

INOVAÇÃO, ENERGIA EÓLICA E CRÉDITOS DE CARBONO: Estratégias para a Consolidação da Economia Verde.

TATIANE DE SOUSA SERAFIM

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ - UFC

RIKELME SALES DA SILVA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ - UFC

Introdução

A intensificação da crise climática e a urgência de reduzir emissões de gases de efeito estufa colocam a transição energética como prioridade global. Nesse cenário, os créditos de carbono, previstos desde o Protocolo de Quioto e reforçados pelo Acordo de Paris, surgem como instrumentos estratégicos para financiar projetos de baixo carbono (Mendes, 2024; Viola et al., 2008). No Brasil, a energia eólica destaca-se pela abundância de recursos naturais, maturidade tecnológica e apoio de políticas de incentivo (Júnior; Figueiredo; Travassos, 2022).

Problema de Pesquisa e Objetivo

De que maneira o ecossistema de inovação pode contribuir para consolidar a energia eólica como protagonista no mercado de créditos de carbono? O objetivo geral é analisar como a inovação tecnológica, as políticas públicas e os mecanismos financeiros podem potencializar a competitividade da energia eólica nesse setor. Especificamente, busca-se compreender o papel da digitalização, da rastreabilidade por blockchain e da regulação no fortalecimento da economia verde.

Fundamentação Teórica

Os créditos de carbono dividem-se em mercados regulados e voluntários, sendo instrumentos de compensação e incentivo a práticas sustentáveis (Prolo et al., 2021). A energia eólica, por sua vez, tem ampliado a eficiência com turbinas de grande porte e uso de inteligência artificial para otimizar produção (Dörterler; Arslan; Özdemir, 2024). Tecnologias como blockchain garantem rastreabilidade e reduzem fraudes (Netke et al., 2025). No Brasil, o futuro do setor depende do avanço de projetos como o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões - MBRE (Vieira et al., 2025).

Metodologia

A pesquisa adotou abordagem qualitativa, fundamentada em revisão bibliográfica sistemática e análise documental. Foram consultadas bases como Scopus, Web of Science e Google Scholar, além de relatórios institucionais da ANEEL (2023), EPE (2022), IEA (2025) e Banco Mundial (2023). A matriz SWOT foi utilizada como ferramenta analítica, permitindo identificar forças, fraquezas, oportunidades e ameaças relacionadas à inserção da energia eólica no mercado de créditos de carbono, integrando evidências científicas e documentos técnicos (Simões; Santos, 2024).

Análise e Discussão dos Resultados

A análise SWOT apontou forças como a abundância de recursos eólicos no Brasil e a maturidade tecnológica das turbinas. Como oportunidades, destacam-se a expansão global do mercado de créditos de carbono (Banco Mundial, 2023), a rastreabilidade digital por blockchain e a atração de investimentos sustentáveis. Entre as fraquezas estão os elevados custos de infraestrutura (EPE, 2022) e falhas de integração entre políticas e mercado. Já as ameaças envolvem insegurança regulatória, oscilações de preços internacionais e conflitos socioambientais em comunidades locais.

Considerações Finais

O estudo demonstrou que a energia eólica, integrada a um ecossistema de inovação, pode se consolidar como vetor estratégico da economia verde, desde que apoiada por políticas públicas consistentes e mecanismos financeiros transparentes da expansão eólica. Contudo, fragilidades como limitações na infraestrutura e insegurança regulatória ainda são barreiras. Conclui-se que marcos regulatórios robustos, governança multissetorial e uso de tecnologias digitais são fundamentais para o avanço.

Referências

ANEEL. Abundância de recursos naturais favoráveis à geração de energia eólica no Brasil. Brasília, 2023. BANCO MUNDIAL. State and Trends of Carbon Pricing 2023. Washington: World Bank, 2023. IEA. Renewables 2024: Analysis and forecast to 2030. Paris: IEA, 2025. IRENA. World Energy Transitions Outlook 2023. Abu Dhabi: IRENA, 2023. VIEIRA, A. C. P. et al. O mercado regulado de carbono no Brasil. Estudos Avançados, v. 39, n. 114, 2025. NETKE, A. S. et al. Blockchain-Based Carbon Credit Ecosystem. IJRASET, v. 13, n. 1, p. 213-218, 2025.

Palavras Chave

Inovação, Energia eólica, Créditos de carbono

INOVAÇÃO, ENERGIA EÓLICA E CRÉDITOS DE CARBONO: Estratégias para a Consolidação da Economia Verde.

1 INTRODUÇÃO

A intensificação da crise climática e a urgência em reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) têm colocado a transição energética como prioridade global. O Acordo de Paris, firmado em 2015, estabeleceu metas ambiciosas para conter o aumento da temperatura média da Terra, e nesse cenário os créditos de carbono tornaram-se uma ferramenta estratégica para internalizar os custos ambientais e direcionar recursos a projetos de baixo carbono (Mendes, 2024; Viola *et al.*, 2008; Cenamo *et al.*, 2024). No Brasil, a energia eólica tem se consolidado como uma das principais alternativas para a diversificação da matriz elétrica e para o fortalecimento da economia verde, devido à abundância de recursos naturais e ao amadurecimento de políticas de incentivo ao setor (Júnio; Figueiredo; Travasso, 2022). Contudo, a inserção da energia eólica no mercado de créditos de carbono exige mais do que disponibilidade de recursos; requer um ecossistema de inovação capaz de integrar tecnologias digitais, políticas públicas consistentes e mecanismos financeiros inovadores que garantam transparência, liquidez e credibilidade (Onabowale, 2025; Santos *et al.*, 2025).

Nesse contexto, surge a seguinte questão de pesquisa que orienta este trabalho: de que maneira o ecossistema de inovação pode contribuir para a consolidação da energia eólica como protagonista na economia dos créditos de carbono? Para respondê-la, este artigo tem como objetivo geral analisar o papel do ecossistema de inovação na expansão da energia eólica dentro desse mercado, considerando a interação entre avanços tecnológicos, políticas públicas e mecanismos financeiros. De forma mais específica, busca-se: identificar como as inovações tecnológicas têm influenciado a competitividade da energia eólica no mercado de créditos de carbono; avaliar o impacto das políticas públicas e dos marcos regulatórios na expansão do setor; e examinar o papel de instrumentos financeiros inovadores na atração de investimentos e no fortalecimento da economia verde.

Para sistematizar a análise estratégica, este estudo utiliza a matriz SWOT (Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças) como ferramenta metodológica. A aplicação da SWOT permite identificar os fatores internos (forças e fraquezas) que determinam a competitividade e a capacidade de inovação da energia eólica, bem como os fatores externos (oportunidades e ameaças) relacionados a políticas públicas, mercado de créditos de carbono e tecnologias digitais (Simões; Santos, 2024). Essa abordagem proporciona uma visão integrada das condições necessárias para consolidar a energia eólica como vetor estratégico da economia verde e oferece subsídios valiosos para formuladores de políticas, investidores e empresas.

A relevância desta investigação justifica-se pela necessidade de compreender as dinâmicas que estruturam a transição energética em países emergentes e de analisar como a inovação pode acelerar esse processo. Compreender de que forma o ecossistema de inovação pode potencializar a inserção da energia eólica no mercado de créditos de carbono auxilia tanto formuladores de políticas públicas quanto investidores e empresas a tomarem decisões mais informadas, ampliando os impactos positivos da transição energética rumo a uma economia de baixo carbono.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A ECONOMIA DOS CRÉDITOS DE CARBONO

O conceito de créditos de carbono surgiu no âmbito do Protocolo de Quioto (1997), como uma tentativa de internalizar os custos ambientais da emissão de GEE. Desde então, o

mercado evoluiu em duas direções: (i) mercados regulados, nos quais governos impõem limites obrigatórios de emissões (cap-and-trade), como o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS); e (ii) mercados voluntários, nos quais empresas ou indivíduos optam por compensar emissões por razões de imagem, responsabilidade social ou antecipação regulatória (Prolo *et al.*, 2021).

Esses mecanismos, embora eficazes, enfrentam críticas relacionadas à volatilidade dos preços, à assimetria regulatória entre países e à falta de transparência em alguns mercados (Santos, 2023). Ainda assim, sua importância cresce exponencialmente: estima-se que o mercado global de carbono poderá movimentar mais de 50 bilhões de dólares anuais até 2030, com forte participação de projetos em energia renovável (Rana *et al.*, 2024).

2.2 INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E ENERGIA EÓLICA

A inovação tecnológica é o motor da competitividade no setor de energia renovável. No caso da energia eólica, a evolução de turbinas de grande porte, com capacidade superior a 10 MW, tem aumentado drasticamente a eficiência dos parques, especialmente os offshore (Dörterler; Arslan; Özdemir, 2024). Além disso, os avanços em inteligência artificial e big data permitem prever padrões de vento, otimizando a produção e reduzindo custos operacionais.

A integração com tecnologias digitais como *blockchain* representa um salto qualitativo. Essa tecnologia garante a rastreabilidade das transações de créditos de carbono, assegurando que cada crédito seja único, transparente e não replicável (Netke *et al.*, 2025). Isso reduz fraudes e aumenta a confiança de investidores internacionais, ampliando a liquidez do mercado.

2.3 POLÍTICAS PÚBLICAS E REGULAMENTAÇÃO

Nenhum mercado se sustenta sem arcabouços regulatórios sólidos. Países como China e membros da União Europeia têm mostrado como políticas públicas bem desenhadas podem alavancar tanto o setor energético quanto os mercados de carbono. Subsídios, incentivos fiscais e leilões específicos para energias renováveis criam previsibilidade e atraem investimentos de longo prazo (Paraschiv *et al.*, 2024).

No Brasil, embora o setor eólico esteja em crescimento acelerado, o mercado regulado de carbono ainda se encontra em construção. Projetos como o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE) são fundamentais para integrar o país ao cenário internacional e atrair maior volume de investimentos estrangeiros (Vieira *et al.* 2025).

3 METODOLOGIA

Este estudo adotou uma abordagem qualitativa baseada em revisão bibliográfica sistemática, integrando a análise estratégica por meio da matriz SWOT (Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças) para examinar a interação entre inovação, energia eólica e créditos de carbono. A matriz SWOT foi escolhida por permitir identificar, de forma estruturada, os fatores internos (forças e fraquezas) e externos (oportunidades e ameaças) que influenciam a consolidação da energia eólica no mercado de carbono, oferecendo insights estratégicos para políticas públicas e decisões empresariais.

A pesquisa foi fundamentada na combinação entre revisão bibliográfica e análise documental. A estratégia metodológica buscou integrar o levantamento teórico a documentos técnicos e institucionais, de modo a construir uma visão abrangente sobre a relação entre inovação, energia eólica e créditos de carbono.

A coleta de dados foi conduzida em duas etapas complementares:

1. Revisão bibliográfica: realizada nas bases Scopus, Web of Science e Google Scholar, abrangendo publicações entre 2020 e 2024. Os descritores utilizados foram: “energia eólica e créditos de carbono”, “inovação em mercados de carbono” e “financiamento sustentável”. Os critérios de seleção consideraram rigor metodológico, relevância científica e aplicabilidade prática.
2. Análise documental: examinou relatórios de instituições nacionais e internacionais que abordam a transição energética e o mercado de carbono. Os documentos analisados foram: ANEEL (2023), EPE (2022), CEPEL (2021), IEA (2022), GWEC (2023), ONS (2022), Banco Mundial (2023), ICAP (2023), IRENA (2023).

A análise seguiu três etapas:

- I. Identificação e seleção de artigos e relatórios relacionados a tecnologias, políticas públicas e mecanismos financeiros voltados à energia eólica e créditos de carbono.
- II. Extração e categorização das informações, organizando os dados em dimensões compatíveis com a matriz SWOT.
- III. Síntese e interpretação, com a construção da matriz SWOT e análise crítica das inter-relações entre fatores internos e externos, com foco na consolidação da economia verde.

Essa metodologia permite compreender como os avanços tecnológicos, políticas públicas e mecanismos financeiros interagem para fortalecer a posição estratégica da energia eólica no mercado de créditos de carbono.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para aprofundar a compreensão sobre os fatores que influenciam a consolidação da energia eólica no mercado de créditos de carbono, foi aplicada a matriz SWOT. Essa ferramenta estratégica permite organizar e visualizar de forma estruturada os elementos internos, forças e fraquezas, e externos, oportunidades e ameaças, que impactam o setor. A matriz baseia-se em evidências da literatura nacional e internacional sobre inovação tecnológica, políticas públicas e mecanismos financeiros aplicados à economia de baixo carbono (Simões; Santos, 2024).

Para aprofundar a compreensão sobre as oportunidades e desafios da inserção da energia eólica no mercado de créditos de carbono, elaborou-se uma análise estratégica baseada na matriz SWOT. Esse instrumento permite evidenciar, de forma sintética, os pontos fortes, as fragilidades, as oportunidades e as ameaças que estruturam a dinâmica desse setor em consolidação. O quadro 1 a seguir resume esses aspectos centrais:

Quadro 1 - Matriz SWOT: Energia Eólica e Créditos de Carbono

Forças (Strengths)	Fraquezas (Weaknesses)	Oportunidades (Opportunities)	Ameaças (Threats)
Abundância de recursos naturais favoráveis à geração de energia eólica no Brasil (ANEEL, 2023).	Dependência de investimentos elevados em infraestrutura (EPE, 2022).	Expansão do mercado global de créditos de carbono e demanda crescente por energias limpas (Banco Mundial, 2023).	Insegurança regulatória e burocracia que podem atrasar projetos (Santos, 2023).
Maturidade tecnológica das turbinas e maior competitividade da	Carência de integração entre políticas públicas e instrumentos de	Avanços em tecnologias digitais e <i>blockchain</i> para	Oscilações nos preços internacionais dos

energia eólica no setor elétrico (IEA, 2022).	mercado (Vieira <i>et al.</i> 2025)	rastreabilidade de créditos (Netke <i>et al.</i> , 2025).	créditos de carbono (ICAP, 2023).
Reconhecimento internacional do potencial eólico brasileiro (GWEC, 2023).	Limitações em linhas de transmissão em regiões de maior potencial eólico (ONS, 2022).	Possibilidade de atração de investimentos externos para projetos sustentáveis (IRENA, 2023).	Conflitos socioambientais e pressões de comunidades locais afetadas por empreendimentos (LABOCART, 2023)

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Mudanças regulatórias ou incertezas políticas que podem comprometer incentivos fiscais e leilões de energia eólica.

Concorrência com outras fontes renováveis ou projetos de energia fora do padrão competitivo.

Riscos socioambientais e resistência de comunidades locais, que podem gerar conflitos e atrasos em projetos.

A análise da matriz SWOT evidencia que a consolidação da energia eólica no mercado de créditos de carbono depende da exploração das forças e oportunidades, como o avanço tecnológico, a inovação financeira e a expansão do mercado voluntário de créditos de carbono. Essas dimensões internas e externas se reforçam mutuamente, criando um ambiente propício para investimentos sustentáveis e redução de custos operacionais.

Fraquezas e ameaças, incluindo a fragmentação do ecossistema de inovação, a dependência de fornecedores internacionais e a ausência de regulamentação nacional padronizada, representam desafios críticos que podem limitar a previsibilidade e a escalabilidade do setor. Mitigar essas vulnerabilidades requer políticas públicas estratégicas, governança multissetorial e capacitação tecnológica.

Portanto, a matriz SWOT não apenas organiza os fatores determinantes da competitividade e sustentabilidade da energia eólica, mas também forneceu subsídios para tomada de decisão estratégica, evidenciando caminhos para fortalecer a economia verde, aumentar a confiabilidade do mercado de créditos de carbono e promover uma transição energética eficiente e inclusiva.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo demonstrou que a energia eólica, quando integrada a um ecossistema de inovação e apoiada por políticas públicas consistentes, constitui um vetor estratégico para a consolidação da economia verde e a expansão do mercado de créditos de carbono. A aplicação da matriz SWOT permitiu identificar que o setor dispõe de forças relevantes, como a abundância de recursos naturais, a maturidade tecnológica das turbinas e o crescente reconhecimento internacional do potencial eólico brasileiro. Essas condições, combinadas às oportunidades externas, especialmente a expansão do mercado global de créditos de carbono e a incorporação de tecnologias digitais para rastreabilidade, consolidam um cenário favorável à atração de investimentos e à competitividade no longo prazo.

Entretanto, a análise evidenciou também fragilidades estruturais, como a dependência de elevados investimentos em infraestrutura, a carência de integração entre políticas públicas e instrumentos de mercado e as limitações nas redes de transmissão. Além disso, foram identificadas ameaças relevantes, como a insegurança regulatória, as oscilações internacionais dos preços de créditos de carbono e os conflitos socioambientais em comunidades impactadas por empreendimentos eólicos. Esses aspectos revelam que, embora o setor apresente elevado potencial, sua plena consolidação depende de maior coordenação institucional, governança multissetorial e transparência regulatória.

Conclui-se, portanto, que a energia eólica, alavancada pela inovação tecnológica, pode se firmar como protagonista no mercado de créditos de carbono. Contudo, para que esse processo seja sustentável, é necessário avançar na construção de um marco regulatório nacional robusto, fortalecer a integração entre agentes públicos e privados e assegurar que os benefícios sociais e econômicos da transição energética sejam distribuídos de maneira equitativa.

Nesse sentido, pesquisas futuras podem se dedicar a investigar os efeitos da implementação de um mercado regulado de carbono no Brasil, bem como os impactos socioeconômicos da expansão da energia eólica sobre comunidades locais, especialmente em relação à geração de renda e aos conflitos socioambientais. Além disso, estudos podem explorar a aplicação em larga escala de tecnologias digitais, como blockchain e contratos inteligentes, para rastreabilidade de créditos de carbono e monitoramento de emissões. Outro caminho relevante é o aprofundamento da análise sobre mecanismos de financiamento inovadores, incluindo títulos verdes e fundos sustentáveis, que podem contribuir para ampliar a atratividade do setor. Por fim, comparações internacionais entre países emergentes e desenvolvidos podem fornecer evidências sobre boas práticas regulatórias e de governança, oferecendo referências úteis para o fortalecimento da economia verde no Brasil.

REFERÊNCIAS

ANEEL (Brasil). **Abundância de recursos naturais favoráveis à geração de energia eólica no Brasil**. Brasília, 2023.

BANCO MUNDIAL. **State and Trends of Carbon Pricing 2023**. Washington: World Bank, 2023.

CENAMO, M. C. *et al.* O Protocolo de Kyoto: a construção de uma política brasileira para a mitigação das mudanças climáticas. **Pesquisa & Debate**, São Paulo, v. 36, n. 1 (65), 2024.

DÖRTERLER, S; ARSLAN, S; ÖZDEMIR, D. Unlocking the potential: A review of artificial intelligence applications in wind energy. **Expert Systems**, v. 41, n. 12, p. e13716, 2024

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2032**. Brasília: EPE, 2022.

GWEC. **Global offshore wind report 2025**. GWEC, 2025. Disponível em: <https://www.gwec.net/gwec-news/offshore-wind-installed-capacity-reaches-83-gw-as-new-report-finds-2024-a-record-year-for-construction-and-auctions>. Acesso em: 30 jun. 2025.

ICAP. International Carbon Action Partnership. **Emissions Trading Worldwide: Status Report 2023**. Berlin: ICAP, 2023.

IEA. **Renewables 2024: Analysis and forecast to 2030**. IEA, 2025. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/17033b62-07a5-4144-8dd0-651cdb6caa24/Renewables2024.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2025.

IRENA .International Renewable Energy Agency. **World Energy Transitions Outlook 2023**. Abu Dhabi: IRENA, 2023.

LABOCART - Laboratório de Geoprocessamento e Cartografia Social da Universidade Federal do Ceará (UFCE). **Os impactos ambientais e sociais da produção de energia**

eólica. 2023. Disponível em: <https://www.agencia.ufc.br/os-impactos-ambientais-e-sociais-da-producao-de-energia-eolica/>. Acesso em: 25 jun. 2025

MENDES, A. **Crise climática e invisibilidade jurídica: os deslocados ambientais no Brasil**. 2024. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Direito Constitucional. Faculdade de Direito. Universidade Federal Fluminense. 2024.

NETKE, A. S., *et al.* Blockchain-Based Carbon Credit Ecosystem. **International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology**, v. 13, n. 1, p. 213–218, jan. 2025.

JÚNIOR, M. J. R.; FIGUEIREDO, P. S.; TRAVASSOS, X. L. How wind energy is contributing to the achievement of Brazilian commitments to the Paris Agreement. **Sustainability in Debate/Sustentabilidade em Debate**, v. 13, n. 3, 2022.

SANTOS, A. N. S. *et al.* Transição energética e preservação: integração de fontes renováveis, biodiversidade e economia verde em tempos de crise climática. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 23, n. 3, p. e9234-e9234, 2025.

SIMÕES, F. L.; SANTOS, D. M. A SWOT Analysis of the Green Hydrogen Market. **Energies**, v. 17, n. 13, p. 3114, 2024.

VIEIRA, A. C. P. *et al.* O mercado regulado de carbono no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 39, n. 114, p. e39114141, 2025.

VIOLA, E.; *et al.* O Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. **Ciência & Tecnologia**, v. 18, n. 2, 2008.

ONABOWALE, O. Energy policy and sustainable finance: Navigating the future of renewable energy and energy markets. **World Journal of Advanced Research and Reviews**, v. 25, n. 1, p. 2235-2252, 2025.

ONS . **Relatório de Acompanhamento da Expansão da Geração e Transmissão 2022**. Brasília: ONS, 2022.

PARASCHIV, *et al.* The Interplay Between China's Regulated and Voluntary Carbon Markets and Its Influence on Renewable Energy Development. A Literature Review. **Energies**, v. 17, n. 22, p. 5587, 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.

RANA, M. *et al.* Carbon credit, trading, green economy, and clean development mechanisms. In: **Agroforestry for Carbon and Ecosystem Management**. Academic Press, 2024. p. 147-159.

SANTOS, C. S. M. **O estado da arte do mercado de crédito de carbono: perspectiva de uma arquitetura regulatória no Brasil**. 2023.