Rodrigues, C. K. S. (2021). Analyzing Blockchain integrated architectures for effective handling of IoT-ecosystem transactions. *Computer Networks*, 201:108610. DOI: 10.1016/j.comnet.2021.108610.
- Rodrigues, C. K. S. (2024). Bases de dados distribuídas para aplicações computacionais: Estudo e seleção de tecnologias de registros distribuídos. *iSys-Brazilian Journal of Information Systems*, 17(1):12–1. DOI: 10.5753/isys.2024.4384.
- Tchernykh, A., Schwiegelsohn, U., ghazali Talbi, E., and Babenko, M. (2019). Towards understanding uncertainty in cloud computing with risks of confidentiality, integrity, and availability. *Journal of Computational Science*, 36:100581. DOI: 10.1016/j.jocs.2016.11.011.
- Vilkov, A. and Tian, G. (2023). Blockchain's scope and purpose in carbon markets: A systematic literature review. *Sustainability*, 15(11):8495. DOI: 10.3390/su15118495.
- Vukolić, M. (2015). The quest for scalable blockchain fabric: Proof-of-work vs. bft replication. In *International workshop on open problems in network security*, pages 112–125. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-39028-4\_9.
- Werth, J., Berenjestanaki, M. H., Barzegar, H. R., El Ioini, N., and Pahl, C. (2023). A review of blockchain platforms based on the scalability, security and decentralization trilemma. *ICEIS (1)*, pages 146–155. DOI: 10.5220/0011837200003467.
- Xiao, Y., Zhang, N., Lou, W., and Hou, Y. T. (2020). A survey of distributed consensus protocols for blockchain networks. *IEEE communications surveys & tutorials*, 22(2):1432–1465. DOI: 10.1109/COMST.2020.2969706.
- Yajam, H., Ebadi, E., and Akhaee, M. A. (2023). Jabs: a blockchain simulator for researching consensus algorithms. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 11(1):3–13. DOI: 10.1109/TNSE.2023.3282916.