

PROTOTIPAGEM DE APLICAÇÃO BLOCKCHAIN PARA GESTÃO DE MICROCRÉDITOS DE CARBONO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS RESIDENCIAIS

Amanda Maia Model¹, Sergio Coral²

Resumo: A expansão da geração distribuída por sistemas fotovoltaicos residenciais amplia o potencial de mitigação das emissões de gases de efeito estufa, porém os créditos ambientais decorrentes dessa produção tendem a ocorrer em pequena escala, dificultando processos de certificação, gerenciamento e destinação desses ativos. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo propor e validar, por meio da prototipagem de uma aplicação baseada em blockchain, uma solução para gestão, rastreabilidade e doação de microcréditos de carbono provenientes de sistemas fotovoltaicos residenciais destinados a instituições beneficentes. A pesquisa foi desenvolvida por meio da implementação de um protótipo com arquitetura híbrida, no qual a blockchain atua como infraestrutura de confiança para verificação da autorização criptográfica e registro auditável das transações. A solução contempla autenticação de usuários, processamento de relatórios solares, cálculo do dióxido de carbono evitado e contabilização do saldo de créditos ambientais. Os resultados demonstraram a viabilidade técnica da proposta, evidenciando a rastreabilidade da destinação dos microcréditos. Ressalta-se, contudo, que o protótipo possui caráter experimental, não substituindo mecanismos formais de certificação de créditos de carbono. Conclui-se que a aplicação desenvolvida constitui uma base promissora para soluções voltadas à gestão e à rastreabilidade de microcréditos de carbono em contextos de microgeração residencial.

Palavras-chave: blockchain; microcréditos de carbono; energia solar fotovoltaica; geração distribuída.

ABSTRACT: The expansion of distributed generation through residential photovoltaic systems increases the potential for mitigating greenhouse gas emissions. However, the environmental credits resulting from this produc-

¹Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), Criciúma - Santa Catarina - Brasil. amandamaiadpa@unesc.net

²Orientador, Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), Criciúma - Santa Catarina - Brasil. sergiocoral@unesc.net

tion tend to occur on a small scale, making certification, management, and allocation processes more challenging. In this context, this study aimed to propose and validate, through the prototyping of a blockchain-based application, a solution for the management, traceability, and donation of carbon microcredits generated by residential photovoltaic systems and allocated to charitable institutions. The research was carried out through the implementation of a prototype based on a hybrid architecture, in which blockchain acts as a trust infrastructure for cryptographic authorization verification and auditable transaction recording. The solution includes user authentication, processing of solar generation reports, calculation of avoided carbon dioxide emissions, and accounting of environmental credit balances. The results demonstrated the technical feasibility of the proposed approach, highlighting the traceability of carbon microcredits allocation. It should be noted, however, that the prototype has an experimental nature and does not replace formal carbon credit certification mechanisms. It is concluded that the developed application provides a promising foundation for solutions focused on the management and traceability of carbon microcredits in residential distributed generation contexts.

Keywords: blockchain; carbon microcredits; photovoltaic solar energy; distributed generation

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado a expansão das fontes renováveis de energia em escala global. Em 2024, a adição de mais de 700 GW de capacidade renovável representou o maior crescimento anual já registrado, evidenciando o avanço dessas tecnologias e seu papel estratégico na transição energética (REN21, 2025).

No Brasil, esse avanço já resultou na mitigação de mais de 50 milhões de toneladas de CO₂, evidenciando o impacto ambiental positivo da adoção da energia solar (ABSOLAR, 2024). Desse modo, a energia solar fotovoltaica destaca-se como a principal responsável pela expansão recente, respondendo por 81% da nova capacidade instalada, o que reforça sua relevância no desenvolvimento de um sistema energético mais sustentável (REN21, 2025).

Os sistemas fotovoltaicos residenciais configuram-se como uma importante forma de geração distribuída, possibilitando a produção de ener-

gia elétrica próxima ao local de consumo. Esse modelo contribui tanto para a descentralização do sistema elétrico quanto para a redução de perdas associadas à transmissão (Silva et al., 2019). No Brasil, a regulamentação da geração distribuída foi estabelecida a partir de 2012, por meio do sistema de compensação de energia elétrica (*net metering*), posteriormente revisado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Nesse modelo, consumidores podem injetar excedentes na rede e receber créditos energéticos para compensação futura, ampliando o uso da energia solar em contextos residenciais (Silva et al., 2019).

Os créditos de carbono, formalizados a partir do Protocolo de Kyoto em 1997, constituem instrumentos voltados à mitigação das mudanças climáticas globais (Sousa, 2025). Esses créditos correspondem a certificados que comprovam a redução ou remoção verificada de emissões de dióxido de carbono (CO₂) ou de outros Gases de Efeito Estufa (GEE) equivalentes. Cada unidade representa, em geral, uma tonelada de CO₂ que deixou de ser emitida ou foi retirada da atmosfera (Carbonext, 2025).

Nesse contexto, tais créditos são amplamente utilizados em mercados de carbono (Kreibich, 2024). No Brasil, o mercado de carbono é estruturado em dois segmentos principais: o mercado regulado e o mercado voluntário. O mercado regulado foi instituído pela Lei nº 15.042/2024 por meio do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), adotando o modelo de teto e comércio de emissões (*cap-and-trade*). Nesse sistema, operadores que excederem os limites de emissão estabelecidos deverão adquirir ativos ambientais para compensação, enquanto aqueles que emitirem abaixo do limite poderão negociar seus excedentes. Já o mercado voluntário é caracterizado pela participação espontânea de empresas e organizações que buscam compensar emissões sem imposição legal, por meio da aquisição de créditos de carbono gerados em projetos de redução ou remoção de gases de efeito estufa. Embora possuam finalidades distintas, a legislação brasileira prevê mecanismos de interoperabilidade entre os dois mercados, especialmente por meio dos Certificados de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVEs), que podem conectar créditos voluntários ao sistema regulado (Brasil, 2024).

A geração desses créditos está associada a iniciativas sustentáveis que visam reduzir, evitar ou capturar emissões, incluindo projetos baseados em fontes renováveis de energia. Assim, a geração de eletricidade por sistemas fotovoltaicos contribui diretamente para a diminuição das emissões ao substituir a produção energética baseada em combustí-

veis fósseis (Carbonext, 2025). No contexto deste trabalho, considera-se que tais créditos podem ser gerados em pequena escala por sistemas solares residenciais, sendo denominados microcréditos de carbono.

A partir dessa perspectiva, a tokenização de créditos de carbono configura-se como uma abordagem tecnológica que permite representar esses ativos em formato digital por meio de registros em blockchain. A conversão dos créditos em tokens digitais possibilita maior auditabilidade, transparência e segurança nas transações, além de reduzir riscos associados à fraude e à dupla contagem (Bezerra; Silva, 2024). Dessa forma, a blockchain deixa de atuar apenas como mecanismo de armazenamento de dados e passa a funcionar como infraestrutura de confiança aplicada à gestão de créditos ambientais tokenizados.

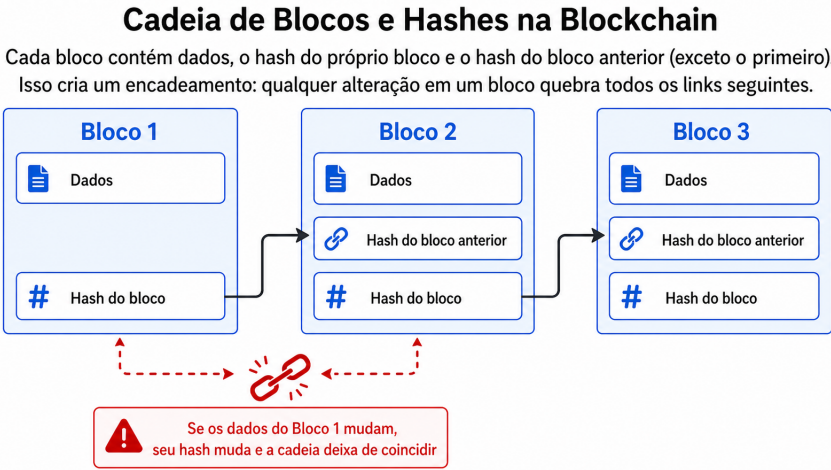
A tecnologia blockchain pode ser entendida como uma estrutura de registro digital distribuído, na qual os dados são organizados em blocos conectados por meio de *hashes* criptográficos. Ao contrário dos sistemas centralizados, em que uma única entidade controla a validação e o armazenamento das informações, a blockchain distribui essa responsabilidade entre os participantes da rede. Conforme apresentado por Nakamoto (2008), esse modelo reduz a dependência de intermediários ao utilizar prova criptográfica e consenso distribuído para registrar e verificar transações de forma coletiva. Cada bloco contém um conjunto de registros, seu próprio *hash* e a referência ao *hash* do bloco anterior, formando uma sequência cronológica encadeada. Com isso, qualquer tentativa de alteração em um bloco já registrado modifica sua identificação criptográfica e rompe a consistência com os blocos seguintes.

No modelo descrito por Nakamoto (2008), novas transações são agrupadas em blocos e validadas por meio de um mecanismo de consenso baseado em prova de trabalho. Esse processo exige esforço computacional para que um novo bloco seja aceito pela rede, e a cadeia considerada válida é aquela que concentra maior quantidade de trabalho acumulado. Assim, quanto mais blocos são adicionados após determinado registro, mais difícil se torna alterá-lo, pois seria necessário refazer o esforço computacional daquele bloco e de todos os posteriores, além de ultrapassar a cadeia mantida pelos participantes honestos. Como resultado, a blockchain alcança elevados níveis de segurança ao associar criptografia, consenso distribuído e validação compartilhada entre os nós da rede. Além disso, sua estrutura favorece a rastreabilidade, pois mantém um histórico ordenado e verificável das transações, permitindo acompanhar a origem, a sequência e a integri-

dade dos dados ao longo do tempo.

A Figura 1 ilustra o encadeamento entre blocos em uma blockchain, demonstrando como cada bloco armazena seu próprio *hash* e o *hash* do bloco anterior. Com isso, qualquer alteração nos dados de um bloco modifica seu *hash* e compromete a continuidade da cadeia.

Figura 1 - Representação do encadeamento de blocos por meio de *hashes* em uma blockchain



Fonte: Elaborado pela autora.

No campo científico e tecnológico, diversos estudos têm investigado o uso da tecnologia blockchain como mecanismo para ampliar a transparência, a rastreabilidade e a confiabilidade na gestão de créditos de carbono.

Sorensen (2023), no estudo *“Tokenized Carbon Credits”*, analisou o ecossistema de créditos de carbono tokenizados, examinando iniciativas como Toucan, Flowcarbon, MOSS e Nori. O autor destaca desafios relacionados à interoperabilidade entre plataformas e à liquidez dos tokens, além de evidenciar que tais soluções são predominantemente direcionadas a grandes emissores e mercados de maior escala.

De forma complementar, Yamaguchi, Santos e Carvalho (2021), em *“Blockchain technology in renewable energy certificates in Brazil”*, investigaram a aplicação da tecnologia blockchain na emissão e comercialização de certificados de energia renovável no contexto brasileiro. Os autores demonstram que o uso de registros descentralizados pode aumentar a transparência e a confiança entre os agentes do setor energético. Entretanto, apontam limitações relevantes, como barreiras regulatórias e a ausência de padronização, que dificultam a adoção em larga escala dessas soluções.

Em nível internacional, no estudo *“Blockchain-based renewable energy certificate trade for low-carbon community of active energy agents”*, Fu, Tan e Xu (2023) propuseram um modelo de comunidade de energia de baixo carbono baseado em blockchain, no qual prosumidores podem negociar certificados de energia renovável de forma descentralizada. O sistema utiliza *smart contracts* para automatizar processos como registro, emissão e troca de certificados, promovendo maior eficiência, redução de custos transacionais e transparência na execução das operações.

Apesar desses avanços, a literatura aponta desafios relevantes relacionados à credibilidade e à efetividade dos créditos de carbono, especialmente no que se refere à dupla contagem e à integridade ambiental (Kreibich, 2024). Ademais, no contexto de sistemas fotovoltaicos residenciais, a geração ocorre em pequena escala, resultando em créditos ambientais de baixo valor agregado, o que pode dificultar economicamente processos de certificação formal e comercialização quando considerados de forma isolada, especialmente devido aos custos operacionais, de validação e auditoria. Além disso, apesar de os microcréditos de carbono de sistemas fotovoltaicos residenciais apresentarem baixa representatividade econômica de forma individual, sua agregação coletiva pode viabilizar volumes mais relevantes de créditos ambientais, ampliando seu potencial de aplicação em iniciativas de impacto socioambiental.

Nesse contexto, mecanismos que permitam a destinação conjunta desses créditos a instituições beneficentes podem aumentar sua utilidade prática, possibilitando que os volumes acumulados sejam posteriormente empregados de forma mais relevante. Cabe destacar, contudo, que o presente trabalho não tem como objetivo substituir mecanismos formais de certificação de créditos de carbono, concentrando-se na camada operacional e tecnológica relacionada ao gerenciamento, à rastreabilidade e à destinação desses créditos.

Apesar dos avanços observados nas áreas de blockchain e créditos de carbono, ainda são limitadas as iniciativas voltadas ao gerenciamento e à utilização de microcréditos de carbono provenientes de sistemas fotovoltaicos residenciais. A ausência de plataformas voltadas a esse contexto limita o aproveitamento desses ativos e restringe a participação de pequenos produtores em iniciativas de impacto ambiental e social. Diante desse cenário, o problema investigado neste trabalho consiste na ausência de mecanismos acessíveis, rastreáveis e operacionalmente viáveis para gerenciar e destinar microcréditos de carbono gerados por sistemas fotovol-

taicos residenciais.

Sob essa perspectiva, a tecnologia blockchain apresenta-se como uma alternativa promissora para responder a essa lacuna, ao permitir o registro de transações de forma segura, transparente e descentralizada, garantindo integridade dos registros, auditabilidade e maior confiabilidade sem a necessidade de uma autoridade central (Nakamoto, 2008). Além disso, sua aplicação mostra-se particularmente relevante em contextos nos quais a integridade do registro e a prevenção de dupla contagem constituem requisitos centrais do fluxo operacional.

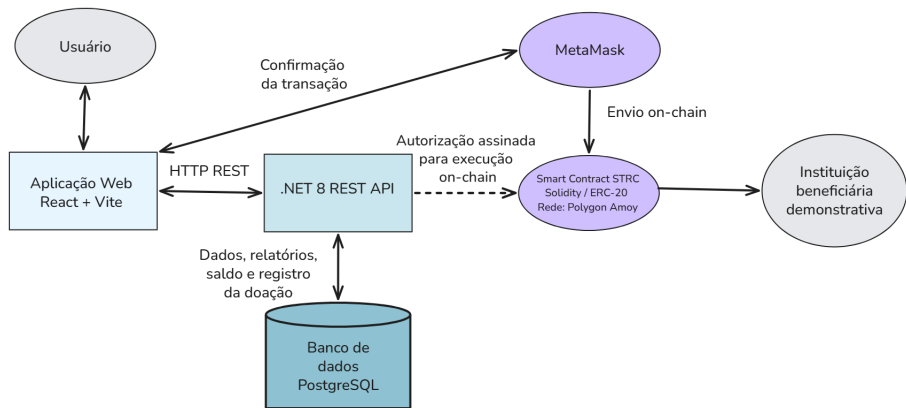
Assim, o presente trabalho tem como objetivo propor por meio da prototipagem de uma aplicação baseada em blockchain, uma solução para o gerenciamento, a tokenização e a doação rastreável de créditos de carbono derivados de sistemas fotovoltaicos residenciais para organizações beneficentes. Além desta introdução, o trabalho está estruturado nas seções de materiais e métodos, resultados e discussão e conclusão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, de natureza tecnológica e experimental, uma vez que buscou desenvolver e validar um protótipo computacional voltado ao gerenciamento e à doação de microcréditos de carbono originados de sistemas fotovoltaicos residenciais.

A solução foi concebida a partir de uma arquitetura híbrida, composta por uma camada *off-chain* e uma camada *on-chain*. Na camada *off-chain*, concentram-se as etapas de autenticação de usuários, recepção de documentos, extração dos dados energéticos, cálculo do dióxido de carbono evitado, armazenamento relacional das informações e contabilização do saldo de créditos ambientais disponíveis. Já na camada *on-chain*, concentra-se a etapa de destinação final dos créditos, com uso de contrato inteligente para verificação da autorização criptográfica e registro rastreável da operação. Essa organização foi adotada com o propósito de preservar a blockchain como núcleo transacional do experimento, reservando sua utilização à etapa em que sua contribuição metodológica se mostra mais relevante. A Figura 2 apresenta, de forma simplificada, a arquitetura geral da aplicação proposta, evidenciando a integração entre o usuário, a aplicação web, a API *backend*, armazenamento *off-chain* e os componentes blockchain empregados no fluxo de doação rastreável.

Figura 2 - Arquitetura geral da aplicação SolTrace



Fonte: Elaborado pela autora.

2.1 MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMPREGADAS

Para a implementação do protótipo, foram utilizadas tecnologias distribuídas entre a camada de interface, a camada de aplicação, armazenamento de dados e a infraestrutura blockchain. Na camada de apresentação, foi empregado React em conjunto com Vite, permitindo a construção de uma aplicação web reativa voltada à interação do usuário com o sistema. Na camada de aplicação, foi utilizado .NET 8, estruturado sob a forma de API REST, responsável pela autenticação dos usuários, recepção dos documentos, extração dos dados energéticos, cálculo ambiental, persistência dos registros e geração das autorizações criptográficas necessárias à operação blockchain.

Como banco de dados *off-chain*, foi empregado PostgreSQL, no qual foram armazenadas informações relacionadas aos usuários, relatórios submetidos, créditos calculados, instituições beneficiárias e histórico das operações registradas. Na camada blockchain, foi utilizada a linguagem Solidity para o desenvolvimento do contrato inteligente, bem como a rede Polygon Amoy como ambiente experimental de testes. A integração entre aplicação web, carteira digital e contrato inteligente foi realizada com o auxílio da biblioteca ethers.js. Para leitura dos relatórios em formato PDF, foi utilizada a biblioteca PdfPig, responsável pela extração direta do conteúdo textual dos documentos.

2.2 ENTRADA DE DADOS E CÁLCULO AMBIENTAL

Como fonte de dados energéticos, foram utilizados relatórios de geração fotovoltaica em formato PDF. A Figura 3 apresenta um exemplo desse documento, contendo informações referentes à geração mensal de

energia da unidade consumidora.

Figura 3 - Exemplo de relatório de geração solar utilizado como entrada no sistema



Fonte: Elaborado pela autora.

Os documentos analisados possuem conteúdo textual estruturado no próprio arquivo PDF, permitindo a extração automática das informações pela aplicação. A partir do texto identificado, o sistema localiza os campos relacionados à geração de energia e utiliza esses dados como base para os cálculos ambientais e para a atualização dos créditos associados à unidade consumidora.

A Figura 4 apresenta a tela de envio e análise dos relatórios implementada no protótipo SolTrace. Essa etapa corresponde ao início do fluxo operacional da aplicação, em que o usuário encaminha o documento para processamento. Após o envio, o sistema realiza a validação do arquivo, identifica automaticamente a energia gerada e prepara os dados para as etapas subsequentes de cálculo e registro dos créditos.

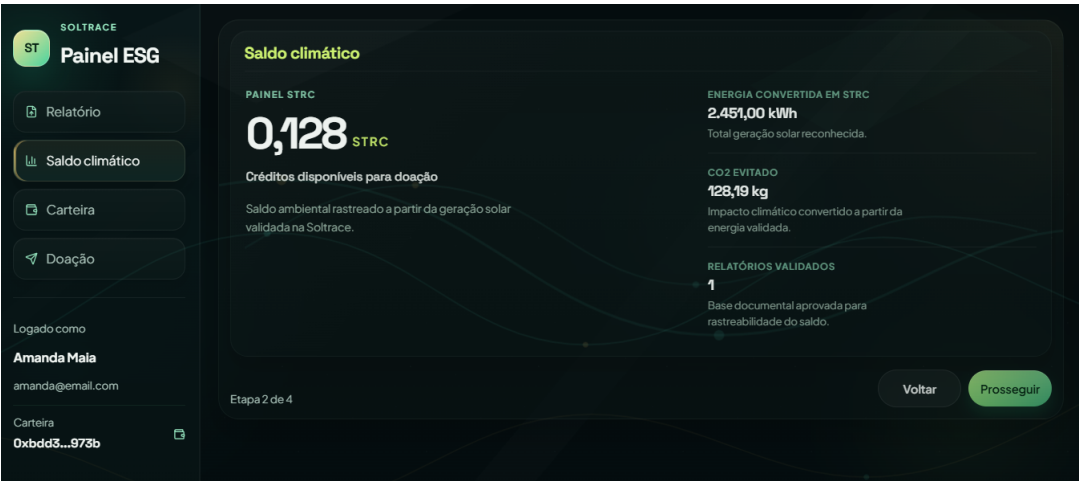
Figura 4 - Interface de envio e análise de relatório solar



Fonte: Elaborado pela autora.

Concluído o processamento do documento, os resultados são apresentados na interface de saldo climático, ilustrada na Figura 5. Nessa tela, o usuário pode acompanhar os créditos STRC disponíveis para doação, a quantidade de energia solar reconhecida, o volume estimado de CO₂ evitado e o número de relatórios validados. Essa visualização permite relacionar diretamente os dados extraídos dos relatórios aos indicadores ambientais gerados pela aplicação.

Figura 5 - Interface de saldo climático e créditos STRC disponíveis para doação



Fonte: Elaborado pela autora.

A estimativa do dióxido de carbono evitado foi implementada no *backend* com base em um fator de emissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), parametrizado no sistema com o valor anual de 2024 igual a 0,0523 kgCO₂/kWh. Esse valor foi obtido em planilha oficial de referência governamental brasileira, utilizada como base numérica para o cálculo (MCTI; SIRENE, 2024). A adoção do fator referente a 2024 justifica-se por corresponder ao ano mais recente com dados anuais consolidados e oficialmente disponibilizados pelo SIRENE no momento da implementação do protótipo. Do ponto de vista metodológico, a formulação adotada foi inspirada na lógica descrita pela ferramenta *Tool to calculate the emission factor for an electricity system* (TOOL07), vinculada à UNFCCC, empregada neste trabalho como referencial conceitual para a relação entre energia elétrica e emissões evitadas (UNFCCC, 2024).

A relação empregada para estimar o dióxido de carbono evitado foi expressa por:

$$CO_{2evitado}(kg) = E_{gerada}(kWh) \times FE_{SIN}$$

em que E_{gerada} representa a energia gerada identificada no relatório e FE_{SIN} representa o fator de emissão adotado no sistema.

Na sequência, o valor obtido em quilogramas de dióxido de carbono evitado foi convertido em créditos ambientais estimados, conforme a seguinte expressão:

$$C = \frac{CO_{2evitado}(kg)}{1000}$$

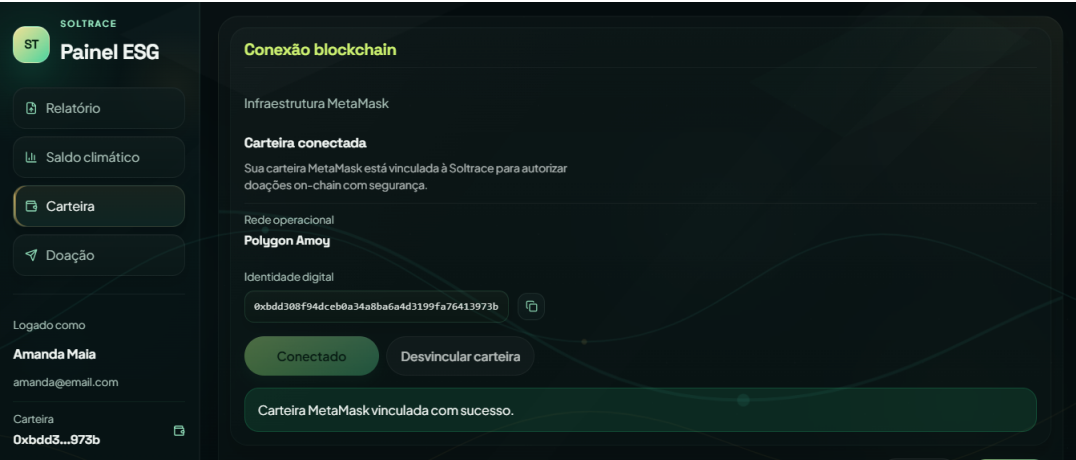
em que C representa a quantidade de créditos ambientais estimados. Essa modelagem adota a convenção segundo a qual 1 crédito corresponde a 1 tonelada de dióxido de carbono. Como a geração distribuída residencial frequentemente resulta em volumes inferiores a uma tonelada por período de análise, o sistema foi projetado para operar com créditos fracionários, permitindo representar com maior precisão os benefícios ambientais associados à geração solar de pequena escala.

2.3 ARQUITETURA BLOCKCHAIN

A camada blockchain da aplicação foi concebida para garantir rastreabilidade, transparência e integridade na destinação dos créditos ambientais gerados a partir da energia solar. Para operacionalizar esse processo, a arquitetura adotada foi estruturada em três entidades principais: a carteira do usuário, responsável pela confirmação das operações e pelo pagamento das taxas de *gas*; a carteira autorizadora da plataforma, utilizada pelo *backend* para emitir autorizações criptográficas; e a carteira da instituição beneficiária demonstrativa, destinatária dos ativos digitais gerados durante o processo de doação.

A associação entre o usuário e sua carteira é realizada por meio de um mecanismo de autenticação baseado em assinatura digital. Inicialmente, o *backend* gera uma mensagem única, que é assinada pelo usuário utilizando a MetaMask. Em seguida, a assinatura é validada pelo sistema, permitindo comprovar a posse da carteira sem a necessidade de armazenamento de chaves privadas. A Figura 6 apresenta a interface responsável pelo gerenciamento dessa conexão, exibindo informações como o endereço público vinculado, a rede utilizada e o status da conexão.

Figura 6 - Interface de conexão blockchain e vinculação da carteira MetaMask



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da autenticação da carteira, o usuário pode iniciar o processo de destinação dos créditos ambientais. Nessa etapa, o *backend* calcula o saldo disponível, verifica as regras de elegibilidade da operação e gera uma autorização criptográfica contendo os parâmetros necessários para sua execução, incluindo a carteira do usuário, a carteira destinatária, a quantidade de créditos a ser destinada, uma referência única da operação e um prazo de validade.

O contrato inteligente foi implementado em Solidity e compatibilizado com o padrão ERC-20. Na versão final do experimento, o ativo recebeu o nome SolTrace e o símbolo STRC, com 8 casas decimais. Sua lógica principal foi concentrada em uma função de doação autorizada, responsável por receber a carteira destinatária, a quantidade de tokens, a referência da operação, o prazo limite e a assinatura da autorização. Após a validação desses parâmetros, o contrato realiza o *mint* do token diretamente para a carteira da instituição beneficiária.

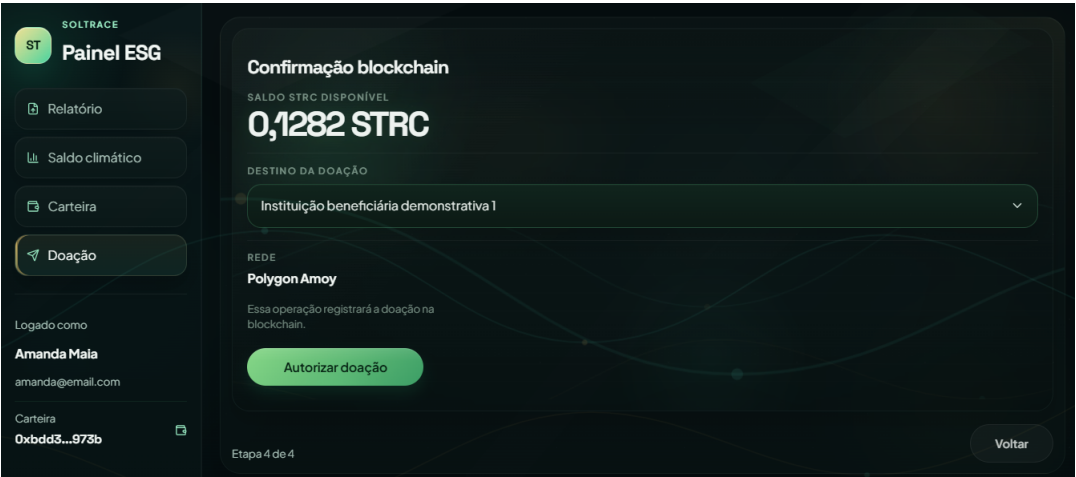
Para fins experimentais, o contrato inteligente foi compilado e implantado na rede Polygon Amoy por meio de uma carteira sob controle da aplicação, utilizada como carteira de *deploy*. No contexto do protótipo, essa mesma carteira também foi empregada como carteira autorizadora, responsável pela assinatura das autorizações criptográficas verificadas pelo contrato. Tal configuração foi adotada com o objetivo de simplificar a operacionalização do experimento, preservando, ainda assim, a distinção funcional entre os três atores do fluxo transacional: a carteira do usuário, que executa a transação; a carteira autorizadora, que valida institucionalmente a operação; e a carteira destinatária da instituição beneficiária demonstra-

tiva, que recebe o ativo emitido.

A escolha da rede Polygon Amoy se deu por sua compatibilidade com contratos inteligentes do ecossistema Ethereum, pela integração com MetaMask e pelo custo reduzido das transações, o que favoreceu a viabilidade experimental do protótipo. As taxas de *gas* permaneceram sob responsabilidade do usuário que confirma a operação, enquanto a plataforma se encarregou da validação *off-chain* e da autorização criptográfica da transação.

A Figura 7 apresenta a interface de doação implementada no SolTrace. Nessa tela, são exibidos o saldo de créditos STRC disponível, a instituição beneficiária selecionada e a rede blockchain utilizada. Ao autorizar a operação, a solicitação é encaminhada para a MetaMask, onde o usuário assina e confirma a transação que será posteriormente registrada na blockchain.

Figura 7 - Interface de autorização da doação STRC na rede Polygon Amoy



Fonte: Elaborado pela autora.

Após a confirmação da doação, o sistema disponibiliza um recibo blockchain contendo informações essenciais da operação, como a quantidade de STRC destinada, a instituição beneficiária, a rede utilizada, a referência *off-chain* e o *hash* da transação. Essa etapa conclui o fluxo de rastreabilidade proposto pelo sistema, conectando os dados de geração solar previamente processados à emissão e destinação dos créditos ambientais em um ambiente descentralizado.

2.4 PROCEDIMENTOS DE TESTE E VALIDAÇÃO FUNCIONAL

A validação do protótipo foi conduzida por meio de testes funcionais iterativos, com o objetivo de verificar o correto funcionamento das funcionalidades implementadas e a integração entre os componentes da aplicação. Os testes abrangeram todas as etapas do fluxo operacional, incluindo o envio de relatórios em formato PDF, a extração das informações energéticas, o cálculo dos indicadores ambientais, a atualização do saldo de créditos, a vinculação e desvinculação de carteiras blockchain, a geração das autorizações criptográficas e o envio das transações para a rede Polygon Amoy.

Além da validação individual de cada funcionalidade, foram realizados testes integrados para verificar a execução completa do fluxo proposto, desde o envio do relatório de geração solar até a emissão dos tokens STRC para a carteira beneficiária. Em cada execução, foram analisados os registros produzidos pelo *backend*, os dados armazenados no banco de dados e os *hashes* das transações confirmadas na rede Polygon Amoy, permitindo confirmar a consistência das informações processadas pelo sistema.

Para aumentar a confiabilidade dos resultados, foram executados ciclos controlados de limpeza da base de dados e reinicialização do ambiente de testes, possibilitando a repetição integral dos experimentos em condições equivalentes. Esse procedimento permitiu observar a estabilidade do comportamento da aplicação ao longo de múltiplas execuções e identificar eventuais inconsistências no processamento dos dados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A implementação do protótipo permitiu avaliar, em ambiente experimental, a viabilidade de uma aplicação web baseada em blockchain para gestão e doação de microcréditos de carbono de sistemas fotovoltaicos residenciais. Os resultados obtidos indicam que a articulação entre processamento documental, cálculo ambiental e registro *on-chain* pode ser operacionalizada de forma coerente em um fluxo único, preservando rastreabilidade e consistência transacional.

No fluxo implementado, o usuário autenticado realiza o envio de um relatório de geração solar em formato PDF, a partir do qual o sistema extrai o conteúdo textual para identificação da energia gerada. Nos testes realizados com documentos válidos e textualmente estruturados, a leitura direta do PDF permitiu reconhecer corretamente os dados energéticos e

utilizá-los como base para o cálculo ambiental. Em um dos cenários experimentais, foi identificado o valor de 2451 kWh de geração, que resultou em 128,19 kg de CO₂ evitado e em 0,1282 créditos ambientais fracionários, representados no sistema como STRC.

Esse resultado é particularmente relevante porque evidencia a aderência da modelagem proposta ao contexto da geração distribuída residencial. Em sistemas fotovoltaicos de pequena escala, a quantidade de emissões evitadas tende a ser reduzida quando observada individualmente, o que dificulta o aproveitamento desses ativos em mecanismos tradicionais de mercado. Nesse sentido, a possibilidade de operar com créditos fracionários mostrou-se compatível com a natureza do problema investigado, permitindo representar digitalmente ativos ambientais que, sob abordagens convencionais, tenderiam a permanecer economicamente subaproveitados.

Além da etapa de cálculo, o protótipo disponibilizou os resultados ambientais em um painel de saldo climático, no qual são apresentados indicadores como a energia solar reconhecida, a quantidade estimada de CO₂ evitado, relatórios validados e saldo disponível para doação. Sob essa perspectiva, o sistema não apenas calcula créditos, mas organiza um encadeamento lógico entre entrada documental, processamento ambiental e destinação final. Essa integração reforça o potencial da aplicação como ferramenta de rastreabilidade climática, uma vez que vincula a origem documental do dado energético à materialização digital do ativo ambiental correspondente.

No componente blockchain, o protótipo foi implantado na rede Polygon Amoy com contrato inteligente compatível com o padrão ERC-20. O ativo digital utilizado no experimento recebeu a nomenclatura SolTrace e o símbolo STRC, com oito casas decimais, permitindo representar adequadamente frações de crédito ambiental. O fluxo transacional foi estruturado para que a autorização institucional da operação ocorresse *off-chain*, por meio de assinatura criptográfica do *backend*, enquanto a confirmação final fosse realizada pelo usuário via MetaMask. Tal decisão arquitetural mostrou-se adequada ao escopo do protótipo, pois reduziu a complexidade operacional sem descaracterizar o papel da blockchain como infraestrutura de confiança para o registro auditável da doação.

Durante os testes, a execução da doação on-chain exigiu o pagamento da taxa de gas pela carteira do usuário, no momento da confirmação da transação pela MetaMask. Como o protótipo utilizou a rede de testes Polygon Amoy, o pagamento foi realizado com tokens sem valor comercial,

não gerando custos financeiros reais. Entretanto, esse resultado evidencia uma questão relevante para uma futura implantação em rede principal, pois o valor da taxa pode variar conforme a demanda e as condições da rede. Considerando que o SolTrace opera com microcréditos de baixo valor individual, custos elevados de gas poderiam comprometer a viabilidade econômica das doações, tornando necessária a avaliação de mecanismos de redução, agrupamento ou custeio dessas taxas pela plataforma.

Como resultado desse processo, após a confirmação da doação, a aplicação disponibilizou um recibo blockchain reunindo informações como a quantidade de STRC destinada, a instituição beneficiária, a rede utilizada e o *hash* da transação. Esse recurso mostrou-se relevante para a rastreabilidade do fluxo, pois permite relacionar o registro interno da aplicação a um identificador público verificável na blockchain. Assim, a doação passa a contar com uma evidência técnica de sua execução, reforçando a auditabilidade e a transparência da destinação dos microcréditos.

A opção por reservar a blockchain à etapa de destinação final também se mostrou metodologicamente consistente. Em vez de descentralizar integralmente os processos da aplicação, o protótipo utilizou a tecnologia de forma direcionada, explorando os mecanismos que representam sua principal contribuição tecnológica: a garantia da integridade dos registros, a transparência das transações e a auditabilidade das operações realizadas.

Os testes funcionais realizados indicaram comportamento satisfatório nos fluxos centrais da aplicação. Foram validados cenários relacionados à autenticação, à proteção de rotas, ao envio de relatórios em PDF, à rejeição de arquivos inválidos, à identificação de duplicidade documental, à extração dos dados energéticos, ao cálculo ambiental e ao registro do saldo climático, à vinculação de carteira e à preparação da autorização de doação em blockchain. Também foram avaliados mecanismos de prevenção de inconsistências operacionais, como a rejeição de saldo insuficiente para doação, o impedimento de reutilização de saldo já destinado em operação anterior e o tratamento de documentos inválidos ou inconsistentes. Esses resultados reforçam a consistência interna do sistema e indicam que a proposta foi validada não apenas conceitualmente, mas também em seus principais fluxos de uso.

Os resultados obtidos apresentam pontos de convergência com os trabalhos correlatos, mas também evidenciam diferenças quanto ao escopo da solução. Assim como Sorensen (2023), o SolTrace utiliza a toke-

nização para representar créditos ambientais digitalmente; entretanto, enquanto as plataformas analisadas pelo autor se concentram em mercados e agentes de maior escala, o protótipo desenvolvido é direcionado à microgeração fotovoltaica residencial. Em relação a Yamaguchi, Santos e Carvalho (2021), confirma-se o potencial da blockchain para ampliar a transparência e a confiança no registro de ativos relacionados à energia renovável, embora o SolTrace aplique essa tecnologia especificamente à rastreabilidade da destinação dos microcréditos. Já em comparação com Fu, Tan e Xu (2023), que empregaram contratos inteligentes na negociação descentralizada de certificados de energia renovável, o presente trabalho utiliza o contrato inteligente para registrar a doação dos ativos a instituições beneficentes. Dessa forma, a principal contribuição do SolTrace está na integração entre geração solar residencial, créditos fracionários, blockchain e destinação social em um único fluxo experimental.

Não obstante os resultados alcançados, o trabalho apresenta limitações. O protótipo não tem como finalidade substituir mecanismos formais de certificação de créditos de carbono empregados em mercados regulados ou voluntários, operando, neste estudo, com microcréditos estimados a partir de fator oficial de emissão e documentação submetida pelo usuário. Adicionalmente, a validação *on-chain* foi realizada em rede de testes, o que delimita a análise a um ambiente experimental. Também cabe destacar que a instituição beneficiária empregada no protótipo possui caráter demonstrativo, de modo que o fluxo foi validado tecnicamente, mas não em contexto institucional real.

Como possibilidade de aplicação prática, o sistema poderia ser integrado a plataformas de empresas responsáveis pelo fornecimento, monitoramento ou gestão de sistemas fotovoltaicos, como ocorre em soluções voltadas ao acompanhamento da geração solar. Nesse cenário, a própria empresa responsável pelo hardware e pela documentação técnica da usina poderia disponibilizar, em sua plataforma, uma funcionalidade específica para doação solar ou destinação de créditos ambientais. Essa integração permitiria que os dados de geração fossem obtidos diretamente de uma fonte institucionalmente responsável pela medição e emissão dos relatórios, reduzindo a dependência do envio manual de arquivos pelo usuário final e minimizando riscos de inconsistências ou fraudes documentais. Dessa forma, a validação das informações energéticas passaria a ocorrer a partir de registros gerados ou certificados pela própria empresa fornecedora, fortalecendo a confiabilidade do processo e ampliando o potencial

de uso do sistema em contextos reais de rastreabilidade, transparência e destinação de créditos vinculados à geração solar.

Apesar dessas limitações, os resultados obtidos demonstram que a integração entre leitura documental, cálculo ambiental, autenticação criptográfica e registro em blockchain é tecnicamente viável. Dessa forma, o estudo oferece uma base consistente para o desenvolvimento de aplicações voltadas à gestão de microcréditos de carbono, à rastreabilidade climática e à investigação de modelos mais robustos de destinação desses ativos em contextos reais.

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo propor e validar, por meio da prototipagem de uma aplicação baseada em blockchain, uma solução voltada ao gerenciamento, à tokenização e à doação rastreável de microcréditos de carbono derivados de sistemas fotovoltaicos residenciais. A solução desenvolvida integrou, em um fluxo único, o envio de relatórios de geração solar em PDF, a extração de dados energéticos, o cálculo do dióxido de carbono evitado, a conversão em créditos ambientais fracionários e a preparação da destinação *on-chain*.

Os resultados obtidos indicaram que a arquitetura híbrida adotada mostrou-se adequada ao problema investigado, ao combinar processamento *off-chain* para autenticação, recepção documental, cálculo ambiental e controle operacional, com processamento *on-chain* para o registro auditável da doação. Dessa forma, preservou-se a blockchain na etapa em que sua contribuição é metodologicamente mais relevante, isto é, na validação e rastreabilidade da destinação final dos créditos ambientais.

Sob a perspectiva aplicada, o trabalho contribui ao propor uma alternativa voltada ao pequeno gerador residencial, contexto ainda pouco explorado em soluções de tokenização de ativos ambientais. Ao considerar créditos fracionários de sistemas fotovoltaicos de pequena escala, a proposta amplia a discussão sobre formas de aproveitamento de ativos digitais associados a finalidades de impacto social.

Entretanto, o estudo apresenta limitações. O protótipo não substitui mecanismos formais de certificação de créditos de carbono empregados em mercados regulados ou voluntários, operando com créditos estimados a partir de fator oficial de emissão e documentação submetida pelo usuário. Além disso, a validação blockchain foi conduzida em rede de testes, e a instituição beneficiária utilizada no fluxo possui caráter demonstra-

tivo, o que delimita os resultados ao contexto experimental.

Como trabalhos futuros, recomendam-se a atualização automatizada dos fatores de emissão empregados no cálculo e a integração do sistema com plataformas de monitoramento de geração fotovoltaica, permitindo que os dados energéticos sejam obtidos diretamente de fontes responsáveis pela medição e pelo acompanhamento da produção solar. Essa abordagem poderia reduzir a dependência do envio manual de relatórios em PDF, aumentar a confiabilidade das informações utilizadas no cálculo dos créditos ambientais e diminuir riscos de inconsistências documentais.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Os autores declaram que ferramentas de Inteligência Artificial generativa foram utilizadas exclusivamente como apoio auxiliar à elaboração deste trabalho, incluindo assistência na revisão linguística, estruturação textual e organização de ideias. Nenhuma ferramenta de IA foi utilizada para substituição da autoria intelectual, análise científica, interpretação dos resultados ou tomada de decisões acadêmicas. A responsabilidade integral pelo conteúdo, originalidade, veracidade das informações e conformidade com os princípios de integridade científica permanece integralmente atribuída aos autores.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Energia solar já evitou 50 milhões de toneladas de CO no Brasil**. 2024. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticias-externas/energia-solar-ja-evitou-50-milhoes-de-toneladas-de-co2-no-brasil/>>. Acesso em: 28 out. 2025.

BEZERRA, N. M.; SILVA, J. I. A. O. **Tokenização dos créditos de carbono: desafios e potencialidades para a administração pública na economia verde**. Universidade Federal de Campina Grande. 2024, Disponível em: <<https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/42250>>. Acesso em: 23 nov. 2025.

Brasil. **Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024**. 2024. <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-15.042-de-11-de-dezembro-de-2024-601124199>>. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). Acesso em: 20 maio 2026.

Carbonext. **Glossário do Mercado de Carbono**. 2025. Disponível em: <<https://www.carbonext.com.br/credito-de-carbono/glossario/>>. Acesso em: 29 out. 2025.

FU, S.; TAN, Y.; XU, Z. **Blockchain-based renewable energy certificate trade for low-carbon community of active energy agents.** Sustainability, v. 15, n. 23. ISSN 2071-1050. 2023, Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/23/16300>>. Acesso em: 11 nov. 2025.

KREIBICH, N. **Toward global net zero: the voluntary carbon market on its quest to find its place in the post-paris climate regime.** Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, v. 15, n. 2, p. e892. 2024, Disponível em: <https://epub.wupperinst.org/files/8579/8579_Kreibich.pdf>. Acesso em: 08 abril 2026.

MCTI; SIRENE. **Fator de emissão médio anual do Sistema Interligado Nacional – ano base 2024.** 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>>. Acesso em: 24 abril 2026.

NAKAMOTO, S. **Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system.** 2008, Disponível em: <<https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2025.

REN21. **Renewables 2025 Global Status Report: Global Overview.** Paris, France: [s.n.], 2025. Disponível em: <<https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>>. Acesso em: 08 abril 2026.

SILVA, P. P. da et al. **Photovoltaic distributed generation – an international review on diffusion, support policies, and electricity sector regulatory adaptation.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, v. 103, p. 30–39. 2019, Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118308232>>. Acesso em: 08 abril 2026.

SORENSEN, D. **Tokenized carbon credits.** Ledger, v. 8. 2023, Disponível em: <<https://doi.org/10.5195/ledger.2023.294>>. Acesso em: 11 nov. 2025.

SOUSA, F. H. **Regulamentação do mercado de créditos de carbono no Brasil: desafios e perspectivas.** 102 f. p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente/CCET) — Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025. Disponível em: <<https://tedebc.ufma.br/jspui/handle/tede/6461>>. Acesso em: 11 nov. 2025.

UNFCCC. **Tool to calculate the emission factor for an electricity system.** 2024. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Reference/catalogue/document?doc_id=000003436>. Acesso em: 24 abril 2026.

YAMAGUCHI, J. A. R.; SANTOS, T. R.; CARVALHO, A. P. de. **Blockchain technology in renewable energy certificates in brazil.** BAR - Brazilian Administration Review, v. 18, n. Special Issue, p. e200069. 2021, Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1807-7692bar2021200069>>. Acesso em: 23 nov. 2025.