



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

BLOCKCHAIN E INTELIGÊNCIA NA OTIMIZAÇÃO DE TRANSAÇÕES DE CRÉDITOS DE CARBONO: UMA ANÁLISE SOB A PERSPECTIVA DA TEORIA INSTITUCIONAL – TRANSACIONAL.

BLOCKCHAIN AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE OPTIMIZATION OF CARBON CREDIT TRANSACTIONS: AN ANALYSIS FROM THE INSTITUTIONAL–TRANSACTIONAL THEORY PERSPECTIVE

Autores: Tatiane de Sousa Serafim¹, Sarah Mesquita Lima², Marcello Erick Fontenele Fiuza³, Lucas Wesley do Nascimento Alves⁴, Stephany Cristhiny Figueiredo Fernande⁵

¹Universidade Federal do Ceará – tatiane.serafim@alu.ufc.br; ² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – sarah.mesquita@ifce.edu.br, ³ Universidade Federal do Ceará – marcelloerick8@gmail.com, ⁴ Universidade Federal do Ceará – lwalves2091.la@gmail.com, ⁵ Universidade Federal do Ceará - stephanycristhiny09@gmail.com.

RESUMO

Este artigo analisa os impactos do uso de tecnologias digitais emergentes, em especial blockchain e inteligência artificial, na redução dos custos de transação no mercado de créditos de carbono, sob a ótica da Teoria Institucional–Transacional. O objetivo central é compreender como tais inovações podem mitigar assimetrias informacionais, burocracia e dificuldades de monitoramento, fatores que comprometem a credibilidade e a eficiência desse mercado. A pesquisa adota uma abordagem qualitativa, fundamentada em revisão bibliográfica, com a elaboração de uma matriz institucional–transacional. Essa matriz compara dois cenários: o tradicional, marcado por altos custos de busca, negociação e monitoramento, e o digital, caracterizado por registros imutáveis, automação contratual e análises avançadas. Os resultados evidenciam que blockchain e inteligência artificial não apenas reduzem custos operacionais, mas também fortalecem novos pilares de governança. O blockchain garante transparência, rastreabilidade e segurança jurídica, prevenindo riscos como dupla contagem e greenwashing. Já a inteligência artificial aprimora auditorias, monitoramento e análises preditivas, ampliando a precisão na precificação dos créditos de carbono. Esses avanços contribuem para maior liquidez, padronização e legitimidade social no sistema. Conclui-se que a integração dessas tecnologias inaugura um novo paradigma de governança ambiental, no qual eficiência econômica e transparência institucional se complementam. Contudo, permanecem desafios regulatórios, éticos e de inclusão social, indicando a necessidade de aprofundar estudos com foco em experiências práticas, comparações internacionais e modelos híbridos de governança digital.

Palavras-chave: Blockchain; Inteligência Artificial; Custos de Transação; Mercado de Carbono; Governança Ambiental.

ABSTRACT

This article analyzes the impacts of emerging digital technologies, particularly blockchain and artificial intelligence, on reducing transaction costs in the carbon credit market, from the perspective of Institutional–Transactional Theory. The central objective is to understand how these innovations can mitigate informational asymmetries, bureaucracy, and monitoring difficulties, which



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

undermine the credibility and efficiency of this market. The research adopts a qualitative approach based on a literature review and develops an institutional–transactional matrix. This matrix compares two scenarios: the traditional one, characterized by high search, negotiation, and monitoring costs, and the digital one, defined by immutable records, contractual automation, and advanced analytics. The results show that blockchain and artificial intelligence not only reduce operational costs but also strengthen new pillars of governance. Blockchain ensures transparency, traceability, and legal certainty, preventing risks such as double counting and greenwashing. Artificial intelligence enhances auditing, monitoring, and predictive analyses, improving the accuracy of carbon credit pricing and oversight. Together, these advancements contribute to greater liquidity, standardization, and social legitimacy of the system. The study concludes that the integration of these technologies inaugurates a new paradigm of environmental governance, where economic efficiency and institutional transparency complement each other. Nevertheless, regulatory, ethical, and social inclusion challenges remain, highlighting the need for further research focused on practical experiences, international comparisons, and hybrid models of digital governance.

Keywords: Blockchain; Artificial Intelligence; Transaction Costs; Carbon Market; Environmental Governance.

1 INTRODUÇÃO

O agravamento das mudanças climáticas consolidou o mercado de créditos de carbono como um dos principais mecanismos de mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Esse mercado, tanto regulado quanto voluntário, ainda enfrenta desafios significativos relacionados a altos custos de transação, assimetria informacional, burocracia excessiva e riscos de greenwashing, fatores que comprometem sua credibilidade e eficiência (IPCC, 2023; Rosa; Castro, 2025). Nesse contexto, torna-se urgente a busca por soluções que assegurem maior transparência, rastreabilidade e confiabilidade nas operações, de forma a fortalecer a governança e a confiança dos agentes envolvidos (Lui, 2024; Bodnar; Hernández, 2022).

No cenário internacional, os mercados de carbono assumem papel estratégico na implementação de políticas de descarbonização e no cumprimento das metas estabelecidas pelo Acordo de Paris. Firmado em 2015, esse acordo consolidou os mercados como instrumentos centrais para a promoção da cooperação internacional e da eficiência climática. Um dos principais avanços foi a introdução do Artigo 6, que estabelece mecanismos para a transferência internacional de resultados de mitigação das emissões de gases de efeito estufa, por meio dos chamados Internationally Transferred Mitigation Outcomes (ITMOs) (Brasil, 2024; Rosa; Castro, 2025). Apesar do potencial econômico e ambiental desses instrumentos, a credibilidade do sistema depende da capacidade de monitorar, verificar e certificar créditos de maneira eficiente e segura, prevenindo a dupla contagem e reduzindo práticas oportunistas. Nesse contexto, a literatura recente aponta que a governança tradicional dos mercados de carbono tem se mostrado insuficiente para lidar com a crescente complexidade das negociações globais (Rosa; Castro, 2025; Le et al., 2024).

Nesse contexto, as tecnologias digitais emergentes, especialmente o blockchain e a inteligência artificial (IA), apresentam-se como alternativas promissoras para responder a tais demandas. O blockchain, ao permitir registros imutáveis e auditáveis, garante maior rastreabilidade das transações, enquanto a IA possibilita análises avançadas e automação de auditorias, contribuindo para a redução de custos de monitoramento e verificação. Em conjunto, essas ferramentas podem transformar de



forma estrutural o funcionamento dos mercados de carbono, ampliando a eficiência, a transparência e a legitimidade das transações (Tapscott; Tapscott, 2018; Olawade et al., 2024).

Ao incorporar a esse cenário a Teoria Institucional–Transacional, fundamentada na Teoria dos Custos de Transação (TCT), proposta por Coase (1937) e desenvolvida por Williamson (1985) e North (1990), se oferece um arcabouço analítico adequado para compreender os impactos dessas tecnologias digitais na redução dos custos de busca de informação, negociação, monitoramento e execução contratual. A partir desse referencial, este estudo busca responder à seguinte questão de pesquisa: como a integração de blockchain e inteligência artificial, sob a ótica da Teoria Institucional–Transacional, pode otimizar as transações no mercado de créditos de carbono?

O objetivo geral do estudo é analisar os impactos do uso de blockchain e inteligência artificial na redução dos custos de transação no mercado de créditos de carbono. Para atingir esse propósito, foram definidos três objetivos específicos: (i) identificar os principais custos de transação associados às negociações de créditos de carbono; (ii) examinar como blockchain e IA podem mitigar ineficiências e riscos informacionais; (iii) e desenvolver uma matriz institucional–transacional que compare os cenários tradicional e digital.

A justificativa deste trabalho reside na necessidade de aprimorar a governança institucional e a eficiência econômica dos mercados ambientais, tema de grande relevância frente aos compromissos globais de mitigação das mudanças climáticas. Ao articular teorias clássicas da economia institucional com ferramentas digitais emergentes, este estudo contribui para a literatura acadêmica sobre sustentabilidade e inovação, ao mesmo tempo em que oferece subsídios práticos para empresas, startups e formuladores de políticas interessados em fortalecer a legitimidade e a escalabilidade dos mercados de carbono. Além disso, reforça a importância de compreender a digitalização não apenas como uma inovação tecnológica, mas como um instrumento de transformação institucional capaz de remodelar os arranjos econômicos e ambientais em escala global (Villabruna; 2024; Rosa; Castro, 2025).

2 METODOLOGIA

Este estudo adotou uma abordagem qualitativa baseada em revisão bibliográfica, integrando a Teoria dos Custos de Transação (Coase, 1937; Williamson, 1985) com a análise do mercado de créditos de carbono e a aplicação da Matriz Institucional-Transacional. A opção por essa abordagem se justifica pelo caráter exploratório e descritivo da pesquisa, que busca compreender de forma aprofundada como as tecnologias digitais, em especial o blockchain e a inteligência artificial, podem impactar os custos envolvidos nesse mercado.

De acordo com Gil (2008), a revisão bibliográfica é especialmente adequada em situações em que se pretende reunir e interpretar diferentes contribuições teóricas já existentes, permitindo ao pesquisador construir um quadro analítico consistente. Assim, a pesquisa fundamentou-se em duas frentes principais. A primeira envolveu o levantamento de obras clássicas da Nova Economia Institucional, com destaque para as contribuições de Coase e Williamson, além de North (1990), no intuito de compreender a natureza dos custos de transação e seus efeitos sobre a governança econômica. A segunda buscou integrar estudos contemporâneos relacionados ao uso de blockchain, contratos inteligentes e inteligência artificial como mecanismos de transformação institucional e redução de custos em mercados regulados e ambientalmente orientados.



A Teoria dos Custos de Transação sendo integrada oferece um arcabouço teórico relevante por considerar que as transações econômicas envolvem custos de busca de informação, negociação, monitoramento e enforcement. Esses elementos são centrais no mercado de créditos de carbono, em que a multiplicidade de atores, a complexidade regulatória e a possibilidade de práticas oportunistas tornam a governança mais desafiadora. Nesse sentido, a aplicação da teoria permite analisar de que forma as novas tecnologias digitais podem mitigar ineficiências e promover maior transparência e confiabilidade.

A Matriz Institucional-Transacional desenvolvida como instrumento analítico para operacionalizar essa integração teórica, proporciona organizar os quatro tipos de custos de transação identificados na literatura, comparando o cenário tradicional, caracterizado por altos custos decorrentes de burocracia e ineficiência, com o cenário tecnológico, em que blockchain e inteligência artificial possibilitam processos automatizados, auditáveis e mais seguros. A fundamentação da matriz tende a basear-se não apenas em referenciais clássicos da teoria econômica, mas também em estudos recentes sobre inovação e sustentabilidade.

Dessa forma, a metodologia adotada articula a revisão bibliográfica como base de sustentação teórica e a matriz aplicada como ferramenta para sistematizar e interpretar criticamente os impactos institucionais e transacionais da incorporação de tecnologias digitais no mercado de créditos de carbono.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Teoria dos Custos de Transação (Coase, 1937; Williamson, 1985) argumenta que toda interação econômica está sujeita a custos além do preço de mercado, como os relacionados à busca de informações, negociação, monitoramento e execução contratual. No mercado de créditos de carbono, tais custos são tradicionalmente elevados, devido à multiplicidade de atores (empresas, governos, certificadoras e ONGs), à complexidade regulatória e à necessidade constante de verificações que assegurem a integridade ambiental dos projetos (North, 1990; Dixit, 1996; Hodgson, 2007). Esse contexto gera riscos de greenwashing e de dupla contagem, que minam a credibilidade e dificultam a escalabilidade do mercado (IPCC, 2023; Rosa; Castro, 2025).

A adoção de tecnologias digitais, como blockchain e inteligência artificial, surge como resposta a essas limitações. O blockchain assegura a rastreabilidade, imutabilidade e auditabilidade dos registros (Tapscott; Tapscott, 2018; Mougayar, 2016), enquanto a inteligência artificial contribui com análises preditivas, automação de auditorias e maior precisão na precificação (Russell; Norvig, 2021; Olawade et al., 2024). A integração dessas tecnologias cria um novo ecossistema transacional no qual a assimetria de informação e os custos associados a auditorias manuais, consultorias e intermediários são significativamente reduzidos (Swinkels, 2024; Zhou; Zhang, 2022).

Ao elaborar uma Matriz Institucional-Transacional ampliada, observa-se que a aplicação conjunta de blockchain e IA pode modificar estruturalmente o mercado de créditos de carbono. A Tabela 1 apresenta uma síntese comparativa dos custos de transação nos cenários tradicional e digital, destacando dimensões adicionais como segurança jurídica, liquidez e legitimidade social, frequentemente negligenciadas em análises convencionais.



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Quadro 1 - Matriz Institucional – Transacional Aplicada ao Mercado de Créditos de Carbono

Elementos de Custo de Transação	Cenário Tradicional	Cenário Digital (Blockchain + IA)	Síntese Comparativa
Custos de Busca de Informação	Elevados, devido a auditorias presenciais, consultorias especializadas e relatórios dispersos, sujeitos a falhas humanas (North, 1990).	Reduzidos, pois os dados passam a ser digitais, padronizados, auditáveis em tempo real e acessíveis de forma descentralizada (Tapscott; Tapscott, 2018).	Maior transparência e acessibilidade; redução de assimetrias informacionais; agilidade no processo decisório.
Custos de Negociação	Altos, em razão da complexidade contratual, da necessidade de intermediários e da falta de padronização dos ativos (Williamson, 1985).	Baixos, via <i>smart contracts</i> que automatizam cláusulas e reduzem a dependência de intermediários (Catalini; Gans, 2016).	Simplificação de contratos; previsibilidade; redução de conflitos e custos legais.
Custos de Monitoramento	Muito altos, dependentes de verificações manuais e frequentes auditorias externas (IPCC, 2023).	Reduzidos, graças à auditoria contínua por blockchain e ao uso de IA com <i>machine learning</i> e imagens de satélite (Olawade et al., 2024).	Confiabilidade em tempo real; mitigação de fraudes e <i>greenwashing</i> ; maior escalabilidade do mercado.
Custos de Enforcement (Execução)	Incertos, sujeitos a disputas legais, morosidade judicial e litígios complexos (Dixit, 1996).	Baixos, com execução automática por <i>smart contracts</i> e <i>token burning</i> (Swinkels, 2024).	Segurança jurídica ampliada; cumprimento automático de obrigações; incentivo a novos investimentos.
Liquidez e Padronização dos Ativos	Baixa liquidez devido à heterogeneidade dos certificados e metodologias de verificação (Rosa; Castro, 2025).	Alta liquidez via tokenização e padronização digital de créditos (Swinkels, 2024).	Facilita negociações internacionais; amplia atratividade para investidores institucionais.
Legitimidade e Confiança Social	Vulnerável a críticas sobre efetividade e transparência, comprometendo a credibilidade (Hodgson, 2007).	Reforçada por registros imutáveis, acessíveis publicamente e auditáveis (Zhou; Zhang, 2022).	Aumento da confiança social e institucional; maior alinhamento com compromissos globais de sustentabilidade.

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A matriz institucional–transacional ampliada demonstra que a incorporação de blockchain e inteligência artificial vai além da redução de custos operacionais, configurando uma mudança estrutural na forma como transações ambientais são concebidas e legitimadas. No modelo tradicional, o mercado de carbono é limitado por assimetrias informacionais, complexidade regulatória e intermediação onerosa, enquanto o cenário digital cria condições para maior eficiência, transparência e confiabilidade.

Nos custos de busca de informação, a descentralização via blockchain reduz a dependência de consultorias e verificações presenciais, mitigando assimetrias informacionais (Williamson, 1985; North, 1990; Tapscott; Tapscott, 2018). Quanto aos custos de negociação, os smart contracts diminuem a necessidade de intermediários, aceleram transações e ampliam a padronização (Catalini; Gans, 2016). No monitoramento, a integração da IA com IoT, imagens de satélite e machine learning permite auditorias



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

contínuas e precisas, combatendo falhas humanas e práticas oportunistas (Russell; Norvig, 2021; Olawade et al., 2024). Em relação ao enforcement, mecanismos digitais como token burning e smart contracts reduzem disputas judiciais, fortalecendo a liquidez e o cumprimento contratual (Dixit, 1996; Swinkels, 2024).

Além dos custos clássicos, destacam-se a liquidez e a legitimidade social: a tokenização amplia o acesso de investidores e pequenos agentes (Swinkels, 2024; Zhou; Zhang, 2022), enquanto a imutabilidade dos registros fortalece a confiança institucional (Hodgson, 2007).

Assim, a análise mostra que blockchain e IA redefinem arranjos institucionais, em linha com a Nova Economia Institucional (North, 1990), criando mercados mais robustos, líquidos e internacionalmente confiáveis, em consonância com o Acordo de Paris e as recomendações do IPCC (2023).

4 CONCLUSÕES

O estudo conclui que a integração de blockchain e inteligência artificial representa um marco transformador para o mercado de créditos de carbono, reduzindo custos de transação e reconfigurando os arranjos institucionais que sustentam sua credibilidade. Enquanto o blockchain assegura transparência, rastreabilidade e segurança jurídica, a inteligência artificial aprimora auditorias, precificação e análises preditivas, fortalecendo a governança e alinhando o mercado a compromissos globais, como o Acordo de Paris. Essas tecnologias consolidam-se como pilares para maior eficiência, liquidez e legitimidade social, aproximando o sistema de créditos de carbono dos padrões dos mercados financeiros internacionais.

Contudo, persistem desafios como falta de regulamentação unificada, interoperabilidade limitada, altos custos de implementação, resistências institucionais e preocupações éticas no uso de dados. Além disso, destaca-se a necessidade de garantir inclusão de pequenos produtores, comunidades tradicionais e países em desenvolvimento, para que a digitalização também seja um vetor de justiça socioambiental.

A pesquisa indica que blockchain e inteligência artificial não devem ser vistos apenas como ferramentas técnicas, mas como elementos estruturantes capazes de inaugurar um novo paradigma de governança ambiental. Recomenda-se que investigações futuras explorem aplicações práticas, comparações internacionais, modelos híbridos de governança digital e os impactos sociais da transformação tecnológica. Em síntese, essas inovações fortalecem a eficiência e a legitimidade do mercado de carbono, ao mesmo tempo em que impõem novos desafios que exigem ação conjunta de governos, empresas, academia e sociedade civil.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Regulamentação dos instrumentos de mercado do Acordo de Paris: Artigo 6 e os ITMOs. **Interesse Nacional**, 2024. Disponível em: <https://interessenacional.com.br/regulamentacao-dos-instrumentos-de-mercado-do-acordo-de-paris/>. Acesso em: 2 set. 2025.

BODNAR, Z.; HERNÁNDEZ, J. G. V. Mercado de Créditos de Carbono na Perspectiva da Governança Climática Transnacional: Experiências do Brasil e da Colômbia. **Novos Estudos Jurídicos**, v. 27, n. 3, p. 452-474, 2022.

CATALINI, C.; GANS, J. The value of blockchain technology. **MIT Sloan Research Paper**, n. 5191-16, p. 1-32, 2016.



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

COASE, R. H. The nature of the firm. **Economica**, v. 4, n. 16, p. 386-405, nov. 1937. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1468-0335.1937.tb00002.x>. Acesso em: 25 ago. 2025.

DIXIT, A. **The making of economic policy: a transaction-cost politics perspective**. Cambridge: MIT Press, 1996.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.

HODGSON, G. M. Evolutionary and institutional economics as the new mainstream?. **Evolutionary and institutional economics review**, v. 4, n. 1, p. 7-25, 2007.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE –. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 20 ago. 2025.

LUI, M. A. **Mercados de carbono : pilares da estratégia global contra as mudanças climáticas**. 2024. Tese (Doutorado) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 06 dez. 2024. Disponível em: <https://repositorio.ulisboa.pt/handle/10400.5/96616>. Acesso em: 11 jun. 2025.

MOUGAYAR, W. **The business blockchain: promise, practice, and the application of the next internet technology**. Hoboken: Wiley, 2016.

NORTH, D. C. **Institutions, institutional change and economic performance**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

OLAWADE, D. B. *et al.* Artificial intelligence in environmental monitoring: Advancements, challenges, and future directions. **Hygiene and Environmental Health Advances**, v. 12, p. 100114, 2024.

PROLO, C. D. *et al.* Explicando os mercados de carbono na era do Acordo de Paris. **Rio de Janeiro: Instituto Clima e Sociedade**, 2021.

ROSA, L.; CASTRO, A. ESG, governança ambiental e o mercado de carbono. **Revista de Administração e Sustentabilidade**, Brasília, v. 9, n. 1, p. 55-77, 2025.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial intelligence: a modern approach**. 4. ed. London: Pearson, 2021.

SWINKELS, L. Trading carbon credit tokens on the blockchain. **International Review of Economics & Finance**, v. 91, p. 720-733, mar. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1059056024000121>. Acesso em: 25 ago. 2025.

TAPSCOTT, D.; TAPSCOTT, A. **Blockchain revolution: how the technology behind bitcoin and other cryptocurrencies is changing the world**. London: Penguin, 2018.

VILLABRUNA, V. E. *et al.* Barriers and strategies for green investments in environmental, social and governance: a seaport companies' study. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 35, n. 6, p. 1193-1212, 2024.

WILLIAMSON, O. E. **The economic institutions of capitalism: firms, markets, relational contracting**. New York: Free Press, 1985

ZHOU, Q.; ZHANG, Q. Simulation research on carbon emissions trading based on blockchain. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 30, n. 1, p. 1-12, jan. 2022. Disponível em: <https://ijspm.vgtu.lt/index.php/JEELM/article/view/15107>. Acesso em: 11 ago. 2025.