



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO SOCIOECONÔMICO
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS
CURSO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS

Pedro Ramiro Grandó Cagol

A cadeia global de valor da energia eólica: perspectivas e desafios para o Brasil

Florianópolis,

2025

Pedro Ramiro Grando Cagol

A cadeia global de valor da energia eólica: perspectivas e desafios para o Brasil

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Relações Internacionais, do Centro Socioeconômico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Relações Internacionais.

Orientador: Prof. Fernando Seabra, Dr.

Florianópolis,

2025

Cagol, Pedro Ramiro Grando

A cadeia global de valor da energia eólica :
perspectivas e desafios para o Brasil / Pedro Ramiro
Grando Cagol ; orientador, Fernando Seabra, 2025.
63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Socioeconômico, Graduação em Relações Internacionais,
Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Relações Internacionais. 2. Energia Eólica. 3.
Cadeias Globais de Valor. 4. Transição Energética. 5.
Economia Internacional. I. Seabra, Fernando . II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Relações Internacionais. III. Título.

Pedro Ramiro Grandó Cagol

A cadeia global de valor da energia eólica: perspectivas e desafios para o Brasil

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Relações Internacionais e aprovado em sua forma final pelo Curso de Relações Internacionais.

Florianópolis, 03 de dezembro de 2025.

Coordenação do Curso

Banca examinadora

Prof. Fernando Seabra, Dr.
Orientador(a)

Prof. Bruno Haeming, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Alex Sidarta Guglielmoni, Me.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certifico que esta é a versão original e final do Trabalho de Conclusão de Curso que foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Relações Internacionais por mim e pelos demais membros da banca examinadora.

Prof. Fernando Seabra, Dr. Orientador
Florianópolis, 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por me dar forças e energias para concluir mais este desafio.

Agradeço imensamente à minha família, aos meus pais, Marcelo e Simone, que sempre estiveram ao meu lado, nunca deixaram me faltar nada, e que são minhas fontes diárias de motivação e inspiração. Aos meus tios, primos e avós. Gostaria de deixar minha gratidão ao meu falecido vô Armando, uma figura exemplar na educação de seus netos, que, assim como eu, sempre se inspiraram e foram incentivados a estudarem e a buscarem o conhecimento. A eles o meu amor eterno.

À minha namorada, Bianca, a quem amo imensamente, por me apoiar e me incentivar durante a conclusão deste trabalho. Sem ela ao meu lado os dias de leitura e escrita deste trabalho seriam muito mais árduos.

Ao professor Fernando Seabra, companheiro de três semestres de monitoria em Comércio Exterior, e de muitas outras atividades na UFSC. Agradeço imensamente o apoio e inspirações dadas para este trabalho acontecer e pelo conhecimento transmitido.

Aos meus amigos de vida, principalmente aqueles que seguiram suas jornadas comigo na UFSC, Arthur, Vinícius, Cassiano e Henrique, meus agradecimentos por trazerem leveza, humor e diversão para a vida universitária.

Agradecer também aos amigos de longa data de Imbituba, que seguem me fazendo companhia até hoje, PH, Matheus, “Guiga”, e tantos outros.

Minha gratidão à Universidade Federal de Santa Catarina, por me proporcionar o estudo e o passar de conhecimento em uma das instituições de ensino mais respeitadas do Brasil e do mundo. Aos docentes do curso de Relações Internacionais, que transmitiram seu enorme conhecimento e construíram um Pedro muito mais sábio e capaz para entender o mundo e os fatos que vivenciamos.

Por fim, agradeço à todos que, de uma forma ou outra, contribuíram para minha formação e desenvolvimento pessoal e profissional, colegas de RI, professores, colegas de trabalho.

RESUMO

O presente trabalho analisa a inserção do Brasil na Cadeia Global de Valor (CGV) da energia eólica, situando-a no contexto da transição energética e da nova geopolítica das energias renováveis. Utilizando o referencial teórico de Cadeias Globais de Valor, desenvolvido por Gary Gereffi, a pesquisa investiga a estrutura produtiva global do setor, caracterizada por uma forte concentração tecnológica e manufatureira na China e em países do Norte Global. A metodologia adota uma abordagem mista, combinando revisão bibliográfica com análise de dados quantitativos sobre capacidade instalada, balança comercial e patentes, provenientes de fontes como GWEC, ABEEólica e BNDES. Os resultados demonstram que, embora o Brasil figure como uma potência em capacidade instalada *onshore* devido à qualidade excepcional de seus ventos e políticas de incentivo passadas, como o PROINFA, o país enfrenta desafios estruturais significativos na etapa industrial. Identifica-se um processo de desindustrialização precoce e enfraquecimento da cadeia de suprimentos nacional, evidenciado pela saída de grandes montadoras de aerogeradores e pela persistente dependência de importação de componentes de alto valor agregado, como *gearboxes* e sistemas de controle. Conclui-se que, para reverter a tendência de inserção subordinada e capturar maior valor na cadeia, o Brasil necessita de políticas industriais que integrem a exploração estratégica de terras raras para ímãs permanentes e o desenvolvimento dos mercados de eólica *offshore* e hidrogênio verde.

Palavras-chave: Energia Eólica. Cadeias Globais de Valor. Transição Energética. Política Industrial. Brasil.

ABSTRACT

This study analyzes Brazil's insertion into the Wind Energy Global Value Chain (GVC), situated within the context of energy transition and the new geopolitics of renewable energy. Using the Global Value Chains theoretical framework developed by Gary Gereffi, the research investigates the sector's global productive structure, characterized by strong technological and manufacturing concentration in China and the Global North. The methodology adopts a mixed approach, combining bibliographic review with quantitative data analysis on installed capacity, trade balance, and patents from sources such as GWEC, ABEEólica, and BNDES. The results demonstrate that although Brazil stands out as a power in onshore installed capacity due to its exceptional wind quality and past incentive policies like PROINFA, the country faces significant structural challenges in the industrial stage. A process of early deindustrialization and weakening of the national supply chain is identified, evidenced by the exit of major wind turbine manufacturers and persistent dependence on imports of high-value-added components, such as gearboxes and control systems. It is concluded that, to reverse the trend of subordinate insertion and capture greater value in the chain, Brazil needs industrial policies that integrate the strategic exploration of rare earths for permanent magnets and the development of offshore wind and green hydrogen markets.

Keywords: Wind Energy. Global Value Chains. Energy Transition. Industrial Policy. Brazil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas principais de uma Cadeia Global de Valor.....	23
Figura 2 - Estrutura de um aerogerador.....	25
Figura 3 – Componentes principais de um aerogerador.....	37
Figura 4 - Cadeia global de valor estendida da energia eólica.....	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Projeção de crescimento da oferta de energia renovável no Mundo em GW	20
Gráfico 2 – Os países fabricantes dos aerogeradores mais avançados	28
Gráfico 3 – Patentes registradas no INPI com tema “eólica” por ano.....	29
Gráfico 4 – Número de patentes em energia eólica no Mundo	30
Gráfico 5 – Porcentagem de patentes por país	30
Gráfico 6 - Agregação de valor por região em cada etapa da CGV da energia eólica	31
Gráfico 7 - Balança comercial por região por geração de valor e novas instalações	32
Gráfico 8 - Capacidade instalada no ano de 2023 por país	33
Gráfico 9 - Crescimento de mercado de energia eólica.....	34
Gráfico 10 - Margens de lucro de fornecedores	35
Gráfico 11 - Custo da energia eólica	35
Gráfico 12 - Evolução da capacidade instalada em operação (GW).....	43
Gráfico 13 - Capacidade x Demanda anual de aerogeradores no Brasil	46
Gráfico 14 - Capacidade total onshore instalada no Brasil	50
Gráfico 15 - Oferta e demanda de imãs de terras raras para o setor eólico no Brasil	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Modelos mais avançados de aerogeradores.....	26
Quadro 2 - Criticidade por setor da CGV da energia eólica.....	36
Quadro 3 - Componentes da nacelle.....	38
Quadro 4 - Componentes das pás de um aerogerador	39
Quadro 5 - Principais componentes da torre de um aerogerador	40
Quadro 6 - Principais componentes de um aerogerador de 2,5MW.....	46
Quadro 7 - Fornecedores de componentes eólicos no Brasil.....	48
Quadro 8 - Análise SWOT das perspectivas e desafios do Brasil na CGV da energia eólica .	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. ECONOMIA POLÍTICA DA ENERGIA	14
2.1. CONTEXTO HISTÓRICO	14
2.2. A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	18
2.3. ASPECTOS DA MUDANÇA DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA	20
3. A CADEIA GLOBAL DE VALOR DA ENERGIA EÓLICA	22
3.1. PROCESSOS DA CADEIA GLOBAL DE VALOR DA ENERGIA EÓLICA.....	22
3.2. A CADEIA DE VALOR DA ENERGIA EÓLICA	24
3.3. PRINCIPAIS COMPONENTES E SETORES	36
3.3.1. Principais <i>players</i>	42
3.3.2 A posição do Brasil	43
4. PERSPECTIVAS E DESAFIOS PARA O BRASIL	49
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1. INTRODUÇÃO

A geopolítica global do século XXI está sendo redefinida pela urgência da transição energética. Se o século XX foi marcado pela disputa por reservas de combustíveis fósseis e pelo controle de rotas de petróleo, o cenário contemporâneo observa uma mudança de paradigma em direção a uma economia de baixo carbono. A transição energética e as mudanças climáticas são temas chave no cenário internacional, como colocam Arent *et al* (2017, p. 3, tradução própria): “O uso de energia deve transicionar de tecnologias que emitem volumes substanciais de GEE¹ para tecnologias com emissão limitada ou nula”.

Contudo, a produção dessa energia não ocorre de forma isolada, ela é sustentada por uma complexa Cadeia Global de Valor (CGV), caracterizada por intensos fluxos de comércio, alta densidade tecnológica e uma divisão internacional do trabalho que reflete as assimetrias de poder entre o Norte e o Sul Global (Gereffi, 2011). O Brasil, como um país emergente, enfrenta o desafio clássico de superar uma inserção subordinada, onde atua primariamente como um mercado consumidor e plataforma de montagem, enquanto as etapas de maior valor agregado, como Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e fabricação de componentes complexos, permanecem concentradas nos países centrais (Camillo, 2013).

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a Cadeia Global de Valor da energia eólica, e identificar as principais perspectivas e desafios para o Brasil dentro desse cenário. O Brasil apresenta-se como um ator singular nesse cenário, possui uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo e um potencial eólico invejável, especialmente na região Nordeste, onde a qualidade dos ventos garante fatores de capacidade superiores à média global. Um dos objetivos específicos desse trabalho, é o mapeamento da CGV da energia eólica no Brasil e os principais setores e atores da cadeia. Embora o país tenha atraído montadoras globais e desenvolvido uma cadeia de fornecedores locais impulsionada por políticas como o PROINFA e os requisitos de conteúdo local do BNDES, observa-se recentemente um processo de desindustrialização precoce no setor (Mauro, 2022). Nesta parte, está mais um objetivo específico, verificar os impactos das políticas públicas de industrialização sobre a CGV no Brasil. A saída de grandes fabricantes, o fechamento de fábricas de componentes e a estagnação na inovação tecnológica,

¹ Gases de Efeito Estufa.

evidenciada pela baixa patenteação nacional, sugerem que o Brasil pode estar regredindo à condição de mero importador de tecnologia e exportador de *commodities* minerais, como as terras raras, essenciais para a fabricação de ímãs permanentes, mas que reforçam o papel do país como primário-exportador (Furtado, 2003). O último objetivo específico do trabalho focará em identificar as perspectivas e desafios para o Brasil na CGV da energia eólica, com análises quantitativas e qualitativas do futuro do setor eólico no país, e o que se esperar do papel do Brasil nesse ramo.

Sob a perspectiva da Economia Internacional, o presente trabalho é crucial para a análise do comércio exterior contemporâneo, uma vez que a Cadeia Global de Valor (CGV) da energia eólica é materializada por intensos fluxos comerciais de bens de altíssima tecnologia. A inserção do Brasil neste setor não ocorre em um vácuo, mas é diretamente moldada pelas regras e dinâmicas do sistema multilateral de comércio. Isso coloca o país diante de um dilema clássico de política comercial, a tensão entre a liberalização, que facilita a importação de componentes a custos menores, e a adoção de políticas industriais que visam proteger e adensar a cadeia produtiva local (Zanella, 2021).

O trabalho adota uma abordagem metodológica mista, combinando a revisão da literatura de Economia Política Internacional e Cadeias Globais de Valor, baseando-se em livros e artigos científicos, com a análise de dados quantitativos sobre capacidade instalada, comércio exterior e inovação no setor, oriundos de relatórios de agências e conselhos de energia eólica, e de pesquisadores independentes. Ao investigar a capacidade do Brasil de se tornar um polo relevante na energia eólica, a pesquisa avalia o potencial do país em converter seus vastos recursos naturais em um ativo de poder no cenário internacional, fortalecendo sua segurança energética e reduzindo vulnerabilidades externas. O método de abordagem será o hipotético-dedutivo, buscando verificar a relação entre as políticas adotadas e os desafios de dependência que marcam a inserção do Brasil na CGV eólica através de argumentos lógicos (Lasta, 2018).

A estrutura do trabalho divide-se em capítulos que abordam desde a economia política da energia e o contexto histórico da transição energética até o mapeamento detalhado da CGV da energia eólica, identificando seus principais atores globais e as especificidades da indústria brasileira. Por fim, discutem-se as perspectivas e os desafios para o Brasil, explorando caminhos como a exploração de terras raras e o potencial do mercado *offshore* como vetores para uma reinserção estratégica na cadeia global.

2. ECONOMIA POLÍTICA DA ENERGIA

A Economia Política Internacional (EPI) do século XX foi indelévelmente marcada pela geopolítica dos combustíveis fósseis, um sistema definido pela escassez, pela concentração geográfica de recursos e pelo controle de rotas de trânsito. Contudo, a emergência da crise climática e a revolução tecnológica impulsionam o mundo para um novo paradigma energético. As políticas de mitigação, como destacam Arent *et al* (2017), são esforços globais para mitigar os efeitos das mudanças climáticas, e, dentro destas políticas, a principal delas é a transição para as energias renováveis:

Uma ‘transição de energia limpa’ refere-se amplamente a uma substituição de tecnologias e insumos de combustível associados em todo o conjunto de subsetores de energia e consumidores de energia, tanto como bens intermediários quanto finais. Esta é a ‘transição de energia limpa’ referida no título deste livro (Arent *et al*, 2017, p. 3, tradução própria).

Este capítulo argumenta que a transição para as energias renováveis representa a mais profunda reconfiguração do poder global desde a ascensão do petróleo. Analisar-se-á como a mudança de uma matriz energética baseada em fluxos de combustíveis para uma baseada em estoques de tecnologia (painéis solares, turbinas eólicas, baterias) e no acesso a minerais críticos está redesenhando o mapa da influência global. O objetivo é investigar a nova EPI da energia, focando em quem são os novos vencedores e perdedores, quais são as novas fontes de dependência e conflito, os principais *players*, e como o Brasil se coloca nesse cenário.

2.1. CONTEXTO HISTÓRICO

A difusão das fontes de energia sempre esteve ligada com o desenvolvimento econômico dos Estados. O surgimento da indústria, por exemplo, está intimamente ligado com a extração da energia a partir de fontes da natureza. O sucesso de cada Estado em âmbito industrial está diretamente condicionado à sua capacidade de investimento nas fontes energéticas (Smil, 2017). Assim como nos mais variados setores da economia internacional, a diferença de capacidades energéticas determina diretamente a posição do Estado na economia internacional, onde a inovação, e não somente o consumo de energia, serve como parâmetro para o desenvolvimento dos países. Nações desenvolvidas possuem ampla gama de fontes energéticas, e lideram o avanço nas fontes de energia mais modernas (eólica, solar, geotérmica),

enquanto países subdesenvolvidos sofrem com a defasagem tecnológica e são abastecidos, normalmente, por fontes arcaicas. “De um ponto de vista biofísico, tanto evolução humana e o curso da história podem ser vistos como uma missão para controlar quantidades e fluxos de formas mais versáteis e concentradas de energia, e converter isso em meios mais baratos e com maior eficiência em calor, luz e movimento” (Smil, 2017, p. 1, tradução própria).

A partir da definição física de energia “propriedade de um sistema cujo consumo é necessário à realização de qualquer trabalho”, derivam-se as mais diversas formas de energia conhecidas pela física: cinética, gravitacional, elétrica, elástica, térmica, radiante, química e nuclear. Apesar de conservada em seu estado natural, a partir da Lei de Conservação da Energia, a energia é frequentemente perdida no momento da transformação de uma forma para outra, como por exemplo em uma usina termelétrica, onde entre 30 e 45% da energia térmica obtida com a queima do combustível em uso se perde dentro do processo de geração. Normalmente, quanto mais processos de transformação energética envolvidos na geração, maiores as perdas, as energias térmicas (carvão, gás), que são as formas de energia mais antigas, têm 3 processos de transformação de energia (química>térmica, térmica>cinética e cinética>elétrica), a energia hidrelétrica, muito usada no Brasil e em outros países com potencial fluvial, possui 2 processos (gravitacional>cinética e cinética>elétrica) (Martins; Guarnieri; Pereira, 2008). Já as energias renováveis modernas, inclusive a energia eólica, foco deste trabalho, são muito eficientes na produção de energia, uma vez que possuem somente um processo de transformação energética, no caso da eólica somente cinética>elétrica, e na energia fotovoltaica radiante>elétrica (Nascimento; Mendonça; Cunha, 2012).

A partir da Revolução Industrial (século XVIII), o mundo passou por uma mudança fundamental, a substituição da biomassa (madeira) pelo carvão e, posteriormente, pelo petróleo e gás natural. Essa transição criou uma dependência intrínseca de recursos geográficos e politicamente concentrados. Conforme argumenta Mitchell (2011), o petróleo, em particular, estabeleceu uma geopolítica de dependência e controle centralizado. A exploração e o transporte de hidrocarbonetos moldaram o poder das grandes potências e criaram a figura do Estado rentista, cuja estabilidade econômica e política depende diretamente da exportação de uma commodity finita. Essa estrutura de poder, baseada em recursos localizados e na vulnerabilidade de rotas de suprimento, é o pano de fundo contra o qual as energias renováveis surgem.

O sociólogo e historiador Timothy Mitchell (2011) oferece a estrutura teórica para entender a relação intrínseca entre os combustíveis fósseis e o poder político. Em sua obra seminal, *Carbon Democracy*, ele argumenta que a organização e a logística da produção e distribuição do carvão e, posteriormente, do petróleo, determinaram a própria forma da política e da democracia. Mitchell inicialmente aponta que o carvão, com sua extração e transporte dependentes de grandes massas de trabalhadores e complexas redes ferroviárias, conferiu um poder estrutural imenso aos sindicatos e à classe trabalhadora, capazes de "estrangular" a economia por meio de greves. O petróleo, por outro lado, permitiu uma centralização e uma dissociação do poder. Por ser mais facilmente bombeado e transportado por oleodutos e superpetroleiros, o petróleo reduziu a capacidade de ação coletiva dos trabalhadores, tornando o sistema de suprimento mais "à prova de greve". Essa logística facilitou a concentração do controle nas mãos de grandes corporações e dos estados exportadores (Mitchell, 2011).

A hegemonia do petróleo como pilar da economia global foi drasticamente desafiada na década de 1970. Os dois grandes choques de preços, em 1973 e 1979, não foram meras flutuações de mercado; representaram eventos geopolíticos de ruptura que remodelaram a economia política internacional da energia. O primeiro, consequência do embargo imposto pelos países árabes membros da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) em resposta ao apoio ocidental a Israel na Guerra do Yom Kippur, e o segundo, decorrente da Revolução Iraniana, expuseram de forma inequívoca a fragilidade das nações industrializadas, cuja estabilidade econômica e segurança nacional estavam atreladas a um recurso controlado por um cartel de nações produtoras (Burke; Stephens, 2018).

A reação a essa vulnerabilidade foi multifacetada e imediata. Nos países desenvolvidos, a primeira resposta foi focada no gerenciamento da demanda, com a implementação de políticas de eficiência energética, como a imposição de limites de velocidade, incentivos a veículos mais econômicos e a melhoria do isolamento térmico em edificações. Contudo, ficou claro que apenas a redução do consumo seria insuficiente. A verdadeira segurança energética passaria, necessariamente, pela diversificação da oferta e pela redução da dependência do petróleo importado (Mitchell, 2011).

Foi nesse contexto que as fontes de energia renováveis, até então relegadas a um papel marginal ou a aplicações de nicho, foram reavaliadas sob uma nova ótica estratégica. Elas deixaram de ser apenas uma curiosidade tecnológica para se tornarem um instrumento de

soberania energética. Governos de países como Estados Unidos, Alemanha, Dinamarca e Japão iniciaram os primeiros programas robustos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) em energia solar (tanto fotovoltaica quanto térmica), eólica, geotérmica e de biomassa (Mitchell, 2011).

Apesar do impulso inicial, o caminho para a expansão das renováveis não foi linear. Quando os preços do petróleo caíram drasticamente a partir de meados da década de 1980, a urgência política que sustentava os programas de incentivo diminuiu. Muitos subsídios foram reduzidos ou eliminados, e o investimento em P&D arrefeceu. Esse período, conhecido como "a montanha-russa das renováveis", demonstrou que, na ausência de uma motivação ambiental mais forte, o apoio a essas fontes estava condicionado à sua competitividade econômica direta com os fósseis. Contudo, as sementes plantadas nas décadas de 1970 e 1980 germinaram, a indústria que se formou, embora reduzida, continuou a inovar. A experiência acumulada e os avanços tecnológicos alcançados durante o período de alto investimento permitiram que os custos continuassem a cair, mesmo com menos apoio governamental. Quando a pauta das mudanças climáticas ganhou proeminência global, a partir do final dos anos 1990 e especialmente nos anos 2000, as energias renováveis já não eram uma aposta incerta. Eram tecnologias maduras, com custos em declínio e com uma base industrial pronta para escalar, posicionando-se como a solução primária para a descarbonização da matriz energética mundial. Assim, a crise de segurança energética dos anos 70 foi o catalisador que iniciou uma jornada de inovação tecnológica e política, posteriormente acelerada e consolidada pela crise climática (Carvalho, 2014).

Embora a energia hidrelétrica tenha se consolidado como uma fonte principal em diversas matrizes nacionais (incluindo o Brasil) e a eólica possua raízes históricas profundas (como nos moinhos de vento), a partir da Segunda Guerra Mundial e o subsequente boom econômico, as energias renováveis foram amplamente marginalizadas. O poder, a conveniência logística e a alta densidade energética do petróleo o estabeleceram como o combustível preferencial da modernidade (Mitchell, 2011).

O primeiro grande desafio a essa hegemonia surgiu com as crises do petróleo da década de 1970. Os choques de preço, desencadeados por eventos geopolíticos no Oriente Médio, expuseram brutalmente a vulnerabilidade das economias ocidentais excessivamente dependentes do suprimento de hidrocarbonetos (Mitchell, 2011). Esse período marcou o ressurgimento do interesse em fontes alternativas. Governos de nações importadoras de energia

(como os Estados Unidos e países europeus) implementaram as primeiras políticas sérias de incentivo e pesquisa e desenvolvimento (P&D) para a energia solar, eólica e biocombustíveis. O objetivo primário era a segurança energética, ou seja, reduzir a vulnerabilidade a choques de suprimento e aos humores geopolíticos dos países exportadores. No entanto, esse ímpeto foi, em grande parte, efêmero. A normalização dos mercados de petróleo nas décadas seguintes, somada ao esforço de grandes corporações e à inércia de uma infraestrutura global já totalmente adaptada aos combustíveis fósseis, levou à marginalização contínua das fontes renováveis. A ausência de um mecanismo de custo efetivo para as externalidades ambientais (o custo do carbono) manteve as renováveis em uma posição de nicho, frequentemente dependentes de subsídios diretos e vistas como tecnologicamente imaturas ou economicamente inviáveis em larga escala (Arent *et al*, 2017).

Essa história de "duas passadas para frente e uma para trás" demonstra que, até o final do século XX, a Economia Política Global estava estruturada para resistir à transformação energética. Os lobbies de energia fóssil e as políticas públicas priorizavam a estabilidade do suprimento de petróleo e gás, em detrimento do investimento maciço necessário para que as energias renováveis pudessem, de fato, competir e reestruturar a matriz global. Seria necessário o advento de uma nova crise, a crise climática, e um salto na competitividade de custos para que as renováveis superassem esse legado histórico de marginalização.

2.2. A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A transição para sistemas energéticos sustentáveis continua a ser uma questão crítica na agenda política internacional. Há décadas, estudos demonstram que a dependência contínua de combustíveis fósseis não só representa um grande desafio para a sustentabilidade ambiental, mas também impacta negativamente a qualidade de vida e o bem-estar humano. Como o setor de energia é responsável, sozinho, por mais de dois terços das emissões globais de gases de efeito estufa, governos, parceiros de desenvolvimento e partes interessadas locais têm sido conclamados a iniciar esforços transformadores e urgentes para a transição a opções de energia limpa e sustentável (Agbaam *et al*, 2023).

Apesar dos fortes apelos para acelerar a transição para economias de baixo carbono, o ritmo de adoção de soluções de energia limpa permanece relativamente baixo em muitos países,

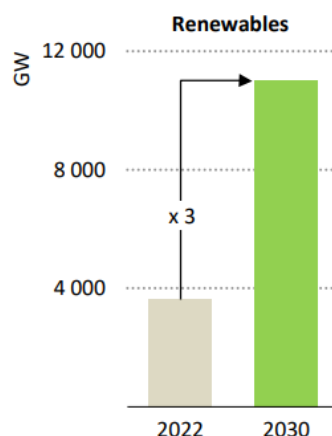
mesmo naqueles com altíssimo potencial de recursos energéticos limpos. Contudo, argumenta-se que estudos focados exclusivamente em elementos sociotécnicos, entre outros, tendem a ignorar as dinâmicas políticas inerentes aos processos de transição energética. Curiosamente, nos últimos tempos, estudos que incorporam considerações de economia política no discurso da transição energética estão se tornando cada vez mais disponíveis e tendem a oferecer uma estrutura alternativa ou complementar para entender o papel do poder e da política nesse processo (Agbaam et al, 2023).

De modo geral, o conceito de transição energética descreve as mudanças no sistema de produção e uso de energia. Numa perspectiva restrita, essas mudanças geralmente envolvem a troca de um tipo específico de fonte ou tecnologia de energia por outra. No entanto, definições muito mais amplas de transição energética vão além do foco nas fontes e tecnologias para incluir as mudanças estruturais inerentes à forma como os serviços energéticos são prestados. Por exemplo, uma definição mais abrangente entende que a transição energética não abrange apenas mudanças na tecnologia, mas também a natureza e os padrões de uso da energia dentro de um sistema (Agbaam et al, 2023). Esse sistema compreende a constelação de insumos e produtos energéticos, envolvendo fornecedores, distribuidores e usuários finais, juntamente com as instituições de regulação, conversão e comércio. Caracteristicamente, as transições energéticas não são processos simples e unidimensionais. Pelo contrário, podem ser descritas como processos complexos, não lineares e de natureza multidimensional, que podem envolver mudanças tecnológicas, econômicas, psicossociais e institucionais. Tais processos acarretam um alto grau de incerteza e dependem de sua trajetória histórica. As transições energéticas também costumam envolver uma vasta gama de atores (como formuladores de políticas, reguladores, produtores, distribuidores e usuários finais) e se desenrolam ao longo de um extenso período. Além disso, são altamente dependentes do contexto e, portanto, apresentam diferentes caminhos de transformação em diferentes cenários. Elas também tendem a ser amplamente impulsionadas por políticas públicas e são marcadas por fortes interesses estabelecidos e por conflitos sobre os objetivos específicos do processo de transição. (Agbaam et al, 2023).

Conforme o relatório de 2023 da Agência Internacional de Energia (IEA), espera-se que o investimento anual em energia limpa cresça 24% entre 2021 e 2023, impulsionado principalmente pela expansão das energias renováveis e veículos elétricos. Em comparação, no mesmo período, o investimento em combustíveis fósseis deverá aumentar apenas 15%.

Contudo, é crucial notar que quase 95% desse aumento no investimento limpo vêm de economias avançadas e da China. Essa concentração evidencia um risco significativo de divisões mais profundas no panorama energético global. A falha em acelerar as transições para energias mais limpas em outras partes do mundo pode agravar esse desequilíbrio (IEA, 2023).

Gráfico 1 - Projeção de crescimento da oferta de energia renovável no Mundo em GW



Fonte: IEA (2023)

2.3. ASPECTOS DA MUDANÇA DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

A inserção do Brasil na transição energética contemporânea não parte do mesmo ponto que as nações industrializadas do Norte Global. Conforme introduzido no contexto histórico, o país construiu ao longo do século XX uma matriz elétrica de base predominantemente renovável, alicerçada em seu vasto potencial hidrelétrico. Essa característica estrutural conferiu ao Brasil uma posição de destaque em termos de baixas emissões de carbono no setor elétrico, mas também gerou um conjunto único de desafios e oportunidades que moldaram sua resposta aos imperativos da transição energética do século XXI.

A experiência brasileira com as crises do petróleo na década de 1970, que resultou no ambicioso Programa Proálcool, já havia demonstrado a capacidade do Estado e da indústria nacional de mobilizarem-se em prol de uma alternativa renovável em larga escala. Essa cultura de buscar soluções energéticas endógenas, aproveitando os recursos naturais abundantes do território, seria reativada no início dos anos 2000, mas por um gatilho diferente: a crise de abastecimento elétrico de 2001-2002. O "apagão" expôs a vulnerabilidade de uma matriz excessivamente dependente de uma única fonte, a hídrica e, portanto, sujeita à variabilidade do

regime de chuvas. A necessidade de diversificar a oferta de energia, aumentar a segurança do sistema e complementar a geração hidrelétrica tornou-se uma prioridade estratégica. Foi nesse contexto que as "novas renováveis" eólica, solar e biomassa de cana-de-açúcar encontraram um terreno fértil para se desenvolver. A resposta brasileira foi, mais uma vez, marcada pela forte indução do Estado por meio de políticas e marcos regulatórios (Ferreira, 2008).

O PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica): Lançado em 2002, foi o primeiro grande programa a garantir a contratação de energia de projetos eólicos, de biomassa e de pequenas centrais hidrelétricas a preços-incentivo, viabilizando os investimentos iniciais e sinalizando um compromisso de longo prazo com a diversificação. O PROINFA foi fundamental para dar partida ao mercado eólico nacional (Zanella, 2021).

O Modelo de Leilões de Energia: A partir de 2004, e com consolidação nos anos seguintes, o Brasil implementou um modelo de leilões regulados para a contratação de nova capacidade de geração. Esse mecanismo competitivo provou ser extremamente eficaz para promover a expansão das renováveis a custos decrescentes. Ao colocar diferentes fontes em concorrência e oferecer contratos de longo prazo que mitigam os riscos para os investidores, os leilões permitiram que a energia eólica, em particular, atingisse um nível de preço altamente competitivo, superando frequentemente as fontes fósseis (Ferreira, 2008).

O sucesso da fonte eólica no Brasil não se deve apenas ao arcabouço regulatório, mas também a condições naturais excepcionais. O país possui um dos melhores ventos do mundo para a geração de energia, especialmente na Região Nordeste. Os ventos brasileiros são caracterizados por serem fortes, constantes e unidirecionais, resultando em um fator de capacidade (a proporção de quanto a usina gera em relação à sua capacidade máxima) que frequentemente ultrapassa 60% durante a estação seca, quase o dobro da média mundial. Essa qualidade do vento possui uma vantagem estratégica adicional, a complementaridade sazonal com a hidroeletricidade. O período de ventos mais fortes no Nordeste (de junho a dezembro) coincide com o período de menor incidência de chuvas e, conseqüentemente, de menor nível nos reservatórios das hidrelétricas do Sudeste/Centro-Oeste. Essa complementaridade natural permite que a geração eólica alivie a pressão sobre os reservatórios, aumentando a segurança do sistema elétrico nacional e reduzindo a necessidade de acionar termelétricas fósseis, que são mais caras e poluentes (Zanella, 2021).

3. A CADEIA GLOBAL DE VALOR DA ENERGIA EÓLICA

Nesta seção, analisar-se-á a cadeia global de valor da energia eólica, iniciando com definições e revisões teóricas sobre o tema, posteriormente detalhando a cadeia por setores e etapas, por agregação de valor, e por nível tecnológico. Após isso, detalhar-se-á a cadeia por países e regiões, expondo características econômicas, políticas e físicas dos diversos players estatais, incluindo o Brasil. E, por fim, serão destacados os players econômicos, como empresas privadas, públicas, e os demais atores não-estatais da cadeia global de valor da energia eólica.

3.1. PROCESSOS DA CADEIA GLOBAL DE VALOR DA ENERGIA EÓLICA

Para descrever a Cadeia Global de Valor (CGV) da energia eólica, parte-se aqui das definições teóricas formuladas por Gary Gereffi e o Center on Globalization, Governance & Competitiveness (CGGC), da Universidade de Duke, a respeito das CGV e como elas se organizam no espaço capitalista mundial. Utilizar-se-ão diversas obras de Gereffi e colegas para descrever os mais variados assuntos das cadeias de valor e colocá-las dentro do tema da energia eólica. A cadeia de valor descreve a gama completa de atividades que empresas e trabalhadores realizam para levar um produto desde sua concepção até o uso final e além. Isso inclui atividades como design, produção, marketing, distribuição e suporte ao consumidor final. As atividades que compõem uma cadeia de valor podem estar contidas em uma única empresa ou divididas entre diferentes empresas. Gereffi ainda faz uma conexão entre as CGV e a globalização:

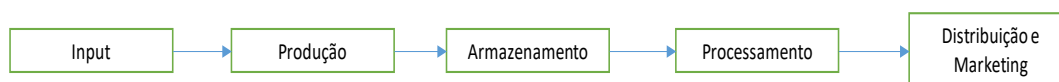
No contexto da globalização, as atividades que constituem uma cadeia de valor geralmente são realizadas em redes interempresariais em escala global. Ao focar nas sequências de atividades tangíveis e intangíveis que agregam valor, desde a concepção e produção até o uso final, a análise de Cadeias Globais de Valor (CGV) fornece uma visão holística das indústrias globais (Gereffi; Fernandez-Stark, 2011, p. 4, tradução nossa).

A metodologia de Cadeias Globais de Valor (CGV) explora quatro dimensões básicas. A primeira (1) é a estrutura de insumo-produto, que descreve o processo de transformação de matérias-primas em produtos finais. A segunda (2) dimensão é a consideração geográfica. A terceira (3) é a estrutura de governança, que explica como a cadeia de valor é controlada. A quarta (4) é o contexto institucional no qual a cadeia de valor da indústria está inserida (Gereffi, 1995). Utilizando essas quatro dimensões fundamentais, desenvolveu-se um elemento adicional de análise conhecido como *upgrading*, que descreve o movimento dinâmico dentro da cadeia de valor. Ele faz isso ao examinar como os produtores mudam entre os diferentes estágios da cadeia. O uso inicial da metodologia CGV focava principalmente em questões econômicas e de

competitividade. Recentemente, as dimensões sociais e ambientais foram incorporadas. Exemplos disso são as questões de regulação do trabalho, o desenvolvimento da força de trabalho, o fenômeno verde das cadeias de valor e as questões de gênero (Gereffi; Fernandez-Stark, 2011).

Para entender cada dimensão das cadeias de valor, Gereffi e Fernandez-Stark (2011) destacam e explicam cada uma delas. Uma cadeia representa todo o processo de entrada e saída que leva um produto ou serviço desde sua concepção inicial até chegar às mãos do consumidor. Os segmentos principais da cadeia variam conforme a indústria. Geralmente, eles incluem pesquisa e design, insumos, produção, distribuição, marketing e vendas. Em alguns casos, a cadeia pode incluir a reciclagem de produtos após o uso. Essa estrutura de entrada e saída envolve tanto bens e serviços quanto uma variedade de indústrias de apoio. Normalmente, essa estrutura é representada como um conjunto de "caixas" da cadeia de valor. Essas caixas são conectadas por setas que mostram os fluxos de bens e serviços, tangíveis e intangíveis. Isso é fundamental para mapear o valor agregado em diferentes estágios da cadeia. Também é crucial para adicionar camadas de informação de interesse particular ao pesquisador, como empregos, salários, gênero e as empresas que participam nos diversos estágios.

Figura 1 – Etapas principais de uma Cadeia Global de Valor



Fonte: Elaboração própria. Adaptado de Gereffi e Fernandez-Stark (2011).

Através da tabela acima, adaptada de Gereffi e Fernandez-Stark (2011), visualiza-se as principais etapas de uma CGV. Etapas diferentes e complementares são possíveis a depender do setor econômico analisado. Dentro da cadeia exemplificada, o *input* são os insumos necessários para a produção, a produção é o passo efetivo de desenvolvimento do produto, o armazenamento refere-se à estocagem do produto analisado, o processamento diz respeito à expedição e logística para a última etapa, a distribuição e o marketing.

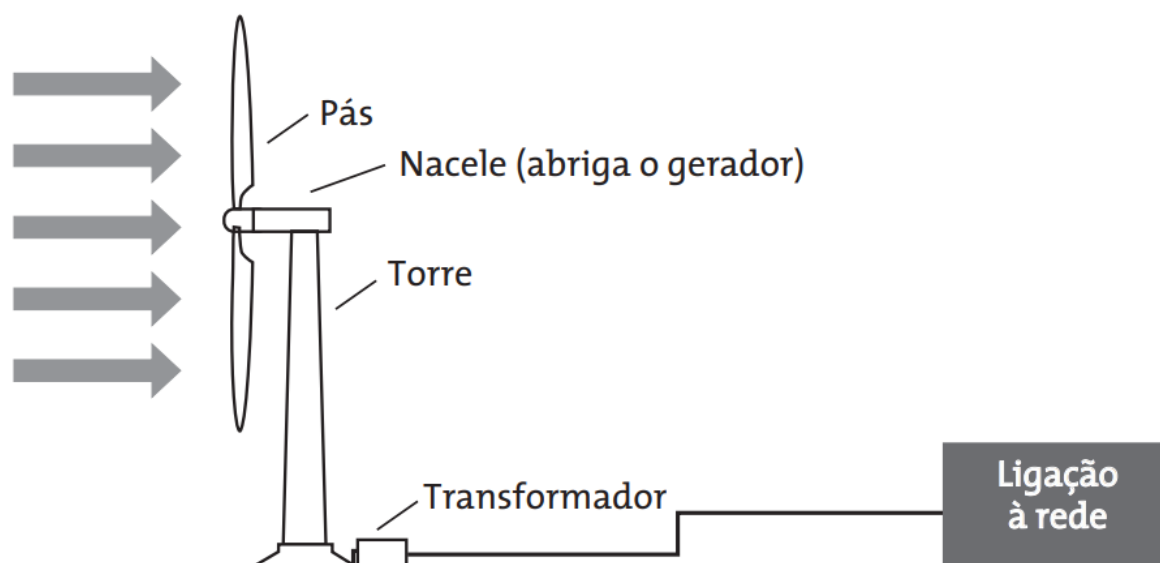
A segunda dimensão de uma CGV, conforme descrito pelos autores, é a dimensão geográfica. Essa dimensão foi intensificada principalmente com a globalização, e os avanços desenvolvidos em áreas como logística internacional, comunicação, transportes e financeira. Atualmente, as cadeias globais de valor são mundialmente dispersas, e fazem parte da realidade econômica de diversos países e regiões, seguindo, principalmente, a Teoria das Vantagens Comparativas, de David Ricardo (Krugman; Obstfeld; Melitz, 2015). Assim, os países

participam em uma CGV de acordo com suas capacidades produtivas e com o produto/insumo que lhe traz maior vantagem comparativa em relação aos outros países da cadeia. Essa dimensão geográfica expõe as discrepâncias regionais e das vantagens comparativas, em que os países em desenvolvimento participam com *commodities*, mão-de-obra barata e insumos baratos, enquanto os países desenvolvidos atuam com pessoal qualificado, marketing, design, e produtos de maior valor agregado dentro da CGV. Atualmente, verifica-se uma tendência de regionalização no aspecto geográfico das cadeias de valor, integrando as cadeias com um aspecto altamente regionalizado, influenciado fortemente pela criação e fortalecimento dos blocos regionais, como a União Europeia (UE), o NAFTA (North American Free-trade Agreement), entre outros. A tendência regional também se fortalece com movimentos disruptivos do comércio internacional, como as tarifas impostas pela segunda administração do presidente americano Donald Trump, a partir de 2025. Essas ameaças à ordem multilateral da OMC (Organização Mundial do Comércio), consolidada a partir do GATT (General Agreement on Tariffs and Trade) que surge com a fundação do sistema econômico de Bretton Woods em 1944 e floresce ao longo do século XX, ameaçam as CGV em sua característica mais ímpar, que é a dimensão geográfica. (Fiori, 2020).

3.2. A CADEIA DE VALOR DA ENERGIA EÓLICA

A geração de energia eólica utiliza o vento como fonte de energia primária. O processo de geração ocorre por meio de um aerogerador (turbina eólica) composto basicamente por uma torre, um conjunto de pás acoplado a um rotor e uma nacele que abriga diversos equipamentos, como gerador elétrico, multiplicador (quando aplicável), dispositivos de medição da velocidade e direção dos ventos, componentes responsáveis pela rotação da nacele para melhor aproveitamento do vento, entre outros componentes (Lage e Processi, 2013).

Figura 2 - Estrutura de um aerogerador



Fonte: Adaptado de Lage & Processi (2013).

As torres das turbinas eólicas, feitas de metal, concreto ou ambos, variam de 90 a 120 metros em altura, dependendo da potência do aerogerador. As pás, construídas com materiais compostos para equilibrar leveza e resistência, possuem 30 a 75 metros de comprimento e pesam entre 6 a 10 toneladas (Gouvea e Silva, 2018). Dentro da Nacele, parte mais importante de um aerogerador, encontram-se os componentes mais tecnologicamente avançados e de maior valor agregado, como a *gearbox*, o *main shaft* e o gerador. Estes três componentes são os principais atores de um aerogerador, a *gearbox* (caixa multiplicadora, semelhante à uma caixa de câmbio de um carro, por exemplo) sendo responsável pela conversão e utilização correta da energia cinética oriunda do movimento das pás para transmissão ao gerador, acoplado a *gearbox*, que transforma essa energia cinética em energia elétrica. O *main shaft* (eixo principal), por sua vez, é o responsável por transmitir a energia cinética do movimento das pás para a *gearbox*. Apesar de serem componentes de alto valor agregado, não são produtos de grande inovação tecnológica, sendo todos os três produtos da segunda Revolução Industrial, oriundos das indústrias mecânica e elétrica.

Ainda na nacele, os sistemas de controle de potência são vitais para a operação segura e eficiente dos aerogeradores. Sua principal função protetora é limitar a potência máxima gerada sob ventos de alta intensidade, mitigando o risco de danos estruturais e de instabilidade na tensão da rede elétrica. Essa limitação é alcançada primariamente por dois sistemas: o controle *pitch*, que altera ativamente o ângulo de ataque das pás, e o controle *stall* (ou estol), que utiliza

um design aerodinâmico passivo para induzir uma perda de sustentação e frear o rotor. Paralelamente, para a otimização da geração, o sistema de controle *yaw* (guinada) alinha o rotor perpendicularmente ao fluxo do vento. Sistemas de freio adicionais garantem a paralisação total do equipamento quando necessário (Lage; Processi, 2013).

A arquitetura do sistema produtivo e tecnológico de uma sociedade é indissociável de sua matriz energética. Historicamente, a acumulação de riqueza e a conquista de um alto padrão de bem-estar social foram alcançadas por nações que dominaram um conjunto específico de técnicas inovadoras, abrangendo as esferas política, econômica e produtiva. Esse domínio estratégico permitiu-lhes controlar sistemas mais avançados e eficientes, possibilitando uma alta acumulação de capital. Em contrapartida, povos que não desenvolveram ou controlaram essas técnicas apresentaram padrões de consumo e qualidade de vida consideravelmente inferiores, evidenciando a energia como um eixo central da desigualdade internacional (Oliveira, 2012).

Por possuir setores de alta complexidade tecnológica dentro de sua cadeia de valor, a energia eólica demanda grande nível de conhecimento e significativos investimentos em P&D, principalmente para manter o setor competitivo e na vanguarda do setor energético. O maior desafio para o setor é utilizar da tecnologia e da inovação para melhorar a composição estrutural das torres, como com o desenvolvimento de materiais mais leves e resistentes (Zanella, 2021). Esses avanços podem ser vistos claramente, à medida que se observa que na década de 1980, a média de diâmetro dos rotores das torres eólicas era de 8 metros, já modelos modernos possuem média de 120 metros, um aumento de 1400% em 40 anos, ou 35% ao ano. Os modelos mais avançados de turbinas são de turbinas *offshore*, que aproveitam dos ventos mais fortes marítimos para uma geração maior de energia. Abaixo, detalhar-se-á alguns dos modelos mais avançados de turbinas eólicas:

Quadro 1 – Modelos mais avançados de aerogeradores

Modelo/Fabricante	Sistema	Pás/Diâmetro	Origem
V164 9.5MW – Vestas	<i>Offshore</i>	80 metros de comprimento e uma nacelle muito leve, com diâmetro de 164 metros.	Dinamarca

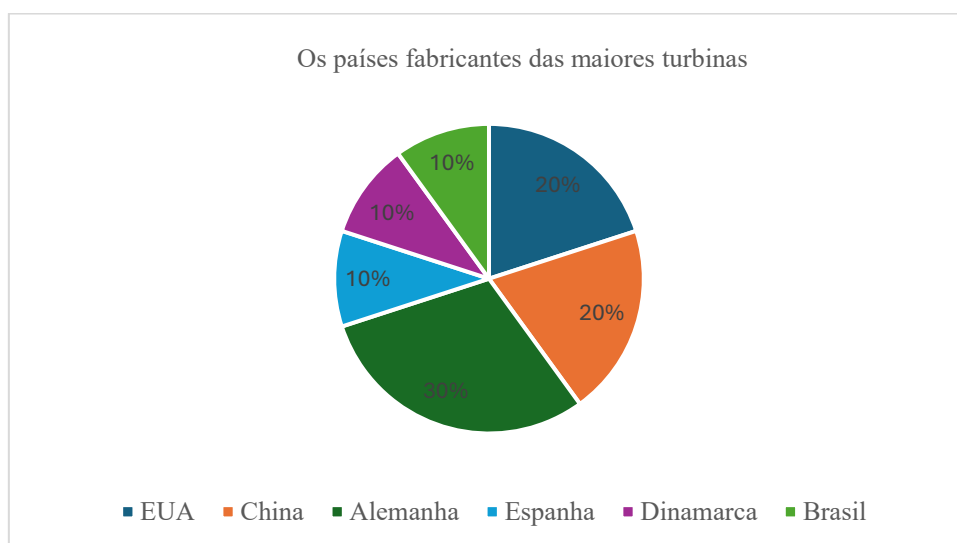
GE Haliade X – 15MW – GE Renewable Energy	<i>Offshore</i>	220 metros de diâmetro de rotor.	Estados Unidos
SG 14-222 DD 15MW – Siemens Gamesa	<i>Offshore</i>	222 metros de rotor e 15MW de potência.	Espanha
E-126 7.5MW – Enercon	<i>Onshore</i>	Rotor com um diâmetro de 127 metros.	Alemanha
AGW172/7MW – WEG	<i>Onshore</i>	Diâmetro do rotor de 172 metros. Fabricada no Brasil.	Brasil
Delta 4000 – Nordex	<i>Onshore</i>	Rotor de 175 metros e potência de 7MW.	Alemanha
MingYang Smart Energy 18MW	<i>Offshore</i>	Rotor com diâmetro de 260 metros e potência de 18MW.	China
Senvion 6M 6.2MW	<i>Offshore e Onshore</i>	A potência foi aumentada para 6.15 MW e o diâmetro do rotor também aumentou de 126 para 152 metros.	Alemanha
GE Haliade 150 – 6MW – GE Renewable Energy	<i>Onshore</i>	Tem lâminas de 73,5 metros e um diâmetro de rotor situado nos 150.8 metros.	Estados Unidos
GWH252-16MW – Goldwind	<i>Offshore</i>	Rotor de 252 metros de diâmetro.	China

Fonte: Elaboração própria. Dados de GWEC (2024) e Zanella (2021).

Da tabela acima, extraem-se alguns fatos relevantes sobre a tecnologia e a cadeia global da energia eólica: primeiro, é possível notar que as turbinas *offshore* são consideravelmente mais potentes que suas irmãs *onshore*, sendo, em média, 100% mais potentes, o que mostra que

o foco das empresas relevantes do setor estão ativamente buscando desenvolvimento tecnológico de seus produtos *offshore*, mais do que *onshore*. Segundo, nota-se que, dos 10 modelos de aerogeradores citados, 7 provêm de países desenvolvidos e apenas 3 de países em desenvolvimento, destes 3, 2 chineses e um brasileiro, a WEG. Terceiro, o setor eólico é diversificado em nível de atores, visto que, dos 10 modelos mais avançados tecnologicamente, apenas uma empresa aparece com 2 modelos, a americana GE (General Electric).

Gráfico 2 – Os países fabricantes dos aerogeradores mais avançados



Fonte: Elaboração própria. Dados de GWEC (2024) e Zanella (2021).

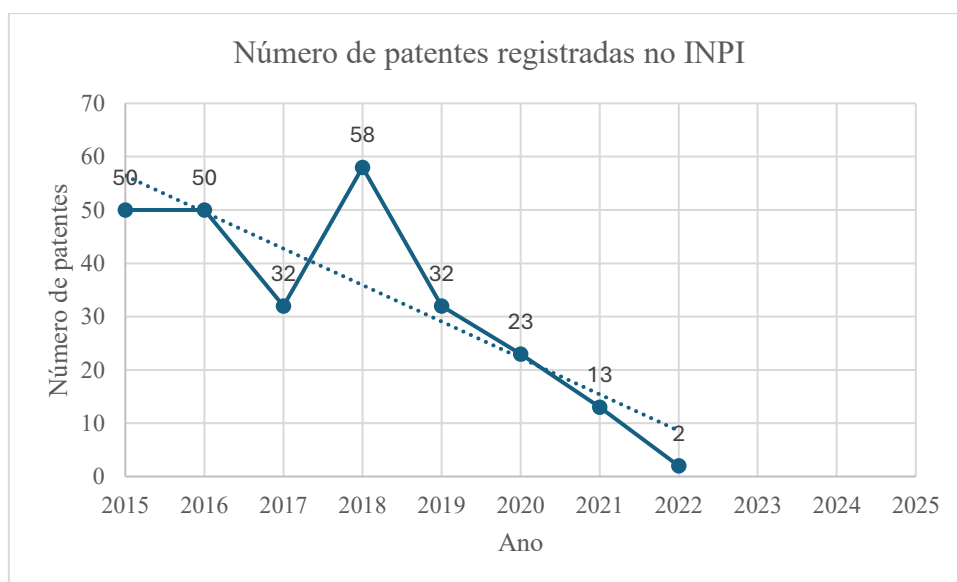
A obtenção e desenvolvimento de tecnologia no setor eólico, como viu-se brevemente no gráfico acima, é predominantemente dominada por poucos países, e de maioria desenvolvidos. Assim, a obtenção das tecnologias na CGV da energia eólica se dá, segundo Camillo (2013, p. 29), “através da importação de equipamentos (e tecnologia) ou da atração de fabricantes multinacionais ou empreender um esforço de aprendizado tecnológico”. A importação de equipamentos e tecnologia é o caminho do comércio, no qual o país importador adquire a tecnologia e os equipamentos já prontos de uma empresa que já possui o conhecimento tecnológico (*know-how*) e que exporta, diretamente ou indiretamente, seus produtos para o país importador, o caminho mais funcional no curto prazo. O segundo caminho, da atração de multinacionais, é um caminho muito adotado por países em desenvolvimento, e que pode ser o mais recompensador no médio prazo, uma vez que o país receptor do IDE (Investimento Direto Externo) ou de licenciamento produtivo pode absorver o *know-how* produtivo da empresa multinacional, habilitando sua indústria local a realizar processos de engenharia reversa e produzir itens semelhantes àqueles da empresa multinacional original

(Nelson; Kim, 2005). Essa etapa foi muito utilizada pela China, por exemplo, no desenvolvimento de sua indústria local e inserção na CGV da energia eólica (Camillo, 2013).

A China, assim como o Brasil, é considerada uma nação *latecomer* na cadeia global de valor da energia eólica, ou seja, é um país que iniciou seus investimentos nesse setor após a grande maioria dos países desenvolvidos. A transferência de tecnologia, vista anteriormente, combinada aos sistemas de inovação, foram usados para promover o desenvolvimento dessa cadeia em países como a China e a Índia. Na China, por exemplo, o sistema de inovação é liderado pelo Estado, com fortes investimentos de empresas públicas e laços profundos entre academia, indústria e mercado (Camillo, 2013).

No Brasil, a tecnologia do setor eólico ainda é deficitária, e os principais atores na inovação do setor são a academia e institutos de pesquisa, os quais são pouco ligados com o mercado (Soares, 2020). Em ordem de quantificar a inovação brasileira, pode-se analisar o número de patentes registradas no INPI (Instituto Nacional de Propriedade Intelectual). De 2015 a 2025, foram registradas 260 patentes relacionadas com o título “eólica”, como verificado no gráfico abaixo:

Gráfico 3 – Patentes registradas no INPI com tema “eólica” por ano

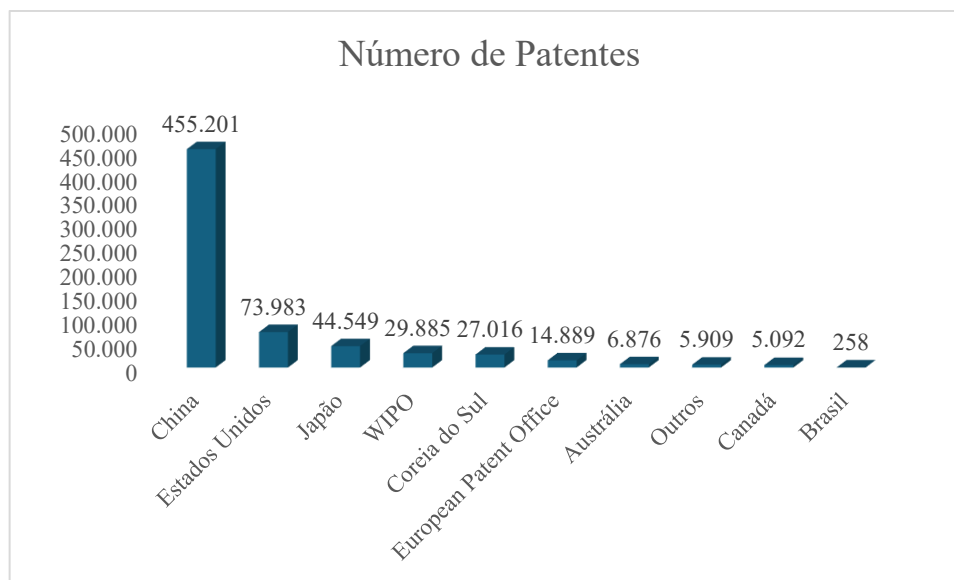


Fonte: Elaboração própria com base em dados do INPI (2025).

A partir do gráfico acima, analisa-se como que a pesquisa e a inovação do Brasil no campo da energia eólica perderam intensidade ao longo dos últimos anos. Na série analisada de 10 anos, 3 anos não registraram nenhuma patente específica de energia eólica, 2023, 2024 e 2025 (até o

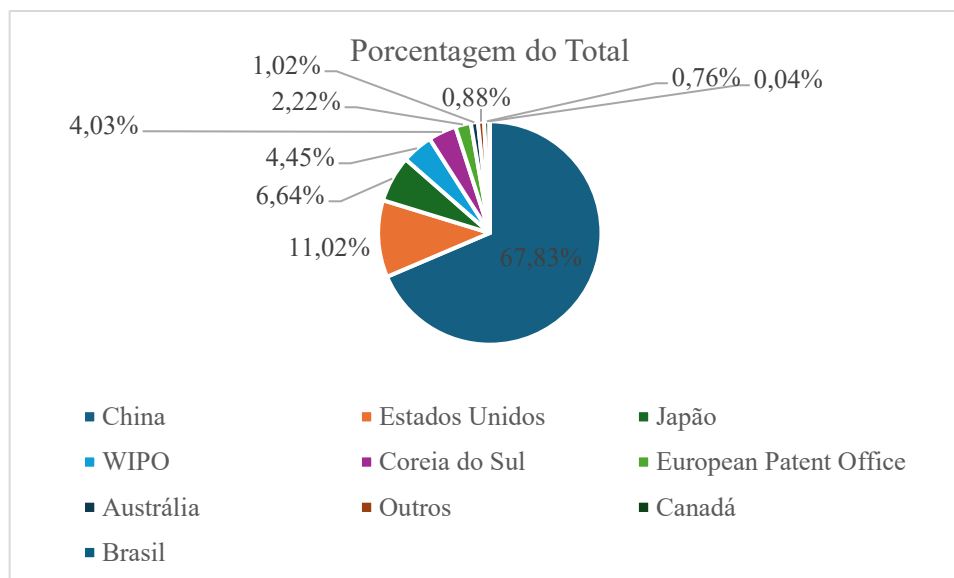
dia 10 de Novembro). Isso mostra como o Brasil está perdendo e ficando para trás na corrida tecnológica dentro da cadeia global de valor da energia eólica, especialmente quando se leva em consideração o desenvolvimento tecnológico nacional.

Gráfico 4 – Número de patentes em energia eólica no Mundo



Fonte: Elaboração própria. Dados de Zanella, 2021.

Gráfico 5 – Porcentagem de patentes por país



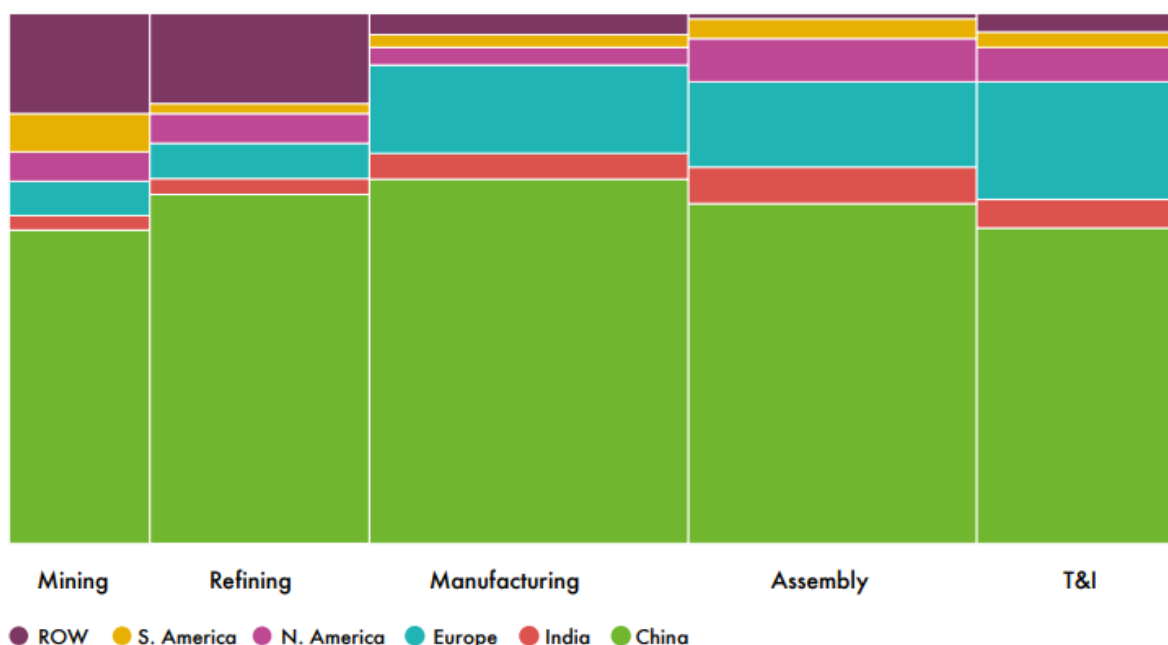
Fonte: Elaboração própria. Dados de Zanella, 2021.

Ao analisar o registro de patentes por países, entre 2015 e 2021, constata-se a enorme liderança chinesa na inovação tecnológica do setor eólico, seguidos dos americanos, japoneses, sul-

coreanos e da UE. O Brasil, no entanto, figura somente com 0,04% do total, uma quantia insignificante para um país de mais de 200 milhões de habitantes, e membro do G20. O país não se qualifica entre os 50 países em número de patentes no setor.

Outra métrica importante para se avaliar a CGV da energia eólica é medindo o quanto de valor é adicionado em cada etapa da cadeia. O Global Wind Energy Council (GWEC), segundo relatório anual da energia eólica no mundo de 2024, qualifica a cadeia de valor da energia eólica em 5 etapas principais. A primeira é a de mineração e extração, etapa reservada à obtenção de recursos naturais e *commodities* para a sequência da cadeia. A segunda etapa, o refino, é relacionado ao tratamento e processamento dos recursos extraídos na etapa 1. A etapa três é a mais complexa e diversa, trata-se da manufatura, processo que envolve múltiplas indústrias e atores simultâneos, em variados locais do mundo, responsáveis por produzir os componentes necessários para a próxima etapa, a montagem, que consiste na compilação e instalação de todos os componentes produzidos na terceira etapa, a fim de tornar o aerogerador operante. A quinta e última etapa, a tecnologia e informação (T&I), é responsável pela manutenção e pós-instalação dos aerogeradores. (GWEC, 2024).

Gráfico 6 - Agregação de valor por região em cada etapa da CGV da energia eólica



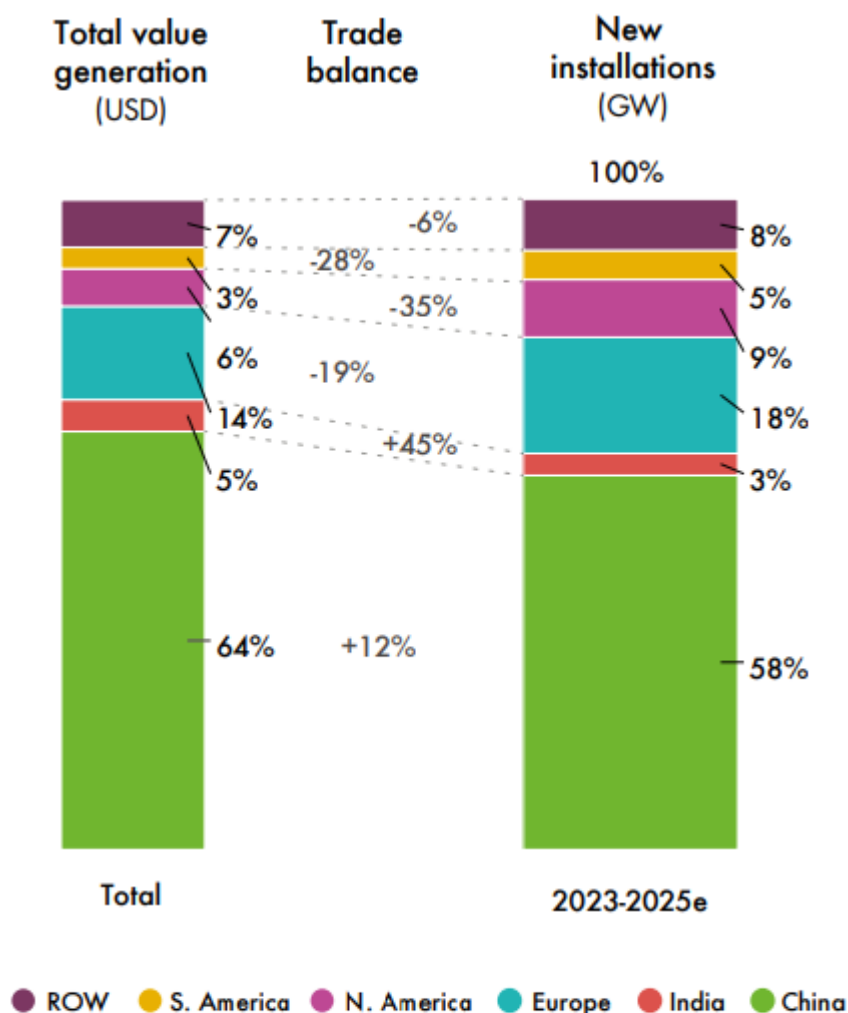
Fonte: GWEC, 2024.

Ainda segundo relatório da GWEC, é notável a influência e poder da China sobre a cadeia de valor da energia eólica, principalmente em refino e manufatura:

A cadeia de suprimentos eólica é atualmente altamente globalizada, com uma forte concentração na China. Ao longo da última década, a China construiu uma indústria impulsionada pela escala e retrointegrada² através de uma expansão constante do mercado. O país lidera o mercado global de refino de materiais (aço, alumínio, terras raras) e de fabricação de componentes eólicos fundamentais, como caixas multiplicadoras (80%), conversores (82%), geradores (73%) e fundidos (82%) (GWEC, 2024, p. 47, tradução própria).

O relatório anual do GWEC, de 2024, também compara o valor agregado na cadeia com as novas instalações, em Gigawatts (GW), por região, para mostrar o déficit comercial dentro da cadeia de valor, como se vê no gráfico abaixo, medindo 2023-2025:

Gráfico 7 - Balança comercial por região por geração de valor e novas instalações



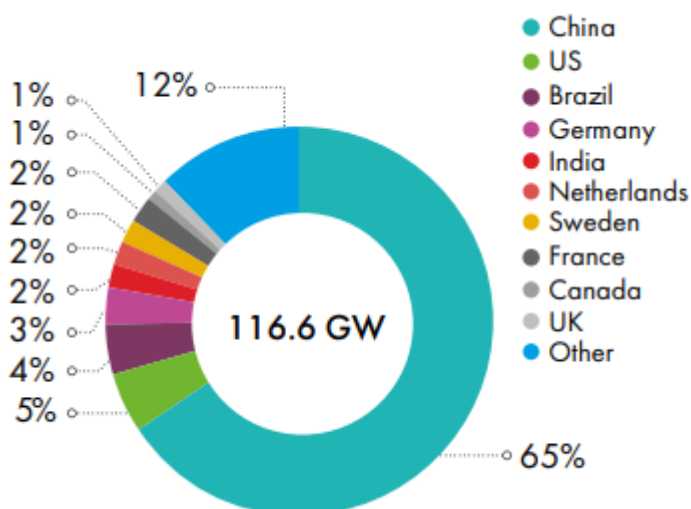
² "Retrointegrada" (ou integrada para trás) refere-se ao conceito de "*backwards-integrated*", que significa que a indústria controla as etapas anteriores da cadeia produtiva (como a extração e o refino de matérias-primas), e não apenas a montagem final (Del Prete; Rungi, 2020, p. 268).

Fonte: GWEC, 2024.

Do gráfico, analisa-se como a China e especialmente a Índia tem de ganhos comerciais dentro da CGV da energia eólica. A Índia, será responsável por apenas 3% de novas instalações de energia eólica no Mundo, mas será responsável por 14% da agregação de valor global da cadeia de valor, e possuirá uma balança comercial positiva de 45%. A China mostra sua dominância na cadeia e na instalação de novas capacidades geradoras, sendo responsável por mais da metade tanto em agregação de valor quanto em instalação, além de uma balança comercial positiva em 12%. Já a Europa, a América do Norte, América do Sul e o resto do mundo (ROW – *Rest of the World*), todas enfrentam déficits comerciais dentro da cadeia global de valor da energia eólica.

O potencial brasileiro dentro da CGV eólica é gigantesco. Em 2023, o país foi responsável por 4% de toda nova capacidade desenvolvida no mundo naquele ano, colocando-o na terceira posição global por país, atrás somente da China (líder absoluta, com 71% da nova capacidade instalada) e dos EUA (com 5% das novas instalações). O Brasil, segundo a GWEC (2024), possui 96 projetos de parques eólicos *offshore* com pedido de licenciamento ambiental no IBAMA, porém, devido à instabilidade legal no que se refere ao projeto de lei das eólicas *offshore* (PL 11.247 de 2018), os projetos estão somente em fase de planejamento, visto a insegurança jurídica presente no tema. Além de China, Estados Unidos e Brasil, destacam-se em capacidade instalada em 2023 Alemanha, Índia, Canadá, e outros países europeus.

Gráfico 8 - Capacidade instalada no ano de 2023 por país

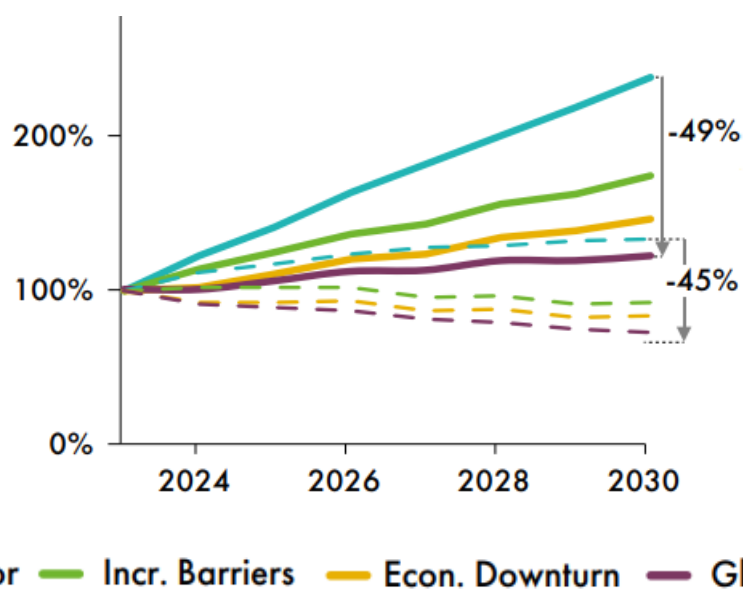


Fonte: GWEC, 2014.

O relatório anual de 2023 da GWEC (2024), ainda dispõe de quatro cenários possíveis para a cadeia global de valor da energia eólica, visando o espaço de 2024 até 2030. O primeiro cenário é o de Portas Abertas, no qual os países sustentariam os benefícios da cooperação multilateral baseada em normas internacionais estabelecidas no comércio e construiriam cadeias regionais competitivas e resilientes. O segundo cenário, qualifica-se como o de Aumento de Barreiras, onde os conflitos comerciais e alianças bilaterais levariam as economias à uma tendência mais forte de bilateralização comercial, aumentando as barreiras comerciais e reduzindo a multilateralidade da cadeia global de valor. A Crise Econômica é o terceiro cenário, no qual os países seriam afetados por altos níveis inflacionários e redução dos investimentos, que combinados com diminuição do crescimento chinês levariam a disrupções na CGV. O quarto e último cenário é o de Escalada Global, onde o mundo seria afetado por conflitos diretos e de *proxy* que levariam os Estados a uma atividade reduzida no comércio internacional, fragmentando assim a CGV (GWEC, 2014, p. 44).

Dos cenários analisados, somente o primeiro, de Portas Abertas, seria benéfico para a CGV da energia eólica, como pode se analisar nos gráficos abaixo:

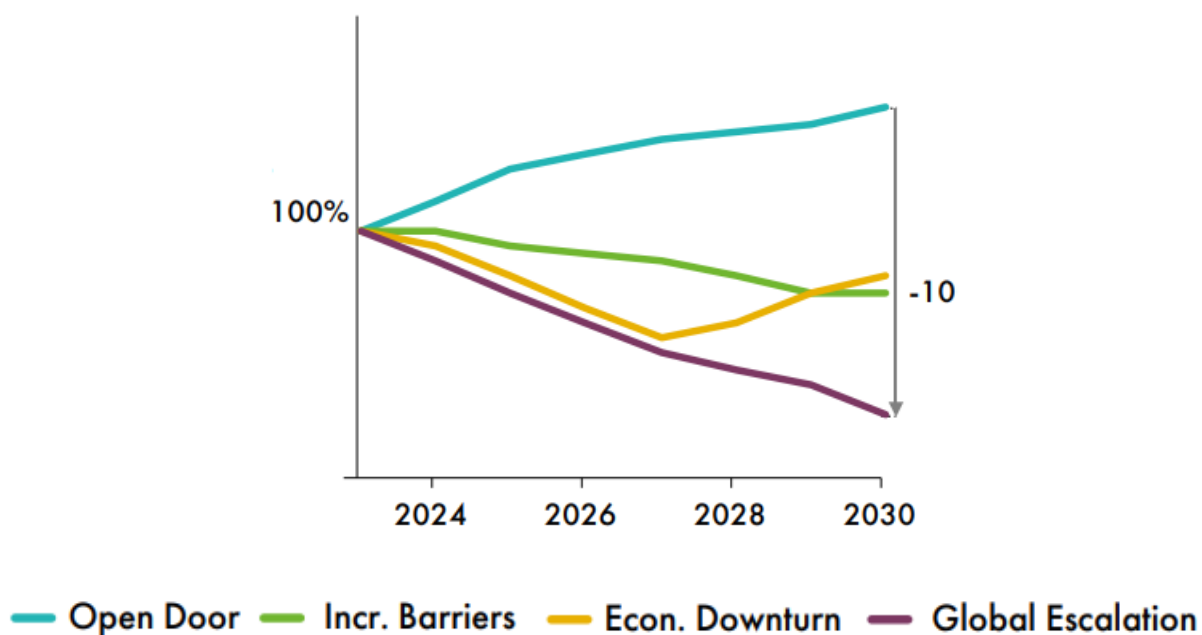
Gráfico 9 - Crescimento de mercado de energia eólica



Fonte: GEWC, 2024.

Esse gráfico mostra o crescimento de mercado da energia eólica, de 2023-2030, baseados nos quatro cenários. Como pode-se analisar, o crescimento em GW (linha contínua) é de mais de 100% no período com o cenário de portas abertas, e vai diminuindo conforme o cenário muda.

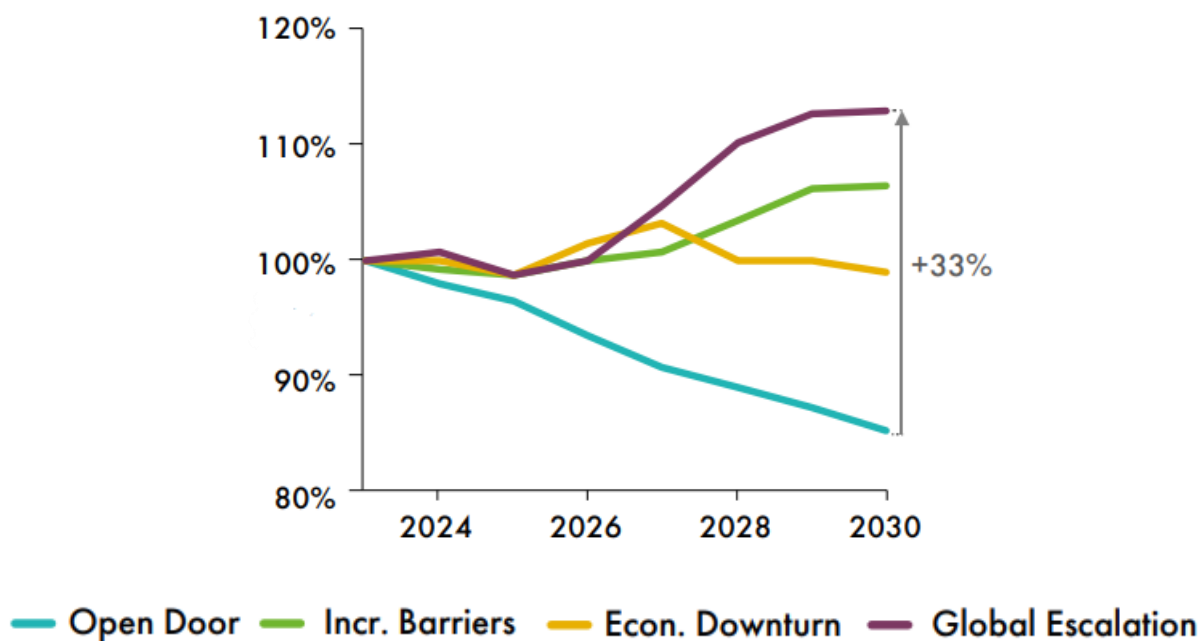
Gráfico 10 - Margens de lucro de fornecedores



Fonte: GWEC, 2024.

Do gráfico acima, nota-se o *forecast* de 2023-2030 da variação da margem de lucro dos fornecedores dentro da CGV da energia eólica. Dos quatro cenários, somente o de Portas Abertas proporcionaria aumento nas margens dos fornecedores, enquanto os demais cenários levariam à queda das mesmas.

Gráfico 11 - Custo da energia eólica



Fonte: GWEC, 2024.

Já nesse gráfico, vê-se a previsão de mudança no custo da energia eólica de 2023-2030, medido na métrica LCOE (Levelized Cost of Energy), que significa o custo nivelado de energia, ou seja, o custo médio por kilowatt/hora (kWh) na vida útil de uma usina. No gráfico, nota-se também que o único cenário positivo é o de Portas Abertas, enquanto o cenário de Crise Econômica manteria praticamente os valores de 2023, e os demais cenários levariam a um aumento no LCOE dos projetos de energia eólica.

Além dos variados cenários para a cadeia global de valor da energia eólica, o relatório da GWEC (2024) apontou níveis de criticidade da disponibilidade, dentro da cadeia de valor, dos setores presentes na CGV:

Quadro 2 - Criticidade por setor da CGV da energia eólica

Theme	Critical materials					Key components							
Subject	Rare Earths*	Steel Plate*	Copper	Concrete	Carbon Fiber*	Gearboxes*	Generators*	Blades*	Power Converters*	Castings*	Towers*	Foundations*	Cables*
Global level criticality													

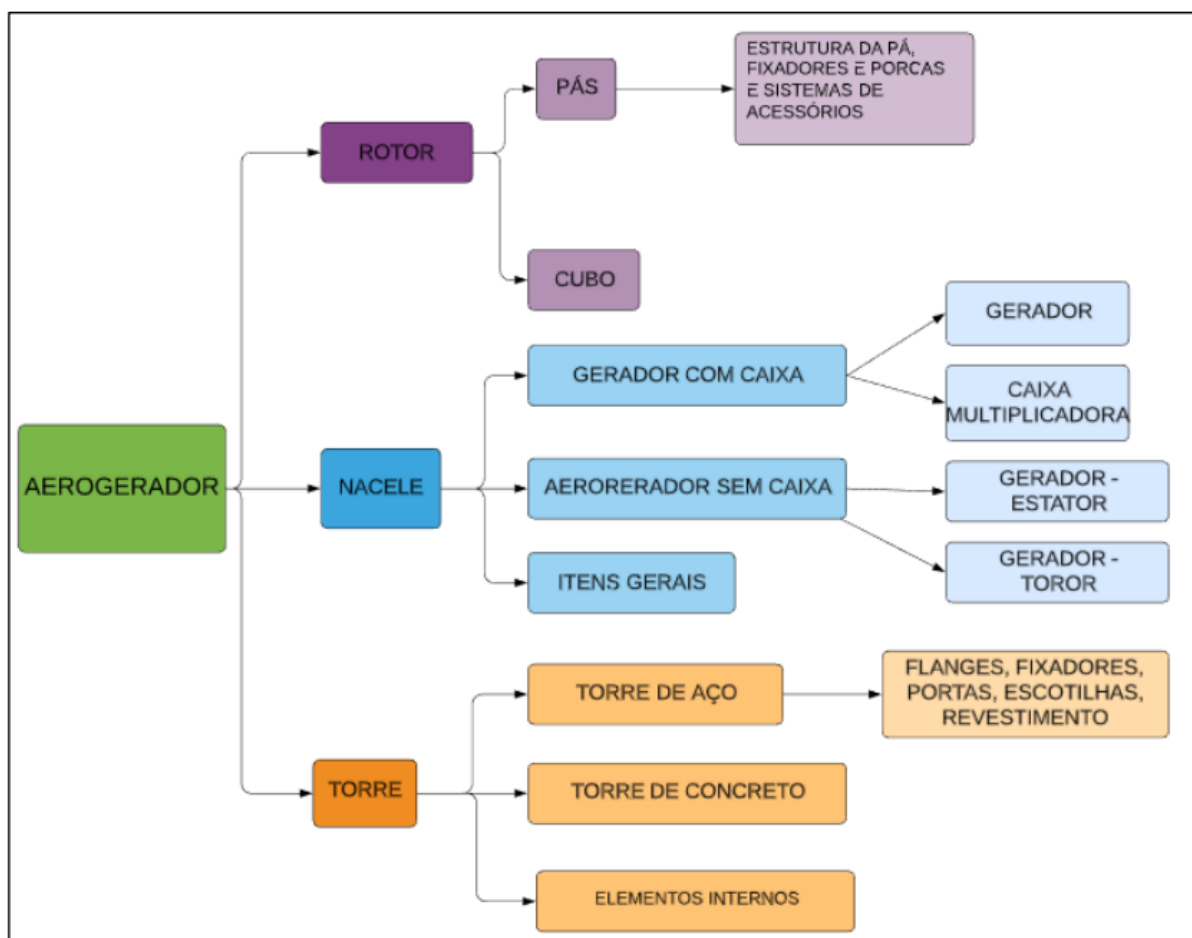
Fonte: GWEC, 2024.

No quadro acima, identifica-se que, dos materiais críticos (matérias-primas e insumos), há uma grande criticidade na disponibilidade global por minerais de terras raras, uma vez que o refino desses minerais se dá quase exclusivamente na China, o que põe em risco a capacidade de suprimento (GWEC, 2024, p. 48). Para os componentes chave, encontram-se dificuldades no suprimento de *gearboxes* (caixas multiplicadoras) e de *castings* (peças fundidas), principalmente devido à centralização da produção em poucos países (Índia e China).

3.3. PRINCIPAIS COMPONENTES E SETORES

A cadeia de valor da energia eólica é composta principalmente pelo aerogerador em si, infraestrutura e fundações do parque eólico, equipamentos da rede elétrica (cabos, transformadores) e vários componentes e subcomponentes, como se pode observar da figura abaixo:

Figura 3 – Componentes principais de um aerogerador



Fonte: Zanella, 2021.

A nacele, parte mais vital e estratégica do aerogerador, contém diversos componentes que são suportados por uma estrutura de aço, compondo o sistema de geração elétrica. O processo começa com o eixo principal, feito de aço ou liga de alta resistência, que transfere a energia mecânica da turbina. Em muitas configurações, esse eixo aciona a caixa multiplicadora (*gearbox*), um componente que adapta a baixa rotação do rotor à velocidade mais elevada demandada pelo gerador. A *gearbox*, quando utilizada, representa a maior massa da nacele e aproximadamente 13% do seu custo, exigindo manutenção intensiva e um sistema hidráulico complexo, o que a torna uma fonte de possíveis falhas no aerogerador. (ABDI, 2014). O gerador, então, transforma a energia mecânica em elétrica, que é tratada por conversores de frequência (retificador e inversor) para controle da onda de saída. Na sequência, um transformador eleva a tensão ao nível da rede, podendo estar localizado na nacele, na torre ou externamente. Paralelamente a esse sistema de geração, atua o Sistema de *Yaw*, que utiliza um

motor elétrico e rolamentos para girar a nacela sobre a torre, otimizando o aproveitamento ao manter a turbina alinhada ao vento (CUSTÓDIO, 2013).

Quadro 3 - Componentes da nacela

Nacela (aprox. 35 a 50% do custo do aerogerador)		
	Elementos estruturais Talha Carenagem da nacela Acessórios Eixo principal Rolamento Yaw Sistema de Yaw Conversor/Inversor Transformador Sistema de freios Sistema de travamento do rotor Painel de proteção elétrica Cabos/barramento Unidade hidráulica Sistema de refrigeração da nacela Slip Ring	Quadro principal (main frame) Quadro traseiro (rear frame) Bastidor Parafusos estruturais Resina epóxi ou poliéster Tecido de fibra de vidro Luzes de sinalização Anemômetro (medidor de velocidade do vento) Sensor de direção do vento Outros sensores Para-raios Rolamentos do eixo principal Sistema de lubrificação Sistema de acionamento do Yaw (motorreductor) Painel de controle do Yaw
Aerogerador com caixa	Gerador Caixa Multiplicadora	Habitáculo Engrenagens planetárias Rolamentos Mangueiras Sistema de torque Sistema de lubrificação Sistema de resfriamento
Aerogerador sem caixa	Gerador – Estator Gerador – Rotor	Elementos estruturais do estator Resina de impregnação Núcleo magnético Bobinas Elementos estruturais do rotor Tampa do rotor Ímãs permanentes

Fonte: ABDI, 2014.

O rotor é composto basicamente pelo cubo onde as pás são fixadas e pelas próprias pás, que nos aerogeradores de grande porte mais comuns são três. Estes são os elementos que interagem com o vento, funcionando como perfis aerodinâmicos que chegam a medir mais de 80 metros em instalações *onshore*. Fabricadas em material compósito (resina epóxi ou poliéster reforçada com fibra de vidro ou carbono), as pás representam cerca de 22% do custo do aerogerador e 7% de sua massa, com cada unidade pesando entre 6 e 10 toneladas. Sua estrutura

consiste em um casco externo (duas conchas) suportado por uma viga principal (alma), que por sua vez pode ser feita de compósitos laminados (várias camadas) ou do tipo sanduíche (núcleo de baixa densidade, como madeira balsa ou espumas de PVC/PET). Para proteger este material das intempéries, a pá recebe um acabamento superficial de *gel-coat* ou poliuretano. A maior vulnerabilidade ao desgaste por erosão concentra-se no "bordo de ataque", a superfície que enfrenta diretamente o atrito com vento, chuva e particulados em alta velocidade (ABDI, 2014).

Quadro 4 - Componentes das pás de um aerogerador

Rotor (aprox. 20 a 30% do custo do aerogerador)		
Pás	Estrutura da pá (casco externo, mastro interno ou alma e raiz de inserção)	Resina epóxi ou poliéster Tecido de fibra de vidro Tecido de fibra de carbono Espuma de PVC Madeira Balsa Massas e revestimentos de proteção
	Fixadores (parafusos T-bolt) e porcas (Barrel Nut) Sistemas acessórios	Sistema antirraios Sistema antigelo

Fonte: ABDI, 2014.

Já as torres, responsáveis por sustentar o conjunto rotor-nacele na altura de operação, são projetadas em diferentes formatos e materiais, cuja escolha depende de fatores como custo, altura, transporte e manutenção (CUSTÓDIO, 2013). Os principais tipos são as cônicas (de aço laminado ou concreto protendido) e as treliçadas (de aço galvanizado). A altura costuma ser um fator decisivo: torres de aço cônicas são mais comuns na faixa de 80 a 100 metros, enquanto alturas superiores a 100 metros favorecem o uso de concreto, torres treliçadas ou as híbridas. As torres híbridas são uma solução que combina uma base de concreto com uma seção superior de aço. Já as treliçadas são uma alternativa logística viável para locais de difícil acesso. Para projetos maiores, na faixa dos 200 metros, exploram-se tecnologias com madeira ou estruturas de aço e tecido. Nos parques eólicos brasileiros, as torres cônicas de aço e as híbridas (utilizadas pela Wobben) são as mais frequentes. Nos últimos anos, as torres totalmente de concreto vêm ganhando mercado recentemente, com novos protótipos sendo desenvolvidos no país (Melo, 2014).

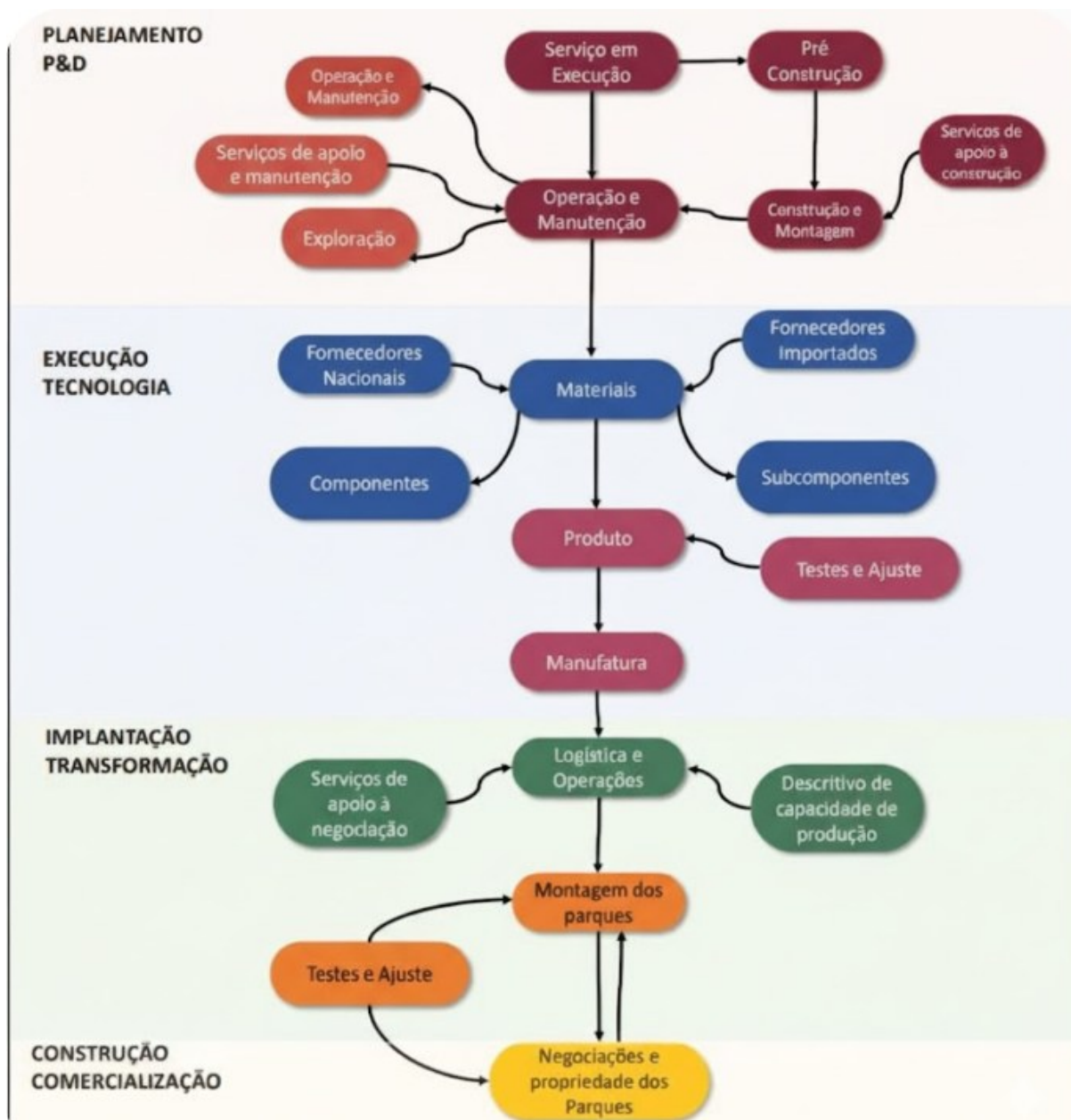
Quadro 5 - Principais componentes da torre de um aerogerador

Torre (20 a 25% do custo do aerogerador)		
Estrutura torre de aço	Chapas de aço laminado Flanges Fixadores (parafusos ou elementos de conexão) Portas Escotilhas Revestimentos (pintura)	
Estrutura torre de concreto	Concreto (pré-moldados) Moldes Inseros metálicos Cabos de aço de protensão Revestimentos (pintura) Produtos de montagem dos pré-moldados (adesivos)	Cimento, areia, brita, água, aditivos plastificantes
Elementos internos	Escadas Elevador Plataformas Suportes (brackets) e acessórios Sistemas de proteção contra quedas Guard-rails Passa-cabos (pipe-rack ou eletrodutos) Cabos Iluminação	Etiquetas de identificação Cabo, fixador, trava-queda, correia, corda Cerca, porta da cerca

Fonte: ABDI, 2014)

A cadeia de valor da energia eólica vai além somente das estruturas produtivas. Existe uma grande e atuante etapa de planejamento e P&D por trás de toda cadeia produtiva. Essa etapa inclui, por exemplo, empresas prestadoras de serviço às grandes fabricantes, que prestam atividades como mensuração da intensidade dos ventos, viabilidade de infraestrutura, viabilidade legal e jurídica, entre diversas outras atividades, que planejam todo o processo pelo qual a cadeia de bens e serviços da energia eólica percorre: execução, tecnologia, implantação e transformação, construção e comercialização, para, por fim, chegar a distribuição (Zanella, 2021).

Figura 4 - Cadeia global de valor estendida da energia eólica



Fonte: Adaptado de Zanella, 2021.

A fase preliminar dos projetos eólicos envolve um estudo de viabilidade do empreendimento, que avalia a potencialidade de implantação do parque e fatores críticos como a disponibilidade e a constância dos ventos. Com base nisso, o projeto arquitetônico básico define o dimensionamento da potência instalada e o posicionamento dos aerogeradores, o que deve ser feito de acordo com a estrutura dos equipamentos e o estudo de vento. Este projeto também deve atender a especificações técnicas (como altura das torres, diâmetro do rotor e potência nominal das turbinas) e ser complementado por projetos construtivos preliminares,

como acessos, fundações, edificações, levantamentos topográficos, sondagens e análise energética (Zanella, 2021)

Todos os projetos são submetidos ao licenciamento ambiental, regido pela Resolução CONAMA nº 462/2014. Embora parques eólicos sejam geralmente considerados empreendimentos de baixo impacto, eles são classificados como de alto risco caso a implantação ocorra em locais com especificidades naturais diferenciadas, como mangues, dunas, mata atlântica, zona litorânea, ou áreas com aves migratórias e pássaros em extinção. Nesses casos de alto risco, é exigido o Estudo de Impacto Ambiental e seu respectivo Relatório (EIA/RIMA). A aprovação deste estudo é a condição para adquirir as licenças necessárias: a Licença Prévia, a Licença de Instalação e a Licença de Operação (Bittencourt et al, 2017).

3.3.1. Principais *players*

Historicamente, os países pioneiros na cadeia global de valor da energia eólica foram os EUA e os países da Europa ocidental, a partir dos anos 1980 até meados dos anos 2010. Disso, derivam-se hoje algumas das principais empresas do setor, como a americana GE (General Electric) que usou de seu já consolidado *know-how* em outros campos da energia para ingressar com grandes vantagens na energia eólica. Na Europa, são proeminentes a Siemens-Gamesa (Originalmente duas empresas distintas, mas que recentemente se fundiram) de origem alemã-espanhola, a Vestas, originária da Dinamarca, e a Enercon, de origem germânica.

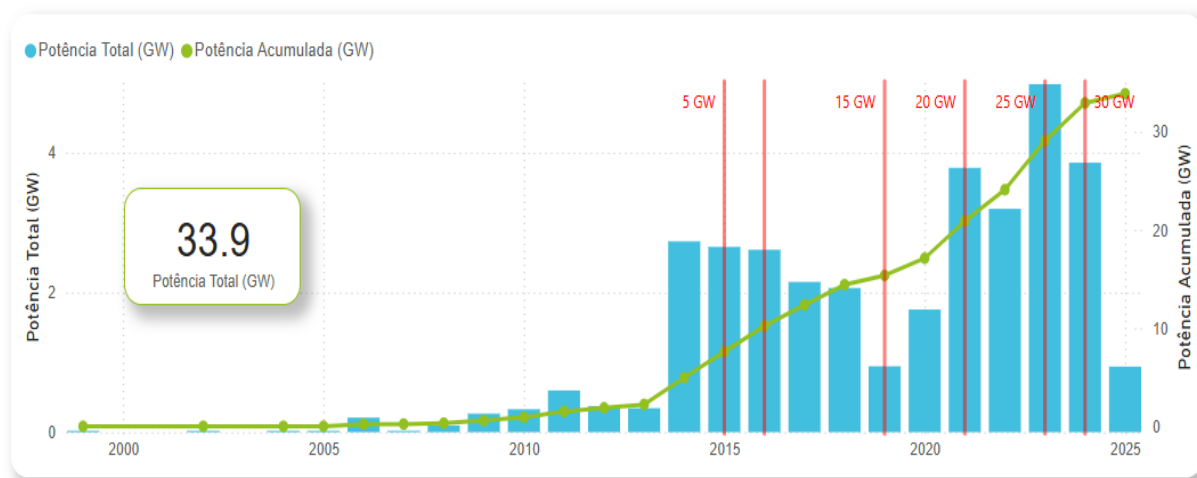
Mais recentemente, especialmente a partir dos anos 2010, China e Índia começaram a desenvolver empresas competidoras no mercado internacional. Entre elas, destacam-se a indiana Suzlon, e as chinesas Sinovel, Goldwind e Guodian. A crescente demanda por equipamentos eólicos impulsionou investimentos relevantes da China e da Índia na indústria de bens de capital. Essa política fomentou o surgimento de gigantes nacionais: Sinovel, Goldwind e Guodian na China, e a Suzlon na Índia. Inicialmente focadas em suprir a demanda regional asiática, essas empresas rapidamente evoluíram. Hoje, elas não apenas conquistaram novos mercados internacionais, mas também estão ativamente buscando fusões e aquisições com fabricantes europeus de grande experiência para absorver tecnologia e expandir sua influência (Lage; Processi, 2013).

3.3.2 A posição do Brasil

O Brasil se insere no contexto internacional da energia eólica entre 1976 e 1977, quando foi realizado o primeiro estudo de viabilidade técnica para comissionamento de usinas eólica no litoral da região nordeste e em Fernando de Noronha (Amarante et al, 2001). Em 1992, o estudo foi posto em prática, e foram instaladas a primeira unidade no país, no arquipélago de Fernando de Noronha, com geração equivalente a 1MW.

Mas foi a partir dos anos 2000 que a fonte eólica passou a receber atenção do Governo Federal. Com as constantes crises energéticas do final da década de 1990 e início dos anos 2000, foi vista a necessidade de ampliação da geração de energia elétrica no Brasil. Em julho de 2001, é criado o PROEÓLICA (Programa Emergencial de Energia Eólica), que visava a geração de pouco mais de 1 GW da fonte até 2003 (Ferreira, 2008). Já em abril de 2002, foi criado o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), buscando a geração de 3,3 GW de energia eólica oriunda de fontes renováveis, além disso, deu as fundações para o estabelecimento da cadeia de valor no Brasil, uma vez que requeria entre 60 e 90% de equipamentos e serviços nacionais na produção dessa energia (Ferreira, 2008) Com o PROINFA, começaram a surgir as primeiras indústrias e prestadores de serviço para a energia eólica no país, além das *commodities* que entraram na cadeia global de valor, como o ferro. Já em 2004, o Governo Federal inicia o modelo de leilões públicos para contratação de energia elétrica, e, a partir de 2006, a energia eólica começa a caminhar em passos mais largos no Brasil.

Gráfico 12 - Evolução da capacidade instalada em operação (GW)



Fonte: ABEEólica, 2025.

O gráfico acima, da ABBEólica (Associação Brasileira de Energia Eólica), mostra a evolução da capacidade instalada no país desde a instalação da primeira usina em Fernando de Noronha, até junho de 2025. Em junho de 2025, a capacidade total instalada no Brasil girava em torno de 33,9 GW com adição de cerca de 1 GW em 2025, até o mês de junho, significando que, de 1992 até junho de 2025, a capacidade instalada total da energia eólica no Brasil aumentou em 33.900 vezes, ou um crescimento em CAGR³ de 37,18%.

Em relação à cadeia global de valor da energia eólica, esta se desenvolve no Brasil a partir dos anos 1990, mas especialmente com os avanços do PROINFA, em meados da década de 2000. Em 1995, a Wobben Windpower Indústria e Comércio Ltda. (subsidiária brasileira da Enercon GmbH, da Alemanha) abriu sua primeira fábrica de aerogeradores na cidade de Sorocaba-SP, e em 2002, inaugurou a segunda unidade fabril em Pecém-CE. Segundo Barbosa Júnior e Silva (2015), a Wobben destaca-se na CGV da energia eólica no Brasil por ser a primeira empresa nacional a fabricar aerogeradores de grande porte, por possuir as primeiras usinas do Leilão de 2009, e as primeiras usinas instaladas pelo PROINFA. Entretanto, após a grave crise econômica que atingiu o Brasil em 2014 e uma diminuição no ritmo de construção de usinas eólicas no país, a Wobben, assim como diversos outros setores e empresas nacionais da CGV da energia eólica acabaram fechando e retirando-se do Brasil (Mauro, 2022). A Wobben fechou sua fábrica de Sorocaba em 2019, e vendeu sua fábrica de Pecém em 2020, para a Aeris, fabricante nacional de pás.

Além da Wobben, no Brasil, em 2014, havia outras 5 montadoras de aerogeradores no país credenciadas pelo FINAME do BNDES, que incentiva a produção local com financiamentos mais acessíveis. Dentre elas estavam a IMPSA (empresa argentina que encerrou atividades no mesmo ano de 2014), a GE (atualmente GE Vernova), Alstom (empresa francesa que foi adquirida pela GE em 2015), Nordex, Acciona (empresa espanhola comprada pela alemã Nordex em 2016). Atualmente, WEG, Siemens-Gamesa e Vestas também estão na lista do Finame BNDES (Mauro, 2022).

A GE, atualmente na sua subdivisão GE Vernova, era a maior montadora em capacidade produtiva de aerogeradores anual, com capacidade para 384 aerogeradores por ano até 2017. Possuía uma fábrica em Campinas-SP de cubos e nacele, e logo após aquisição da Alstom

³ O CAGR (Compound Annual Growth Rate), ou Taxa de Crescimento Anual Composta, é uma métrica utilizada para descrever a taxa de retorno de um investimento ou o crescimento de um indicador (como a capacidade de energia eólica) durante um período de tempo.

obteve sua fábrica de Camaçari-BA, também de naceles e cubos (Mauro, 2022). Entretanto, em 2022, a empresa decidiu parar de produzir aerogeradores no Brasil, após uma decisão da empresa de focar em novos mercados, mesmo possuindo, à época, cerca de 30% do mercado nacional de aerogeradores, mais de 3 mil unidades. Em 2024, a empresa fechou sua última fábrica de Camaçari-BA.

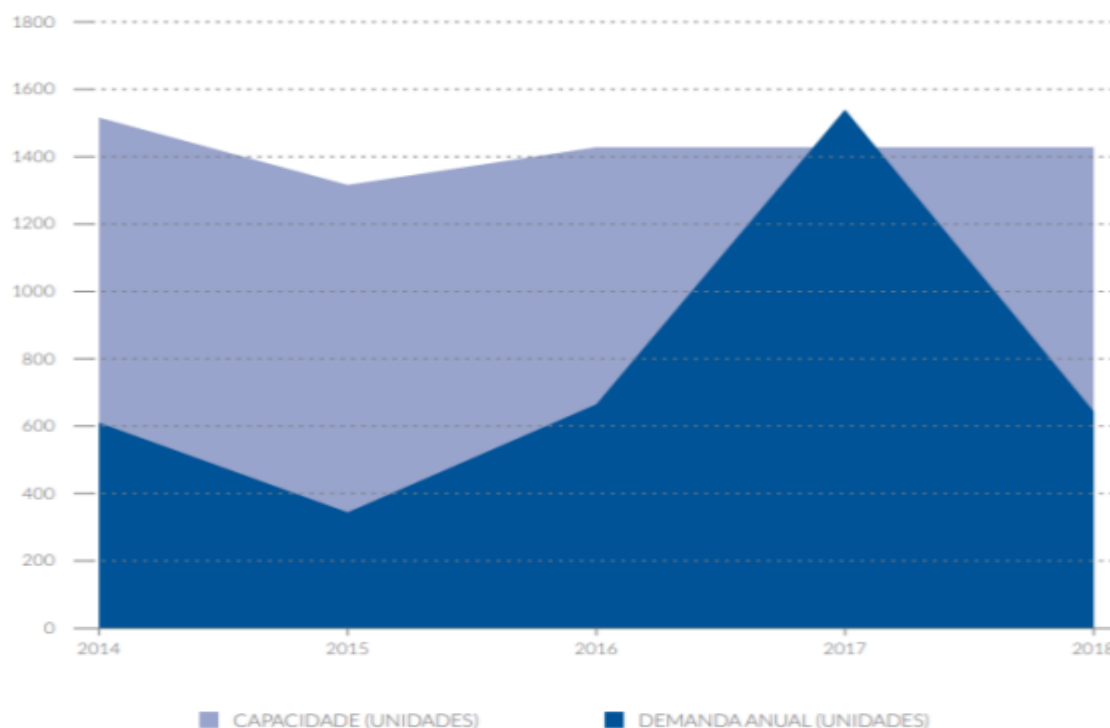
A fábrica da GE fechada em Camaçari foi recentemente adquirida pela Goldwind, montadora de aerogeradores chinesa, uma das líderes globais, que pretende iniciar sua produção nacional para ingressar mais fortemente no mercado brasileiro. A Goldwind terá capacidade produtiva de 150 aerogeradores por ano (Bahia, 2024).

A Vestas, fabricante dinamarquesa, inaugurou com um aporte de investimentos na ordem de R\$ 100 milhões, a Vestas estabeleceu sua unidade fabril em Aquiraz, na região metropolitana de Fortaleza-CE, em janeiro de 2016, a planta dedica-se à produção de hubs e naceles, operando com uma capacidade inicial de 400 MW e possuindo infraestrutura para expansão até 800 MW (Mauro, 2022).

Já a alemã Nordex, após a compra da Acciona em 2016, possui capacidade de produção em ordem de 150 unidades de aerogeradores por ano em 2017. A empresa atua com fábricas de torres de concreto próprias, montadas em locais próximos aos parques eólicos, em um processo próprio e patenteadado da empresa (Mauro, 2022).

Consolidando-se como a única fabricante de capital brasileiro no segmento, a WEG ampliou gradativamente sua capacidade produtiva de 24 para 144 aerogeradores anuais, em 2022. A companhia destaca-se pela verticalização de sua cadeia produtiva: além da montagem via WEG Energia, ela fornece internamente inversores e sistemas de controle (WEG Automação), bem como transformadores e subestações (WEG Transmissão & Distribuição). Em um movimento de internacionalização, a empresa anunciou planos para adaptar sua unidade fabril em Tamil Nadu, na Índia, visando a produção local de turbinas de 2,1 MW (Mauro, 2022). A empresa, porém, diante da redução geral da demanda por aerogeradores no Brasil, encerrou a produção dos mesmos na sua fábrica de Jaraguá do Sul-SC no segundo semestre de 2024 (FIESC, 2024).

Gráfico 13 - Capacidade x Demanda anual de aerogeradores no Brasil



Fonte: ABDI, 2018.

O gráfico acima, da ABDI (2018), mostra uma parte do problema que os fabricantes de aerogeradores enfrentavam no Brasil. No espaço analisado, de 2014-2018, em apenas um ano (2017) a demanda foi maior que a oferta, e em poucas unidades. Já nos demais anos, a oferta ultrapassou a demanda em praticamente mil unidades por ano, um cenário insustentável para um produto completo que custa entre US\$1.500.000,00 e US\$2.000.000,00 para ser produzido. Além disso, é quase impensável manter estoque de aerogeradores, tendo em vista seu tamanho, fazendo com que a produção seja quase exclusivamente sobre demanda da empresa compradora.

Quadro 6 - Principais componentes de um aerogerador de 2,5MW

Equipamento (Português)	Custo (US\$x1000)	Custo (%)
Torre	249,9	14
Pás	258,4	14,3
Cubo	81,6	4,6
Sistema do pitch	64,6	3,6
Eixo principal	35,7	2
Rolamento do eixo	20,4	1,1
Redutor(planetário)	246,5	13,8
Sistema de freio	6,8	0,4

Estrutura suporte	158,1	8,8
Sistema do yaw	41,3	2,3
Cobertura	35,7	2
Gerador	170	9,5
Transformador	102	5,7
Sistema hidráulico	6,8	0,4
Instrumentos	102	5,7
Trocador de calor	3,4	0,2
Controles eletrônicos	204	11,4
Outros	3,4	0,2
Total	1790,6	100

Fonte: Elaboração própria. Dados de Barbosa Júnior; Silva (2015).

O quadro acima mostra os principais componentes de um aerogerador de 2,5MW, o mais difundido no Brasil para os modelos *onshore* (Barbosa Junior; Silva, 2015). Para as torres, segundo componente mais valioso do aerogerador, o Brasil tem considerável e suficiente produção nacional, com empresas como a GESTAMP, no Ceará, Intecnial no Rio Grande do Sul, e a CTZ Eolic Towers, no Ceará. A única montadora presente na lista é a Nordex que, como visto, possui fábricas móveis de torres de concreto, o que deu à empresa grande vantagem no mercado, fabricando inclusive torres para montadoras concorrentes (Mauro, 2022). Para as pás, item mais valioso do aerogerador, a produção nacional se concentra em 3 empresas, a Tectsis, sediada em Sorocaba-SP, a Aeris, localizada em Pecém-CE, e a chinesa Sinoma, com fábrica recém-inaugurada em Camaçari-BA (Bahia, 2024).

Dos principais componentes de um aerogerador, os que não possuem fabricação nacional são o eixo principal (*main shaft*, 2% do custo total), o *mainframe* (8,8% do custo), o sistema de *yaw* (2,3% do custo), o rolamento do eixo (1,1% do custo), instrumentos de controle e sensores (17,1% do custo), e as caixas multiplicadoras (*gearbox*, 13,8% do custo total). Assim, verifica-se que algo em torno de 45,1% do custo de peças e componentes de um aerogerador, no Brasil, provém de materiais importados, sem fabricação nacional equivalente, o que mostra uma defasagem tecnológica marcante, pois mesmo fabricando nacionalmente torres e pás e outros componentes, esses são de indústrias já consolidadas e antigas, como as metalmecânica, eletroeletrônica e de construção civil. Equipamentos mais caros e tecnologicamente mais complexos, como sensores, *gearboxes*, e outros instrumentos de controle, não possuem manufatura nacional capaz de supri-los.

Isso leva a outro problema que é o do financiamento Finame do BNDES, uma vez que ele requer condições específicas para que as montadoras de aerogeradores possam usufruí-lo:

Havia uma série de etapas que os fabricantes deveriam cumprir para poderem habilitar-se ao programa e, assim, usufruir de condições especiais de financiamento e, dessa forma, aumentar suas vantagens competitivas num ambiente em que o valor do MWh oferecido caiu drasticamente desde que o programa foi instituído em janeiro de 2013. Em linhas gerais, a regra indicava que os itens que compõem o aerogerador deveriam ter 60% dos seus componentes produzidos localmente. Este valor deveria ser respeitado tanto em relação ao custo, quanto ao peso do aerogerador. Deste modo, os fabricantes de aerogeradores teriam que ajustar sua cadeia produtiva de maneira que seus fornecedores também seguissem a mesma regra (Mauro, 2022, p. 28).

Como Mauro (2022) coloca, o Finame requer mínimo de 60% de valor e custo do aerogerador composto por materiais de fabricação nacional. Como calculou-se o número em torno de 45,1% de custo de um aerogerador, pode-se perceber que as montadoras atuam no limiar do limite de 40% de componentes importados. Isso demonstra a dificuldade em se estabelecer uma cadeia de valor nacional da energia eólica que possa compor a maior parte de um aerogerador, seja por custos mais baratos de itens importados e custos elevados de itens nacionais, ou por dificuldades tecnológicas e de *know-how* para produção nacional, uma vez que boa parte dos fabricantes nacionais são subsidiárias de empresas estrangeiras, como pode-se observar pelo quadro abaixo:

Quadro 7 - Fornecedores de componentes eólicos no Brasil⁴

Componentes	Empresas
Conversor/Inversor	Ingeteam*, Woodward*, ABB*, GE* e ICSA.
Transformador	Comtrafo, Blutrafos, WEG, ABB* e Siemens*
Gerador	GE*, ABB* e WEG
Quadro Principal (Main Frame)	BR Metals, ROMI, Bardella e Voith.
Carcaça do Cubo	ROMI, Br Metals e Voith.
Carenagem da Nacele	E.M.Estaleiro, Ancel, Atlanta, Molde e MVC
Sistema de Freio	Vulkan*, Regal Rexnord* e Dellner Bubelzner*
Rolamento do Pitch	ThyssenKrupp*
Cabos	Prysmian* e Nexans*
Rolamento do Eixo Principal	ThyssenKrupp* e SKF
Rolamento do Yaw	ThyssenKrupp*
Sistema de Yaw	Bonfiglioli*
Sistema de Acionamento de Yaw	Bonfiglioli*
Sistema de Refrigeração da Nacele	Apema e Gea
Elevador	Avanti*, Baram, Hailo* e Montarte
Painel de Proteção Elétrica	ABB*, ICSA, Ormazabal* e Blutrafos

⁴ O asterisco (*) representa empresa estrangeira com fabricação nacional.

Sistema de Travamento do Rotor	Atlanta
Unidade Hidráulica	Rexroth Bosch*, Hensaflex* e Hine*
Slip Ring	Moog* e Deublin*
Luzes de Sinalização (Externa)	Frata e Debetec
Acionamento do Pitch/Motorreductor	Bonfiglioli*, Sew-eurodrive* e WEG.
Sistema/Painel de controle de Pitch	Ingeteam*, Moog* e ICSA.
Bloco Hidráulico para controle do Pitch	Hine*
Cilindros do Pitch	Hine*

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados de Ferreira (2017) e Mauro (2022)

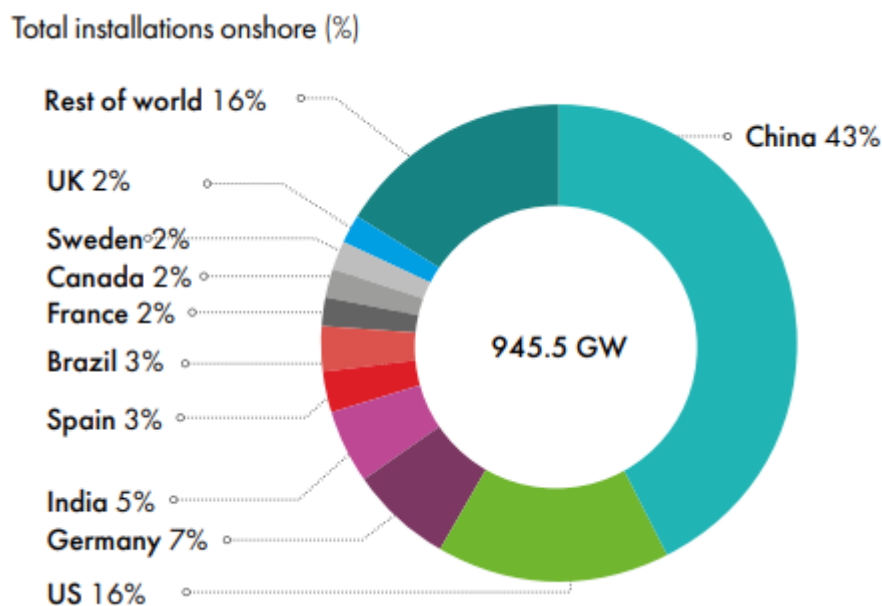
Além disso, é notável como os componentes mais tecnologicamente avançados, como conversores, geradores, sistemas do Yaw e Slip rings são fabricados quase exclusivamente por empresas estrangeiras, enquanto componentes menos avançados, como carcaças e carenagens conseguem ser produzidos por empresas nacionais.

A WEG, única empresa de capital nacional a atuar entre as montadoras de aerogeradores, ingressou no mercado em 2012, aproveitando-se do *know-how* produtivo da empresa em componentes que fazem parte do aerogerador, como gerador, transformadores e disjuntores, facilitou na inserção da empresa no mercado. Além disso, a WEG realizou acordos de transferência de tecnologia com empresas do setor, como a americana Northern Power, através da compra do negócio de turbinas eólicas da empresa. Assim, a WEG passou a ser proprietária de patentes, projetos e tecnologia referente aos aerogeradores, e incorporou engenheiros e pesquisadores da empresa em suas equipes. Isso aliado à participação da empresa no Programa de P&D da ANEEL e o Programa de Subvenção Econômica à Inovação da FINEP, levou a empresa a uma inserção forte no mercado de aerogeradores, através de investimentos em tecnologia e P&D (Ferreira, 2017).

4. PERSPECTIVAS E DESAFIOS PARA O BRASIL

O Brasil tem, no geral, boas perspectivas para seu desenvolvimento na cadeia global de valor do setor eólico no país. O Brasil é, de acordo com o relatório anual da energia eólica (GWEC, 2024), o 6º país no mundo em número total de capacidade instalada em energia eólica *onshore*, a modalidade mais difundida com cerca de 92% da capacidade total, ou 945,5 GW de energia, para o ano de 2023.

Gráfico 14 - Capacidade total *onshore* instalada no Brasil



Fonte: GWEC, 2024.

O crescimento da capacidade eólica brasileira traz boas perspectivas para a inserção do país na cadeia global de valor. No campo da manufatura deve-se destacar a participação do BNDES, por meio do Finame, como financiador da cadeia de valor em território nacional, especialmente a partir de 2012, quando a PCL (Política de Conteúdo Local) do Finame se alterou, saindo da meta fixa de mínimo 60% das partes do aerogerador, para uma nova PCL com metas progressivas e específicas para cada parte do aerogerador (Ferreira, 2024).

Essa nova PCL do BNDES, segundo Ferreira (2017), trouxe características chave para uma política industrial de sucesso, como a definição cuidadosa de exigências de conteúdo local, consulta ao mercado prévia da formulação da PCL, prazos bem definidos, flexibilidade e dinamismo. Para Ferreira (2024), a nova PCL teve sucesso em desenvolver a cadeia de valor no Brasil:

[...] A PCL do BNDES conseguiu desenvolver a cadeia produtiva do aerogerador sem deixar a energia eólica menos competitiva no Brasil. Atualmente, segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (Abeeólica), cerca de 80% do aerogerador é produzido dentro do país (Lovisi e Salomão, 2024). Tal número é relevante uma vez que em torno de 70% do custo de um parque eólico se deve aos investimentos em aerogeradores (Ferreira, 2024).

Entretanto, uma PCL de sucesso deve ser acompanhada de um mercado estável e de crescimento contínuo, sem grandes instabilidades (Ferreira, 2024). Todavia, como pôde-se ver

no capítulo anterior, as capacidades de manufatura estão em declínio recentemente no Brasil. Isso se deve, de acordo com Ferreira (2024) por um excesso de energia disponível no mercado interno, o que arrefeceu a demanda por novos projetos de energia eólica. Esse excesso de demanda origina-se de múltiplos fatores: o primeiro é o enfraquecimento da economia brasileira, que sofreu perdas consideráveis com a crise político-econômica de 2015-2016, e com a pandemia de COVID-19. O segundo fator é o crescimento da energia solar fotovoltaica no Brasil, que ganhou, entre 2020-2023 24,2 GW de potência instalada, enquanto a eólica apenas 15 GW, impulsionada principalmente por importações de baixo custo da China, altos subsídios governamentais e agentes com grande poder aquisitivo (Ferreira, 2024). É visto que a política energética nacional para energia solar não está em acordo com a PCL do setor eólico, uma vez que para o setor solar não existe regras de financiamento como o Finame, grande parte dos componentes são importados, principalmente da China, e não existe política de fomento como existe para a energia eólica (Rennkamp; Westin; Grottera, 2020).

Segundo o vice-presidente de assuntos governamentais e regulatórios da Vestas na América Latina, os subsídios e vantagens comerciais dadas a energia solar são o principal motivo do movimento de desindustrialização, "Quando você olha projetos financiados pelo BNDES, o custo do capital para projetos eólicos com conteúdo local é o mesmo para projetos solares, onde praticamente 100% dos componentes são importados" (Lovisi e Salomão, 2024). De acordo com a ABBEólica, cerca de 80% das peças de um aerogerador no Brasil são produzidas em território nacional, porém, os preços de componentes importados vêm caindo substancialmente, sobretudo produtos chineses. Aerogeradores com potência acima de 3.300 kVA (quilovolt-ampères) podem ser importados com II (Imposto de Importação) a 0% (Lovisi e Salomão, 2024).

Outro fator que mostra essa desaceleração da energia eólica no Brasil, é o fato de que entre 2020 e 2024, foram contratados através de leilões governamentais (ACR)⁵ contratos somente em 2021 e 2022. No mercado livre (ACL)⁶, não houve contratos em 2022, 2023 e 2024 (Lovisi e Salomão, 2024). Assim, a cadeia de valor nacional do setor eólico corre um grave risco de desindustrialização precoce até o final da década, e os próximos anos serão essenciais para a sobrevivência da manufatura do setor no Brasil (Ferreira, 2024). Isso se verifica com o que foi apresentado no capítulo anterior, com o fechamento de fábricas e saída de montadoras

⁵ Ambiente de Contratação Regulada.

⁶ Ambiente de Contratação Livre.

do país, como a GE que fechou suas unidades fabris, a Siemens-Gamesa seguindo na mesma direção, e alguns fabricantes nacionais como a TEN (Torres Eólicas do Nordeste) que demitiu 500 funcionários em 2023, e a Aeris, fabricante de pás, que demitiu mais de 1500 funcionários em 2024 e passou a atuar mais no mercado externo, com exportações para a América Latina, que devem representar 40% da receita da companhia em 2025 (Lovisi e Salomão, 2024).

Apesar disso, as perspectivas da energia eólica no Brasil ainda são boas, devido, por exemplo, ao surgimento do mercado de hidrogênio verde, que pode usar das turbinas eólicas para alimentar os eletrolisadores e produzir hidrogênio em larga escala e de maneira renovável. Além disso, a regulamentação das eólicas *offshore* também é de grande interesse para a cadeia de valor nacional, pois ampliaria o número de aerogeradores e traria ao Brasil tecnologias novas destinadas às turbinas *offshore*. Os *datacenters* de IA também entraram na mira do Governo Federal para dar impulso à cadeia de valor da energia eólica (Lovisi e Salomão, 2024).

A grande aposta do Brasil na sua inserção na cadeia global de valor da energia eólica, parece se desenhar ainda mais para o primeiro estágio da cadeia, o da mineração (GWEC, 2024). Os aerogeradores de rotor-estator contêm imãs permanentes de terras raras, e substituem as caixas multiplicadoras (*gearbox*), melhoram a eficiência energética da torre e diminuem as atividades de manutenção (Ocharam, 2018). Um aerogerador de 3MW necessita de aproximadamente 2,700kg de imãs de minérios de terras raras. Segundo Balaram (2019), o Brasil possui cerca de 22 milhões de toneladas de depósitos de terras raras, embora parte considerável desse depósito sejam de minerais de processamento não estabelecido ou alta complexidade. Atualmente, a China é responsável por até 95% da oferta mundial de terras raras, entretanto, com a demanda interna crescente, o país reduziu sua oferta ao resto do mundo, e os preços de minérios de terras raras aumentaram em 10 vezes entre 2009-2019 (Sousa Filho; Galaço; Serra, 2018).

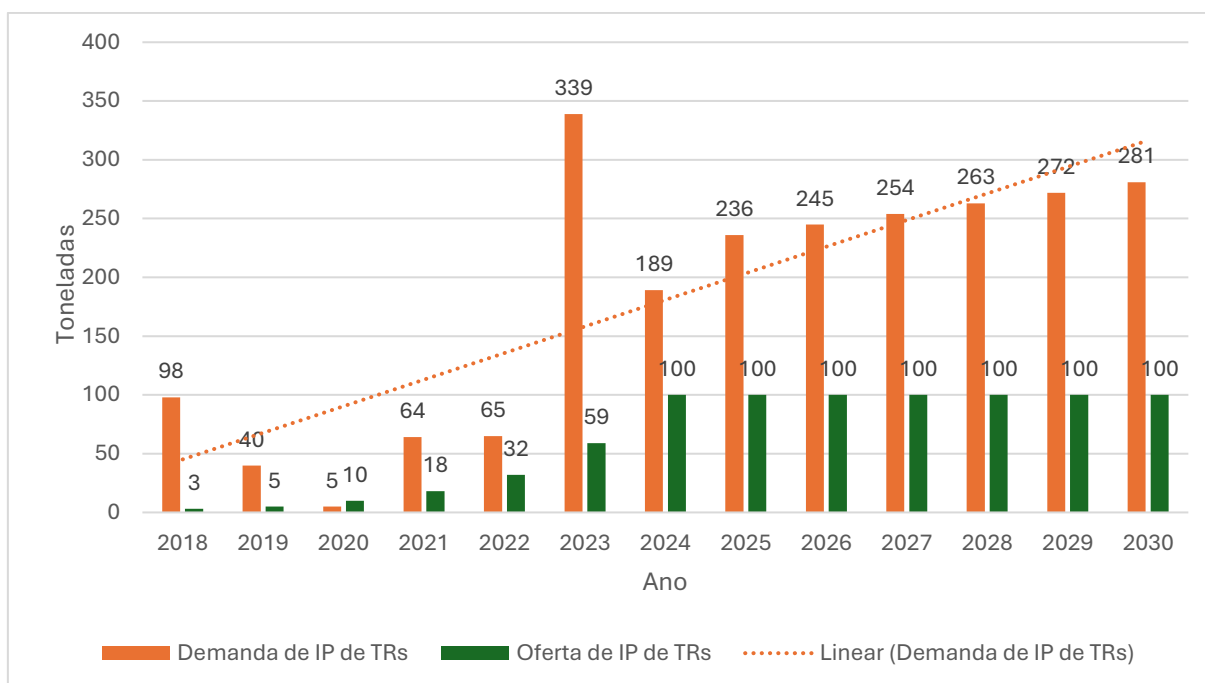
No mercado de terras raras, um dos dois mercados que mais cresceu em demanda desses minérios é o de turbinas eólicas. As montadoras Siemens-Gamesa e Vestas utilizam de geradores de magnetos permanentes em suas mais modernas turbinas *offshore*. A quantidade de terras raras necessárias na produção de energia eólica, é estimada em 100kg de Nd³ (Neodímio), e, para a extração do Neodímio são necessários 800kg de monazita. Como esta não se encontra pura na natureza, são necessários 8000kg de minério bruto para a extração e 6000kg de ácido sulfúrico. O processo de extração da monazita libera Tório, um mineral radioativo. Ou

seja, para a produção de 1 MW de energia eólica, geram-se de resíduos 40kg de material radioativo, provenientes do tório (Sousa Filho; Galaço; Serra, 2018).

Tendo como base óxidos de Terras Raras, Ferro e Boro, a produção de ímãs permanentes no Brasil ainda enfrenta barreiras estruturais. Apesar dos esforços de mineradoras como a CBMM e Serra Verde, e de instituições como o IPEN e o CETEM no desenvolvimento de processos de extração e beneficiamento, essas atividades ainda se restringem a escalas piloto. Na prática, inexistente uma indústria nacional capaz de fornecer ímãs para a geração eólica ou de suprir a demanda por matérias-primas básicas para esse fim (Ocharam, 2018).

Atualmente, a fabricação nacional de ímãs de (Nd,Pr)FeB enfrenta gargalos significativos, como a baixa produção de óxido de didímio e a total ausência de produção de óxido de disprósio (Ocharam, 2018). Para mitigar essa lacuna, a CODEMIG avança no licenciamento ambiental de um Laboratório-Fábrica na Região Metropolitana de Belo Horizonte. A planta, projetada para uma capacidade de 100 toneladas anuais, priorizará ímãs à base de Neodímio, aproveitando a maior demanda e diversificação deste mercado, e o ciclo produtivo abrangerá desde a separação e redução até a magnetização final. Estima-se que 20 toneladas de óxidos de Terras Raras, provenientes da mineração de nióbio da CBMM em Araxá, gerarão cerca de 7,5 toneladas de ímãs (sem disprósio) ou 9,2 toneladas (com disprósio), destinados principalmente aos setores eólico e de veículos híbridos (Ocharam, 2018).

Até o momento, se a oferta nacional por ímãs de terras raras permanecer nas 100 toneladas anuais da CODEMIG, a situação da oferta local desses ímãs seria crítica, dependendo o mercado de importações chinesas de ímãs de terras raras.

Gráfico 15 - Oferta e demanda de ímãs de terras raras para o setor eólico no Brasil

Fonte: Elaboração própria com dados de Ocharam, 2018.

No cenário atual, percebe-se que o mercado de aerogeradores no Brasil teria déficit de produção local em praticamente todos os anos, com exceção de 2020. Além disso, vê-se a demanda crescente por ímãs de terras raras, porém sem aumentos visíveis de oferta.

O Brasil detém um potencial expressivo para nacionalizar a fabricação de ímãs permanentes de terras raras, impulsionado tanto por suas reservas minerais quanto por políticas federais de incentivo à cadeia de energias renováveis (Ocharam, 2018). Nesse contexto, a realização de estudos de avaliação de ciclo de vida, integrando dimensões tecnológicas, econômicas e ambientais, torna-se fundamental. Tais análises são essenciais para promover o desenvolvimento sustentável da energia eólica, abrangendo gargalos específicos como a cadeia produtiva dos ímãs.

Com a utilização de suas reservas de terras raras, as segundas maiores do mundo, o país pode ingressar fortemente nas fases de mineração e refino da cadeia global de valor da energia eólica, especialmente na questão das terras raras, atualmente dominadas pela China. Entretanto, como visto, ações tanto público-privadas nacionais quanto interesse de multinacionais colocam o Brasil no centro das discussões das terras raras para a energia eólica, colocando o país em grandes possibilidades de fortalecer a cadeia nacional de terras raras e posicionar o Brasil no mercado externo, em competição com os chineses.

Em vista dessas perspectivas e desafios para o Brasil dentro da CGV da energia eólica, é válida uma demonstração desses tópicos através de uma análise SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats). De acordo com Silveira (2001), a análise SWOT permite a identificação dos principais aspectos que permitem a inserção de um ator no mercado, tanto internos quanto externos. Para essa análise, identificaremos os principais aspectos da inserção do Brasil na CGV da energia eólica em comparação com o mercado externo.

Quadro 8 - Análise SWOT das perspectivas e desafios do Brasil na CGV da energia eólica

<i>Opportunities (Oportunidades)</i>	<i>Threats (Ameaças)</i>
Exploração de terras raras	Competição externa (importações)
Eólicas <i>offshore</i>	Crescimento dos investimentos em energia solar
Novas demandas como datacenters e hidrogênio verde	Baixo crescimento econômico
Exportação de tecnologia e produção	Insegurança jurídica

Fonte: Elaboração própria.

Essa análise SWOT, focada somente nas oportunidades e desafios, os elementos externos, ilustra as perspectivas brasileiras na inserção dentro das CGV da energia eólica. As explorações e refino dos minérios de terras raras, o desenvolvimento jurídico das eólicas *offshore* e novas demandas tecnológicas como o hidrogênio verde e os datacenters dão ao Brasil possibilidades concretas de inserção nas cadeias de valor. Enquanto isso, em oposição, estão a competição com importações mais baratas, o crescimento da demanda por energia solar face à eólica, o baixo crescimento econômico e produtivo do país e a insegurança jurídica, põe dificuldades e ameaças à essa inserção.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho dedicou-se a analisar a inserção do Brasil na Cadeia Global de Valor (CGV) da energia eólica, e suas perspectivas e desafios. O objetivo geral do trabalho, analisar a CGV da energia eólica e as perspectivas e desafios para o Brasil, foi detalhado nos capítulos do trabalho, com análises quantitativas e qualitativas com pesquisas em artigos acadêmicos, relatórios de órgãos governamentais, livros e publicações técnicas na busca de identificar os elementos cruciais para esse objetivo.

A análise da estrutura da CGV eólica, um dos objetivos específicos do trabalho, fundamentada na teoria de Gary Gereffi (2011), revelou uma divisão internacional do trabalho profundamente assimétrica. Enquanto países do Norte Global e a China detêm a primazia nas etapas de maior agregação de valor, como Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), design de aerogeradores e produção de componentes de alta complexidade (sistemas de controle e *gearboxes*), países emergentes lutam para superar a condição de meros montadores ou fornecedores de componentes de baixa complexidade tecnológica.

Em outro objetivo específico, a pesquisa identificou que o país enfrenta o risco iminente de uma inserção subordinada e de um processo de desindustrialização setorial, apesar de seu vasto potencial natural. Os dados apresentados demonstram uma dicotomia clara, o Brasil é uma superpotência eólica em termos de capacidade instalada e fator de capacidade, fruto de políticas estatais bem-sucedidas no passado, como o PROINFA e os leilões de energia, que garantiram escala ao mercado interno. Contudo, essa pujança na geração não se traduziu em autonomia tecnológica sustentável. O diagnóstico da indústria nacional evidenciou gargalos críticos. A saída de grandes montadoras do país, como a GE e a Siemens-Gamesa, aliada à ociosidade das fábricas de pás e torres, expõe a fragilidade de uma cadeia dependente de políticas de conteúdo local que, embora tenham funcionado inicialmente, não foram suficientes para blindar o setor das oscilações de demanda interna e da concorrência com importados asiáticos. A dependência externa em componentes vitais, que representam cerca de 45% do custo de um aerogerador, e a insignificante participação brasileira no registro global de patentes corroboram a dificuldade do país em realizar o *upgrading* tecnológico necessário para ascender na cadeia.

O último objetivo específico, de identificar as perspectivas e desafios para o Brasil, destacou o elo mais frágil e estratégico dessa cadeia, os ímãs permanentes de terras raras.

Embora o Brasil possua as segundas maiores reservas mundiais desses minerais, o país permanece ausente das etapas industriais de refino e magnetização, dependendo quase exclusivamente da China (Ocharam, 2018). A análise aponta que iniciativas isoladas, como a da CODEMIG, ainda são insuficientes para garantir soberania nesse insumo crítico, essencial não apenas para a energia eólica, mas para toda a economia de baixo carbono.

Com a pesquisa realizada nesse trabalho, constatou-se que o Brasil possui grandes capacidades dentro da CGV da energia eólica, não somente por ser um *player* importante, sendo o 6º país com maior capacidade instalada no mundo, mas por ter uma base industrial já desenvolvida no setor, e com perspectivas de novas oportunidades, como as eólicas *offshore* e a exploração e refino de terras raras. Entretanto, a base industrial desenvolvida e altamente consolidada nos anos 2010, vê-se em uma situação difícil, com a redução na demanda por energia eólica e a forte competitividade de produtos chineses importados. Dessa maneira, destaca-se como políticas governamentais, como a PCL do BNDES são fundamentais para garantir o desenvolvimento da base industrial nacional da CGV, mas que devem conversar com os outros setores energéticos, como o solar fotovoltaico, que está absorvendo grande parte da demanda por energia no país e não possui políticas de conteúdo local como a energia eólica, expondo os fabricantes nacionais às importações chinesas. A desindustrialização do setor é notável, e segue um padrão nacional industrial, conforme destaca Espósito (2017), e altamente destrutivo para a indústria de máquinas, muito relevante para os aerogeradores.

Assim, é possível notar que a CGV de energia eólica no Brasil não é imune à crise de desindustrialização do país, e, apesar de fortes desempenhos nos anos 2000 e 2010, regride lentamente a partir da crise de 2015 e de maneira mais acentuada após a pandemia de COVID-19. Pode-se colocar que o país e o setor eólico seguem a máxima do Brasil de ser uma economia primário-exportadora, como colocava Furtado (2003) e os teóricos da Teoria da Dependência. O país desenvolve uma indústria local fraca e suficiente somente para atividades básicas, mas falha em desenvolver produtos mais tecnologicamente avançados e competir com os países centrais.

Apesar disso, o Brasil ainda conta com empresas disruptivas e avançadas no setor, como a WEG, empresa totalmente nacional, localizada em Jaraguá do Sul-SC, e que trabalhou no desenvolvimento de P&D e em avanços tecnológicos para se tornar uma empresa referência no setor, tendo condições de competir com montadoras estrangeiras e exportar tecnologia brasileira para o mundo (Fabris, 2020).

Concluído o trabalho, é mister notar como o investimento estatal e políticas públicas voltadas ao desenvolvimento do setor eólico são essenciais para inserir o Brasil na CGV da energia eólica. Isso foi verificado neste trabalho, as experiências brasileiras no setor são comprovadas e demonstradas. As políticas de incentivo às energias renováveis, como o PROINFA, e as Políticas de Conteúdo Local do BNDES ajudaram a fortalecer o setor no seu momento de expansão no país, durante a segunda metade de 2000 e primeira metade de 2010. Entretanto, a crise política de 2016 enfraqueceu os incentivos ao setor, que começou a decair desde então, especialmente o setor manufatureiro da cadeia, conforme já visto. Atualmente, o setor está praticamente sem contratos de novos leilões, uma vez que a energia solar pode operar sem PCLs definidas pelo BNDES e atuar com componentes e usinas completamente importados, desbancando as montadoras de aerogeradores em custo.

Diante disso, é fundamental o surgimento de novas políticas públicas, como investimentos ou subsídios para o setor eólico, e investimento em novas tecnologias com grande promessa no setor, como os minérios de terras raras, o hidrogênio verde e os datacenters do movimento das inteligências artificiais. Além disso, é importante valorizar as empresas nacionais, como a WEG, e promover a cooperação entre academia e mercado, a fim de promover melhor inserção tecnológica do país na CGV e não promover uma inserção subordinada às vantagens tecnológicas de países estrangeiros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEÓLICA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA). Disponível em: <http://abeeolica.org.br/dados-abeeolica/>. Acesso em: 18 out. 2025.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI) – (org.). **Mapeamento da Cadeia Produtiva da Indústria Eólica no Brasil.** Brasília: Abdi, 2014. Disponível em: <https://abdi.com.br/>. Acesso em: 04 nov. 2025.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI) – (org.). **Mapeamento da Cadeia Produtiva da Indústria Eólica no Brasil.** Brasília: Abdi, 2018. Disponível em: <https://abdi.com.br/>. Acesso em: 04 nov. 2025.

AGBAAM, Callistus; ARREDONDO, Ana Maria Perez; ALATINGA, Kennedy; BENDER, Katja. The Political Economy of Sustainable Energy Transitions: a literature review and a research agenda. **Izne Working Paper Series**; Nr. 23/3, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 1-25, 18 set. 2023. Hochschule Bonn-Rhein-Sieg. <http://dx.doi.org/10.18418/978-3-96043-109-1>.

AMARANTE, O. A. C., BROWER, M., ZACK, J., & SÁ, A. L. (2001). **Atlas do potencial eólico brasileiro.** Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf. Acesso em 18 nov. 2025.

ARENT, Douglas; ARNDT, Channing; MILLER, Mackay; TARP, Finn; ZINAMAN, Owen. **The Political Economy of Clean Energy Transitions.** Oxford: Oxford University Press, 2017. 594 p.

BAHIA. Governo do Estado. **Nova fábrica de turbinas eólicas da Goldwind recebe investimento de R\$ 100 milhões e fortalece liderança da Bahia em energia renovável.** Salvador: Secretaria de Desenvolvimento Econômico (SDE), 28 ago. 2024. Disponível em: <https://www.ba.gov.br/casacivil/noticias/2024-08/2281/nova-fabrica-de-turbinas-eolicas-da-goldwind-recebe-investimento-de-r-100>. Acesso em: 04 nov. 2025.

BALARAM, V. Rare earth elements: a review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. **Geoscience Frontiers**, [S.L.], v. 10, n. 4, p. 1285-1303, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>.

BARBOSA JÚNIOR, Waldomiro de Oliveira; SILVA, Kaio. **Mapeamento da Cadeia Produtiva da Indústria Eólica no Brasil.** São Paulo: Mackenzie, 2015. 85 p. Disponível em: <https://adelfa-api.mackenzie.br/server/api/core/bitstreams/e7d755d0-c3a1-4c19-ac1a-6d38e20a7f17/content>. Acesso em: 18 nov. 2025.

BURKE, Matthew J.; STEPHENS, Jennie C. Political power and renewable energy futures: a critical review. **Energy Research & Social Science**, [S.L.], v. 35, p. 78-93, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.018>.

CAMILLO, Edilaine Venancio. **AS POLÍTICAS DE INOVAÇÃO DA INDÚSTRIA DE ENERGIA EÓLICA: uma análise do caso brasileiro com base no estudo de experiências**

internacionais. 2013. 192 f. Tese (Doutorado) - Curso de Política Científica e Tecnológica, Instituto de Geociências, Unicamp, Campinas, 2013.

CARVALHO, Joaquim Francisco de. Energia e sociedade. **Estudos Avançados**, [S.L.], v. 28, n. 82, p. 25-39, dez. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142014000300003>.

CUSTÓDIO R. **Energia Eólica**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2013.

FABRIS, Leonardo Prates. Instituições e redes na indústria de aerogeradores: o caso da empresa weg. **Revista Contraponto**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 271-295, jul. 2020. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/contraponto/article/view/108855/59039>. Acesso em: 21 nov. 2025.

ESPÓSITO, Maurício. Desindustrialização no Brasil: uma análise a partir da perspectiva da formação nacional. **Revista da Sociedade Brasileira de Economia Política**, [S.L.], v. 1, n. 46, p. 121-146, abr. 2017. Disponível em: <https://revistasep.org.br/index.php/SEP/article/view/293>. Acesso em: 16 nov. 2025.

FERREIRA, A. C.; BLASQUES, L. C. M.; PINHO, J. T. Avaliações a respeito da evolução das capacidades contratada e instalada e dos custos da energia eólica no Brasil: do proínta aos leilões de energia. **Revista Brasileira de Energia Solar**, [S. L.], v. 5, n. 1, 2014. Disponível em: <https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/111>. Acesso em: 5 out. 2025.

FERREIRA, H. T. (2008). **Energia eólica: barreiras a sua participação no setor elétrico brasileiro**. 97 f. Dissertação (Mestrado em Energia). Universidade de São Paulo, São Paulo.

FERREIRA, Welinton Conte. **Política de conteúdo local e energia eólica: a experiência brasileira**. 2017. 270 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Econômicas, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2017/07/Tese-Pol%C3%83%C2%ADtica-de-Conte%C3%83%C2%BAdo-local-e-Energia-E%C3%83%C2%B3lica-WCF-2017.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.

FERREIRA, Welinton Conte. A Cadeia Produtiva do Aerogerador no Brasil e o risco de desmantelamento. **Ensaio Energético**, 18 de junho, 2024. Disponível em: <https://ensaioenergetico.com.br/a-cadeia-produtiva-do-aerogerador-no-brasil-e-o-risco-de-desmantelamento/>. Acesso em: 20 nov. 2025.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SANTA CATARINA (FIESC). **WEG anuncia suspensão da fabricação de aerogeradores no Brasil**. Florianópolis, 21 maio 2024. Disponível em: <https://fiesc.com.br/pt-br/imprensa/weg-anuncia-suspensao-da-fabricacao-de-aerogeradores-no-brasil>. Acesso em: 04 dez. 2025.

FIORI, José Luis. A Guerra, o Futuro e a “transição energética”. **Outras Palavras**, [S.L.], jul. 2020. Disponível em: <https://outraspalavras.net/geopoliticaeguerra/a-guerra-o-futuro-e-a-transicao-energetica/>. Acesso em: 15 nov. 2025.

FURTADO, Celso. **Formação Econômica do Brasil**. 32ª ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2003.

GEREFFI, Gary. Global production systems and third world development. In: STALLINGS, Barbara. **Global change, regional response: the new international context of development**. Cambridge, Uk: Cambridge University Press, 1995. p. 100-142. Disponível em: <https://scispace.com/pdf/global-production-systems-and-third-world-development-4n64ubcwmk.pdf>. Acesso em: 09 nov. 2025.

GEREFFI, Gary. **Global Value Chains and Development: redefining the contours of 21st century capitalism**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2018. 494 p.

GEREFFI, Gary; FERNANDEZ-STARK, Karina. **Global Value Chains Analysis: a primer**. Durham, Nc: Center On Globalization, Governance & Competitiveness, 2011.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report (2024)**. Bruxelas: Gwec, 2025. Disponível em: www.gwec.net. Acesso em: 15 nov. 2025.

GOUVEA, Renato Luiz Proença de. SILVA, Paulo Azzi da. Desenvolvimento do setor eólico no Brasil. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 49, p.81-118, jun. 2018.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso em 18 out. 2025.

INPI, Instituto Nacional da Propriedade Industrial. **Pesquisa avançada de patentes**. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/servicos/patentes>. Acesso em: 18 nov. 2025.
KRUGMAN, Paul; OBSTFELD, Maurice; MELITZ, Marc. **Economia Internacional**. 10. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015. 595 p.

LAGE, E. S.; PROCESSI, L. D. Panorama do Setor de Energia Eólica. **Revista do BNDES**, v. 39, p. 183-206, 2013.

LASTA, Tatiane Thaís. **Metodologia e técnicas de pesquisa em economia**. Indaial: UNIASSELVI, 2018.

LOVISI, P.; SALOMÃO, A. Setor Eólico fecha as portas no Brasil, demite milhares e não vê retomada imediata: empresas precisaram suspender fabricação por falta de demanda; fenômeno já era previsto pelo governo. **Folha de S. Paulo**. São Paulo, maio 2024. Disponível em: https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2024/05/setor-eolico-fecha-as-portas-no-brasil-demite-milhares-e-nao-ve-retomada-imediata.shtml?utm_source=twitter&utm_medium=social&utm_campaign=twfolha. Acesso em: 20 nov. 2025.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, p.1304-1 a 1304-13, 2008.

MAURO, João Paulo Marin Santo. **Cadeia Produtiva da Energia Eólica no Brasil: cenário atual, perspectivas, oportunidades e estudo de caso**. 2022. 44 f. Monografia (Especialização) - Curso de Energias Renováveis, Geração de Energia e Eficiência Energética, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em:

<https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/e8f85657-9c38-4703-bc1a-e35cfcced340/JoaoPauloMarinSantoMauro.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2025.

MELO, Elbia. Proinfa e a consolidação do setor eólico brasileiro. **Revista Concreto e Construções**, n. 75, p. 133-135, 2014.

MITCHELL, Timothy. **Carbon democracy**. New York: Verso, 2011. 278 p.

NASCIMENTO, Thiago Cavalcante; MENDONCA, Andréa Torres Barros Batinga de; CUNHA, Sieglinde Kindl da. Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil. **Cad. EBAPE.BR**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 3, p. 630-651, set., 2012.

NELSON, R.R., KIM, L. Introdução. In: NELSON, R.R., KIM, L. (Orgs.), **Tecnologia, Aprendizado e Inovação: As experiências das Economias de Industrialização Recente, Clássicos da Inovação** (traduzido por Calor D. Szlak), Editora Unicamp, Campinas, SP, 2005.

OCHARAM, Jose Luis Saravia. Análise do mercado e aspectos ambientais dos ímãs de terras raras na energia eólica no Brasil. **ENGEMA**, [S. L.], dez. 2018. Disponível em: <https://engemasp.submissao.com.br/20/anais/arquivos/393.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.

OLIVEIRA, Lucas Keer de. **Energia como recurso de poder na política internacional: Geopolítica, estratégia e o papel do centro de decisão energética**. 2012. 400 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência Política, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

PRETE, Davide del; RUNGI, Armando. Backward and Forward Integration Along Global Value Chains. **Review Of Industrial Organization**, [S.L.], v. 57, n. 2, p. 263-283, 9 jul. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11151-020-09774-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11151-020-09774-y>. Acesso em: 17 nov. 2025.

RENNKAMP, Britta; WESTIN, Fernanda Fortes; GROTTERA, Carolina. **Política de conteúdo local e incentivos financeiros no mercado de energia eólica no Brasil**. Naciones Unidas Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2020.

SILVEIRA, Henrique. SWOT. IN: **Inteligência Organizacional e Competitiva**. Org. Kira Tarapanoff. Brasília. Ed. UNB, 2001.

SMIL, Vaclav. **Energy and Civilization: a history**. Cambridge: The Mit Press, 2017. 552 p.

SOARES, P. M. et al. Setor elétrico brasileiro: avaliação da evolução dos investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) (2008-2018) / Brazilian electric sector: evaluation of the evolution of investments in Research and Development (R&D) (2008-2018). **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 6, n. 6, p. 35094–35112, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/11262>. Acesso em: 6 out. 2025.

SOUSA FILHO, Paulo; GALAÇO, Ayla; SERRA, Osvaldo. Terras raras: tabela periódica, descobrimento, exploração no Brasil e aplicações. **Química Nova**, [S.L.], v. 10, n. 42, out. 2019. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170438>.

ZANELLA, Makerli Galvan. **Dinâmica geoeconômica da cadeia de energia eólica no Brasil**. 2021. 255 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Francisco Beltrão, 2021. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/5561/2/Makerli%20Galvan%20Zanella%202021.pdf>. Acesso em: 21 out. 2025.