

OTIMIZAÇÃO DE TRANSAÇÕES DE CRÉDITOS DE CARBONO POR MEIO DE BLOCKCHAIN E IA: Uma Aplicação da Teoria Institucional - Transacional.

TATIANE DE SOUSA SERAFIM

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ - UFC

SARAH MESQUITA LIMA

UNIVERSIDADE DE FORTALEZA - UNIFOR

MARCELLO ERICK FONTENELE FIUZA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ - UFC

LUCAS WESLEY DO NASCIMENTO ALVES

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ - UFC

STEPHANY CRISTHINY FIGUEIREDO FERNANDES

Introdução

O agravamento das mudanças climáticas consolidou o mercado de créditos de carbono como um dos principais mecanismos de mitigação das emissões de GEE (IPCC, 2023). Apesar de sua relevância, esse mercado enfrenta barreiras como altos custos de transação, burocracia e riscos de greenwashing (Rosa; Castro, 2025). Tecnologias digitais, como blockchain e inteligência artificial, surgem como soluções promissoras para fortalecer a governança, garantir maior rastreabilidade e ampliar a confiança entre os agentes econômicos (Olawade et al., 2024; Tapscott; Tapscott, 2018).

Problema de Pesquisa e Objetivo

O mercado de créditos de carbono, embora promissor, ainda enfrenta altos custos de negociação, monitoramento e execução contratual, além de entraves institucionais que limitam sua legitimidade. Assim, surge a questão: de que maneira blockchain e inteligência artificial podem otimizar as transações nesse mercado? O objetivo é investigar os impactos dessas tecnologias na redução de custos de transação e na consolidação de um sistema mais transparente, eficiente e confiável para os agentes envolvidos.

Fundamentação Teórica

A Teoria dos Custos de Transação (Coase, 1937; Williamson, 1985) destaca que toda transação envolve custos de informação, negociação e execução. No mercado de carbono, tais custos são historicamente elevados, exigindo arranjos institucionais robustos (North, 1990). O blockchain possibilita registros auditáveis e contratos inteligentes autoexecutáveis, reduzindo burocracia e intermediários (Catalini; Gans, 2016; Tapscott; Tapscott, 2018). Já a inteligência artificial permite auditorias automatizadas e análises preditivas, reduzindo falhas e ampliando a confiança (Russell; Norvig, 2021).

Metodologia

Este estudo adota abordagem qualitativa, com base em revisão bibliográfica, articulando os fundamentos da Nova Economia Institucional (Coase, 1937; Williamson, 1985; North, 1990) e pesquisas recentes sobre blockchain e inteligência artificial (Mougayar, 2016; Swinkels, 2024; Zhou; Zhang, 2022). Como ferramenta analítica, desenvolveu-se a Matriz Institucional Transacional, comparando os custos de transação nos cenários tradicional e digital. O método permitiu avaliar de forma crítica como a incorporação de tecnologias digitais pode reduzir ineficiências e fortalecer a governança no mercado.

Análise e Discussão dos Resultados

A Matriz Institucional Transacional revelou diferenças significativas entre os cenários tradicional e digital. Antes das tecnologias, os custos de informação e monitoramento eram elevados, exigindo auditorias manuais e processos burocráticos (North, 1990). Com blockchain, dados tornam-se rastreáveis e auditáveis em tempo real (Swinkels, 2024). Os contratos inteligentes reduzem a necessidade de intermediários (Catalini; Gans, 2016), e a IA viabiliza auditorias contínuas, mitigando riscos de fraude (Russell; Norvig, 2021). Assim, há ganhos em eficiência, confiança e legitimidade institucional.

Considerações Finais

O estudo demonstrou que blockchain e inteligência artificial são instrumentos estratégicos para transformar o mercado de créditos de carbono, reduzindo custos de transação e ampliando transparência e rastreabilidade. Essas tecnologias fortalecem a governança institucional, melhoram a execução contratual e aumentam a segurança jurídica, promovendo maior credibilidade aos mercados ambientais. Conclui-se que tais inovações não são apenas recursos tecnológicos, mas pilares de mudança institucional, capazes de alinhar eficiência econômica e governança ambiental e climática.

Referências

COASE, R. H. The nature of the firm. *Economica*, 1937. WILLIAMSON, O. E. The economic institutions of capitalism. Free Press, 1985. NORTH, D. C. Institutions, institutional change and economic performance. Cambridge University Press, 1990. TAPSCOTT, D.; TAPSCOTT, A. Blockchain revolution. Penguin, 2018. RUSSELL, S.; NORVIG, P. Artificial intelligence: a modern approach. Pearson, 2021. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva, 2023.

Palavras Chave

Blockchain, Inteligência Artificial, Créditos de carbono

Agradecimento a órgão de fomento

A equipe agradece ao Instituto Kunumi pelo fomento à pesquisa.

OTIMIZAÇÃO DE TRANSAÇÕES DE CRÉDITOS DE CARBONO POR MEIO DE BLOCKCHAIN E IA: Uma Aplicação da Teoria Institucional – Transacional.

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.

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 (Olawade *et al.*, 2024).

A Teoria Institucional–Transacional, fundamentada na Teoria dos Custos de Transação (TCT), proposta por Coase (1937) e desenvolvida por Williamson (1985) e North (1990), 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. Assim, este artigo busca responder à seguinte questão de pesquisa: de que maneira 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: identificar os principais custos de transação associados às negociações de créditos de carbono; examinar como blockchain e IA podem mitigar ineficiências e riscos informacionais; 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.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TEORIA DOS CUSTOS DE TRANSAÇÃO.

A Teoria dos Custos de Transação (TCT) foi inicialmente proposta por Ronald Coase (1937) em seu artigo seminal *The Nature of the Firm* e posteriormente aprofundada por Oliver Williamson (1985) em *The Economic Institutions of Capitalism*. Essa teoria defende que as transações econômicas não envolvem apenas preços, mas também custos associados à busca de informações, negociação, monitoramento e *enforcement* contratual.

No mercado de créditos de carbono, esses custos tendem a ser elevados, considerando a multiplicidade de atores, as complexas regras regulatórias e a necessidade de verificações constantes para assegurar a integridade ambiental dos projetos. Conforme North (1990), as instituições são cruciais para reduzir incertezas e orientar o comportamento econômico, mas, ao mesmo tempo, podem gerar entraves burocráticos que aumentam os custos de governança.

Autores contemporâneos como Dixit (1996) e Hodgson (2007) reforçam que as instituições funcionam como “regras do jogo”, sendo determinantes para a eficiência das transações. No caso específico dos créditos de carbono, o risco de *greenwashing* ou de dupla contagem evidencia a necessidade de arranjos institucionais mais robustos e mecanismos de governança mais confiáveis.

2.2 BLOCKCHAIN E SMART CONTRACTS

O blockchain é um sistema de registro distribuído que garante imutabilidade e transparência das transações. Sua aplicação em mercados regulados e voluntários de carbono tem sido investigada como forma de superar falhas institucionais e assimetrias de informação (Tapscott; Tapscott, 2018; Mougayar, 2016).

Além da rastreabilidade, a implementação de *smart contracts* possibilita reduzir custos de negociação e execução contratual, pois as cláusulas são programadas e executadas automaticamente, sem a necessidade de intermediários. Como observa Catalini e Gans (2016), isso representa um novo paradigma de governança digital, no qual as regras do contrato passam a ser autoexecutáveis e auditáveis em tempo real.

Swinkels (2024) analisa a tokenização de créditos de carbono via blockchain, demonstrando como a tecnologia pode facilitar a liquidez e a padronização dos ativos ambientais. Zhou e Zhang (2022) complementam destacando que o blockchain, ao permitir auditorias contínuas, reduz custos de monitoramento e fortalece a confiança entre os participantes do mercado.

2.3 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E TRANSPARÊNCIA NO MERCADO DE CARBONO.

A inteligência artificial (IA) tem ganhado relevância como ferramenta de análise preditiva e de auditoria automatizada. Segundo Russell e Norvig (2021), algoritmos de IA permitem identificar padrões, prever comportamentos e reduzir erros humanos em sistemas complexos. No mercado de carbono, essa capacidade é particularmente valiosa, dado o grande volume de dados relativos a emissões, verificações de projetos e relatórios de sustentabilidade.

A integração da IA em sistemas de monitoramento permite identificar inconsistências e fraudes potenciais com maior rapidez e precisão, reduzindo custos e riscos associados ao controle manual (Olawade *et al.*, 2024). Além disso, a IA pode auxiliar na precificação de créditos ao considerar múltiplas variáveis econômicas e ambientais, fornecendo maior previsibilidade e segurança aos investidores.

Assim, blockchain e IA, quando combinados, oferecem um ecossistema inovador capaz de mitigar falhas institucionais, reduzir custos de transação e fortalecer a confiança no mercado de créditos de carbono, alinhando eficiência econômica e governança ambiental.

3 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.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Teoria dos Custos de Transação (Coase, 1937; Williamson, 1985) propõe que toda interação econômica envolve custos relacionados à busca de informação, negociação, monitoramento e execução dos contratos. No mercado de créditos de carbono, tais custos são historicamente elevados, em razão da complexidade regulatória, da multiplicidade de atores e da necessidade de auditorias constantes para evitar práticas de *greenwashing*. Nesse sentido, a utilização de tecnologias emergentes como *blockchain* e inteligência artificial apresenta-se como uma alternativa promissora para reduzir essas barreiras, ao fornecer maior transparência, rastreabilidade e automação dos processos. Para ilustrar essa transformação, elaborou-se uma Matriz Institucional-Transacional, que compara os custos de transação no mercado de carbono antes e depois da adoção de soluções digitais, evidenciando os ganhos de eficiência decorrentes dessa inovação. O quadro 1 a seguir resume esses aspectos centrais:

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

Elementos de Custo de Transação	Antes da Tecnologia	Com Blockchain + IA	Redução dos custos
---------------------------------	---------------------	---------------------	--------------------

Custos de Busca de Informação	Elevados devido à necessidade de auditorias e consultorias tradicionais.	Reduzidos, pois os dados são digitais, rastreáveis e acessíveis em tempo real.	Sim
Custos de Negociação	Altos, com contratos longos e complexos, além de intermediários.	Baixos, utilizando smart contracts automatizados que reduzem a necessidade de intermediários.	Sim
Custos de Monitoramento	Muito altos, exigindo verificação manual e auditorias frequentes.	Reduzidos, com auditoria em tempo real via blockchain e IA.	Sim
Custos de Enforcement (Execução)	Incertos, sujeitos a litígios e disputas legais.	Baixos, com execução automática digital através de smart contracts e token burning.	Sim

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A análise da Matriz Institucional-Transacional evidencia impactos significativos da adoção de tecnologias digitais, como blockchain e inteligência artificial, sobre os custos de transação no mercado de créditos de carbono. Antes da introdução dessas tecnologias, os custos de busca de informação eram elevados devido à necessidade de auditorias manuais, consultorias especializadas e verificações externas, o que demandava tempo, recursos financeiros e estava sujeito a erros humanos. Com a utilização de blockchain e IA, os dados passam a ser digitais, rastreáveis e acessíveis em tempo real, permitindo que as informações sobre os créditos de carbono sejam verificadas instantaneamente por todos os agentes do mercado, reduzindo custos operacionais e aumentando a confiabilidade das transações.

De forma semelhante, os custos de negociação, que anteriormente eram altos devido à complexidade dos contratos e à necessidade de intermediários, são significativamente reduzidos com a adoção de smart contracts automatizados, que permitem transações diretas entre as partes e execução automática das cláusulas contratuais, aumentando a eficiência do mercado e diminuindo a dependência de intermediários. No caso dos custos de monitoramento, a verificação manual e as auditorias frequentes representavam um ônus elevado, além de serem vulneráveis a fraudes e erros. A implementação de blockchain e IA possibilita auditoria contínua e rastreamento automático das transações, promovendo maior confiabilidade e segurança operacional.

Por fim, os custos de enforcement, antes incertos e sujeitos a litígios, tornam-se previsíveis e menores com a execução automática proporcionada por smart contracts e mecanismos de token burning, garantindo que as condições contratuais sejam cumpridas e aumentando a segurança jurídica, o que favorece a estabilidade e incentiva novos investimentos. Esses achados demonstram que a integração de blockchain e IA atua como um mecanismo de governança eficiente, reduzindo fricções, aumentando a transparência e a rastreabilidade, melhorando a execução e monitoramento das transações e fortalecendo a confiança entre os agentes do mercado, corroborando os postulados da Teoria dos Custos de Transação de Coase e Williamson.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo evidenciou que a integração de blockchain e inteligência artificial pode representar um avanço significativo na otimização das transações no mercado de créditos de carbono, à luz da Teoria Institucional Transacional. A análise realizada demonstrou que essas tecnologias reduzem custos de busca de informação, negociação, monitoramento e execução contratual, ao mesmo tempo em que ampliam a transparência, a rastreabilidade e a confiança entre os agentes envolvidos. Tais resultados reforçam o papel estratégico da digitalização como

ferramenta de transformação institucional, capaz de superar entraves históricos que comprometem a eficiência e a credibilidade desse mercado.

A aplicação da Matriz Institucional Transacional mostrou-se particularmente relevante, ao evidenciar comparativamente como os mecanismos tradicionais apresentam elevados custos e vulnerabilidades, enquanto as soluções digitais oferecem maior segurança, rapidez e confiabilidade. O blockchain, ao proporcionar registros auditáveis e imutáveis, aliado ao uso de contratos inteligentes, reduz significativamente a dependência de intermediários e aumenta a eficiência dos processos. Da mesma forma, a inteligência artificial, ao possibilitar auditorias em tempo real e análises preditivas, fortalece a governança e a legitimidade das operações, mitigando riscos de fraudes e práticas de greenwashing.

Diante desse cenário, conclui-se que blockchain e inteligência artificial não devem ser entendidos apenas como recursos tecnológicos, mas como instrumentos estruturantes para o fortalecimento dos mercados ambientais, contribuindo para sua escalabilidade e integração às exigências globais de mitigação das mudanças climáticas. Ao promover maior eficiência econômica, transparência institucional e robustez regulatória, essas inovações consolidam-se como pilares para o desenvolvimento sustentável e para a credibilidade internacional do mercado de créditos de carbono.

REFERÊNCIAS

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

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.

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.

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.

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.