

ENEI 2026 sergipe

X ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA INDUSTRIAL E INOVAÇÃO

Indústria, Sustentabilidade e os
Desafios Regionais



Padrões regionais de inserção na cadeia de valor da energia eólica no Nordeste Brasileiro.

Beatriz Dias Varago;¹
Mariane Santos Françoso;²

Resumo:

Pesquisas recentes sobre desenvolvimento regional e mudança tecnológica destacam crescentemente que a expansão de atividades produtivas ligadas às tecnologias verdes não gera automaticamente capacidades industriais e tecnológicas locais. Nesse contexto, a indústria global de energia eólica é um caso elucidativo, devido à sua elevada complexidade tecnológica, baixo grau de padronização e forte coordenação por firmas líderes. Essas características implicam que a participação regional na cadeia eólica é seletiva e funcionalmente diferenciada, em vez de homogênea ou linearmente determinada pela expansão da capacidade instalada de geração.

Este artigo analisa o posicionamento de territórios subnacionais na cadeia global de valor da energia eólica, focando o Nordeste brasileiro, que concentra parcela significativa da geração eólica nacional, mas exhibe marcadas assimetrias em inserção produtiva, comercial e tecnológica. O objetivo central é identificar padrões estruturais de inserção regional na cadeia eólica e avaliar se a recente expansão da geração foi acompanhada pela internalização de atividades industriais e capacidades tecnológicas. A análise parte da premissa de que a função e a qualidade da participação regional na cadeia informam mais os resultados de desenvolvimento do que a escala física da produção de energia.

Metodologicamente, o estudo integra dimensões produtiva, comercial e tecnológica em um arcabouço analítico. A dimensão produtivo-comercial é mapeada via códigos selecionados do Sistema Harmonizado (HS), associados aos componentes centrais da cadeia eólica e organizados por estágios funcionais da cadeia global de valor. A especialização exportadora é mensurada pelo índice de VCR, calculado de forma agregada e por eixo funcional, para 2015-2022, com dados oficiais de comércio exterior. A dimensão tecnológica usa dados de patentes do Instituto Nacional da Propriedade Industrial, ancorados na classe IPC F03D, e operacionalizados pelo índice de Vantagem Tecnológica Revelada (RTA), baseado no estoque de patentes concedidas até 2022. A interpretação conjunta desses indicadores constrói uma tipologia regional de inserção na cadeia eólica.

Os resultados revelam forte heterogeneidade entre os estados. Bahia e Ceará mostram perfis integrados, com geração, inserção exportadora e especialização tecnológica desigual. Pernambuco exhibe inserção exportadora funcional com fraco enraizamento tecnológico, diferentemente de Rio Grande do Norte e Sergipe, que têm forte expansão tecnológica sem correspondência produtiva. Piauí, Maranhão, Paraíba e Alagoas permanecem em estágios incipientes em todas as dimensões.

¹ Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Letras de Araraquara (FCLAr). beatriz.varago@unesp.br

² Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Letras de Araraquara (FCLAr). mariane.francoso@unesp.br

Conclui-se que, em contexto de superprodução global e maior concorrência, a expansão da geração eólica sozinha é insuficiente para trajetórias duráveis de desenvolvimento regional. A principal contribuição empírica do artigo é mostrar que os efeitos econômicos e tecnológicos das tecnologias verdes dependem criticamente da posição estrutural na cadeia global de valor. Para políticas públicas, os resultados sugerem estratégias diferenciadas, focadas no adensamento produtivo e tecnológico compatível com os perfis regionais de inserção na cadeia eólica.

Palavras-chave: Energia eólica; especialização produtiva; cadeias globais de valor; inserção regional

Código JEL: Q42; F63; R11

Área Temática: 2.2 Comércio internacional e cadeias de valor

Regional patterns of insertion in the wind energy value chain in Northeast Brazil

Abstract:

Recent research on regional development and technological change has increasingly highlighted that the expansion of productive activities associated with green technologies does not automatically lead to the consolidation of local industrial and technological capabilities. In this context, the global wind energy industry constitutes a particularly elucidative case, due to its high technological complexity, low degree of standardization, and strong coordination exerted by leading firms. These characteristics imply that regional participation in the wind chain tends to be selective and functionally differentiated, rather than homogeneous or linearly determined by the expansion of installed generation capacity.

This article analyzes how subnational territories position themselves in the global wind energy value chain, focusing on Brazil's Northeast region, which concentrates a significant share of national wind generation but exhibits marked asymmetries in terms of productive, commercial, and technological insertion. The central objective is to identify structural patterns of regional insertion in the wind chain and assess whether the recent expansion of generation has been accompanied by the internalization of industrial activities and technological capabilities. The analysis departs from the premise that the function and quality of regional participation in the chain are more informative for development outcomes than the physical scale of energy production.

Methodologically, the study combines productive, commercial, and technological dimensions into an integrated analytical framework. The productive-commercial dimension is mapped through a selected set of Harmonized System (HS) codes associated with the core components of the wind chain and organized according to functional stages of the global value chain. Export specialization is measured by the VCR index, calculated in aggregate form and by functional axis, for the 2015-2022 period, based on official foreign trade data. The technological dimension is captured by patent data from the National Institute of Industrial Property, using IPC class F03D as the technological anchor, and operationalized through the Revealed Technological Advantage (RTA) index, calculated from the stock of patents granted up to 2022. The joint interpretation of these indicators enables the construction of a regional typology of insertion in the wind chain.

The results evidence strong heterogeneity among the states analyzed. Bahia and Ceará present more integrated profiles, combining generation, export insertion, and, albeit unevenly, technological specialization. Pernambuco exhibits a pattern of functional export insertion with weak technological rooting, unlike Rio Grande do Norte and Sergipe, which show strong technological expansion but without productive correspondence. Finally, Piauí, Maranhão, Paraíba, and Alagoas remain at incipient stages across all dimensions.

It is concluded that, in a context of global overproduction and intensifying competition, the expansion of wind generation alone is insufficient to sustain durable regional development trajectories. The article's main empirical contribution lies in evidencing that the economic and technological effects of green technologies critically depend on the structural position occupied in the global value chain.

From a public policy perspective, the results indicate the need for differentiated strategies, oriented not toward the indiscriminate expansion of installed capacity, but toward productive and technological densification compatible with regional profiles of insertion in the wind chain.

Keywords: Wind energy; productive specialization; global value chains; regional integration

1. Introdução

A transição energética tem impulsionado a rápida expansão das cadeias produtivas associadas às tecnologias renováveis, recolocando no centro da agenda econômica contemporânea os debates sobre desenvolvimento industrial, inserção internacional e aprendizado tecnológico (Altenburg et al., 2017; Quitzow et al., 2017). Nesse contexto, a energia eólica assume papel estratégico, não apenas pelo crescimento acelerado da capacidade instalada, mas pela complexidade organizacional, tecnológica e institucional que estrutura sua cadeia produtiva (Araújo, 2025; UNCTAD, 2024).

Diferentemente de outras rotas renováveis, como a solar fotovoltaica, cuja difusão recente foi acompanhada por elevados níveis de padronização tecnológica e modularidade produtiva, a cadeia eólica permanece fortemente condicionada por especificidades técnicas, geográficas e institucionais. A necessidade de adaptação das turbinas às condições locais de vento, relevo, logística e integração aos sistemas elétricos, bem como a elevada interdependência entre componentes, engenharia de sistemas e serviços de operação e manutenção, limita a homogeneização dos processos produtivos e das trajetórias de inovação (Burton et al., 2011; Manwell et al., 2010; Binz; Truffer, 2017). Como resultado, a inserção de regiões e países na cadeia eólica tende a assumir configurações funcionalmente diferenciadas, nas quais capacidades industriais, tecnológicas e organizacionais específicas condicionam as funções efetivamente internalizadas (Huenteler et al., 2016; Gereffi et al., 2005).

Essa heterogeneidade torna-se ainda mais relevante à luz do contexto recente de superprodução na cadeia eólica em escala global. A rápida expansão da oferta de equipamentos e da capacidade instalada, combinada ao fortalecimento da coordenação exercida por firmas líderes, tem intensificado a concorrência baseada em custos e ampliado a pressão sobre os elos mais padronizáveis da cadeia (Ponte; Sturgeon, 2014; UNCTAD, 2024). Nesse ambiente, a ampliação da geração física ou da produção industrial não se traduz automaticamente em fortalecimento das bases produtivas e tecnológicas locais, sobretudo em cadeias caracterizadas por elevada complexidade técnica e forte assimetria de poder.

No Brasil, a trajetória recente da energia eólica evidencia de forma clara essas tensões. A expansão da capacidade instalada ocorre de maneira espacialmente concentrada, sobretudo na região Nordeste, mas é acompanhada por padrões desiguais de inserção produtiva, comercial e tecnológica entre os estados. Enquanto algumas unidades federativas combinam geração relevante com participação exportadora e algum grau de enraizamento produtivo, outras permanecem majoritariamente restritas à função de produção de energia, sem internalização significativa de atividades industriais ou capacidades inovativas associadas à cadeia (Humphrey; Schmitz, 2002; Gereffi et al., 2005; Araújo, 2025).

Esse descompasso sugere que o crescimento da capacidade instalada, por si só, é insuficiente para explicar os padrões de inserção internacional e de desenvolvimento tecnológico associados à cadeia eólica. Em um cenário internacional marcado por superprodução e pelo reforço da coordenação exercida por firmas líderes, tais diferenças estruturais tendem a se aprofundar, uma vez que regiões especializadas em elos menos complexos enfrentam maior vulnerabilidade competitiva e menor capacidade de captura de valor ao longo da cadeia (Ponte et al., 2019; Gereffi, 2018).

Diante desse quadro, o objetivo deste artigo é analisar a configuração espacial e funcional da cadeia de valor da energia eólica nos estados do Nordeste brasileiro, identificando padrões diferenciados de inserção produtiva, comercial e tecnológica ao longo da cadeia. Para tanto, o estudo combina informações sobre a evolução da capacidade instalada de geração eólica com dados de comércio exterior e de patentes, organizados a partir de uma segmentação funcional da cadeia baseada em classificações internacionais de produtos e tecnologias. A análise empírica apoia-se em indicadores de Vantagem Comparativa Revelada (VCR) e Vantagem Tecnológica Revelada (RTA), inspirados nos trabalhos de Balassa (1965) e Soete e Wyatt (1983), bem como na literatura sobre cadeias globais de valor e sistemas regionais de inovação (Gereffi et al., 2005; Binz; Truffer, 2017).

Assim, o artigo está organizado da seguinte forma: Seção 2 apresenta o referencial teórico, articulando a abordagem das cadeias globais de valor com a literatura sobre aprendizado tecnológico. A Seção 3 descreve os procedimentos metodológicos, incluindo as fontes de dados, a segmentação funcional da cadeia e os indicadores utilizados. A Seção 4 discute os resultados empíricos para os estados do Nordeste brasileiro. Por fim, a Seção 5 sintetiza as conclusões e discute implicações para políticas industriais e tecnológicas associadas à cadeia eólica.

2. Referencial teórico

2.1 Cadeias globais de valor

As cadeias globais de valor constituem um arcabouço analítico voltado à compreensão da reorganização produtiva associada à globalização contemporânea, marcada pela fragmentação funcional dos processos produtivos e pela sua distribuição geográfica sob a coordenação de firmas líderes transnacionais (Gereffi; Korzeniewicz, 1994; Gereffi et al., 2005). Nesse enquadramento, a produção é concebida como um conjunto de atividades funcionalmente diferenciadas, como concepção, suprimento, manufatura, logística, comercialização e pós-venda, articuladas por redes interorganizacionais assimétricas, nas quais o poder de coordenação condiciona as posições ocupadas pelos diferentes agentes ao longo da cadeia (Gereffi, 1999).

Essa abordagem permite analisar a inserção internacional de regiões e países a partir das funções produtivas efetivamente desempenhadas, e não apenas do volume agregado de produção ou exportação. As desigualdades espaciais emergem da alocação diferenciada dessas funções, que determinam tanto o potencial de captura de valor quanto as possibilidades de aprendizado produtivo e tecnológico (Kaplinsky, 2000). Ao operar em um nível intermediário entre a especialização macroeconômica e o comportamento microeconômico das firmas, o enfoque das cadeias globais de valor oferece instrumentos analíticos para compreender por que territórios com níveis semelhantes de participação quantitativa podem ocupar posições estruturalmente distintas na economia global (Gereffi; Humphrey; Sturgeon, 2005).

Um elemento central desse arcabouço é a governança das cadeias, entendida como o conjunto de mecanismos por meio dos quais firmas líderes coordenam, monitoram e controlam atividades realizadas por fornecedores geograficamente dispersos. A forma assumida por essa governança depende da complexidade das transações, do grau de codificabilidade do conhecimento produtivo e das capacidades dos fornecedores, dando origem a arranjos organizacionais que variam desde relações de mercado pouco coordenadas até estruturas hierárquicas fortemente integradas (Gereffi; Humphrey; Sturgeon, 2005). Esses arranjos explicam a concentração recorrente das decisões estratégicas e das funções de maior valor agregado nas firmas líderes, enquanto fornecedores periféricos tendem a se especializar em atividades mais padronizadas, intensivas em escala ou sensíveis a custos (Ponte; Sturgeon, 2014; Gereffi, 2018).

Essa perspectiva é particularmente relevante para cadeias produtivas complexas, nas quais diferentes elos apresentam graus distintos de padronização, intensidade tecnológica e potencial de aprendizado. Nesses casos, a inserção internacional assume caráter seletivo, concentrando-se em funções específicas da cadeia. Assim, territórios podem exibir participação expressiva em determinados fluxos comerciais sem, contudo, internalizar atividades associadas à inovação, ao design ou à coordenação produtiva, permanecendo em posições subordinadas na cadeia global (Ponte; Ewert; Huber, 2019).

2.2 Aprendizado tecnológico e limites à difusão de capacidades

A cadeia produtiva da energia eólica configura-se como um sistema tecnológico complexo, no qual a dinâmica de aprendizado e inovação não pode ser apreendida exclusivamente pela fragmentação funcional das atividades produtivas. Trata-se de um setor intensivo em engenharia, cuja trajetória tecnológica depende de processos contínuos de adaptação incremental, recombinação de competências e resolução contextualizada de problemas técnicos (Burton et al., 2011; Malerba, 2002). Nessas condições, a simples presença de atividades produtivas ou operacionais em determinado território não implica, por si só, a internalização de capacidades tecnológicas avançadas, exigindo um referencial analítico capaz de captar os mecanismos de geração, circulação e enraizamento do conhecimento (Araújo, 2025).

Esse papel é desempenhado pela abordagem dos Sistemas Globais de Inovação, que concebe a inovação como resultado da articulação entre subsistemas de formação de recursos, conhecimento, mercados, investimentos e legitimidade, distribuídos de forma assimétrica no espaço e conectados por acoplamentos estruturais seletivos (Binz; Truffer, 2017). Diferentemente de interpretações que pressupõem difusão homogênea do conhecimento tecnológico, esse enfoque reconhece que os subsistemas críticos de concepção, engenharia avançada e coordenação tecnológica tendem a permanecer concentrados em contextos territoriais específicos, mesmo quando a produção e a instalação se disseminam geograficamente.

Tal concentração decorre da coevolução histórica entre competências industriais, capacidades científicas, mercados sofisticados e estruturas institucionais consistentes, que sustentam trajetórias tecnológicas cumulativas ao longo do tempo (Lundvall, 1992; Malerba, 2002). Em sistemas tecnológicos complexos, como o eólico, tais trajetórias reforçam vantagens acumuladas e limitam a replicabilidade espontânea dos núcleos inovadores em novos territórios, estabelecendo barreiras estruturais à difusão de capacidades (Asheim et al., 2011).

A distinção entre modos setoriais de inovação contribui para qualificar esse padrão. Setores intensivos em engenharia operam predominantemente sob o modo de aprendizado *doing-using-interacting*, baseado na experiência prática, na interação contínua entre agentes produtivos e no uso intensivo de conhecimento tácito, enquanto atividades formais de P&D e conhecimento codificado desempenham papel complementar (Jensen et al., 2007). No caso da energia eólica, a turbina constitui um sistema tecnológico integrado que articula aerodinâmica, materiais compósitos, engenharia eletromecânica e sistemas avançados de controle, favorecendo processos de adaptação e customização tecnológica fortemente dependentes da interação direta entre firmas líderes, fornecedores especializados e usuários avançados (Burton et al., 2011).

Esses processos estão associados a mecanismos de proximidade territorial, organizacional e cognitiva, que viabilizam a circulação de conhecimento tácito e a recombinação incremental de competências (Boschma, 2005). Como resultado, os sistemas globais de inovação da energia eólica apresentam configuração territorialmente concentrada, na qual os subsistemas decisivos de aprendizado e inovação permanecem enraizados em núcleos específicos, apesar da ampla difusão geográfica das atividades de geração e instalação (Binz; Truffer, 2017).

Embora atividades operacionais possam se expandir rapidamente em função de vantagens locacionais, os ganhos de eficiência associados ao *learning-by-doing* permanecem circunscritos às etapas de operação e manutenção, não substituindo os mecanismos de *learning-by-interacting* necessários à internalização de capacidades tecnológicas avançadas (Arrow, 1962; Jensen et al., 2007). Assim, a expansão da capacidade instalada não se traduz automaticamente em desenvolvimento industrial ou tecnológico local, sobretudo em contextos periféricos pouco acoplados aos subsistemas centrais de conhecimento (Araújo, 2025).

3. Metodologia

A metodologia do artigo organiza-se em três etapas analíticas complementares. A primeira etapa consiste na coleta e sistematização dos dados empíricos utilizados na análise. A segunda etapa envolve o mapeamento das funcionalidades produtivas e das classes tecnológicas associadas aos diferentes segmentos da cadeia de valor da energia eólica. A terceira etapa corresponde ao cálculo de indicadores de especialização relativa, com destaque para a VCR, com o objetivo de identificar os padrões de inserção territorial dos estados do Nordeste brasileiro ao longo da cadeia.

A coleta de dados abrange três dimensões. A dimensão produtiva e comercial baseia-se em informações de comércio exterior extraídas das estatísticas oficiais brasileiras de exportação, desagregadas em códigos do Sistema Harmonizado (HS) a seis dígitos, no período de 2015 a 2022. A dimensão tecnológica utiliza dados de patentes concedidas pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), considerando patentes de invenção e modelos de utilidade associados à cadeia eólica, consolidados durante o mesmo período. Complementarmente, são incorporadas informações sobre a capacidade instalada de geração eólica, obtidas a partir da ANEEL, de modo a caracterizar a distribuição territorial da geração física de energia.

Após a coleta, os dados são submetidos a um processo de tratamento e classificação, no qual produtos e tecnologias são associados a funções específicas da cadeia de valor da energia eólica. Esse procedimento permite articular as dimensões produtiva, comercial e tecnológica em uma estrutura analítica comum, viabilizando a comparação entre estados e segmentos da cadeia.

3.1 Dimensão produtiva e comercial

Para analisar a inserção funcional dos estados do Nordeste brasileiro, o estudo utiliza dados de comércio

exterior como proxy das atividades produtivas efetivamente internalizadas ao longo da cadeia. A dimensão produtiva e comercial é operacionalizada a partir das exportações, entendidas como um indicador observável da especialização relativa dos territórios em diferentes funções da cadeia eólica. Os dados foram extraídos da base da Secretaria de Comércio Exterior (SECEX) e cobrem o período de 2015 a 2022, com finalidade de captar a fase recente de expansão da energia eólica no país e assegurar comparabilidade temporal entre os estados nordestinos.

A seleção dos códigos do Sistema Harmonizado (HS) utilizados para mapear a dimensão produtiva e comercial da cadeia global de valor (CGV) da energia eólica fundamenta-se na metodologia proposta por Caravella et al. (2024). Essa abordagem parte de uma lista inicial composta por aproximadamente 80 códigos HS identificados pela *United Nations Conference on Trade and Development* (UNCTAD), como associados a bens de energia renovável e procede a uma filtragem progressiva, com o objetivo de preservar elevado grau de granularidade analítica nos diferentes estágios da cadeia de valor, ao mesmo tempo em que evita a diluição do objeto de estudo por meio da inclusão de insumos excessivamente genéricos ou periféricos à tecnologia analisada (Caravella et al., 2024).

Com base nessa adaptação, os códigos HS selecionados neste estudo atendem cumulativamente a quatro critérios metodológicos definidos:

- I. **Funcionalidade indispensável:** o bem deve ser tecnicamente essencial para o funcionamento energético da turbina eólica, isto é, sua ausência comprometeria diretamente o processo de geração de eletricidade. Enquadram-se nesse critério, por exemplo, as caixas de engrenagens (HS 8483) e os rolamentos (HS 8482), componentes centrais para a transmissão de torque e o controle da rotação do rotor (Manwell et al, 2010);
- II. **Associação recorrente na literatura setorial:** o item deve aparecer de forma sistemática e consistente em manuais técnicos, artigos especializados e relatórios institucionais sobre a tecnologia eólica, sendo reconhecido como parte integrante da estrutura da turbina (Manwell et al., 2010);
- III. **Posicionamento claro na cadeia global de valor:** o código deve ser inequivocamente alocável a um dos estágios da CGV, *upstream*, *midstream* ou *downstream*, evitando ambiguidades que dificultem a análise da especialização produtiva e comercial (Caravella et al., 2024);
- IV. **Especificidade setorial:** o bem não pode ser excessivamente genérico ou difuso, isto é, a análise de cadeias de suprimento de energias renováveis deve concentrar-se nos componentes e processos diretamente vinculados à tecnologia analisada. Insumos amplamente utilizados em múltiplos setores podem distorcer a avaliação das capacidades tecnológicas e especializações específicas da cadeia eólica (Hmouda, 2024).

Nesse sentido, componentes como caixas de engrenagens e rolamentos são mantidos na amostra, ainda que não sejam exclusivos da energia eólica, em virtude de seu papel estrutural no conjunto rotor–nacelle e de sua recorrência na literatura técnica como elementos centrais da turbina (Manwell et al, 2010; Burton et al, 2021).

Por outro lado, insumos como aço bruto ou cobre primário, embora indispensáveis do ponto de vista da engenharia construtiva, foram deliberadamente excluídos. Tratam-se de materiais amplamente utilizados em diversos setores da economia e cuja inclusão deslocaria a análise para cadeias produtivas periféricas à tecnologia eólica. Ademais, do ponto de vista funcional, o desempenho da turbina não depende estritamente do uso desses materiais específicos, uma vez que elementos como a torre podem ser fabricados a partir de materiais alternativos, como concreto ou compósitos, sem alterar o princípio tecnológico da geração eólica (Burton et al., 2021).

Como resultado desse processo de filtragem sucessiva, obteve-se um conjunto otimizado de aproximadamente 18 códigos HS, representativos dos segmentos centrais da CGV da energia eólica. Essa seleção final foi validada por meio de confrontação com relatórios especializados da UNCTAD (2024) e com o escopo de bens discutido por Jha (2013), assegurando consistência metodológica e aderência à literatura internacional.

3.2 Dimensão tecnológica

Após o mapeamento da dimensão produtiva e comercial da cadeia da energia eólica, procedeu-se à caracterização de sua dimensão tecnológica a partir de dados de patentes do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). Para atribuir cada patente a uma localidade na região Nordeste, utilizou-se a informação de localização do inventor constante no cadastro do INPI, permitindo associar o estoque tecnológico ao estado correspondente. Foram consideradas patentes de invenção (PI) e modelos de utilidade (MU) concedidas entre 2015 e 2022, de modo a captar o estoque tecnológico associado à cadeia eólica no recorte espacial analisado e sua distribuição territorial recente.

O ponto de partida do mapeamento tecnológico foi a subclasse F03D (motores a vento), que constitui o núcleo tecnológico da energia eólica e é formalmente reconhecida como tecnologia ambiental no *IPC Green Inventory* (WIPO, 2023). A utilização dessa subclasse como classificação analítica permite identificar tecnologias eólicas a partir de uma classificação consolidada e diretamente vinculada à conversão de energia por vento, evitando inferências indiretas ou critérios exclusivamente semânticos.

A partir dessa âncora, o mapeamento foi conduzido de forma empírica, tomando a própria tecnologia final como referência para identificar os domínios tecnológicos mobilizados ao longo da cadeia produtiva. Em vez de definir previamente um conjunto amplo de classes tecnológicas, o procedimento adotado buscou revelar, a partir das patentes classificadas em F03D, quais subclasses IPC aparecem de forma recorrente associadas à tecnologia eólica. Essa estratégia preserva a especificidade setorial da análise e reduz a incorporação de códigos excessivamente genéricos, que pouco informam sobre capacidades tecnológicas efetivamente relacionadas à cadeia eólica.

Operacionalmente, foram inicialmente selecionadas todas as patentes concedidas que continham a subclasse F03D. Em seguida, extraíram-se os demais códigos IPC associados a esses documentos, os quais foram analisados segundo sua frequência e coocorrência com a subclasse nuclear. Esse procedimento permitiu distinguir entre tecnologias complementares estruturantes da cadeia e códigos de ocorrência residual.

Como etapa adicional de validação, aplicou-se um filtro textual aos campos de título, resumo e reivindicações das patentes, utilizando palavras-chave³ diretamente relacionadas à geração de energia eólica e aos principais componentes dos sistemas eólicos. Esse procedimento funcionou como um mecanismo complementar de controle de aderência tecnológica, voltado a excluir documentos que, embora classificados em F03D, não estivessem diretamente associados à tecnologia eólica no sentido estrito.

O conjunto final de subclasses IPC foi validado por meio de confronto com o *IPC Green Inventory* (WIPO, 2023) e com relatórios da UNCTAD sobre cadeias de valor de tecnologias verdes, assegurando coerência tecnológica e alinhamento com classificações internacionais. O recorte adotado também é consistente com estudos baseados em patentes que analisam a base tecnológica do setor eólico a partir da coocorrência de classes tecnológicas (Storti et al., 2022).

Como resultado, obteve-se um conjunto integrado de subclasses IPC, centrado na F03D e complementado por domínios tecnologicamente coerentes ao longo da cadeia produtiva da energia eólica. Destacam-se, entre eles, a B29C, associada à moldagem de materiais compósitos relevantes para a fabricação de pás; a E04H, relacionada a estruturas e torres; e a H02K, vinculada a geradores elétricos. Esse conjunto concentra a maior parte das patentes analisadas e apresenta forte concentração regional nos estados do Nordeste, em especial Bahia, Ceará e Pernambuco.

A principal limitação da análise decorre do nível de agregação das classificações tecnológicas, restritas ao IPC a quatro dígitos (Caravella, 2021), o que pode ocultar distinções mais finas entre tecnologias próximas. Ainda assim, o procedimento adotado permite captar, de forma consistente e comparável, os principais domínios tecnológicos associados à cadeia eólica no período analisado, oferecendo uma base adequada para a análise da especialização tecnológica regional.

³ *String* booleana: (*eólica OR *eólico OR aerogerador* OR nacele OR rotor OR pás OR hélice OR "sistema de pitch" OR "sistema de passo" OR "sistema yaw")

3.3 Segmentação funcional da cadeia eólica

Com base nos códigos HS e nas subclasses IPC previamente definidos, foi construída uma matriz integrada HS–IPC que serviu de referência para associar os componentes da cadeia eólica aos estágios funcionais da cadeia global de valor (CGV). A segmentação adotada segue a estrutura padronizada em seis estágios proposta pela UNCTAD (2024), mantendo-se a numeração sequencial de 1 a 6 que organiza os códigos HS e IPC segundo sua função predominante ao longo da CGV da energia eólica.⁴

Nos casos em que os códigos HS não apresentavam correspondência direta com subclasses IPC específicas, recorreu-se a uma análise textual complementar baseada em palavras-chave setoriais. Esse procedimento permitiu completar a matriz integrada HS–IPC, que passou a abranger aproximadamente 18 códigos HS a seis dígitos associados a subclasses IPC a quatro dígitos.

O resultado desse processo é apresentado no Apêndice A.1, estruturado conforme o formato metodológico de Caravella et al. (2024), possibilitando uma leitura integrada das dimensões produtivo-comercial e tecnológica da cadeia. Ressalta-se que o objetivo não é reconstruir de forma extensiva todas as etapas do processo produtivo, mas privilegiar elementos diretamente associados às funções tecnológicas centrais da geração eólica (UNCTAD, 2024).

3.4 Indicadores de especialização

A análise da inserção produtiva e tecnológica dos estados do Nordeste brasileiro na cadeia da energia eólica fundamenta-se na aplicação de indicadores de especialização revelada, cujo princípio comum consiste em comparar a importância relativa de um determinado setor ou tecnologia na estrutura estadual com sua importância correspondente no agregado nacional. Essa abordagem permite identificar padrões de especialização e assimetrias regionais tanto no plano produtivo-comercial quanto no tecnológico.

No âmbito produtivo, utiliza-se o indicador de VCR, originalmente proposto por Balassa (1965), amplamente empregado na literatura para mensurar o grau de especialização relativa a partir da estrutura das exportações. A VCR compara a participação de um determinado produto, setor ou segmento funcional na pauta exportadora de um estado com a participação desse mesmo conjunto na pauta nacional. Valores superiores à unidade indicam especialização relativa, enquanto valores inferiores sinalizam ausência de vantagem comparativa revelada.

No presente estudo, a VCR é aplicada à cadeia produtiva de energia eólica com base nos dados de exportação dos estados nordestinos entre 2015 e 2022. Inicialmente, estima-se a VCR desagregada por eixo funcional da cadeia, o que permite identificar em quais estágios produtivos específicos cada estado apresenta maior intensidade relativa de inserção exportadora, conforme a Equação (1).

$$VCR_{i,j} = \frac{X_{i,eólica}/X_{i,total}}{X_{b,eólica}/P_{b,total}} \quad (1)$$

Onde $X_{i,eólica}$ corresponde às exportações totais do estado i associadas à cadeia eólica e $X_{b,eólica}$ às exportações brasileiras no mesmo conjunto de produtos.

Em complemento, calcula-se a VCR agregada da cadeia eólica, considerando conjuntamente todos os códigos HS6 selecionados, de modo a capturar a relevância setorial global da energia eólica na pauta exportadora estadual em relação ao padrão nacional, conforme a Equação (2):

⁴ O Estágio 1 (matérias-primas) não é apresentado na tabela em razão da ausência de insumos tecnologicamente específicos à energia eólica (BURTON et al., 2011). Materiais como aço estrutural, resinas epóxi e fibras de vidro ou carbono configuram commodities amplamente utilizadas em diversos setores industriais, como o automotivo, aeroespacial e da construção civil (HAU, 2013; BURTON et al., 2011). Sua inclusão implicaria uma abertura excessiva da cadeia para atividades de mineração, siderurgia e petroquímica, introduzindo ruído analítico e afastando o foco da tecnologia eólica propriamente dita.

$$VCR_{i,j}^a = \frac{X_{i,j}/X_{i,total}}{X_{b,j}/P_{b,total}} \quad (2)$$

Em que $X_{i,j}$ representa as exportações do estado i no eixo j da cadeia eólica; $X_{i,total}$ o total exportado pelo estado i ; $X_{b,j}$ as exportações brasileiras no eixo j ; e $X_{b,j}$ o total exportado pelo Brasil.

De forma análoga, no plano tecnológico, emprega-se o indicador de RTA, proposto por Soete e Wyatt (1983), que segue um mesmo mecanismo analítico análogo ao da VCR, porém aplicado à distribuição de patentes. A RTA compara a participação das tecnologias associadas à energia eólica no estoque total de patentes de cada estado com a participação correspondente dessas tecnologias no estoque nacional, sendo interpretada de maneira equivalente: valores superiores à unidade indicam especialização tecnológica relativa, enquanto valores inferiores sinalizam subespecialização. A equação pode ser escrita como:

$$RTA_{i,j} = \frac{P_{i,j}/\sum_j P_{i,j}}{\sum_i P_{i,j}/\sum_i \sum_j P_{i,j}} \quad (3)$$

Onde onde $P_{i,j}$ representa o número de patentes de tecnologia j no estado i , $\sum_j P_{i,j}$ é o total de patentes do estado i , e $P_{b,j}$ e $P_{b,total}$ são os equivalentes correspondentes no nível nacional.

Onde $P_{i,j}$ representa o número de patentes da tecnologia j no estado i ; $\sum_j P_{i,j}$ corresponde ao total de patentes do estado i em todas as tecnologias; $\sum_i P_{i,j}$ é o total de patentes na tecnologia j considerando todos os estados; e $\sum_i \sum_j P_{i,j}$ indica o total de patentes de todos os estados em todas as tecnologias.

A utilização conjunta da VCR e da RTA permite uma análise integrada da inserção dos estados nordestinos na cadeia eólica, evidenciando situações em que a especialização produtiva não encontra correspondência tecnológica, bem como casos em que capacidades inventivas emergem sem tradução em inserção exportadora relevante. Essa articulação fornece base empírica para interpretar as trajetórias regionais de aprendizado, adensamento produtivo e potencial de diversificação tecnológica associadas à energia eólica.

4. Resultados e discussão

4.1 Estágios funcionais da cadeia de valor

A análise dos resultados tem início com a caracterização da estrutura funcional da cadeia produtiva da energia eólica, sintetizada na Figura 1. A cadeia integra uma sequência de elos interdependentes que se estendem desde a provisão de insumos básicos até os sistemas de integração e transmissão de energia elétrica, apresentando distintos níveis de complexidade tecnológica, intensidade de capital e requisitos produtivos, os quais condicionam as possibilidades de inserção regional ao longo da cadeia (Burton et al., 2011; Manwell et al., 2010; Hoicka et al., 2025).

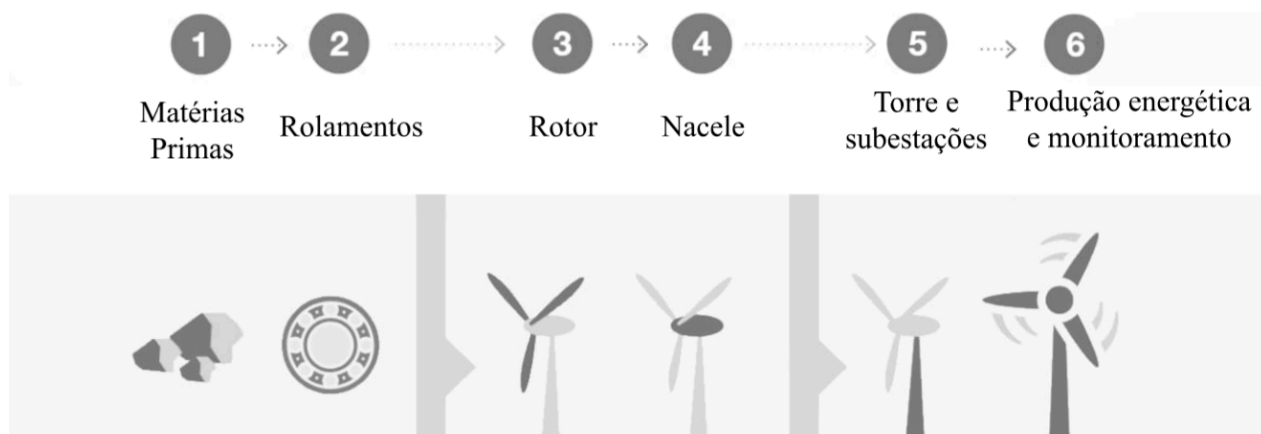


Figura 1 – Estágios funcionais da cadeia global de valor da energia eólica
 Fonte: Adaptado de UNCTAD (2024).

O estágio *upstream* (elos 1 e 2) compreende a produção de matérias-primas e componentes industriais básicos, incluindo aço, concreto, cobre, alumínio, materiais compósitos e rolamentos. Esses insumos constituem a base física da cadeia, sendo essenciais para a fabricação de torres, fundações, pás e sistemas mecânicos das turbinas (Manwell et al., 2010; Burton et al., 2011). Embora apresente menor complexidade tecnológica relativa, esse estágio demanda elevada escala produtiva, domínio de processos industriais padronizados e acesso a insumos de qualidade, além de desempenhar papel crucial na confiabilidade estrutural e operacional dos equipamentos.

O *midstream* (elos 3 e 4) concentra os elos de maior densidade tecnológica da cadeia, abrangendo a fabricação e integração do rotor, das pás e da nacelle. Nesse segmento ocorre a conversão da energia cinética do vento em energia mecânica e elétrica, envolvendo processos avançados de engenharia, como design aerodinâmico, integração eletromecânica, automação e controle (Burton et al., 2011; Manwell et al., 2010). Trata-se do núcleo tecnológico da cadeia eólica, no qual se concentram esforços de inovação, aprendizado cumulativo e desenvolvimento de competências produtivas de maior valor agregado (Macedo et al., 2023; Hoicka et al., 2025).

Por fim, o estágio *downstream* (elos 5 e 6) abrange a fabricação de torres, a instalação dos parques eólicos e os sistemas de integração elétrica, incluindo subestações, transformadores e equipamentos de conexão à rede de transmissão. Esse estágio constitui a interface entre a geração e o sistema elétrico, sendo fundamental para a operação segura e contínua dos parques eólicos (Manwell et al., 2010; Hoicka et al., 2025). Embora tecnologicamente menos intensivo que o *midstream*, apresenta forte dependência de capacidades logísticas, engenharia de projetos e coordenação com agentes do setor elétrico.

Essa organização funcional da cadeia produtiva da energia eólica, explicitamente vinculada aos elos numerados da Figura 1, constitui o referencial operacional utilizado na identificação e classificação dos códigos HS (comércio internacional) e IPC (atividade tecnológica), conforme detalhado na Seção 3.3. Essa estratégia analítica viabiliza uma leitura mais precisa das capacidades regionais nos diferentes segmentos da cadeia eólica, bem como a identificação de oportunidades e limitações ao adensamento produtivo, ao aprendizado tecnológico e à internalização de elos estratégicos nos estados do Nordeste brasileiro (Araújo, 2025; Macedo et al., 2023; Burton et al., 2011).

4.2 Capacidade de energia eólica instalada.

A análise da capacidade instalada de geração eólica nos estados do Nordeste brasileiro, apresentada no Gráfico 1, evidencia diferenças estruturais expressivas tanto em termos de escala quanto de trajetória de expansão ao longo do período 2015-2022. Os dados, obtidos junto à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), referem-se à potência nominal instalada de parques eólicos em operação e permitem identificar padrões claros de concentração e hierarquização regional.

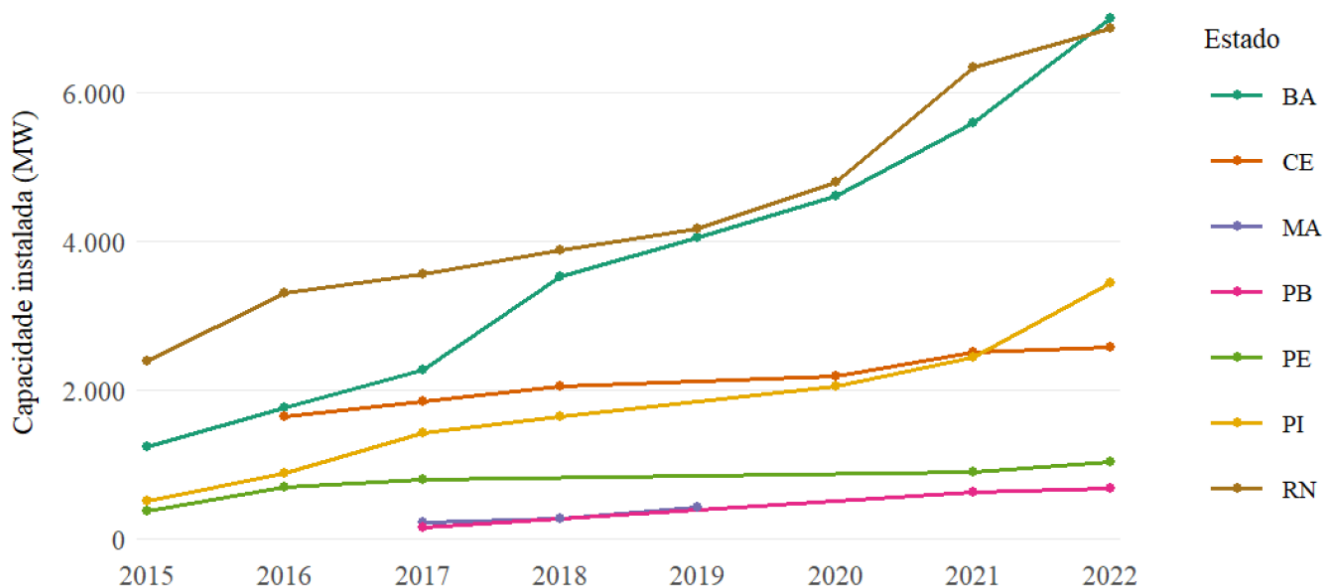


Gráfico 1 – Evolução da capacidade instalada de energia eólica nos estados do Nordeste (2015–2022)

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da ANEEL (SIGA).

De forma consistente ao longo de todo o período analisado, Rio Grande do Norte e Bahia destacam-se como os principais polos de geração eólica da região. Conforme ilustrado no Gráfico 1, esses estados concentram a maior parcela da capacidade instalada, refletindo não apenas a elevada densidade de parques eólicos, mas também a consolidação de estruturas produtivas e institucionais associadas ao setor. Essa posição dominante reforça seu papel como centros regionais de produção e fornecimento de energia eólica, com maior capacidade de atração de investimentos e continuidade na expansão da geração (Oliveira Neto, 2017; Macedo et al., 2023).

Em contraste, estados como Maranhão, Paraíba e Sergipe apresentam participação bastante reduzida na capacidade instalada regional. O Gráfico 1 revela que, mesmo ao final do período, esses estados permanecem em patamares significativamente inferiores aos dos líderes regionais, com trajetórias marcadas por expansão tardia, descontínua ou concentrada em poucos empreendimentos. Tal padrão sugere limitações estruturais para a consolidação de uma base produtiva e tecnológica mais robusta associada à cadeia eólica (Araújo, 2025; Macedo et al., 2023).

Estados como Ceará, Piauí e Pernambuco ocupam uma posição intermediária, embora com dinâmicas distintas. O Ceará apresenta uma trajetória de crescimento relativamente estável, consolidando-se como um polo secundário de geração ao longo do período analisado. O Piauí, por sua vez, evidencia uma expansão mais recente e acelerada nos anos finais da série, indicando um processo de inserção ainda em formação. Pernambuco registra crescimento mais moderado, compatível com um perfil produtivo menos intensivo e com uma inserção funcional mais restrita na cadeia eólica regional.

O padrão temporal de crescimento também diferencia claramente os estados líderes dos demais. No Rio Grande do Norte e na Bahia, observa-se uma expansão contínua e cumulativa da capacidade instalada, sugerindo maior previsibilidade regulatória, capacidade de planejamento e articulação com grandes investidores. Nos estados de menor escala, os incrementos tendem a ocorrer de forma episódica, frequentemente associados a projetos específicos, o que evidencia maior dependência de decisões externas e de políticas pontuais de incentivo.

Essas assimetrias na capacidade instalada possuem implicações diretas para o desenvolvimento produtivo e tecnológico regional. Estados com maior escala de geração dispõem de condições mais favoráveis para internalizar atividades associadas à operação, manutenção, engenharia e integração de sistemas, ampliando as possibilidades de aprendizado produtivo. Em contraste, nos estados com menor capacidade instalada, a geração física de energia eólica tende a permanecer dissociada de processos mais amplos de adensamento industrial e tecnológico, reforçando a necessidade de políticas direcionadas ao

desenvolvimento de fornecedores, qualificação da mão de obra e estímulo à inovação (Araújo, 2025; Macedo et al., 2023; Hoicka et al., 2025).

Em síntese, conforme evidenciado no Gráfico 1, a distribuição da capacidade instalada de geração eólica no Nordeste brasileiro é fortemente concentrada em poucos estados, com um conjunto significativo de unidades federativas apresentando inserção limitada ou emergente.

Interpretação dos índices

Com o objetivo de caracterizar a configuração regional da cadeia eólica no Nordeste brasileiro, esta seção procede a uma análise conjunta da capacidade instalada de geração, da especialização exportadora e do desempenho tecnológico dos estados da região. Para tanto, são utilizados os indicadores de VCR e RTA, que permitem captar, respectivamente, padrões relativos de inserção produtivo-comercial e de especialização tecnológica (Balassa, 1965; Soete; Wyatt, 1983), explicitados na Tabela 1.

Tabela 1 – Vantagem Comparativa Revelada (VCR) e Vantagem Tecnológica Revelada (RTA), por estado e eixo funcional da cadeia eólica nordestina

UF do Produto	VCR Eixo 2	VCR Eixo 3	VCR Eixo 4	VCR Eixo 5	VCR Agregado	RTA
Alagoas	0,13	0,00	0,00	0,02	0,04	0,53
Bahia	2,73	0,88	0,06	3,33	1,82	1,24
Ceará	33,60	0,05	0,02	0,08	8,43	1,17
Maranhão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,01
Paraíba	NA	0,02	0,01	0,04	0,02	0,90
Pernambuco	5,36	0,03	0,05	1,65	1,89	0,80
Piauí	NA	0,00	0,00	0,14	0,04	0,74
Rio Grande do Norte	0,02	0,00	0,03	0,13	0,06	1,45
Sergipe	NA	NA	0,01	0,37	0,12	1,16

Fonte: elaboração própria do autor

A combinação desses indicadores, apresentada no Gráfico 2, possibilita identificar distintos perfis regionais de participação na cadeia eólica, distinguindo estados com integração produtiva e tecnológica mais consistente daqueles cuja inserção é seletiva, segmentada ou marcada por rompimento entre geração, exportação e inovação (Gereffi et al., 2005).

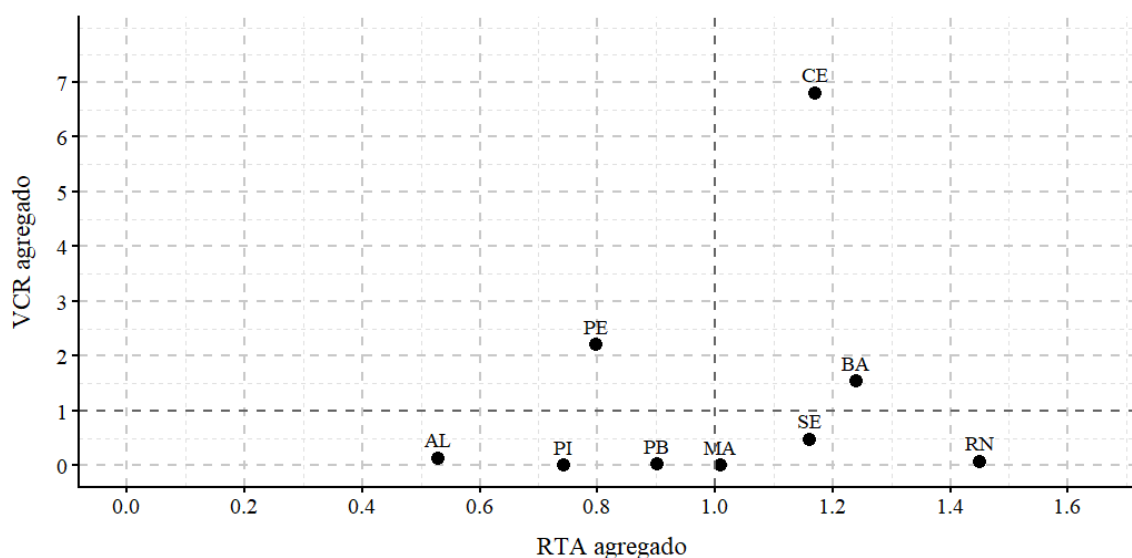


Gráfico 2 – Cruzamento entre VCR e RTA na cadeia eólica nordestina
Fonte: elaboração própria

A Bahia configura um dos casos mais consistentes de convergência entre base produtiva, inserção comercial e capacitações tecnológicas na cadeia eólica do Nordeste brasileiro. Além de sua posição de destaque na geração de energia eólica (Gráfico 1), o estado responde por aproximadamente 44,5% das exportações regionais do setor entre 2015 e 2022, ao lado do Ceará, consolidando-se como um dos principais polos de inserção internacional (ver Apêndice A.2). Esse protagonismo se reflete em valores de VCR superiores à unidade em diferentes eixos funcionais e na VCR agregada, indicando que os bens da cadeia eólica possuem peso relativo superior ao padrão nacional na pauta exportadora estadual (Balassa, 1965).

Esse desempenho sugere que a expansão da geração eólica na Bahia foi acompanhada pela internalização de segmentos produtivos capazes de competir no comércio exterior, configurando um padrão de especialização produtiva revelada no sentido balassiano. A inserção exportadora não se reduz ao volume exportado, mas reflete a presença de estruturas industriais associadas a etapas de maior complexidade técnica, como a fabricação de componentes eletromecânicos, sistemas elétricos e atividades de engenharia vinculadas à geração eólica (Gereffi et al., 2005).

A base produtiva se expressa na elevada densidade de atividades industriais relacionadas à cadeia eólica, incluindo fabricantes de componentes, fornecedores especializados e serviços técnicos de engenharia, operação e manutenção (ABEEÓLICA, 2016). Destaca-se a presença de empresas como a Goldwind, com operações industriais e participação relevante em projetos no estado, fornecendo turbinas, sistemas elétricos e soluções tecnológicas associadas à geração eólica (Goldwind, 2025). Esse enraizamento produtivo sustenta a especialização exportadora observada.

Esse arranjo encontra correspondência na dimensão tecnológica: os indicadores de RTA superiores à unidade indicam que as tecnologias eólicas ocupam peso relativamente maior no estoque estadual de patentes do que na média nacional, sugerindo a existência de esforços inventivos codificados e de um ambiente institucional favorável à geração e absorção de conhecimento, apoiado por universidades e centros de pesquisa (Soete; Wyatt, 1983; Pires; Abud, 2021).

Em síntese, a Bahia apresenta um padrão integrado de inserção na cadeia eólica, no qual capacidade instalada, especialização exportadora e base tecnológica se articulam de forma consistente, consolidando o estado como um polo estruturante do setor no Nordeste brasileiro (Gereffi et al., 2005; Binz; Truffer, 2017).

Em contraste, o Ceará destaca-se como o caso mais expressivo de especialização comercial revelada da cadeia eólica na região. Embora ocupe posição intermediária em termos de capacidade instalada, o estado respondeu por aproximadamente 46,1% das exportações regionais do setor entre 2015 e 2022, configurando-se como o principal polo exportador. Essa liderança, contudo, é fortemente

concentrada em um único segmento da cadeia, o eixo funcional 2, no qual o estado apresenta valores elevados de VCR, amplamente superiores à unidade e aos demais estados analisados. A VCR agregada, a mais alta da amostra, reforça a centralidade dos produtos eólicos na pauta exportadora estadual (Balassa, 1965).

Essa especialização comercial reflete uma base produtiva concentrada em segmentos mais padronizados da cadeia, como a produção de rolamentos e partes de motores e geradores, cuja competitividade depende sobretudo de produção seriada, integração modular e eficiência logística, em detrimento da internalização de etapas tecnológicas mais complexas (Manwell et al., 2010; Gereffi et al., 2005). Essa dinâmica é visível na concentração de fabricantes e fornecedores estratégicos no entorno do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, configurando um padrão de inserção industrial altamente especializado, ainda que restrito a segmentos de menor valor agregado (ABEIN, 2016).

Embora o Ceará apresente RTA superior à unidade, a especialização tecnológica é menos pronunciada do que a comercial, indicando que sua inserção na cadeia eólica se apoia predominantemente em capacidades produtivas, organizacionais e logísticas. Os valores relativamente baixos de RTA reforçam esse diagnóstico, sugerindo limitações na internalização de atividades tecnológicas mais intensivas. Ainda assim, a presença de universidades, centros de pesquisa e estruturas de apoio à inovação contribui para processos de aprendizado incremental e adaptação produtiva, sustentando a competitividade nos segmentos em que o estado se especializou (Jensen et al., 2007; Pires; Abud, 2021).

Em continuidade à análise regional, o Rio Grande do Norte configura um caso emblemático de dissociação entre a liderança na geração física de energia eólica e a limitada inserção produtiva e comercial na respectiva cadeia de valor. Apesar de ocupar posição de destaque no Nordeste em termos de capacidade instalada, favorecida por condições naturais excepcionais de vento, o estado não apresenta especialização produtiva ou exportadora relevante. Os indicadores de VCR permanecem inferiores à unidade em todos os eixos funcionais, o agregado é reduzido, evidenciando o peso marginal dos bens da cadeia eólica na pauta exportadora estadual, conforme o critério de Balassa (1965).

Esse padrão indica que a expansão do setor no território potiguar esteve concentrada na implantação e operação de parques eólicos, sem a internalização de segmentos industriais estratégicos da cadeia, como a fabricação de aerogeradores, componentes eletromecânicos ou sistemas elétricos. A ausência de especialização exportadora sugere que eventuais atividades produtivas permanecem restritas ao mercado interno ou dependentes de decisões e insumos externos, sem escala ou competitividade internacional (Macedo et al., 2023; Binz; Truffer, 2017).

Em contraste, o estado apresenta RTA superior à unidade, indicando uma participação relativamente maior das tecnologias eólicas em seu estoque de patentes em comparação à média nacional, conforme o indicador de Soete e Wyatt (1983). Esse resultado aponta para a existência de esforços inventivos localizados e de um ambiente institucional minimamente favorável à produção de conhecimento codificado, associado à presença de universidades, institutos federais e estruturas de formação técnica.

Ainda assim, a especialização tecnológica observada não se traduz, até o momento, em encadeamentos produtivos mais densos. Em cadeias de valor caracterizadas por elevada complexidade tecnológica e forte coordenação por grandes empresas globais, a ausência de uma base industrial local robusta limita a conversão de capacidades científicas, esforços inventivos e processos de aprendizado incremental em atividades produtivas de maior valor agregado (Gereffi et al., 2005; Jensen et al., 2007). Nesse sentido, o caso do Rio Grande do Norte evidencia que a presença de ativos de geração eólica e mesmo de especialização tecnológica não constitui, por si só, condição suficiente para promover a internalização de etapas estratégicas da cadeia produtiva ou a consolidação de uma especialização regional sustentável.

Em relação ao Rio Grande do Norte, Sergipe compartilha um padrão de baixa inserção produtiva e comercial na cadeia eólica, caracterizado por participação marginal nos fluxos de exportação e pela ausência de enraizamento industrial significativo. Assim como no caso potiguar, a presença da cadeia no território sergipano não se traduz em especialização ao longo dos diferentes eixos funcionais, permanecendo concentrada em segmentos pontuais, com reduzido potencial de encadeamento produtivo e

elevada dependência de decisões produtivas externas. Em contraste com estados como Pernambuco, que mesmo apresentando menor capacidade instalada exibem maior diversificação produtiva e comercial associada à cadeia, Sergipe mantém uma inserção fragmentada e pouco articulada.

A principal distinção em relação ao Rio Grande do Norte manifesta-se na dimensão tecnológica. Sergipe apresenta RTA ligeiramente superior à unidade, indicando uma especialização inventiva incipiente, enquanto o estado potiguar exibe uma base tecnológica relativamente mais consolidada (Soete; Wyatt, 1983). Esse resultado sugere a existência de esforços inventivos formalmente codificados associados à energia eólica, embora em magnitude insuficiente para sustentar processos mais amplos de aprendizado produtivo, difusão tecnológica ou inserção comercial internacional. Essa dissociação entre uma especialização tecnológica ainda embrionária e a fraca inserção produtiva reforça a interpretação de que, em cadeias de valor caracterizadas por elevada complexidade técnica e forte coordenação externa, capacidades inventivas isoladas não constituem condição suficiente para a internalização de elos estratégicos. Na ausência de uma base industrial local articulada, tais capacidades tendem a permanecer fragmentadas e desconectadas de atividades produtivas de maior valor agregado, limitando seu impacto sobre a estrutura produtiva regional (Gereffi et al., 2005; Binz; Truffer, 2017).

Em sequência, Pernambuco apresenta um padrão no qual a especialização comercial revelada não encontra correspondência equivalente em uma base tecnológica doméstica consolidada. A inserção exportadora do estado ocorre de forma funcional e seletiva, concentrada em segmentos específicos da cadeia produtiva (Gereffi et al., 2005). Entre 2015 e 2022, Pernambuco respondeu por cerca de 9,1 por cento das exportações regionais associadas à cadeia eólica, desempenho superior ao de estados com níveis semelhantes ou mesmo mais elevados de capacidade instalada de geração. Esse resultado indica que sua inserção no comércio exterior do setor não decorre exclusivamente da expansão da geração, mas da capacidade de articulação produtiva em elos específicos da cadeia (Manwell et al., 2010).

Essa inserção concentra-se sobretudo nos eixos funcionais 2 e 5, abrangendo desde componentes mais padronizados, como rolamentos, até estruturas e equipamentos industriais, como torres, subestações e sistemas associados (Manwell et al., 2010). Apesar do desempenho exportador relativamente mais robusto, a especialização tecnológica permanece limitada, refletida em valores de RTA inferiores à unidade. Isso sugere que parcela relevante da tecnologia empregada é madura ou externalizada, sem produção inventiva significativa no âmbito estadual (Gereffi et al., 2005). Como resultado, embora Pernambuco se posicione de forma diferenciada no comércio exterior da cadeia eólica, sua participação permanece pouco articulada a trajetórias cumulativas de aprendizado tecnológico e ao desenvolvimento endógeno de competências produtivas (Binz; Truffer, 2017).

Maranhão e Paraíba, por sua vez, apresentam um padrão de inserção ainda mais limitado na cadeia eólica, marcado pela ausência de especialização comercial significativa e por capacidades tecnológicas pouco consolidadas (Gereffi et al., 2005). Em ambos os estados, os bens vinculados à cadeia exercem peso marginal nas pautas exportadoras, independentemente do eixo funcional considerado, indicando que sua participação nos fluxos internacionais permanece restrita. Esse comportamento ocorre mesmo na presença de capacidade instalada de geração, que, embora existente, é modesta em comparação aos principais polos do Nordeste, evidenciando uma fraca internalização de atividades produtivas e comerciais associadas à cadeia.

No plano tecnológico, os indicadores revelam ausência de especialização tecnológica consistente. No caso do Maranhão, o valor ligeiramente superior à unidade sugere uma posição limítrofe, sem caracterizar especialização efetiva, enquanto na Paraíba o valor reforça a fragilidade do esforço inventivo associado à cadeia eólica. Em ambos os casos, a combinação entre inserção comercial limitada e baixa densidade tecnológica aponta para um estágio inicial e pouco estruturado de participação na cadeia, sem internalização relevante de segmentos produtivos ou tecnológicos estratégicos (Binz; Truffer, 2017).

No Piauí, observa-se uma expansão gradual da capacidade instalada de geração eólica, que posiciona o estado em patamar intermediário no contexto nordestino. Esse avanço, contudo, ocorre em um ambiente no qual a presença da cadeia produtiva associada à energia eólica permanece incipiente. Os indicadores de VCR situam-se sistematicamente abaixo da unidade em todos os eixos funcionais, assim como o indicador de especialização tecnológica, indicando que nem a produção industrial nem a atividade

inventiva vinculadas ao setor assumem relevância relativa no estado (Gereffi et al., 2005).

A participação piauiense na cadeia concentra-se predominantemente nas etapas finais de uso dos equipamentos, associadas à instalação, operação e manutenção dos parques eólicos, com limitada internalização de atividades produtivas, logísticas ou comerciais voltadas ao mercado externo (ABEIN, 2023). A ausência de fabricantes de componentes, fornecedores especializados e serviços técnicos mais avançados restringe a formação de encadeamentos produtivos locais, reduzindo os efeitos de transbordamento econômico e tecnológico decorrentes da expansão da geração (Gereffi et al., 2005).

Em posição extrema na tipologia regional, Alagoas apresenta um padrão de inserção residual na cadeia eólica, caracterizado por baixa expressão produtiva, comercial e tecnológica. A capacidade instalada de geração é reduzida, os indicadores de VCR permanecem baixos em todos os eixos funcionais e o estado não apresenta especialização tecnológica revelada, com valores de RTA inferiores à unidade. Esses resultados indicam que os bens e as tecnologias associados à energia eólica não assumem peso relevante nem na pauta exportadora nem no esforço inventivo estadual (Balassa, 1965; Soete; Wyatt, 1983).

Nesse sentido, Alagoas configura o limite inferior da inserção regional na cadeia eólica nordestina, evidenciando uma participação meramente marginal, sem internalização de atividades produtivas, comerciais ou tecnológicas associadas ao setor. Esse caso reforça a interpretação de que, em cadeias caracterizadas por elevada complexidade técnica e forte coordenação produtiva, a ausência de uma base industrial mínima inviabiliza a formação de encadeamentos produtivos, a consolidação de especializações reveladas e a emergência de trajetórias de aprendizado tecnológico, mesmo em contextos de expansão regional da energia eólica (Gereffi et al., 2005; Binz; Truffer, 2017).

4.2. Implicações estratégicas da inserção regional na cadeia eólica

À luz do padrão regional identificado, a formulação de políticas industriais e tecnológicas para a cadeia eólica no Nordeste deve partir do reconhecimento de que estados com níveis semelhantes de geração ou exportação ocupam posições estruturalmente distintas na cadeia global de valor, o que torna ineficazes estratégias uniformes de promoção setorial. Essa diferenciação assume relevância adicional diante do contexto recente de superprodução global na cadeia eólica, caracterizado por excesso de capacidade produtiva, intensificação da concorrência baseada em custos e fortalecimento da coordenação exercida por firmas líderes (Gereffi et al., 2005; Hoicka et al., 2025). Nesse ambiente, a ampliação da geração ou da capacidade industrial, quando dissociada de processos de aprendizado e adensamento tecnológico, tende a reproduzir padrões periféricos de inserção, nos quais regiões fora do núcleo decisório da cadeia permanecem restritas a funções de menor valor agregado e elevada vulnerabilidade competitiva (Ponte; Sturgeon, 2014). Assim, as orientações de política aqui discutidas partem do pressuposto de que, sob condições de superprodução, a expansão quantitativa da presença regional na cadeia eólica é insuficiente para sustentar trajetórias duráveis de desenvolvimento produtivo e tecnológico.

Nos estados da Bahia e do Ceará, onde se observa um perfil integrado de inserção produtiva, exportadora e, ainda que de forma desigual, tecnológica, o desafio central desloca-se da criação inicial de capacidades para o aprofundamento qualitativo das articulações já existentes. A coexistência de base industrial, inserção comercial relevante e alguma densidade tecnológica cria condições favoráveis à transição de uma especialização predominantemente funcional para trajetórias mais sofisticadas de diversificação intra-cadeia (Kaplinsky, 2000; Gereffi, 2018).

No território baiano, a orientação das políticas públicas deve privilegiar a ampliação do escopo das capacitações produtivas e tecnológicas já consolidadas, evitando a cristalização da especialização em um conjunto restrito de segmentos. A diversificação intra-cadeia, sobretudo em elos complementares de maior intensidade tecnológica, como engenharia aplicada, integração de sistemas elétricos e serviços avançados associados à operação e otimização de parques, constitui um vetor estratégico para elevar o valor agregado local e reduzir vulnerabilidades associadas a mudanças nos padrões de coordenação das cadeias globais (Araújo; Lopes, 2019; Gereffi, 2018). Essa estratégia não pressupõe a substituição do perfil existente, mas sua extensão progressiva, apoiada em mecanismos de difusão tecnológica, compras públicas estratégicas e estímulos à cooperação entre empresas industriais, universidades e centros de

pesquisa, capazes de sustentar trajetórias cumulativas de conhecimento (Hoicka et al., 2025).

Nesse sentido, o perfil cearense apresenta especificidades relevantes. A forte concentração da inserção exportadora em um único eixo funcional, ainda que altamente competitivo, impõe limites ao enraizamento tecnológico de longo prazo, especialmente em cadeias marcadas por rápida evolução técnica e elevada assimetria de poder entre os atores globais (Gereffi et al., 2005; Ponte; Sturgeon, 2014). Diante disso, políticas orientadas à redução da dependência estrutural desse segmento assumem caráter estratégico, não por meio de uma diversificação abrupta, mas pela internalização gradual de atividades adjacentes e pelo fortalecimento das interações entre firmas industriais e o sistema local de ciência e tecnologia (Araújo; Lopes, 2019). A promoção de projetos colaborativos de P&D, com foco em adaptação tecnológica, engenharia de processos e customização de componentes, pode elevar o conteúdo tecnológico da produção local e tornar o perfil integrado mais resiliente às oscilações da demanda internacional (Jaegersberg, 2017).

Em contraste, Pernambuco apresenta um perfil exportador funcional marcado por um descompasso persistente entre desempenho comercial e enraizamento tecnológico. Apesar da inserção competitiva em segmentos específicos da cadeia eólica, essa trajetória apoia-se majoritariamente em tecnologias consolidadas e externalizadas, sem gerar, até o momento, processos endógenos robustos de aprendizado e inovação (Jaegersberg, 2017). Nessa configuração, a simples ampliação dos fluxos exportadores tende a reforçar dependências estruturais, sobretudo em um cenário de superprodução no qual os elos mais padronizados se tornam particularmente sensíveis à concorrência por custos (Hoicka et al., 2025).

Em face deste cenário, a orientação mais coerente de política preconiza converter vantagens funcionais já existentes em capacidades produtivas e tecnológicas mais duráveis. Isso implica priorizar a internalização progressiva de competências técnicas associadas aos elos exportadores nos quais o estado já atua, por meio de instrumentos de apoio à P&D aplicada, qualificação da força de trabalho e modernização de fornecedores locais (Hoicka et al., 2025). Diferentemente dos casos com perfil integrado, em Pernambuco o foco não recai sobre a diversificação ampla da cadeia, mas sobre o aprofundamento tecnológico dos segmentos já presentes, de modo a elevar o valor agregado das atividades realizadas no território e reduzir a dependência de soluções tecnológicas importadas (Jaegersberg, 2017; Araújo; Lopes, 2019).

O Rio Grande do Norte e Sergipe demandam uma orientação estratégica voltada à conversão de capacidades tecnológicas em inserção produtiva mais consistente, ainda que o contexto de cada estado seja distinto. No caso do Rio Grande do Norte, apesar da elevada capacidade instalada de geração eólica, essa presença não se traduz automaticamente em internalização de etapas produtivas complexas ou em densificação da base tecnológica local. Já Sergipe apresenta produção de energia reduzida e limitada articulação industrial, mas compartilha com o RN a necessidade de fortalecer a capacidade de transformação do conhecimento em aplicação econômica. Em ambos os casos, políticas promissoras concentram-se na criação de interfaces capazes de conectar o conhecimento científico existente a segmentos produtivos estratégicos da cadeia eólica, promovendo a P&D aplicada, prototipagem, validação tecnológica e transferência de tecnologia (Jaegersberg, 2017; Hoicka et al., 2025). O objetivo é reduzir o isolamento funcional da especialização tecnológica, aproveitando esforços inventivos locais e construindo condições para que o conhecimento gerado se traduza em atividades industriais e comerciais de maior valor agregado, ainda que de forma gradual e seletiva, adaptada às características de cada território (Araújo; Lopes, 2019).

Por fim, Piauí, Alagoas, Maranhão e Paraíba situam-se em um estágio ainda mais incipiente de participação na cadeia eólica, no qual a formulação de políticas deve operar prioritariamente no plano da preparação estrutural do território. A combinação entre inserção comercial marginal, capacidades tecnológicas pouco consolidadas e presença limitada de atividades produtivas indica que estratégias voltadas à diversificação industrial ou à inserção exportadora imediata tendem a apresentar baixa efetividade, sobretudo em um cenário de superprodução global (Hoicka et al., 2025). Nesses estados, políticas voltadas à formação técnica básica, à qualificação da mão de obra e ao fortalecimento institucional de universidades e institutos federais assumem papel central como condição preliminar para

qualquer trajetória futura de inserção mais ativa (Jaegersberg, 2017).

Paralelamente, o estímulo à expansão da geração de energia eólica deve ser articulado a iniciativas que convertam essa capacidade física em aprendizado industrial e tecnológico, por meio da cooperação entre empresas, universidades e centros de pesquisa, de modo a internalizar progressivamente etapas produtivas e competências técnicas (Araújo; Lopes, 2019). Iniciativas de inovação de pequena escala, frequentemente associadas a projetos acadêmicos, empreendimentos locais ou demandas regionais específicas, podem contribuir para a formação de núcleos embrionários de aprendizado produtivo, ainda que sem expectativa de diversificação industrial no curto prazo. Trata-se, portanto, de um perfil no qual as políticas devem reconhecer explicitamente os limites impostos pela posição estrutural desses estados na cadeia global, atuando de forma incremental para criar condições mínimas de absorção produtiva, tecnológica e de geração de valor a partir da capacidade instalada no médio e longo prazo. Esses padrões estão sintetizados no Quadro 1:

Quadro 1 – Síntese das estratégias por perfil regional

Perfil	UF	RTA	VCR	Propostas
Integrado	Bahia, Ceará	>1	>1	• Consolidar articulação produção-tecnologia • Diversificar produção e tecnologia • Fomentar componentes de maior valor agregado
Tecnológico	Rio Grande do Norte, Sergipe	>1	≤1	• Transformar conhecimento em capacidade produtiva local. • Incentivar P&D aplicada, prototipagem, validação tecnológica e transferência de tecnologia. • Aproveitar capacidades existentes para internalizar etapas produtivas (Sergipe).
Exportador Concentrado	Pernambuco	≤1	>1	• Diversificar e sofisticar produção • Capacitação técnica e P&D aplicada • Modernizar fornecedores e certificar qualidade
Limitado	Piauí, Alagoas, Maranhão, Paraíba	≤1	≤1	• Criar capacidades mínimas produtivas e tecnológicas • Incentivar pequenas iniciativas locais • Preparar expansão futura em exportação e produção • Estimular cooperação universidade-empresa

Fonte: elaboração própria

5. Conclusão

Este artigo examinou a inserção dos estados do Nordeste brasileiro na cadeia eólica a partir da combinação entre capacidade instalada de geração, especialização exportadora e desempenho tecnológico, adotando como premissa que a expansão da geração não constitui, por si só, evidência de aprofundamento produtivo ou tecnológico. Os resultados indicam que estados com níveis semelhantes de geração ocupam posições estruturalmente distintas ao longo da cadeia, refletindo diferenças persistentes no grau de enraizamento produtivo, na internalização de atividades industriais e no acesso a funções de maior valor agregado (Gereffi et al., 2005; Ponte; Sturgeon, 2014).

Essas assimetrias tornam-se particularmente relevantes no contexto recente de operação da cadeia eólica, marcado por excesso de capacidade produtiva, intensificação da concorrência baseada em custos e reforço da coordenação exercida por firmas líderes. Nesse ambiente, a ampliação da geração física ou da capacidade instalada tende a produzir retornos decrescentes em termos de desenvolvimento produtivo e tecnológico, sobretudo em territórios especializados em elos mais padronizáveis da cadeia (UNCTAD, 2024; Hoicka et al., 2025). A evidência empírica apresentada sugere que a expansão quantitativa da energia eólica não tem sido acompanhada, de forma sistemática, pela consolidação de bases industriais ou tecnológicas mais densas nos estados nordestinos.

A especificidade tecnológica da cadeia eólica reforça esse resultado. Trata-se de uma cadeia

caracterizada por baixa padronização, elevada integração sistêmica e forte dependência de capacidades de engenharia, coordenação produtiva e aprendizado cumulativo, o que impõe limites estruturais à difusão espontânea de atividades de maior valor agregado. A internalização de capacidades tecnológicas avançadas depende menos da presença de parques eólicos e mais do grau de acoplamento aos segmentos centrais da cadeia, nos quais se concentram decisões estratégicas, atividades de engenharia avançada e controle tecnológico (Binz; Truffer, 2017; Huenteler et al., 2016).

Do ponto de vista analítico, os resultados indicam que abordagens centradas exclusivamente em indicadores de geração ou produção física tendem a superestimar os efeitos estruturais da expansão da energia eólica. A tipologia regional apresentada evidencia que a inserção na cadeia deve ser compreendida como um posicionamento estrutural em cadeias globais de valor e sistemas globais de inovação específicos, e não como um processo linear de progressão funcional. Estados com elevada geração podem permanecer restritos a funções operacionais, enquanto outros combinam geração, produção industrial e desempenho tecnológico de forma mais integrada (Gereffi et al., 2005; Ponte et al., 2019).

Em termos de implicações, os resultados sugerem limites claros a estratégias uniformes de promoção setorial da energia eólica. Em um contexto internacional marcado por superprodução e competição intensificada, políticas industriais e tecnológicas tendem a ser mais eficazes quando orientadas por diagnósticos territoriais diferenciados, capazes de reconhecer tanto as restrições estruturais quanto as possibilidades reais de enraizamento produtivo em cada estado. A ausência dessa diferenciação aumenta o risco de consolidação de trajetórias de especialização regressiva em cadeias verdes tecnologicamente complexas (UNCTAD, 2024; Binz; Truffer, 2017).

Financiamento

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2025/08463-7.

Referências bibliográficas

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA). Brasília: ANEEL, s.d.
- ARAÚJO, Bruno Platteck de. O desenvolvimento de políticas industriais sistêmicas na área de energia: uma análise a partir das políticas implementadas para a expansão da capacidade de geração de energia eólica no Brasil. 2025. 259 f. Tese (Doutorado em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento) – Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.
- ARROW, Kenneth J. The economic implications of learning by doing. *Review of Economic Studies*, Oxford, v. 29, n. 3, p. 155–173, 1962. DOI: 10.2307/2295952.
- ASHEIM, Bjørn T.; BOSCHMA, Ron; COOKE, Philip. Constructing regional advantage: platform policies based on related variety and differentiated knowledge bases. *Regional Studies*, Londres, v. 45, n. 7, p. 893–904, 2011. DOI: 10.1080/00343404.2010.543126.
- BAIR, Jennifer. Global capitalism and commodity chains: looking back, going forward. *Competition & Change*, Londres, v. 9, n. 2, p. 153–180, 2005. DOI: 10.1191/1024529405cC104oa.
- BALASSA, Béla. Trade liberalization and revealed comparative advantage. *The Manchester School of Economic and Social Studies*, v. 33, p. 99–123, 1965. DOI: 10.1111/j.1467-9957.1965.tb00050.x.
- BINZ, C.; TRUFFER, B. Global innovation systems: a conceptual framework for innovation dynamics in transnational contexts. *Research Policy*, Amsterdam, v. 46, n. 7, p. 1284–1298, set. 2017.
- BOSCHMA, Ron. Proximity and innovation: a critical assessment. *Regional Studies*, Londres, v. 39, n. 1, p. 61–74, 2005. DOI: 10.1080/0034340052000320887.
- BURTON, Tony; JENKINS, Nick; SHARPE, David; BOSSANYI, Ervin. *Wind energy handbook*. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- CARAVELLA, Serenella; CRESPI, Francesco; CUCIGNATTO, Giacomo; GUARASCIO, Dario. Technological sovereignty and strategic dependencies: The case of the photovoltaic supply chain. *Journal of Cleaner Production*, v. 434, p. 140222, 2024. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623043809>. Acesso em: 15 out. 2025.

FRANÇOSO, Mariane; AVANCI, Vanessa de Lima; VONORTAS, Nicholas Spyridon. Regional capabilities and co-invention networks for technological diversification: evidence from Brazil. *Industry and Innovation*, 2025. DOI: 10.1080/13662716.2025.2518190.

GEREFFI, Gary; HUMPHREY, John; STURGEON, Timothy. The governance of global value chains. *Review of International Political Economy*, v. 12, n. 1, p. 78–104, 2005.

HMOUDA, Ahmed M. O.; ORZES, Guido; SAUER, Philipp C. Sustainable supply chain management in energy production: a literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 191, p. 114085, 2024. DOI: 10.1016/j.rser.2023.114085.

HOICKA, Christina E.; GRAZIANO, Michael; WILLARD-STEPAN, Michael; ZHAO, Yanjia. Insights to accelerate place-based at-scale renewable energy landscapes: an analytical framework to typify the emergence of renewable energy clusters along the energy value chain. *Applied Energy*, v. 377, p. 124559, 2025. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.124559.

HUENTELER, Joern; NIEBUHR, Jens; SCHMIDT, Tobias S. The role of local and global linkages for the diffusion of wind power technology. *Energy Policy*, Amsterdã, v. 93, p. 159–172, 2016. DOI: 10.1016/j.enpol.2016.02.032.

HUMPHREY, John; SCHMITZ, Hubert. How does insertion in global value chains affect upgrading in industrial clusters? *Regional Studies*, Londres, v. 36, n. 9, p. 1017–1027, 2002. DOI: 10.1080/0034340022000022198.

JAEGERSBERG, Gudrun; URE, Jenny. *Renewable energy clusters: recurring barriers to cluster development in eleven countries*. Cham: Springer International Publishing, 2017.

JENSEN, M. B.; JOHNSON, B.; LORENZ, E.; LUNDVALL, B. Å. Forms of knowledge and modes of innovation. *Research Policy*, Amsterdam, v. 36, n. 5, jul. 2007.

JHA, Veena. *Removing trade barriers on selected renewable energy products in the context of energy sector reforms: modelling the environmental and economic impacts in a general equilibrium framework*. Genebra: International Centre for Trade and Sustainable Development, 2013. Disponível em: https://seors.unfccc.int/applications/seors/attachments/get_attachment?code=CY4M3EURGJTM03AXBQS4QVT9A8JGJ8XF. Acesso em: 8 ago. 2025.

KAPLINSKY, Raphael. Globalisation and unequalisation: what can be learned from value chain analysis? *Journal of Development Studies*, Londres, v. 37, n. 2, p. 117–146, 2000. DOI: 10.1080/713600071.

LEWIS, Joanna I. Building a national wind turbine industry: experiences from China, India and South Korea. *International Journal of Technology and Globalisation*, Genebra, v. 5, n. 3-4, p. 281–305, 2011. DOI: 10.1504/IJTG.2011.043407.

LUNDVALL, Bengt-Åke. *National systems of innovation: towards a theory of innovation and interactive learning*. Londres: Pinter, 1992.

MACEDO, Luziene Dantas; MELO, Ellitamar Alves de Oliveira; SILVA, Emerson do Nascimento. Panorama da geração de energia eólica onshore no país: o caso do Rio Grande do Norte. *Revista de Economia Regional, Urbana e do Trabalho*, v. 12, n. 1, p. 91–107, 2023. DOI: 10.21680/2316-5235.2023v12n1ID33716.

MALERBA, Franco. Sectoral systems of innovation and production. *Research Policy*, Amsterdã, v. 31, n. 2, p. 247–264, 2002. DOI: 10.1016/S0048-7333(01)00139-1.

MANWELL, James F.; MCGOWAN, Jon G.; ROGERS, Anthony L. *Wind energy explained: theory, design and application*. Chichester: John Wiley & Sons, 2010.

MILBERG, William; WINKLER, Deborah. *Outsourcing economics: global value chains in capitalist development*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

OLIVEIRA NETO, Calisto Rocha. Expansão da energia eólica no território nordestino: uma análise a partir das teorias da localização. *Revista de Economia da UEG, Anápolis*, v. 12, n. 2, p. 196–217, 2017. DOI: 10.5281/zenodo.5579286.

PIRES, Maria Cristina Ferreira Silva; ABUD, Ana Karla de Souza. Estratégias de fomento à inovação nas universidades públicas do nordeste brasileiro e seu impacto no depósito, concessão e transferência de patentes. *Navus – Revista de Gestão e Tecnologia, Florianópolis*, v. 16, 2025. DOI:

10.22279/navus.v16.2021.

PONTE, Stefano; STURGEON, Timothy. Explaining governance in global value chains: a modular theory-building effort. *Review of International Political Economy*, Londres, v. 21, n. 1, p. 195–223, 2014. DOI: 10.1080/09692290.2013.809798.

QUITZOW, Rainer; HUENTELER, Joern; ASH, Sarah. The political economy of green industrial policy: building domestic capabilities in renewable energy. *Energy Policy*, Amsterdã, v. 101, p. 283–294, 2017. DOI: 10.1016/j.enpol.2016.11.047.

SOETE, Luc G.; WYATT, S. M. E. The use of foreign patenting as an internationally comparable science and technology output indicator. *Scientometrics*, v. 5, p. 31–54, 1983. DOI: 10.1007/BF02097176.

UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT (UNCTAD). Powering trade: Fine-tuning trade policy for solar and wind energy value chains. Genebra: UNCTAD, 2024. (UNCTAD/OSG/TT/INF/2024/3).

WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION (WIPO). IPC Green Inventory. Genebra: WIPO, s.d. Disponível em: <https://www.wipo.int/classifications/ipc/green-inventory/home>. Acesso em: 18 dez. 2025.

Apêndice A

Quadro A.1 - Mapeamento HS–IPC da cadeia produtiva da energia eólica

Estágio da cadeia	Código HS	Código IPC	Descrição
2	848280	H02K	Rolamentos de esferas ou rolos;
2	850300	H02K	Peças de motores e geradores elétricos;
3	350691	B29C	Adesivos de polímeros ou borracha;
3	390791	B29C	Poliéster insaturado como material compósito estrutural;
3	841290	F03D	Peças de motores e geradores para rotor/pás;
4	848220	F03D	Rolamentos cônicos para caixa de engrenagens;
4	848230	F03D	Rolamentos esféricos para caixa de engrenagens;
4	848250	F03D	Rolamentos cilíndricos para caixa de engrenagens;
4	848310	F03D	Eixos de transmissão (incluindo árvores de cames e virabrequins) e manivelas;
4	848330	F03D	Carcaças de rolamentos sem esferas ou rolos e mancais de eixo simples;
4	848340	F03D	Caixas de engrenagens para turbinas eólicas;
4	848360	F03D	Embreagens e acoplamentos de eixo para uso com turbinas eólicas;
4	854411	H02K	Fio de enrolamento de cobre com isolamento;
5	850231	F03D	Conjuntos geradores elétricos movidos a vento;
5	730820	E04H	Torres e mastros treliçados de ferro ou aço;
5	853690	H02K	Aparelhos elétricos para comutação ou proteção de circuitos;
5	850440	H02K	Conversores estáticos elétricos;
5	853710	H02K	Quadros de controle e distribuição elétrica;
5	854449	H02K	Condutores elétricos isolados sem conectores;

Fonte: Elaboração própria do autor

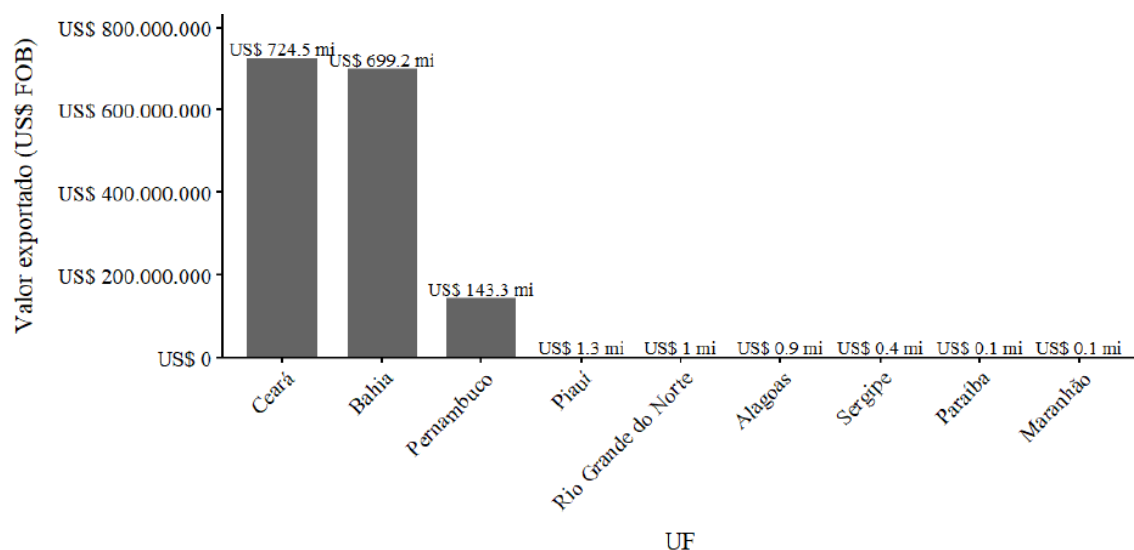


Gráfico A.2 - Exportações da cadeia eólica por UF nordestina, 2015-2022

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da SECEX