

OVERVIEW OF OFFSHORE WIND ENERGY AND PROSPECTS FOR BRAZIL

Renato Santos de Souza

*Guilherme Oliveira Arantes**

Keywords: energy; renewable energy; offshore wind energy.

* Respectively, engineer and manager of the Electric Power Department of the BNDES's Energy Transition and Climate Division.

Resumo

A energia eólica *offshore* alcançou um estágio avançado de maturidade em diversos países e surge como uma alternativa estratégica para a diversificação da matriz elétrica brasileira, impulsionada por avanços regulatórios, planejamento espacial marinho e instrumentos financeiros. Com quase dez mil quilômetros de linha costeira e elevado potencial eólico, o Brasil tem avançado na regulamentação do setor. O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) tem desempenhado papel crucial no financiamento da transição energética, com mais de US\$ 36,4 bilhões investidos desde 2004. Por meio do Fundo Clima e dos títulos verdes, mobilizando recursos nacionais e internacionais, incluindo o secretariado da Plataforma Brasil de Investimentos Climáticos (BIP), o BNDES seguirá apoiando a transição energética e aumentando o engajamento financeiro e institucional em projetos eólicos *offshore*, reforçando a posição do país como líder global no desenvolvimento de energia renovável.

Abstract

Offshore wind energy has reached an advanced maturity stage in several countries and is emerging as a strategic alternative for diversifying the Brazilian energy matrix, which was driven by regulatory advances, marine spatial planning, and financial instruments. Brazil has almost ten thousand kilometers of coastline and high wind potential, and has advanced in regulating the sector. The Brazilian Development Bank (BNDES) has played a crucial role in financing the energy transition and more than US\$ 36.4 billion were invested since 2004. Via the Climate Fund and green bonds, mobilizing national and international resources, including the secretariat of the Brazil Climate Investment Platform (BIP), BNDES will continue to support the energy transition and increase the financial and institutional engagement in offshore wind projects, reinforcing the country's position as a global leader in the development of renewable energy.

Introdução

A Agência Internacional de Energia (IEA, na sigla em inglês) estima que, para atingir a transição da economia global para atividades com emissões líquidas zero e, assim, evitar a catástrofe climática, serão necessários investimentos anuais de US\$ 4 trilhões até 2050. Esses investimentos deverão impulsionar as tecnologias existentes de geração de energia renovável, como solar e eólica; expandir as ações de eletrificação direta, como veículos elétricos e bombas de calor; e promover tecnologias inovadoras, a exemplo de soluções de eficiência energética, usos do hidrogênio, bioenergia e soluções de captura de carbono (IEA, 2021). Estima-se que a eletrificação direta poderá responder por 50% dos esforços de descarbonização, enquanto os outros 50% dependem de tecnologias que ainda estão em amadurecimento, principalmente em setores de difícil abatimento como transporte de longas distâncias, produção de aço e fertilizantes (BNEF, 2024).

As mudanças climáticas já em curso estão relacionadas ao aumento da incidência de eventos climáticos extremos, decorrentes do acúmulo de emissões de gases de efeito estufa (GEE), sobretudo provenientes da queima de combustíveis fósseis. Esse cenário impõe novos desafios à gestão e ao planejamento do sistema elétrico. Ao mesmo tempo que a eletrificação das atividades econômicas é fundamental para a transformação de processos produtivos emissores de GEE, o sistema elétrico, em especial em regiões com grande penetração de hidrelétricas, como no Brasil, precisa aumentar sua resiliência para suportar os impactos climáticos que estão em andamento.

Espera-se que as mudanças climáticas impactem a maioria das tecnologias de produção de eletricidade, sendo que os efeitos negativos na produção de energia praticamente dobram entre cenários de aquecimento

de 1,5°C e 3°C (Tobin *et al.*, 2018). A diversificação é a melhor maneira de aumentar a resiliência da geração de energia contra as mudanças climáticas (IEA, 2024). Estudos mostram que uma maior participação de energias renováveis pode reduzir a vulnerabilidade da geração de energia aos impactos climáticos, embora a variabilidade continue sendo um desafio (Tobin *et al.*, 2018). Isso ocorre porque diferentes fontes de energia, como solar, eólicas em terra e no mar, hidrelétrica e bioenergia, têm características distintas de produção e são afetadas de maneiras variadas por eventos climáticos extremos (Sinsel; Yan; Stephan, 2019). Quando o sistema elétrico é diversificado, ele se torna menos vulnerável a oscilações causadas por secas, tempestades, variações de temperatura ou mudanças nos padrões dos ventos.

Nesse contexto, a tecnologia de geração eólica em estruturas no mar (*offshore*) traz uma nova oportunidade de diversificação da matriz elétrica brasileira. Estudos sugerem que há uma relevante complementaridade operacional entre os sistemas de energia hidrelétrica e eólica *offshore* no Brasil (World Bank, 2024a), o que contribui para aumentar a resiliência da energia renovável às mudanças climáticas, expandir a gama de condições climáticas sob as quais o sistema pode operar com segurança e reduzir a dependência de combustíveis fósseis que intensificam as mudanças climáticas (Wang *et al.*, 2022).

Este estudo analisa o papel crescente da energia eólica *offshore* no cenário mundial, bem como as oportunidades e desafios para a inserção dessa nova fonte na matriz elétrica brasileira. Para isso, além desta introdução, o artigo foi organizado em seis seções. A primeira explora o panorama global das eólicas *offshore*, com abordagem da perspectiva histórica e dos impactos nos locais onde os projetos foram desenvolvidos. A segunda seção apresenta os elementos necessários para o desenvolvimento dessa indústria, entre os quais a cadeia de suprimentos, as políticas públicas

e as fases do desenvolvimento dos projetos. A terceira seção aborda o potencial, as sinergias e os desafios para o desenvolvimento dessa fonte renovável no Brasil. A quarta seção apresenta o estágio atual da regulação e das políticas públicas no país. A quinta seção trata da perspectiva financeira, trazendo os elementos necessários para a financiabilidade dos projetos, com destaque para os instrumentos e a atuação do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Por fim, as conclusões são apresentadas na última seção.

Panorama global das eólicas *offshore*

Histórico do desenvolvimento do setor

A energia eólica *offshore* desenvolveu-se significativamente desde a sua criação no início da década de 1990. O primeiro parque eólico *offshore* comercial foi estabelecido na Dinamarca, em 1991, com capacidade de 4,95 MW (Higgins; Foley, 2013). Na verdade, tratava-se de um conjunto de 11 turbinas *onshore* adaptadas para condições marinhas, cada uma com 450 kW de potência, e que foram descomissionadas em 2017, mas tiveram grande importância para iniciar o ciclo das eólicas *offshore* na Europa (World Bank, 2019). A indústria progrediu de projetos em águas rasas e próximos à costa para águas mais profundas, necessitando de turbinas maiores e técnicas avançadas de instalação, com grandes desenvolvimentos no noroeste da Europa (Macaskill; Mitchell, 2013) e, mais recentemente, na China (GWEC, 2024).

O crescimento da energia eólica *offshore* foi impulsionado pela necessidade de descarbonização do sistema elétrico de países europeus, por seu impacto local reduzido em comparação com a energia eólica *onshore*,

pelas maiores áreas disponíveis e pelo potencial de grandes economias de escala. Os marcos regulatórios evoluíram para apoiar esse desenvolvimento, com a União Europeia desempenhando um papel significativo na formação das leis aplicáveis (Nieuwenhout, 2021).

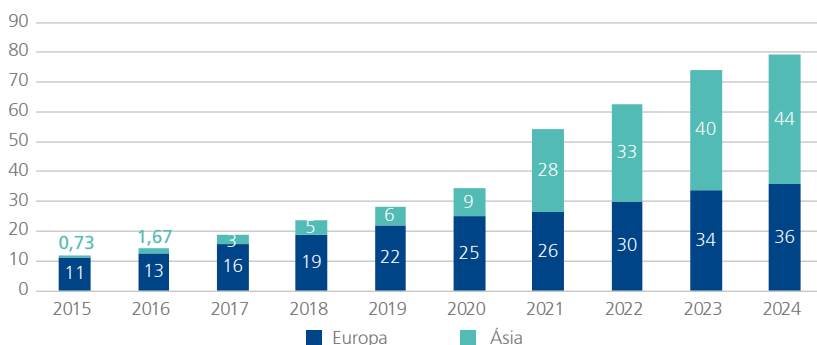
Resultados de leilões recentes indicam que a energia eólica *offshore* está se tornando cada vez mais competitiva, com custos em rápido declínio e alguns projetos na Alemanha e na Holanda já livres de subsídios. Globalmente, os leilões de energia eólica *offshore* empregam diversos *designs*, embora a maioria forneça alguma forma de estabilização de receita (Jansen *et al.*, 2020).

No entanto, o custo de capital para energia eólica *offshore* permanece mais alto do que para energia eólica *onshore* e solar, em parte devido às enormes estruturas empregadas e à complexidade de construção. No seu planejamento decenal, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) considera custos médios para eólicas *offshore* entre 2,4 e 3,5 vezes superiores aos projetos *onshore* (Brasil; EPE, 2024). Embora todas as tecnologias de energia renovável, incluindo solar e eólica, tenham apresentado reduções significativas de custos, a competitividade de cada projeto varia a depender de fatores como custos de capital e taxas de desconto (Timilsina, 2021). A competitividade de custo da energia eólica *offshore* evoluiu significativamente nos últimos anos: o preço da energia eólica *offshore* contratada diminuiu 70% em dez anos no norte da Europa, considerando a diferença de preços entre os projetos instalados desde 2015 e aqueles recém-leiloados, que entram em operação até 2025 (World Bank, 2021).

Apesar dos desafios, como ambientes marinhos complexos, transmissão de energia em alto mar e altos custos de instalação, a energia eólica *offshore* continua a se expandir globalmente e se apresenta como uma fonte de energia renovável estável e promissora (Li *et al.*, 2020). Em 2024, a fonte

atingiu quase 80 GW instalados, sendo 50% concentrados na China e o restante em países da Europa, como Reino Unido, com 15 GW, Alemanha, com 9 GW, e Holanda, com 5 GW instalados (IRENA, 2025). O Gráfico 1 ilustra a evolução da capacidade instalada, com destaque para o ano de 2020, quando a China adicionou 16,7 GW de eólicas *offshore*.

Gráfico 1 | Evolução da capacidade instalada em eólicas *offshore* (em GW)



Fonte: Elaboração própria com base em dados da IRENA (2025).

Impacto local dos projetos

Mesmo trazendo os benefícios da geração de energia limpa, o desenvolvimento da indústria eólica *offshore* também gera críticas devido aos seus impactos locais. Entre as preocupações estão o ruído submarino, que pode afetar a migração e reprodução de animais marinhos, colisões de aves marinhas com as turbinas, perturbação visual da paisagem, perda de territórios para comunidades – como pescadores – e a resistência de grupos contrários ao desenvolvimento da energia renovável, associada ao fenômeno *not in my backyard* (NIMBY).¹ Esse fenômeno é amplificado por campanhas de desinformação, principalmente de opositores ou da indústria de combustíveis fósseis (Garo; Roberts, 2024; Slevin; Roberts; Kattrup, 2023).

1 Termo criado para caracterizar o movimento de oposição a projetos de infraestrutura coletiva próximos a áreas de residência ou de interesse dos seus integrantes, mas com a conotação de que podem ser tolerados se desenvolvidos em locais distantes.

Essas críticas são importantes para aprimorar os estudos e o planejamento dos projetos, visando minimizar impactos negativos. Por exemplo, os efeitos das turbinas eólicas sobre as aves têm sido amplamente estudados, apontando riscos como mortalidade por colisão, deslocamento e impactos nas populações de presas. No entanto, pesquisas recentes indicam que a mudança de rotas migratórias ou habitats não é conclusiva e algumas espécies até mostram atração pelas turbinas (Trinder; O'Brien; Deimel, 2024; Marques; Batalha; Bernardino, 2021). A altura das torres e o uso de turbinas maiores podem reduzir o risco de colisões com as aves (Johnston *et al.*, 2014).

Além disso, as turbinas eólicas emitem ruído subaquático de baixa frequência, que pode afetar espécies marinhas, como botos e focas, dependendo da distância, embora esse ruído seja mais baixo que o ruído de navios na mesma faixa de frequência (Tougaard; Hermannsen; Madsen, 2020). Durante a construção, o ruído gerado pelas fundações tipo monoestaca é mais alto, mas medidas como cortina de bolhas e observação de proximidade podem mitigar esses impactos (Green *et al.*, 2022).

Outros impactos no ecossistema marinho incluem os campos eletromagnéticos gerados pelos cabos de transmissão, que podem afetar espécies como salmões e tartarugas marinhas. No entanto, esses efeitos podem ser mitigados com melhor planejamento e isolamento dos cabos. As colisões com embarcações durante a construção e a manutenção dos parques também são preocupantes, especialmente para mamíferos marinhos, e podem ser reduzidas com a diminuição da velocidade das embarcações. Além disso, a formação de recifes artificiais nas estruturas pode atrair espécies de peixes e invertebrados, o que pode ser benéfico se o *design* das estruturas for adequado às necessidades ecológicas (Green *et al.*, 2022). Todos esses aspectos exigem um aprimoramento contínuo das pesquisas, especialmente

nas fases iniciais dos projetos, antes da obtenção da licença de instalação, durante os estudos de impacto ambiental.

Diretrizes para o desenvolvimento de eólicas *offshore*

Nesta seção, serão tratados os principais componentes da cadeia de valor a ser desenvolvida para viabilizar a implantação de parques eólicos no mar, com análise direcionada ao mercado brasileiro. Também serão abordados os condicionantes regulatórios e políticos para o desenvolvimento desse mercado e as fases típicas de um projeto, desde os primeiros pilotos até alcançarem a escala necessária para consolidação e competitividade da fonte.

Cadeia produtiva

A cadeia de suprimentos do setor de eólicas *offshore* foi dividida em dois grupos: os componentes principais do parque eólico *offshore* e os serviços prestados nas diversas fases dos projetos.

Os componentes de um parque eólico *offshore* normalmente são produtos manufaturados que poderão ser produzidos a partir da cadeia de fornecedores existente ou demandarão novos investimentos, como é o caso de muitos componentes de maior dimensão, peso e características diferenciadas ao ambiente marinho. O Quadro 1 sintetiza esses componentes e suas características.

Quadro 1 | Principais componentes do parque eólico offshore

Grupo	Componente	Descrição	Características
Componentes principais do aerogerador offshore	Pás	Feitas de materiais como fibra de vidro, carbono e madeira balsa, são maiores em projetos offshore, aumentando a geração de energia.	As pás de turbinas de 15 MW podem alcançar 150 m e exigem moldes específicos.
	Cubo do rotor	Conecta as pás ao eixo central da turbina.	Devido a suas dimensões, precisam ser fabricados o mais próximo possível dos portos.
	Nacele	Contém o rotor, caixas multiplicadoras, unidades hidráulicas e sistemas de segurança.	Mesmo com a presença dos principais fabricantes no Brasil, novos investimentos são necessários devido aos requisitos de dimensão e peso, sendo desejável que a montagem ocorra o mais próximo possível dos portos.
	Torres	Feitas de aço tratado, as torres são mais robustas devido às condições marinhas e também mais altas, aumentando sua eficiência.	As fábricas de torres existentes no Brasil podem ser adaptadas, mas a logística pode ser um desafio a depender do local de instalação.
	Fundações	Podem ser fixas ou flutuantes, com a escolha dependendo da profundidade do mar e das condições do solo marinho.	As fundações fixas são limitadas a profundidades de até 60 m.

(Continua)

(Continuação)

Grupo	Componente	Descrição	Características
Componentes principais do aerogerador <i>offshore</i>	Componentes de grande porte	A fabricação de fundidos de grande porte, rolamentos e transformadores exige novos investimentos.	O conhecimento atual das empresas é um ativo, mas demandarão novas estruturas fabris e algumas deverão se deslocar para os portos.
	Componentes modulares	Componentes como painéis, conversores, freios, parafusos e sinalizações podem ser adaptados da cadeia eólica <i>onshore</i> .	Pela característica modular desses componentes, podem ser adaptados ao aumento de potência e dimensões dos aerogeradores <i>offshore</i> .
Componentes de interligação do parque <i>offshore</i>	Cabos submarinos	Transportam eletricidade das turbinas para as subestações e para a rede elétrica.	Sua robustez aumenta conforme o parque está mais distante da costa.
	Subestações <i>offshore</i>	São plataformas no mar que concentram a eletricidade gerada pelas turbinas e a enviam para a terra.	Quanto maior a distância da costa, maiores os custos do sistema de transformação e transmissão.

Fonte: Elaboração própria.

Já a cadeia de fornecedores de serviços especializados pode ser agrupada nas três fases principais do desenvolvimento do setor, sendo a primeira o desenvolvimento da infraestrutura de portos, navios e logística, seguida da construção dos parques e, por fim, da operação e manutenção dos parques construídos, conforme detalhado no Quadro 2.

Quadro 2 | Serviços especializados

Grupo	Componente	Descrição	Características
Infraestrutura e logística	Portos	Essenciais para a movimentação de grandes componentes e para a montagem e manutenção dos parques.	A infraestrutura portuária adequada é crucial para o sucesso dos projetos.
	Navios	Transportam turbinas, fundações e cabos, com grandes guindastes e embarcações adaptadas às necessidades da instalação no mar.	Alguns navios podem ser compartilhados com outras indústrias, como a de petróleo, enquanto outros são específicos e têm custos altos e janelas de afretamento concorridas.
	Transporte terrestre	Inclui o transporte de peças para os portos, o que exige infraestrutura apropriada para lidar com componentes pesados.	Os custos logísticos entre o local de produção e o de pré-montagem antes da montagem final no mar podem ser significativos.
Engenharia e construção	Estudos geotécnicos e ambientais	Antes da instalação, são realizados estudos para avaliar o solo marinho e os impactos ambientais.	Envolve atividades como medição de ventos, avaliações geológicas, estudos de impacto ambiental.
	Engenharia de fundações e instalações	Projetos de fundações variam conforme as condições do fundo oceânico e da profundidade do mar.	As fundações oneram os projetos eólicos <i>offshore</i> e seu dimensionamento correto é um fator de competitividade.
	Instalação e comissionamento	A montagem das turbinas, fundações e subestações requer alta especialização.	Componente que pode representar 25 a 35% dos custos de um parque em função da complexidade da operação no mar.

(Continua)

(Continuação)

Grupo	Componente	Descrição	Características
Operação e manutenção (O&M)	Monitoramento remoto	Utiliza sensores avançados para monitoramento contínuo das turbinas e sistemas de transmissão.	Atividades que garantem o funcionamento seguro e econômico do projeto, atingindo equilíbrio entre custo de funcionamento e produção de eletricidade.
	Manutenção especializada	A manutenção exige embarcações e helicópteros, além de ser mais cara e desafiadora devido às condições adversas no mar.	
	Inspecções regulares	Drones e robôs subaquáticos são usados para inspecionar fundações, torres e cabos submarinos.	

Fonte: Elaboração própria.

Políticas públicas

O desenvolvimento dos projetos *offshore* é longo, levando cerca de oito a dez anos para os projetos pioneiros serem concluídos. Porém, os primeiros passos para o estabelecimento dessa indústria não demandam grandes investimentos, pois estão concentrados em políticas públicas para definir estratégias, metas e arcabouços regulatórios que irão guiar e incentivar o seu desenvolvimento.

O Banco Mundial e a Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) publicaram um guia voltado para economias emergentes, como a do Brasil, que estão em estágios iniciais de implantação de políticas para o mercado de eólicas *offshore*, trazendo quatro pilares para o desenvolvimento da indústria: estratégia, políticas, regulação e entrega, que serão apresentados na sequência (World Bank, 2021).

- **Estratégia – estabelecer a visão**

A estratégia tem por objetivo integrar as eólicas *offshore* ao plano energético de longo prazo, reconhecendo sua contribuição para a segurança energética, devido a sua larga escala, alto fator de capacidade e previsibilidade, para a descarbonização e para o atingimento de metas do Acordo de Paris. Com essa declaração de intenções inequívoca, os formuladores de política energética e políticas públicas contribuem para o progressivo desenvolvimento do mercado, redução de custos, robustez dos contratos, adensamento da cadeia e criação de empregos (World Bank, 2021).

Os novos projetos *offshore* têm apresentado maior fator de capacidade, como observado no Reino Unido, onde a média aumentou de 34,9% para 41% entre as rodadas do esquema de obrigação de energias renováveis (Dean, 2020). Na China, estima-se um potencial de 800 GW em regiões com fator de capacidade superior a 50% (Peng; Lin; He, 2023). Como será detalhado posteriormente, estima-se que o fator de capacidade no Brasil atinja valores médios entre 47 e 60%, o que contribui para o aumento da atratividade dessa fonte (Fernandes *et al.*, 2022).

Embora os custos iniciais sejam elevados, o desenvolvimento do mercado os reduz. No Reino Unido, o custo nivelado de energia (LCOE, na sigla em inglês) caiu de 150 €/MWh, em 2011, para 69 €/MWh, em 2020, impulsionado por fatores como financiamento favorável e avanços tecnológicos (Santhakumar *et al.*, 2022).

A distribuição geográfica de parques *offshore* contribui para a segurança energética ao minimizar períodos de baixa geração e reduzir a dependência de poucas fontes renováveis (Potisomporn; Vogel, 2021). Além disso, o setor tem impacto socioeconômico relevante, podendo gerar 2,1 milhões de pessoas-dias de trabalho para cada 500 MW

instalados,² principalmente na fabricação dos componentes, instalação, operação e manutenção ao longo de toda a vida útil do parque (IRENA, 2018). Por fim, a indústria atrai investimentos e *funding* local e global, fortalecendo a economia e viabilizando energia limpa a preços competitivos no longo prazo (Kilicarslan, 2019).

A eólica *offshore* é considerada no planejamento energético brasileiro nos Planos Decenais de Energia (PDE 2030 e PDE 2031), elaborados pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e pela EPE, mas ainda não se mostra competitiva no horizonte de dez anos, mesmo com a incorporação de referências internacionais de redução de custos (Brasil; EPE, 2021, 2022). Essa avaliação se mantém na versão mais recente do PDE 2034, ainda em consulta pública (Brasil; EPE, 2024).

No longo prazo, o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) discute o potencial da tecnologia conforme fatores como profundidade e velocidade dos ventos, além dos desafios para sua implementação, como infraestrutura portuária e regulação (Brasil; EPE, 2020). A inclusão da eólica *offshore* nos principais estudos do MME e da EPE reforça seu reconhecimento como parte da estratégia energética de longo prazo do Brasil.

- **Política – leis e acordos para implementar a estratégia**

Para fomentar um *pipeline* robusto de projetos e reduzir custos, o Banco Mundial recomenda um plano de desenvolvimento com metas claras e cronograma de leilões de concessão de áreas, equilibrando redução de custos e benefícios econômicos e sociais (World Bank, 2021). Países como Reino Unido, com meta de implantação de 40 GW até 2030,

2 A referência de 2,1 milhões de pessoas-dias de trabalho para cada 500 MW instalados é utilizada por ser independente do tempo de cada etapa do ciclo de vida do parque eólico. Por exemplo, 59% desse montante de referência está na fabricação de componentes, e para calcular o número de empregos gerados seria necessário conhecer o tempo de fabricação, assim como o número de empregos da operação e manutenção (24%) e da instalação (11%) dependeriam de conhecermos o tempo de vida útil e o prazo de instalação, respectivamente.

Alemanha, com meta de 20 GW, e Estados Unidos da América (EUA), com meta de 30 GW, demonstram que a definição de metas impulsiona investimentos (World Bank, 2021).

O Banco Mundial sugere um *roadmap* para capacitação da força de trabalho e alerta sobre o equilíbrio entre políticas de conteúdo local e redução de custos para garantir crescimento sustentável da indústria (World Bank, 2021). O mesmo estudo alerta ainda que os formuladores de políticas públicas devem evitar a busca por múltiplos objetivos simultaneamente, sendo necessário o balanceamento ou faseamento das políticas, a fim de promover a redução de custo com políticas de desenvolvimento da cadeia produtiva e o crescimento consistente da indústria, especialmente nas etapas iniciais (World Bank, 2021). Além disso, a falta de transparência e previsibilidade nos processos de cessão de áreas e licenciamento ambiental são barreiras ao desenvolvimento do setor (Vasconcelos *et al.*, 2022).

No Brasil, o grupo de trabalho de eólicas *offshore*, coordenado pelo MME, tem como objetivo estruturar um mapa regulatório para viabilizar projetos e avaliar adequações normativas.³ Nesse sentido, a aprovação da Lei 15.097/2025 (Brasil, 2025), foi um marco importante para o avanço do setor.

• Arcabouço regulatório – viabilizar a política e a estratégia

O Banco Mundial define sete *frameworks* regulatórios fundamentais para o desenvolvimento da indústria eólica *offshore*, quais sejam: (i) planejamento espacial marítimo (PEM), para mapear as áreas mais adequadas; (ii) processo de concessão, garantindo direitos aos desenvolvedores para pesquisa e operação; (iii) licenciamento ambiental,

³ Informações sobre o grupo de trabalho estão disponíveis em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/dte/cgebc/gt-eolicas-offshore-1>. Acesso em: 26 mar. 2025.

exigindo estudos detalhados sobre impactos sociais e ambientais; (iv) suporte à receita, reduzindo riscos financeiros e viabilizando investimentos; (v) planejamento das conexões elétricas, assegurando a integração eficiente à rede; (vi) treinamentos em saúde e segurança, protegendo trabalhadores da indústria; e (vii) padronização e certificação, garantindo conformidade técnica e permitindo ganhos de escala (World Bank, 2021).

O modelo regulatório pode adotar um sistema integrado ou separado para a concessão de áreas e a definição dos contratos de receita. No modelo integrado, um único processo competitivo concede tanto a área quanto os direitos de comercialização da energia, exigindo mais envolvimento governamental na disponibilização de informações. Já no modelo separado, ocorre primeiro a concessão da área para o desenvolvedor realizar estudos e estruturar o projeto, seguido por um leilão específico para a venda da energia gerada (World Bank, 2021).

A colaboração entre governo, indústria e agentes do setor é apontada como essencial para o sucesso da regulação, permitindo adaptações aos desafios regionais e aproveitamento de boas práticas internacionais. Fóruns que reúnem esses atores, a exemplo do grupo de trabalho de eólicas *offshore* liderado pelo MME, podem acelerar projetos e reduzir custos ao alinhar interesses e compartilhar conhecimento (World Bank, 2021).

Mercados já consolidados adotaram estratégias para facilitar e agilizar o processo regulatório. O conceito de *one stop shop* – um órgão único responsável por coordenar todas as etapas necessárias para a outorga de projetos – tem sido um fator de sucesso em países como Dinamarca e Noruega, além dos EUA, onde o Bureau of Ocean Energy Management (BOEM) coordena esse processo (Vasconcelos *et al.*, 2022).

• Implementação – entrega dos resultados

O Banco Mundial sugere que a implementação de projetos eólicos *offshore* comece com projetos pilotos, que servem para testar e ajustar os *frameworks* regulatórios em uma escala reduzida, com o objetivo de, a longo prazo, estabelecer um *pipeline* contínuo de projetos que possibilite a redução de custos e a consolidação da indústria (World Bank, 2021).

A sustentabilidade a longo prazo da indústria depende também do desenvolvimento da infraestrutura local, incluindo a cadeia de suprimento e portos. O governo tem um papel central nesse processo, incentivando investimentos por meio de mecanismos como competição por crédito direcionado, incentivos à pesquisa e desenvolvimento, incentivos tributários e acordos com agências de exportação (World Bank, 2021).

Para garantir que as competências locais atendam às demandas dessa nova indústria, o Banco Mundial propõe ações como análises das lacunas da cadeia (*gap analysis*), incubadoras de empresas, programas de diversificação para empresas de outros setores, e o fomento de associações industriais para promover a coordenação e o intercâmbio de informações (World Bank, 2021).

Por fim, como os portos são centros estratégicos para o desenvolvimento da cadeia eólica *offshore*, o governo pode apoiar o crescimento da indústria promovendo políticas direcionadas, estimulando a inovação e o desenvolvimento portuário, o que contribui para a redução dos custos de energia no futuro (World Bank, 2021).

Fases do desenvolvimento dos projetos

O desenvolvimento de projetos eólicos *offshore* é composto pelas seguintes fases: pré-desenvolvimento, desenvolvimento, operação e pós-operação.

Na fase de pré-desenvolvimento, realiza-se a avaliação inicial do local do projeto, levando em consideração fatores técnicos e ambientais como a velocidade e variabilidade dos ventos, a infraestrutura necessária (como portos e sistemas de transmissão elétrica) e os impactos ambientais potenciais, especialmente sobre a vida marinha e o ecossistema local. O PEM é uma ferramenta importante, pois facilita a integração dos projetos ao ambiente marinho e ajuda a superar desafios relacionados à falta de dados, aos conflitos entre diferentes usuários do espaço marítimo e à complexidade regulatória, promovendo uma implantação mais rápida e ambientalmente responsável de parques eólicos *offshore*.

Na fase de desenvolvimento, o foco está no licenciamento e na obtenção de permissões necessárias para construção e operação do parque. O processo envolve a realização de um estudo de impacto ambiental (EIA), a obtenção de licenças ambientais e marítimas, e a concessão do uso do solo marinho. Além disso, são necessários consulta pública e engajamento para garantir que sejam consideradas as preocupações de todas as partes interessadas. Também é preciso garantir as licenças para a instalação de cabos submarinos e a conexão do parque à rede elétrica.

Ainda durante essa fase, são elaborados os projetos detalhados das turbinas, fundações e infraestrutura necessária, incluindo os sistemas de cabos submarinos. A análise geotécnica das áreas-alvo é essencial para determinar o tipo adequado de fundação, considerando fatores como a profundidade do mar e as condições geológicas. O *design* das turbinas deve ser otimizado para as condições locais de vento e maré, e as turbinas precisam ser projetadas para garantir máxima eficiência e baixa manutenção. A modelagem e a simulação, que consideram as condições do vento e o impacto das turbinas sobre o vento incidente na turbina adjacente, são cruciais para o sucesso do projeto.

A decisão de investimento é um dos passos mais importantes, com uma análise detalhada da viabilidade dos modelos de negócios influenciando a escolha de financiar o projeto. A negociação de contratos de compra de energia (PPA, na sigla em inglês) e a aquisição de componentes essenciais, como turbinas e cabos submarinos, são determinantes para garantir os recursos financeiros necessários. Mecanismos de apoio, como as tarifas *feed-in* (FIT, na sigla em inglês) e os contratos por diferença (CFD, na sigla em inglês),⁴ que estabilizam a receita dos novos empreendimentos, podem ajudar a reduzir a incerteza política e econômica, embora exijam recursos públicos direcionados a sustentar esses mecanismos.

Na fase de construção e instalação, os componentes são transportados para o local de instalação por meio de navios especializados, e a instalação das fundações, a montagem das turbinas e o lançamento dos cabos submarinos são realizados. As infraestruturas portuárias e estaleiros precisam ser adequadamente modernizados para lidar com os grandes e pesados componentes necessários. A instalação bem-sucedida dos componentes é um passo crucial para o início da geração de energia do parque.

Operação e manutenção (O&M) envolvem monitoramento remoto do desempenho das turbinas, além de inspeções e reparos regulares para garantir o funcionamento eficiente e seguro do parque eólico ao longo de sua vida útil.

Por fim, o descomissionamento é a fase em que as operações são encerradas de maneira ambientalmente responsável, com a desmontagem das turbinas e remoção das fundações, desconexão dos cabos submarinos e recuperação ambiental da área marítima.

4 FITs são tarifas fixas superiores às convencionais, garantidas pelo poder público e, geralmente, definidas em leilões ou processos competitivos. CFDs são mecanismos baseados em processos competitivos distintos para compra e para a venda de um determinado produto em que a diferença de preços de mercado é garantida pelo poder público, compensando o desenvolvedor caso os preços do mercado sejam mais baixos, ou recebendo um pagamento quando os preços superam o valor acordado. Ambos têm como objetivo estabilizar as receitas de um projeto e incentivar a adoção de novas tecnologias, que podem experimentar reduções de custos com os ganhos de escala.

Investimento total necessário

Sobre o contexto brasileiro, uma pergunta premente é: quanto investimento será necessário para o desenvolvimento do setor de geração eólica *offshore* no Brasil? Para tratar essa questão, é preciso observar o montante necessário não apenas do ponto de vista do investimento no projeto eólico em si, mas também da infraestrutura e da cadeia de fornecedores que serão necessárias desenvolver para sustentar o crescimento dessa indústria.

O estudo "Cenários para o desenvolvimento de eólica *offshore* no Brasil", conduzido pelo Banco Mundial e pela consultoria DNV, destaca que, em um cenário intermediário, o Brasil pode ter 8 GW instalados até 2035 e 32 GW de eólicas *offshore* até 2050 (World Bank, 2024a). Para que esse cenário se materialize, seriam necessários leilões frequentes de cessão de área, entre 2025 e 2050, e o desenvolvimento simultâneo de portos, transmissão e outras infraestruturas em torno das três macrorregiões brasileiras, no Sul, Sudeste e Nordeste. Considerando um custo de R\$13,5 milhões por MW, a instalação a um ritmo regular de 1,8 GW por ano requer um investimento direto total de R\$17,2 bilhões por ano.

Porém, investimento de capital (Capex) medido em R\$/MW é diferente do investimento em infraestrutura necessária para implementar atualizações de rede de transmissão, de portos e da cadeia de suprimentos. Em um exercício de perspectiva de investimentos, projetamos que ao Capex anual de R\$ 17,2 bilhões, que viabilizariam os 1,8 GW/ano, deverão ser adicionados cerca de 50% de investimentos extras em infraestrutura e na indústria. O direcionamento desses investimentos no momento adequado será um importante elemento estratégico, de forma a não inviabilizar os primeiros projetos e permitir que, ao longo do tempo, o custo unitário se reduza e torne a fonte cada vez mais competitiva, com os ganhos de escala da cadeia de suprimentos local.

Nesse cenário, o estudo do Banco Mundial estima um retorno no PIB de US\$ 55 bilhões e a criação de 100 mil postos de trabalho nos picos de construção, com média de 50 mil novos postos no período (World Bank, 2024a).

Potencial das eólicas *offshore* no Brasil

Sinergias

As eólicas *offshore* podem desempenhar um papel crucial no atendimento à demanda futura por energia renovável no Brasil, especialmente considerando a crescente limitação da expansão das hidrelétricas. Atualmente, as hidrelétricas respondem por 72% da eletricidade consumida no país, mas a expectativa é que sua participação caia para 46% até 2050, conforme indicado pelos estudos do PNE 2050 (Brasil; EPE, 2020). Isso ocorre devido à escassez de áreas disponíveis para a expansão, uma vez que grande parte do potencial hidrelétrico brasileiro se encontra em áreas protegidas ou de alta sensibilidade ambiental. Dessa forma, fontes de energia renovável não hídrica, como a energia solar e a eólica, tornaram-se alternativas essenciais para garantir a expansão da capacidade de geração elétrica do país.

A energia eólica *offshore* apresenta um grande potencial para complementar a geração hidrelétrica no Brasil, especialmente nas regiões Nordeste e Sudeste, áreas com alta intensidade de ventos (Nogueira; Moraes; Pereira, 2023). Além disso, essa fonte de energia possui uma característica valiosa: sua complementaridade com o regime de chuvas. O vento no mar tende a ser mais constante e forte durante os meses secos, enquanto a geração das hidrelétricas é maior durante os períodos chuvosos, o que torna essas fontes de energia convenientemente complementares. Isso significa que a geração de energia eólica *offshore* pode compensar a menor produção das hidrelétricas em anos de escassez hídrica, o que contribui para uma matriz energética mais estável e resiliente. Estudos indicam que a distribuição otimizada dos parques eólicos *offshore* pode reduzir em até 68% a variabilidade

sazonal da produção de energia eólica no Brasil, maximizando a geração de eletricidade e reduzindo a necessidade de usinas térmicas de reserva, que são mais caras e poluentes (Fernandes *et al.*, 2022; World Bank, 2024a).

Os ventos *offshore*, em comparação com os ventos *onshore*, geralmente apresentam velocidades mais altas e menor variabilidade, o que os torna mais favoráveis à geração de energia elétrica. Esse fenômeno ocorre devido a mudanças na estabilidade atmosférica e nas características de rugosidade das superfícies terrestre e marítima, que favorecem maior velocidade do vento no mar à noite. Durante o dia, as condições se tornam mais estáveis, o que reduz a velocidade do vento *offshore*. O regime de ventos no mar, assim como em terra, tende a alcançar seu pico durante a noite, o que ajuda a atender parte do pico de demanda de eletricidade que acontece no início da noite, enquanto os picos de produção de energia solar ocorrem em horários diferentes (Li *et al.*, 2020; Barthelmie; Grisogono; Pryor, 1996; Yu; Wagner, 1970). Essas características complementares são especialmente importantes no atual sistema elétrico brasileiro, que observa um aumento significativo da energia solar. Quando a produção solar se encerra e ocorre também o aumento de demanda, outras fontes precisam suprir a carga. Atualmente, as hidrelétricas têm sido a principal responsável por atender essa demanda, mas devido à sua limitação de expansão, as eólicas *offshore* poderão desempenhar um papel importante no atendimento dessa demanda instantânea.

Conforme desenvolvido na seção anterior, a cadeia de suprimentos a ser desenvolvida para eólicas *offshore* pode valer-se de algumas sinergias com o setor eólico *onshore* do Brasil. No entanto, permanecem desafios relacionados à logística e à necessidade de novos investimentos - em função das maiores dimensões e peso de alguns equipamentos - e às

especificações do regime de trabalho no mar. Alguns componentes de grande porte, como pás, naceles, torres e fundações, demandarão novos investimentos em instalações fabris, preferencialmente deslocadas para áreas próximas aos portos, enquanto outros componentes naturalmente escaláveis e a prestação de serviços poderão aproveitar-se da estrutura e *expertise* existentes.

Por fim, a vasta experiência do Brasil na exploração de petróleo no mar e sua infraestrutura de navegação de apoio resultaram em uma riqueza de recursos e conhecimentos técnicos que podem ser aproveitados para o desenvolvimento da energia eólica *offshore*, a exemplo da força de trabalho com experiência em operações *offshore*, da indústria naval estabelecida para apoiar a fabricação e a instalação de componentes e os recursos existentes em logística e operações marítimas (Shadman *et al.*, 2023). Além da sinergia pelo conhecimento e experiência, existe a possibilidade de reaproveitamento de estruturas e plataformas de petróleo fixas que estão em final de vida útil, reutilizando-as como subestações *offshore* ou estruturas de apoio a futuros parques eólicos, evitando o processo de descomissionamento desses equipamentos (Nogueira; Moraes; Pereira, 2023).

Potencial eólico brasileiro

O Brasil tem um grande potencial para a geração de energia renovável, especialmente energia eólica, com destaque para o setor *offshore*, que apresenta oportunidades ainda mais promissoras. Na região Nordeste, por exemplo, os parques eólicos *offshore* podem alcançar fatores de capacidade de até 75% entre os meses de agosto e novembro, período de maior incidência de vento, e uma média anual entre 47% e 60% de eficiência (Fernandes *et al.*, 2022). Em comparação, os parques eólicos *onshore* da região apresentam um fator de capacidade médio de 43% nos mesmos meses de pico, e uma média anual entre 34% e 38%. Porém, a região sofre uma variabilidade sazonal

significativa, com redução do fator de capacidade para cerca de 27% entre janeiro e maio, período de chuvas (ONS, 2025).

Além da alta velocidade constante dos ventos, outro fator favorável ao desenvolvimento da energia eólica *offshore* no Brasil é a profundidade das águas costeiras. As turbinas eólicas mais econômicas, que utilizam fundações fixas no fundo do mar, exigem águas rasas, enquanto estruturas flutuantes, mais caras, são necessárias para profundidades superiores a cinquenta metros. A EPE estima que o potencial teórico de geração de energia *offshore* no Brasil pode atingir quase 700 GW, considerando locais onde a velocidade do vento a cem metros de altura é maior que 7 m/s, e a profundidade não ultrapassa os cinquenta metros (EPE, 2020).

O aproveitamento ideal dessa energia requer uma análise cuidadosa das áreas de concessão, levando em conta a sobreposição de fatores técnicos e as condições de contorno, como unidades de conservação, rotas de navegação e áreas de exploração mineral e de petróleo. O PEM, ferramenta que, conforme mencionado anteriormente, visa harmonizar os usos do espaço marinho, será essencial para o desenvolvimento sustentável da energia eólica *offshore*. Embora o PEM ainda esteja em elaboração para todas as regiões do Brasil, é possível iniciar a definição de áreas para os projetos, desde que as condições sociais e ambientais sejam analisadas adequadamente.

Ao contrário dos parques eólicos *onshore*, que exigem grandes áreas de terra, os parques *offshore* apresentam menor risco de conflito com outros usos, como agricultura e preservação ambiental, já que as turbinas são instaladas no mar, longe das áreas habitadas. Embora haja impactos no ecossistema marinho, esses efeitos podem ser minimizados com um planejamento adequado. A geração de energia eólica *offshore* também tende a gerar menos impactos sociais, pois não desloca comunidades

nem interfere em atividades terrestres, além de causar menores impactos visuais e sonoros.

Desafios

O desenvolvimento das eólicas *offshore* em países emergentes, como o Brasil, enfrenta diversos entraves, como a falta de infraestrutura em portos especializados e redes de transmissão adequadas, o arcabouço regulatório ainda recente e em desenvolvimento, a complexidade do licenciamento ambiental, além do alto custo inicial, com exigência de grandes investimentos em infraestrutura e em tecnologia.

Um estudo sobre o desenvolvimento do setor de energia eólica *offshore* na Dinamarca mapeou, por meio de entrevistas e documentos, os aspectos mais importantes e agrupou-os nas dimensões: (i) espacial, relativo ao uso do espaço marinho e infraestrutura existente; (ii) financeira, relativa às questões tributárias e de financiamento; (iii) ambiental, quanto aos riscos e efeitos no entorno; e (iv) política, relativa à governança e aos processos a serem estabelecidos. O estudo é sumarizado no Quadro 3 e forma um guia para que outras regiões possam desenvolver seus próprios recursos de energia eólica no mar (Barth, 2024).

Quadro 3 | Desenvolvimento do setor de energia eólica *offshore* na Dinamarca

Categoria	Pontos críticos
Espacial	Envolvimento das partes interessadas por meio do PEM ou estudos semelhantes antes da decisão de alocação de recursos.
	Uso estratégico de infraestrutura portuária e de transmissão e desenvolvimento de <i>clusters</i> de projetos para otimização da logística.
	Implementação inicial com projetos menores e escaláveis para evitar o superdimensionamento, o qual poderia atrapalhar a transição das cadeias de suprimentos tradicionais.

(*Continua*)

(Continuação)

Categoria	Pontos críticos
Financeira	As tarifas reguladas oferecem estabilidade de preços em mercados flutuantes por um prazo longo (10-25 anos) para projetos iniciais; posteriormente, podem migrar para processos competitivos.
	O uso de instrumentos de dívida para custear o investimento permite que os desenvolvedores de projetos realizem iniciativas mais ambiciosas.
	Fundos públicos e privados podem ser utilizados como fontes, fornecendo garantias para mitigar os riscos financeiros relacionados à volatilidade do mercado.
	Os certificados verdes negociáveis atraem capital de vários setores, expandindo o fluxo de recursos para além da energia eólica <i>offshore</i> .
	As tecnologias de conversão de eletricidade em outros vetores energéticos, como hidrogênio e outros <i>e-fuels</i> (<i>Power-to-X</i>), fortalecem a viabilidade financeira das energias renováveis e a segurança energética para a cadeia de valor dessas novas aplicações.
Ambiental	Os estudos ambientais (mapeamento de riscos e mitigação de impactos) são indispensáveis para a integração das estruturas ao espaço marinho.
	Os parques eólicos <i>offshore</i> são uma oportunidade para o aumento da biodiversidade, criando recifes e novos <i>clusters</i> de vida marinha.
	A descarbonização e a redução de emissões exigem uma abordagem holística, tanto do setor eólico quanto da economia como um todo.
Política	A política energética nacional é crucial para impulsionar a transição verde sustentável.
	A atribuição clara de papéis nas parcerias público-privadas cria um setor de energia eólica <i>offshore</i> eficaz.
	O processo de licitação adiciona concorrência a um mercado regulamentado.
	A demanda de mercado orientada pela capacidade garante um crescimento sustentável.
	Estruturas de propriedade claras criam responsabilidade e fornecem alocação de risco.

Fonte: Adaptado de Barth (2024).

Marco regulatório e políticas no Brasil

Legislação de eólicas *offshore* no Brasil

A regulação do setor de energia eólica *offshore* no Brasil está em andamento e apresenta avanços legais significativos, embora ainda enfrente desafios para consolidar um sistema regulatório robusto e atrativo para os investidores. Um marco importante foi a publicação do Decreto 10.946/2022, que regulamenta a cessão de uso de espaços no mar e o aproveitamento de recursos naturais para a geração de energia eólica *offshore*. Esse decreto define as regras para o uso de águas públicas e estabelece um processo de licenciamento ambiental detalhado, com a exigência de consulta a diversos órgãos federais, como a Marinha do Brasil, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), e a Agência Nacional de Aviação Civil (Anac). A Declaração de Interferência Prévia (DIP) é uma parte essencial desse processo, exigindo a identificação de potenciais interferências entre os projetos e outras atividades no mar, como rotas de pesca e áreas portuárias (Brasil, 2022a).

Após o decreto, duas portarias importantes foram publicadas: a Portaria Normativa MME 52/2022, que estabelece normas complementares para a cessão de uso de áreas *offshore* para geração de energia (Brasil, 2022b), e a Portaria Interministerial MME/MMA 3/2022, que define as diretrizes para a criação de um portal único de gestão para o uso dessas áreas (Brasil, 2022c). O portal será um espaço digital transparente e acessível para acompanhar o andamento dos projetos, proporcionando mais clareza aos investidores e à sociedade.

Antes dessas publicações, desde 2019, o Ibama já vinha recebendo solicitações de licenciamento ambiental de empresas interessadas em desenvolver projetos eólicos *offshore* no Brasil. Com a publicação das novas normas, o interesse aumentou, de modo que atualmente verificam-se 96 pedidos de licenciamento, que totalizam 234 GW de potência e 15.500 aerogeradores. No entanto, muitos desses projetos estão localizados em áreas sobrepostas ou em locais de possível conflito com outras atividades, como exploração de petróleo, rotas de navegação ou áreas protegidas. Os instrumentos para lidar com esses conflitos são a DIP e o PEM, mas a falta de regulação e governança para implantar os processos levou o Ibama a declarar que somente analisaria os pedidos de licenciamento ambiental que fossem acompanhados de outorga da Aneel.

Diante disso, surgiu a necessidade de uma legislação mais robusta para regulamentar de maneira clara o setor de energia eólica *offshore*. Vários projetos de lei foram apresentados ao longo dos anos, com destaque para o PL 576, de 2021, que consolidou as propostas anteriores e foi aprovado no Senado e na Câmara, sendo sancionado pelo Governo Federal, tornando-se a Lei 15.097/2025. Essa lei estabelece o marco regulatório para a exploração de energia *offshore*, incluindo as eólicas, e detalha normas para a outorga de autorizações de uso de áreas em águas públicas, além de definir os critérios de licitação e as modalidades de concessão (Brasil, 2025).

A Lei 15.097/2025 ratifica diretrizes estabelecidas pelo Decreto 10.946/2022, e introduz a possibilidade de cessão de uso das áreas por meio de dois mecanismos principais: a oferta permanente, quando o governo delimita áreas com base no interesse dos empreendedores; e a oferta planejada, em que o governo define previamente as áreas a serem oferecidas aos interessados por meio de licitação pública. Além disso, a lei ratifica o uso da DIP para identificar interferências entre os projetos e outras

atividades. Ela também determina a vedação da concessão de áreas que coincidam com blocos de exploração de petróleo, rotas de navegação ou áreas protegidas, com algumas exceções previstas. A Lei também inclui exigências financeiras para os concessionários, como bônus de assinatura e taxas de ocupação, além de participações proporcionais sobre a energia gerada (Brasil, 2025).

A aprovação da Lei 15.097/2025 e sua regulamentação são vistas como essenciais para dar segurança jurídica aos desenvolvedores e investidores, garantindo que as concessões de uso das áreas marinhas serão protegidas durante a implementação dos projetos. Com a conclusão dessa etapa legal, os primeiros leilões de áreas poderão ser realizados, permitindo a atração de investimentos para os estudos necessários de licenciamento ambiental e para a obtenção das permissões para a construção dos parques eólicos *offshore*.

O planejamento espacial marinho

O Brasil possui uma extensa linha costeira, com cerca de dez mil quilômetros, abrangendo 17 estados e 279 municípios situados na zona costeira (Brasil, 2021). Essa região é altamente relevante, não apenas por sua importância geográfica, mas também por abrigar grande parte da população do país. Cerca de 18% da população brasileira vive em municípios costeiros;⁵ e, quando se considera uma distância de até 150 quilômetros da costa, essa porcentagem aumenta para 54,8% (Abdala, 2024). A zona costeira é crucial para diversas atividades econômicas e desempenha um papel significativo na preservação ambiental, o que torna fundamental um planejamento estratégico e ordenado para o uso do espaço marinho.

5 Os dados do censo podem ser consultados em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 25 mar. 2025.

As atividades que competem por espaço no oceano incluem pesca comercial e recreativa, exploração de petróleo e gás, a produção de energia renovável *offshore*, além de áreas marinhas protegidas, canais de navegação, ancoradouros, áreas para exercícios militares, entre outras. Dada essa variedade de usos, o PEM se apresenta como uma ferramenta essencial para coordenar e alocar as diferentes atividades de forma sustentável, buscando alcançar objetivos ecológicos, econômicos e sociais. O PEM é definido como um processo público de análise e alocação de atividades humanas no mar, com base em um planejamento que integra diversos níveis de governo e setores econômicos, além da participação ativa da sociedade. Esse processo visa antecipar e resolver potenciais conflitos, promovendo um desenvolvimento equilibrado e sustentável (Ehler; Douvere, 2009).

O principal resultado do PEM é o mapeamento do espaço marinho, com a definição de prioridades para cada área. Esse planejamento é feito com uma visão de longo prazo, geralmente de dez a vinte anos, e serve como base para o licenciamento das atividades e a criação de áreas de preservação (Ehler; Douvere, 2009). É importante destacar que o PEM não substitui o processo de licenciamento específico de cada atividade, mas fornece informações gerais e orientações que ajudam a facilitar a análise e aprovação de novos projetos. Além disso, o PEM não substitui o planejamento setorial de cada atividade humana, como transporte, energia e pesca, mas busca integrar os diversos setores para reduzir impactos, riscos e conflitos.

No Brasil, a elaboração do PEM está em andamento e é coordenada pela Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM), vinculada à Marinha do Brasil, e pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA). O BNDES financia os estudos técnicos para o PEM nas regiões Sul, Sudeste e Norte, enquanto a

Fundação Norte Rio Grandense de Pesquisa e Cultura (Funpec) financia os estudos para a região Nordeste. A expectativa é de que os cadernos do PEM para cada região sejam divulgados a partir de 2025, após consultas com os interessados e integrações intersetoriais.

A Lei 15.097/2025 estabelece que a outorga de áreas para projetos de energia *offshore* deve observar as diretrizes do PEM ou de instrumentos equivalentes (Brasil, 2025). No entanto, caso o PEM para uma área específica ainda não tenha sido concluído, seria necessário realizar estudos equivalentes para a área em questão, como o Mapeamento Integrado de Sensibilidade Ambiental e Social (SenMap, na sigla em inglês), desenvolvido pelo Banco Mundial (World Bank, 2024b). Essa flexibilidade permite que os leilões de outorga de áreas possam ser realizados mesmo antes da finalização do PEM, sem prejudicar o processo de planejamento e integração dos diferentes usos. Dessa forma, o PEM deve ser visto como um processo integrador, que ajuda a identificar as melhores áreas para o desenvolvimento de atividades econômicas, ao mesmo tempo que minimiza conflitos e favorece a conservação ambiental.

Financiamento das eólicas *offshore*

Financiabilidade

A financiabilidade refere-se à avaliação por parte dos financiadores do nível de confiança em fornecer crédito ao projeto conforme as políticas de crédito e risco da instituição financeira (Morgan, 1987). É também definida como avaliação da alavancagem em relação à rentabilidade do projeto e aos custos financeiros das fontes de recursos (Repovž, 1988).

A literatura de tomada de decisão em projetos de infraestrutura sugere diversos elementos na avaliação da financiabilidade que caracterizam um “bom projeto”, tais como reputação dos empreendedores (Jaafari, 1990), a solidez dos contratos que irão gerar a receita do empreendimento (Mendicino *et al.*, 2019), a viabilidade técnica e comercial (Tiong; Alum, 1997), a confiabilidade das premissas usadas nas previsões de performance, assim como a análise de sensibilidade das variações dessas premissas (Patel; Bhattacharya, 2010), o rendimento técnico dos equipamentos e a perda da sua eficiência (Leloux *et al.*, 2014).

Observando os protocolos no Ibama, órgão ambiental federal, verifica-se que as empresas que manifestaram interesse nas áreas de exploração de energia eólica no mar são empresas sólidas, já atuantes no setor de energia eólica ou petróleo e gás, e isso ajuda na tomada de decisão dos financiadores. Por outro lado, no aspecto do projeto, o segmento de eólicas *offshore* está em desenvolvimento. As premissas para modelagem ainda são incertas, não havendo estudos de rendimento e custos, e estando o arcabouço regulatório ainda em amadurecimento. Isso traz volatilidade aos fluxos de caixa que remuneram os investidores, provocando maiores custos de capital e complexidade na estrutura financeira necessária para lidar com a incerteza de cobertura da dívida, o que resultaria em maiores preços ao consumidor (Stauffer, 2006).

Nesse ponto, o regulador tem um papel importante em garantir a financiabilidade conjuntural das empresas de um setor (Tapia, 2012), sendo um objetivo primordial dos governos e órgãos de desenvolvimento o de promover a solidez das outorgas para garantir a sustentabilidade da cadeia e a financiabilidade dos empreendimentos (Eberhard *et al.*, 2017).

Ecossistema de financiamento

O ecossistema financeiro é essencial para viabilizar os investimentos necessários à transição para um futuro com zero emissões líquidas de GEE, envolvendo tanto o setor público quanto as instituições financeiras privadas, que desempenham papéis complementares. No financiamento privado, a redução de riscos é fundamental, com os bancos fornecendo grande parte do crédito, embora haja limitações para que eles assumam riscos totais de construção ou forneçam financiamento de longo prazo, devido ao descasamento entre o prazo dos depósitos bancários, geralmente de curto e médio prazo, e o longo prazo de retorno dos projetos de energia renovável (WEF, 2021; Taghizadeh-Hesary; Yoshino, 2020). Os investidores institucionais, como fundos de pensão, controlam vastos recursos, mas priorizam crédito de baixo risco, o que limita seus investimentos em transição energética. Para superar essa limitação, é fundamental aumentar a participação das instituições financeiras privadas e entidades não bancárias em investimentos verdes de longo prazo, além de utilizar crédito direcionado à transição energética para melhorar os retornos e desenvolver esquemas de garantia de crédito verde (Taghizadeh-Hesary; Yoshino, 2020; McDonnell; Gupta, 2023).

As seguradoras também desempenham um papel no financiamento de projetos eólicos *offshore*, oferecendo programas de seguro adaptados às necessidades específicas dessas iniciativas. Elas ajudam a mitigar os riscos associados às fases de construção e operação dos parques eólicos, incluindo seguros para riscos de construção, atraso, perdas de receita, quebras de equipamento, sobrecustos operacionais e responsabilidade civil. Esses produtos de seguros são essenciais para atrair investimentos e apoiar o desenvolvimento sustentável dos projetos eólicos *offshore* (Kirillova; Pukala; Janowicz-Lomott, 2021; Taghizadeh-Hesary; Yoshino, 2020).

No setor público, a criação de um ambiente de apoio é crucial para a transição energética. Isso inclui a implementação de esquemas de incentivo, como subsídios, crédito concessional e mecanismos indutores, como metas ou mandatos de adoção de tecnologias e políticas de precificação de carbono (WEF, 2021). As agências de crédito à exportação (ECA), os bancos de desenvolvimento, como o BNDES, e os bancos multilaterais de desenvolvimento (MDB) desempenham papéis centrais no fornecimento de financiamento e melhoria de crédito, sendo responsáveis por financiar 73% dos projetos de eólicas *offshore* em países membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) entre 2004 e 2021 (Waidelich; Steffen, 2024).

Por fim, o sucesso do financiamento da transição energética para um futuro *net-zero* depende de uma abordagem colaborativa entre as partes interessadas. São necessários mecanismos que integrem os diversos atores do ecossistema financeiro em torno de soluções de redução de riscos, garantia de demanda, estabilidade de receita e inovação tecnológica para que os ganhos de escala promovam a redução de custos.

Instrumentos financeiros

Os projetos de parques eólicos *offshore* em operação nos mercados europeus têm utilizado uma variedade de instrumentos financeiros para viabilizar seu desenvolvimento e operação. Um desses instrumentos é o *project finance*, que consiste no financiamento de um projeto específico baseado nos seus fluxos de caixa projetados, e não no balanço patrimonial de uma empresa operacional. Esse tipo de financiamento é comumente utilizado para projetos de alto custo de capital, como a geração de energia renovável. O financiamento de *project finance* cria um veículo exclusivo, a sociedade de propósito específico (SPE), que concentra as garantias exigidas nos ativos e nas receitas do projeto,

sendo que o valor do financiamento é determinado por métricas de alavancagem, como a relação dívida/patrimônio, e as receitas operacionais previstas para o pagamento da dívida. Além disso, avaliações de cenários, *due diligence* e análise de contratos de fornecimento e receita são essenciais nesse processo (Roth *et al.*, 2022).

O capital próprio (*equity*) também é essencial para esses projetos, representando a participação financeira que os investidores colocam no projeto. Estima-se que entre 20% e 40% do investimento seja proveniente de capital próprio, que pode vir de investidores especializados, gestores de ativos, contrapartes industriais ou fabricantes de equipamentos (Roth *et al.*, 2022).

Além disso, a emissão de títulos (*bonds*), especialmente os alinhados ao clima, é uma estratégia para levantar capital. Esses títulos são utilizados para financiar projetos que atendem a metas climáticas, com a grande maioria dos títulos de clima sendo de grau de investimento (BBB ou melhor) (WEF, 2021).

O cofinanciamento e o *blended finance* são formas de alavancar fontes distintas de financiamento, em uma composição de capital privado e concessional, com características e apetite a risco diferentes e complementares. Os bancos de desenvolvimento frequentemente oferecem esse tipo de solução e têm um caráter mais paciente em relação à recuperação do capital investido (Waidelich; Steffen, 2024). Essa característica viabiliza, por exemplo, a constituição de estruturas financeiras compostas, nas quais os bancos de desenvolvimento fornecem a parcela da dívida com prazos mais longos e os credores institucionais ou privados oferecem prazos mais curtos ou outras condições diferenciadas (WEF, 2021).

Por fim, alguns projetos de energia eólica *offshore* podem ser refinanciados após a construção, utilizando dívidas pós-construção. Esses refinanciamentos geralmente buscam condições financeiras mais favoráveis, com redução de riscos e um melhor dimensionamento da dívida nos balanços patrimoniais das empresas que investem nesses projetos (WFO, 2022).

O BNDES e as energias renováveis

O BNDES, criado em 1952, desempenha um papel fundamental no financiamento de energias renováveis no Brasil. Nos últimos vinte anos, financiou mais de 65 GW de geração renovável, o que representa mais da metade da expansão do período, além de 67 mil quilômetros de linhas de transmissão. Entre 2004 e 2023, foi a instituição financeira que mais concedeu empréstimos para novas energias renováveis globalmente, totalizando mais de US\$ 36,4 bilhões (BNEF, 2024; IRENA, 2024).

A partir do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (Proinfa), o BNDES tem apoiado a expansão recente da geração de energia renovável, ajustando sua atuação conforme as mudanças do setor. Nos leilões regulados, possibilitou condições de financiamento de longo prazo e em moeda local com melhores taxas para novas tecnologias. No mercado livre, em que contratos entre geradores e consumidores possuem prazos menores, o Banco desenvolveu uma metodologia de valoração da energia no longo prazo para viabilizar financiamentos com contratos de comercialização mais curtos. O Fundo Nacional sobre Mudança do Clima (Fundo Clima), administrado pelo BNDES, tornou-se um importante mecanismo de crédito para a transição energética. Seu orçamento foi ampliado de uma média de R\$ 300 milhões anuais, entre 2011 e 2023, para cerca de R\$ 10 bilhões, a partir de 2024, impulsionado por captações externas. Além disso, o Banco fomenta o mercado de finanças sustentáveis por

meio da subscrição de debêntures e da emissão de títulos verdes, tanto no mercado local quanto internacional. O BNDES também é um agente importante no desenvolvimento do mercado de capitais doméstico, seja por meio de aquisição de debêntures incentivadas emitidas por empresas que investem no setor de energia, seja por meio da estruturação de ofertas desse tipo de instrumento. Projetos inovadores, como eólicas *offshore*, armazenamento de energia e hidrogênio verde, demandarão novas fontes de capital e instrumentos financeiros. Para isso, o BNDES poderá utilizar seu relacionamento institucional com bancos multilaterais e agências governamentais internacionais.⁶ De 2009 a 2024, o BNDES captou mais de US\$ 5 bilhões para projetos de energia renovável por meio de títulos verdes e parcerias internacionais.

O BNDES também contribuiu decisivamente para o desenvolvimento da cadeia de suprimentos da indústria de energia eólica no Brasil, por meio da disponibilidade de financiamento em melhores condições e da metodologia de credenciamento para acessar seu financiamento de longo prazo (IRENA, 2024). Aliada à política energética, que incentivou a inserção de fontes renováveis, criando um *pipeline* de projetos de energia eólica para atender ao crescimento esperado da demanda, uma política industrial exitosa também pode ser desenvolvida progressivamente para adaptar a cadeia existente e fomentar novos fornecedores para o novo mercado das eólicas *offshore*.

Além dessas iniciativas, o governo brasileiro também lançou a Plataforma Brasil de Investimentos Climáticos e para a Transformação Ecológica (BIP), visando ampliar investimentos sustentáveis e a descarbonização da economia. A plataforma facilitará a conexão entre projetos e fornecedores de capital financeiro, e contará com a participação do BNDES

6 A relação completa de acordos de cooperação e convênios do BNDES com instituições financeiras internacionais pode ser consultada em: www.bndes.gov.br/Acordos.

na gestão e monitoramento dos projetos cadastrados. A geração eólica *offshore* é um dos setores priorizados, e projetos outorgados poderão se candidatar ao financiamento para acelerar sua implementação e benefícios econômicos.

Conclusão

O Brasil está na vanguarda do desenvolvimento regulatório da energia eólica *offshore* na América Latina. O marco legal representado pela Lei 15.097/2025 e o desenvolvimento do PEM representam avanços significativos no ambiente regulatório, que colocam o país no rumo para criar segurança jurídica e atrair investimentos. No entanto, ainda há espaço para desenvolvimento do atual cenário regulatório para energia eólica *offshore* no país, implementando e aperfeiçoando a atual legislação e desenvolvendo regras em torno da regulamentação dessa nova fonte.

O Brasil possui excelentes recursos eólicos com profundidades relativamente rasas na costa, tornando o desenvolvimento eólico *offshore* uma fonte de energia alternativa sólida para descarbonizar as atividades econômicas e construir nova capacidade de geração, trazendo diversificação e segurança na matriz elétrica instalada. Conforme vimos neste artigo, há sinergias e adaptações necessárias para o desenvolvimento da cadeia de suprimentos e infraestrutura para esse novo setor.

Como proposta para investigações futuras, sugere-se, por exemplo, avaliar os diversos desenhos de leilões das áreas já utilizados em outros países e até mesmo os formatos de concessões para outras fontes de energia, como exploração de blocos de petróleo ou hidrelétricas. Outra sugestão seria explorar exemplos de mecanismos e ações que

incentivem instituições financeiras privadas e entidades não bancárias a alocar mais recursos nos segmentos de geração de energia renovável, como eólicas *offshore*, especialmente em investimentos de longo prazo. A ampliação da participação do financiamento privado é um desafio conhecido, e aprofundar análises e estratégias para ampliar seu envolvimento nesses investimentos, de forma eficaz, seria particularmente relevante para o debate.

Por fim, destaca-se que o desenvolvimento de parques eólicos *offshore* no Brasil requer uma consideração cuidadosa dos fatores ambientais e sociais para garantir que os benefícios da energia renovável sejam maximizados, minimizando o impacto negativo nos ecossistemas e comunidades regionais.

Referências

ABDALA, V. Mais da metade da população brasileira vive no litoral. *Agência Brasil*, Rio de Janeiro, 21 mar. 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-03/mais-da-metade-da-populacao-brasileira-vivem-no-litoral>. Acesso em: 4 mar. 2025.

BARTH, J. *The development of offshore wind energy in Denmark: lessons for Nova Scotia, Canada*. 2024. Dissertação (Mestrado) – University of Akureyri, Ísafjörður, 2024. Disponível em: <https://skemman.is/handle/1946/48695>. Acesso em: 4 mar. 2025.

BARTHELMIE, R.; GRISOGONO, B.; PRYOR, S. Observations and simulations of diurnal cycles of near-surface wind speeds over land and sea. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Washington, D.C., v. 101, n. D16, p. 21327-21337, 1996. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/96JD01520>. Acesso em: 4 mar. 2025.

BNEF – BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE. *Brazil transition factbook*. London: BNEF, set. 2024. Disponível em: <https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/Brazil-Transition-Factbook.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2025.

BRASIL. Decreto 10.946, de 25 de janeiro de 2022. Dispõe sobre a cessão de uso de espaços físicos e o aproveitamento dos recursos naturais em águas interiores de domínio da União [...]. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 25 jan. 2022a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/Decreto/D10946.htm. Acesso em: 4 mar. 2025.

BRASIL. Lei 15.097, de 10 de janeiro de 2025. Disciplina o aproveitamento de potencial energético offshore [...]. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 10 jan. 2025. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/lei/l15097.htm. Acesso em: 4 mar. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Nacional de Energia 2050*. Brasília, DF: MME; EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2030*. Brasília, DF: MME; EPE, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf. Acesso em: 04 mar. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2031*. Brasília, DF: MME; EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>. Acesso em: 04 mar. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2034*. Brasília, DF: MME; EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>. Acesso em: 4 mar. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Portaria normativa 52, de 19 de outubro de 2022. Estabelece as normas e procedimentos complementares relativos à cessão de uso onerosa para exploração de central geradora de energia elétrica offshore [...]. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, ano 160, n. 200, p. 65, 20 out. 2022b. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-normativa-n-52/gm/mme-de-19-de-outubro-de-2022-437756203>. Acesso em: 4 mar. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Portaria interministerial 3, de 19 de outubro de 2022. Cria o Portal Único para Gestão do Uso de Áreas Offshore para Geração de Energia. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, ano 160, n. 200, p. 65, 20 out. 2022c. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-interministerial-mme/mma-n-3-de-19-de-outubro-de-2022-437756126>. Acesso em: 4 mar. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Portaria normativa 34, de 2 de fevereiro de 2021. Aprova a listagem atualizada dos municípios abrangidos pela faixa terrestre da zona costeira brasileira. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, ano 159, n. 23, p. 53, 3 fev. 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/despacho-decisorio-n-2/2021/spe-302053421>. Acesso em: 4 mai. 2025.

DEAN, N. Performance factors. *Nature Energy*, London, v. 5, n. 1, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41560-019-0545-5>. Acesso em: 4 mai. 2025.

EBERHARD, A. *et al.* Independent power projects in Sub-Saharan Africa: investment trends and policy lessons. *Energy Policy*, Amsterdam, v. 108, p. 390-424, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421517303087?via%3Di>. Acesso em: 4 mar. 2025.

EHLER, C.; DOUVERE, F. *Marine spatial planning: a step-by-step approach toward ecosystem-based management*. Paris: Unesco, 2009. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000186559>. Acesso em: 4 mar. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Roadmap eólica offshore Brasil: perspectivas e caminhos para a energia eólica marítima*. Brasília, DF: EPE, 2020. (NT-EPE-PR-001/2020-r2). Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-456/Roadmap_Eolica_Offshore_EPE_versao_R2.pdf. Acesso em: 04 mar. 2025.

FERNANDES, I. *et al.* Exploring the complementarity of offshore wind sites to reduce the seasonal variability of generation. *Energies*, Basel, v. 15, n. 19, p. 1-24, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/19/7182>. Acesso em: 4 mar. 2025.

GARO, I.; ROBERTS, T. *Spinning negativity*: discourses of delay on offshore wind in the 118th Congress. Providence: The Climate and Development Lab – Brown University, 2024. Disponível em: <https://www.climatedevlab.brown.edu/post/new-brown-university-study-finds-pervasive-disinformation-in-congress-about-offshore-wind>. Acesso em: 4 mar. 2025.

GREEN, R. *et al.* *Environmental effects of U.S. offshore wind energy development*: compilation of educational research briefs: U.S. Offshore Wind Synthesis of Environmental Effects Research (SEER). Golden; Richland: National Renewable Energy Laboratory; Pacific Northwest National Laboratory, 2022. Disponível em: <https://research-hub.nrel.gov/en/publications/environmental-effects-of-us-offshore-wind-energy-development-comp>. Acesso em: 5 mar. 2025.

GWEC – GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. *Global offshore wind report 2024*. Brussels: GWEC, 2024. Disponível em: <https://www.gwec.net/reports/globaloffshorewindreport/>. Acesso em: 4 mar. 2025.

HIGGINS, P.; FOLEY, A. Review of offshore wind power development in the United Kingdom. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING, 12, 2013. *Conference Papers* [...]. Wrocław: IEEE, 2013. p. 589-593. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6549584>. Acesso em: 5 mar. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Net Zero by 2050*. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. Acesso em: 4 mar. 2021.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2024 – Analysis*. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>. Acesso em: 4 mar. 2025.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Renewable energy benefits: leveraging local capacity for offshore wind*. Abu Dhabi: IRENA, 2018. Disponível em: https://now.solar/wp-content/uploads/2022/08/irena_leveraging_for_offshore_wind_2018.pdf. Acesso em: 4 mar. 2025.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Development banks and energy planning: attracting private investment for the energy transition – the Brazilian case*. Abu Dhabi: IRENA, 2024. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Development-banks-and-energy-planning-Attracting-private-investment-for-the-energy-transition-Brazil>. Acesso em: 4 mar. 2025.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Renewable capacity statistics 2025*. Abu Dhabi: IRENA, 2025. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-capacity-statistics-2025>. Acesso em: 4 mar. 2025.

JAAFARI, A. Management know-how for project feasibility studies. *International Journal of Project Management*, Amsterdam, v. 8, n. 3, p. 167-172, 1990. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0263786390900198?via%3Dihub>. Acesso em: 4 mar. 2025.

JANSEN, M. *et al.* Offshore wind competitiveness in mature markets without subsidy. *Nature Energy*, London, v. 5, n. 8, p. 614-622, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41560-020-0661-2>. Acesso em: 4 mar. 2025.

JOHNSTON, A. *et al.* Modelling flight heights of marine birds to more accurately assess collision risk with offshore wind turbines. *Journal of Applied Ecology*, Hoboken, v. 51, n. 1, p. 31-41, 2014. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2664.12191>. Acesso em: 4 mar. 2025.

KILICARSLAN, Z. The relationship between foreign direct investment and renewable energy production: evidence from Brazil, Russia, India, China, South Africa and Turkey. *International Journal of Energy Economics and Policy*, Istanbul, v. 9, n. 4, 2019. Disponível em: <https://www.econjournals.com/index.php/ijee/article/view/7879>. Acesso em: 4 mar. 2025.

KIRILLOVA, N.; PUKALA, R.; JANOWICZ-LOMOTT, M. Insurance programs in the renewable energy sources projects. *Energies*, Basel, v. 14, n. 20, 6802, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6802>. Acesso em: 4 mar. 2025.

LELOUX, J. *et al.* A bankable method of assessing the performance of a CPV plant. *Applied Energy*, Amsterdam, v. 118, p. 1-11, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261913010131?via%3Dihu>. Acesso em: 4 mar. 2025.

- LI, J. *et al.* A review on development of offshore wind energy conversion system. *International Journal of Energy Research*, Hoboken, v. 44, n. 12, p. 9283-9297, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.5751>. Acesso em: 4 mar. 2025.
- LI, Y. *et al.* Comparative study of onshore and offshore wind characteristics and wind energy potentials: a case study for southeast coastal region of China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Amsterdam, v. 39, p. 100711, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138820301363?via%3Dihub>. Acesso em: 4 mar. 2025.
- MACASKILL, A.; MITCHELL, P. Offshore wind—an overview. *WIREs Energy and Environment*, Hoboken, v. 2, n. 4, p. 374-383, 2013. Disponível em: <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wene.30>. Acesso em: 4 mar. 2025.
- MARQUES, A. T. BATALHA, H. BERNARDINO, J. Bird displacement by wind turbines: assessing current knowledge and recommendations for future studies. *Birds*, Basel, v. 2, n. 4, p. 460-475, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-6004/2/4/34>. Acesso em: 4 mar. 2025.
- MCDONNELL, C.; GUPTA, J. Beyond divest vs. engage: a review of the role of institutional investors in an inclusive fossil fuel phase-out. *Climate Policy*, London, v. 24, n. 3, p. 314-331, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14693062.2023.2261900>. Acesso em: 4 mar. 2025.
- MENDICINO, L. *et al.* Corporate power purchase agreement: formulation of the related levelized cost of energy and its application to a real life case study. *Applied Energy*, Amsterdam, v. 253, p. 113577, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919312516?via%3Dihub>. Acesso em: 4 mar. 2025.
- MORGAN, B. Benefits of project management at the front end. *International Journal of Project Management*, Amsterdam, v. 5, n. 2, p. 102-119, 1987. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0263786387900366?via%3Dihub>. Acesso em: 4 mar. 2025.
- NIEUWENHOUT, C. Chapter IX.45: Regulating offshore wind energy. In: FAURE, Michael (ed.). *Elgar encyclopedia of environmental law*. Cheltenham: Edward Elgar, 2021. p. 535-545. Disponível em: https://www.elgaronline.com/display/book/9781785369520/b-9781788119689-IX_45.xml. Acesso em: 4 mar. 2025.

NOGUEIRA, E. C.; MORAIS, R. C.; PEREIRA, A. O. Offshore wind power potential in Brazil: complementarity and synergies. *Energies*, Basel, v. 16, n. 16, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/16/5912>. Acesso em: 4 mar. 2025.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Fator de capacidade*. Brasília, DF: ONS, 2025. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/fator-capacidade.aspx>. Acesso em: 15 jan. 2025.

PATEL, U.; BHATTACHARYA, S. Infrastructure in India: the economics of transition from public to private provision. *Journal of Comparative Economics*, Amsterdam, v. 38, n. 1, p. 52-70, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147596709000821?via%3Dihub>. Acesso em: 4 mar. 2025.

PENG, L.; LIN, J.; HE, G. Accelerating offshore wind development enhances energy independence and contributes to carbon-neutrality in China's coastal regions. In: AMERICAN GEOPHYSICAL UNION ANNUAL MEETING, 2023, San Francisco. *Conference Papers [...]*. San Francisco: AGU23, 2023. Disponível em: <https://agu.confex.com/agu/fm23/meetingapp.cgi/Paper/1359174>. Acesso em: 4 mar. 2025.

POTISOMPORN, P.; VOGEL, C. Spatial and temporal variability characteristics of offshore wind energy in the United Kingdom. *Wind Energy*, Hoboken, v. 25, n. 3, p. 537-552, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/we.2685>. Acesso em: 4 mar. 2025.

REPOVŽ, L. Project financing and financial engineering. *International Journal of Project Management*, Amsterdam, v. 6, n. 3, p. 171-177, 1988. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0263786388900440?via%3Dihub>. Acesso em: 4 mar. 2025.

ROTH, A. *et al.* Financing conditions of renewable energy projects – results from an EU wide survey. *Open Research Europe*, Brussels, v. 1, n. 136, p. 1-14, 2022. Disponível em: <https://open-research-europe.ec.europa.eu/articles/1-136/v2>. Acesso em: 4 mar. 2025.

SANTHAKUMAR, S. *et al.* Technological progress observed for fixed-bottom offshore wind in the EU and UK. *Technological Forecasting and Social Change*, Amsterdam, v. 182, p. 1-22, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162522003808?via%3Dihub>. Acesso em: 4 mar. 2025.

SHADMAN, M. *et al.* A review of offshore renewable energy in South America: current status and future perspectives. *Sustainability*, Basel, v. 15, n. 2, p. 1-34, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/2/1740>. Acesso em: 4 mar. 2025.

SINSEL, S.; YAN, X.; STEPHAN, A. Building resilient renewable power generation portfolios: the impact of diversification on investors' risk and return. *Applied Energy*, Amsterdam, v. 254, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919310220?via%3Dihu>. Acesso em: 4 mar. 2025.

SLEVIN, I.; ROBERTS, T.; KATTRUP, W. *Against the wind*: a map of the anti-offshore wind network in the Eastern United States. Providence: The Climate and Development Lab – Brown University, 2023. Acesso em: <https://www.climatedevlab.brown.edu/post/against-the-wind-a-map-of-the-anti-offshore-wind-network-in-the-eastern-united-states>. Acesso em: 05 mar. 2025.

STAUFFER, H. Capacity markets and market stability. *The Electricity Journal*, Amsterdam, v. 19, n. 3, p. 75-80, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1040619006000212?via%3Dihu>. Acesso em: 4 mar. 2025.

TAGHIZADEH-HESARY, F.; YOSHINO, N. Sustainable solutions for green financing and investment in renewable energy projects. *Energies*, Basel, v. 13, n. 4, p. 1-18, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/4/788>. Acesso em: 4 mar. 2025.

TAPIA, J. The 'duty to finance', the cost of capital and the capital structure of regulated utilities: Lessons from the UK. *Utilities Policy*, Amsterdam, v. 22, p. 8-21, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957178712000197?via%3Dihu>. Acesso em: 4 mar. 2025.

TIMILSINA, G. Are renewable energy technologies cost competitive for electricity generation? *Renewable Energy*, Amsterdam, v. 180, p. 658-672, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148121012568?via%3Dihu>. Acesso em: 4 mar. 2025.

TIONG, R.; ALUM, J. Financial commitments for BOT projects. *International Journal of Project Management*, Amsterdam, v. 15, n. 2, p. 73-78, 1997.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263786396000336?via%3DiHu>. Acesso em: 4 mar. 2025.

TOBIN, I. *et al.* Vulnerabilities and resilience of European power generation to 1.5 °C, 2 °C and 3 °C warming. *Environmental Research Letters*, Bristol, v. 13, n. 4, p. 1-8, 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aab211>. Acesso em: 4 mar. 2025.

TOUGAARD, J.; HERMANNSEN, L.; MADSEN, P. How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines? *The Journal of the Acoustical Society of America*, Melville, v. 148, p. 2885-2893, 2020. Disponível em: <https://pubs.aip.org/asa/jasa/article/148/5/2885/631772/How-loud-is-the-underwater-noise-from-operating>. Acesso em: 4 mar. 2025.

TRINDER, M.; O'BRIEN, S.; DEIMEL, J. A new method for quantifying redistribution of seabirds within operational offshore wind farms finds no evidence of within-wind farm displacement. *Frontiers in Marine Science*, Lausanne, v. 11, 2024. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2024.1235061/full>. Acesso em: 4 mar. 2025.

VASCONCELOS, R. M. *et al.* Environmental licensing for offshore wind farms: guidelines and policy implications for new markets. *Energy Policy*, Amsterdam, v. 171, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421522004670?via%3DiHu>. Acesso em: 4 mar. 2025.

WAIDELICH, P.; STEFFEN, B. Renewable energy financing by state investment banks: evidence from OECD countries. *Energy Economics*, Amsterdam, v. 132, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988324001634?via%3DiHub>. Acesso em: 4 mar. 2025.

WANG, C. *et al.* A systematic review on power system resilience from the perspective of generation, network, and load. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Amsterdam, v. 167, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032122004658?via%3DiHu>. Acesso em: 4 mar. 2025.

WEF – WORLD ECONOMIC FORUM. *Financing the transition to a net-zero future: innovative financing for a sustainable future*. Cologny: World Economic Forum, 2021. Disponível em: <https://www.weforum.org/publications/financing-the-transition-to-a-net-zero-future/>. Acesso em: 4 mar. 2025.

WFO – WORLD FORUM OFFSHORE WIND. *Financing offshore wind*. Hamburg: WFO, 2022. Disponível em: https://wfo-global.org/wp-content/uploads/2022/09/WFO_FinancingOffshoreWind_2022.pdf. Acesso em: 5 mar. 2025.

WORLD BANK. *Going global: expanding offshore wind to emerging markets*. Washington, D.C.: World Bank, 2019. Disponível em: <https://www.esmap.org/going-global-offshore-wind>. Acesso em: 5 mai. 2025.

WORLD BANK. *Key factors for successful development of offshore wind in emerging markets*. Washington, D.C.: World Bank, 2021. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/343861632842395836/pdf/Key-Factors-for-Successful-Development-of-Offshore-Wind-in-Emerging-Markets.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2025.

WORLD BANK. *Scenarios for offshore wind development in Brazil*. Washington, D.C.: World Bank, 2024a. Disponível em: https://www.esmap.org/Offshore-Wind_Development_Program_Scenarios_for_Offshore_Wind_Development_in_Brazil. Acesso em: 5 mar. 2025.

WORLD BANK. *Integrated environmental and social sensitivity mapping: guidance for early offshore wind spatial planning*. Washington, D.C.: World Bank, 2024b. Disponível em: https://www.esmap.org/Integrated_Environmental_Social_Sensitivity_Mapping. Acesso em: 5 mar. 2025.

YU, T.; WAGNER, N. Diurnal variation of onshore wind speed near a coastline. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Boston, v. 9, n. 5, p. 760-766, 1970. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/9/5/1520-0450_1970_009_0760_dvoows_2_0_co_2.xml. Acesso em: 5 mar. 2025.