



Offshore Wind Development Program

Cenários para o Desenvolvimento de Eólica Offshore no Brasil





FUNDED BY:



© 2024 Julho | International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank

1818 H Street NW, Washington, DC 20433

Telefone: 202-473-1000; Internet: www.worldbank.org

Alguns direitos reservados

Este trabalho é um produto do Banco Mundial com contribuições dadas pelos funcionários e consultores listados nos Agradecimentos. As constatações, interpretações e conclusões expressas neste trabalho não refletem necessariamente as opiniões do Banco Mundial, do seu Conselho de Diretores Executivos ou dos governos que eles representam. O Banco Mundial não garante a exatidão dos dados incluídos neste trabalho. Os limites, cores, denominações e outras informações mostradas em qualquer mapa deste trabalho não implicam qualquer julgamento por parte do Banco Mundial sobre o status legal de qualquer território ou o endosso ou aceitação de tais limites. Nada aqui contido constituirá ou será considerado uma limitação ou renúncia aos privilégios e imunidades do Banco Mundial, todos especificamente reservados.

DIREITOS E PERMISSÕES

Atribuição — Cite o trabalho da seguinte forma: Banco Mundial. 2024. Cenários para o Desenvolvimento de Eólica Offshore no Brasil. Banco Mundial, Washington, DC. Licença: Creative Commons Atribuição CC BY 3.0 IGO.

Traduções — Se você criar uma tradução deste trabalho, adicione o seguinte aviso junto com a atribuição: Esta tradução não foi criada pelo Banco Mundial e não deve ser considerada uma tradução oficial do Banco Mundial. O Banco Mundial não será responsável por qualquer conteúdo ou erro nesta tradução.

Adaptações — Se você criar uma adaptação deste trabalho, adicione o seguinte aviso junto com a atribuição: Esta é uma adaptação de um trabalho original do Banco Mundial. Pontos de vista e opiniões expressas na adaptação são de responsabilidade exclusiva do autor ou autores da adaptação e não é endossada pelo Banco Mundial.

Conteúdo de terceiros – O Banco Mundial não é necessariamente proprietário de cada componente do conteúdo contido neste trabalho. O Banco Mundial, portanto, não garante que o uso de qualquer componente individual de propriedade de terceiros ou parte contida no trabalho não infringirá os direitos desses terceiros.

O risco de reclamações resultantes de tal infração é exclusivamente seu. Se desejar reutilizar um componente da obra, é sua responsabilidade determinar se é necessária permissão para essa reutilização e obter permissão do proprietário dos direitos autorais. Exemplos de componentes podem incluir, entre outros, tabelas, figuras ou imagens.

Todas as dúvidas sobre direitos e licenças devem ser dirigidas a Publicações do Banco Mundial, The World Bank Group, 1818 H Street NW, Washington, DC 20433, EUA; e-mail: pubrights@worldbank.org.

CRÉDITOS DE PRODUÇÃO

Editor de cópia | HUE Communications LLC

Designer | HUE Communications LLC

Imagens | Vestas Wind Systems A/S, Ørsted

Todas as imagens permanecem propriedade exclusiva de sua fonte e não podem ser usadas para qualquer propósito sem permissão por escrito da fonte.

AGRADECIMENTOS

Este relatório faz parte da Prática de Energia e Extrativismo da região da América Latina e Caribe, do Banco Mundial (BM), e também da série de estudos de *roadmap* sobre energia eólica *offshore* encomendados pelo Grupo Banco Mundial (GBM) no âmbito de seu Programa de Desenvolvimento da Energia Eólica Offshore /1/, financiado e liderado pelo Programa de Assistência à Gestão do Setor de Energia (ESMAP) em parceria com a Corporação Financeira Internacional (IFC), o braço do setor privado do GBM.

Este estudo foi executado pela DNV com a colaboração de especialistas da Vieira Regende Advogados e da Magalhães, Reis e Figueiró Advogados. Além disso, a empresa The Biodiversity Consultancy contribuiu com uma avaliação da biodiversidade em nível nacional.

O relatório foi supervisionado por Sean Whittaker (especialista principal em Indústria, IFC); Rebeca Doctors e Michael Peter Wilson (especialistas em Energia, BM); e Carolina de Mas Serrat (assessora de Energia Eólica Offshore, BM). Também foram feitas contribuições por Pernille Skyt (assessora de Energia Eólica Offshore, BM), Carlos Costa (economista sênior de Energia, BM), Pierre Audinet (especialista líder em Energia, BM) e Christopher John Lloyd (assessor de Energia Eólica Offshore, BM). Agradecemos também a Guido Couto Penido Guimarães (consultor em energia, BM) e a Felipe Sgarbi (especialista sênior em energia, BM) pela contribuição na revisão do relatório.

A revisão por pares foi realizada por Ana Fontes (diretora de Investimentos, IFC), Patricia Marcos Huidobro (especialista sênior em Mudanças Climáticas, BM), Claudia Ines Vasquez (especialista líder em Energia, BM) e Jari Vayrynen (especialista sênior em Energia, BM). Somos gratos por seu tempo e seu *feedback*.

Também expressamos nossa profunda gratidão ao Ministério de Minas e Energia (MME) e à Empresa de Pesquisa Energética (EPE) por sua colaboração neste projeto. Gostaríamos de agradecer em particular a Mariana de Assis Espécie (Assessora do Ministro, MME), Karina Araujo Sousa (Diretora do Departamento de Transição Energética, MME), Patricia Naccache Martins da Costa (Coordenadora-geral de Energias e Tecnologias de Baixo Carbono e Inovação, MME), Natália Hoffmann Ramos (Coordenadora de acompanhamento tecnológico e regulatório, MME), Alexandre da Costa Pereira (Especialista de Infraestrutura, MME), Gustavo Pires da Ponte (Consultor Técnico, EPE), Amanda Vinhoça (Analista de Pesquisa Energética, EPE), Nathália Tavares (Analista de Pesquisa Energética, EPE), Helena Portugal Goncalves da Motta (Analista de Pesquisa Energética, EPE), Andre Makishi (Analista de Pesquisa Energética, EPE), Marcos Vinicius G. da Silva Farinha (Superintendente Adjunto, EPE), Veronica S. M. Gomes (Analista de Pesquisa Energética, EPE), Daniel Dias Loureiro (Analista de Pesquisa Energética, EPE), Robson O. Matos (Analista de Pesquisa Energética, EPE).

Além disso, agradecemos todas as muitas partes interessadas que nos deram *feedback* durante o processo de consultas do relatório, entre as quais o BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social); o Ibama (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis); a Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica); a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis); o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico); o MMA (Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima); o MPA (Ministério da Pesca e Aquicultura); o IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás); a ABH2 (Associação Brasileira do Hidrogênio); o Porto do Pecém; e o Porto do Açu. Agradecemos igualmente às empresas Equinor, TotalEnergies, Corio, Copenhagen Offshore Partners (COP), Neoenergia, Corio Generation, Vestas, EDF Renewables e Petrobras, entre outras, por sua participação nas consultas com o setor energético. Agradecemos calorosamente a Elbia Gannoum, Matheus Noronha e Juliana Lima da ABEEólica por seu imenso apoio durante a elaboração deste relatório.

Gostaríamos, ademais, de reconhecer os esforços da equipe mais ampla da DNV e de seus escritórios em Porto Alegre e no Rio de Janeiro por sua dedicação e entusiasmo. Em particular, gostaríamos de apresentar nossos agradecimentos calorosos a Daniela Ribeiro (engenheira principal, DNV); Thiago Coriolano (engenheiro de Energia Eólica Offshore, DNV); Tcharles Coutinho Hilbig (gerente de Mercado, Brasil, DNV); e Unai Otaçua (chefe da Seção de Engenharia de Projetos, Sul da Europa, América Latina, Oriente Médio e África, DNV) por terem capitaneado a elaboração do projeto. Também somos muito gratos a toda a equipe da DNV que trabalhou na elaboração deste relatório detalhado: Juan Morales (SIG); Carlos Ramallo (SIG); Luca Lisciotta (engenheiro ambiental); Juan Portillo (engenheiro de Energia Eólica Offshore); Marta Gonzalez (líder técnica de Energia Eólica Offshore); Ari Biggart (engenheiro de Projetos Offshore); Leonardo Barriatto (engenheiro sênior; desenvolvedor de Projetos); Miguel Morgado Pereira (especialista em Redes Elétricas); André Pauferro (engenheiro sênior de Offshore e DM); Gutyerre Saldanha (analista de Conteúdo Local); Mariana Bardy (diretora sênior para Gerenciamento de Riscos de SSMA); Eduardo Bolonhez (consultor para Mercados de Energia); Andrea Ximena (consultora para Mercados de Energia); e Makenzie Sheerer (engenheira analítica). Nosso caloroso agradecimento também a Thiago da Silva (Vieira Rezende Advogados) e Gerusa Magalhães (Magalhães, Reis e Figueiró Advogados) por seu apoio na revisão das seções sobre licenciamento e questões regulatórias.

O relatório foi produzido sob a orientação de Maria Marcela Silva (Diretora Regional para a América Latina e Caribe, BM), Johannes Zutt (Diretor do Banco Mundial no Brasil, BM), Demetrios Papathanasiou (Diretor Global, BM), Gabriela Elizondo Azuela (Gerente de Prática para a América Latina e Caribe, BM), Chandrasekar Govindarajalu (Gerente de Prática do ESMAP, BM) e Luis Alberto Andres (Líder do Setor de Infraestrutura, BM).

Por fim, agradecemos aos doadores do ESMAP por sua participação neste estudo.

CENÁRIOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE EÓLICA OFFSHORE NO BRASIL



1 RESUMO EXECUTIVO

O Brasil dispõe de abundantes recursos naturais, que ajudam o país a satisfazer sua demanda energética. Graças a uma base energética tradicionalmente hídrica e ao desenvolvimento mais recente dos segmentos solar e eólico *onshore*, o Brasil desfruta de uma das matrizes de geração mais limpas e competitivas em termos de custos do planeta. Além disso, os recursos eólicos *offshore* do Brasil estão entre os melhores do mundo, com um potencial técnico de mais de 1.200 gigawatts (GW), incluindo 480 GW de potencial de fundação fixa (em profundidades inferiores a 70 M) e 748 GW de potencial de fundação flutuante (em profundidades de 70 m a 1.000 m)¹. Esses recursos eólicos *offshore* são robustos, consistentes, geograficamente diversificados e localizados em áreas próximas aos centros de demanda: todos esses fatores indicam que, no longo prazo, a energia eólica *offshore* pode ter um papel de destaque na matriz energética brasileira. Contudo, vale lembrar que os primeiros projetos eólicos *offshore* terão um custo de geração mais elevado que os projetos *onshore* e exigirão uma expansão significativa das capacidades nacionais se o Brasil quiser competir com mercados estabelecidos na Europa, ou mesmo com novos mercados no continente americano.

Isso levanta uma pergunta óbvia: por que o Brasil buscaria desenvolver energia eólica *offshore* em escala quando já tem tantas outras opções? A resposta será, em última instância, fornecida por formuladores de políticas públicas e partes interessadas empenhados em traçar uma rota de longo prazo para as necessidades energéticas do Brasil e, ao mesmo tempo, cumprir objetivos de mitigação climática, segurança energética, modicidade tarifária e desenvolvimento econômico. Este relatório sobre cenários para a energia eólica *offshore* no Brasil tem, como objetivo, embasar essa decisão, descrevendo os desafios e oportunidades associados a diferentes rotas de desenvolvimento da energia eólica *offshore* a partir de perspectivas técnicas, comerciais, econômicas, ambientais e sociais. O relatório não defende uma rota em detrimento de outra; em vez disso, apresenta uma visão do futuro com base em diferentes cenários de expansão e descreve o que seria necessário para tornar cada cenário uma realidade, conforme o caminho escolhido.

Este relatório foi elaborado com o objetivo de apoiar o governo brasileiro na definição de políticas públicas para sua transição energética a partir de uma análise do desenvolvimento da energia eólica *offshore*. O trabalho foi capitaneado pelo Banco Mundial (BM)² e pela Corporação Financeira Internacional (IFC) sob a égide do Programa de Desenvolvimento da Energia Eólica *Offshore* do Grupo Banco Mundial, em colaboração com o Ministério de Minas e Energia do Brasil (MME) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Fundado em 2019, o Programa de Desenvolvimento da Energia Eólica *Offshore* do Grupo Banco Mundial tem, como objetivo, acelerar o desenvolvimento do segmento eólico *offshore* em mercados emergentes. Este relatório foi financiado pelo Programa de Assistência à Gestão do Setor de Energia (ESMAP) e pelo Programa de Economia Azul (PROBLUE) do Grupo Banco Mundial.

1 Grupo Banco Mundial (2020). *Offshore Wind Technical Potential in Brazil*.

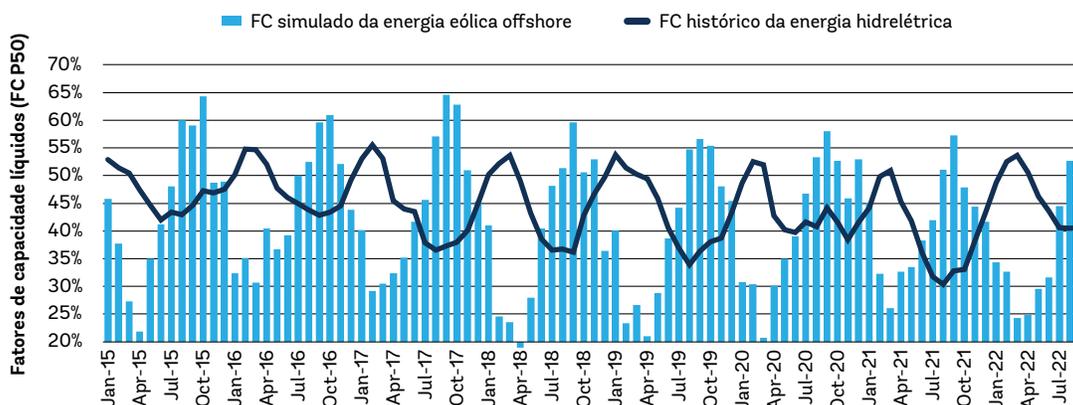
2 https://www.esmap.org/esmap_offshore-wind.

JUSTIFICATIVA PARA A ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NO BRASIL

Há uma série de razões pelas quais o Brasil pode querer fomentar o desenvolvimento da energia eólica *offshore* em grande escala.

Energia eólica *offshore* como “a nova energia hidrelétrica do Brasil”. Embora, atualmente, a energia hidrelétrica satisfaça 72% da demanda brasileira de eletricidade, certas projeções indicam que a capacidade líquida de geração hidrelétrica não terá uma expansão significativa nos próximos 25 anos. Considerando as expectativas de crescimento populacional e de aumento da demanda, a contribuição da energia hidrelétrica para a rede deve cair para 46% até 2050³. A energia eólica *offshore* — paralelamente à energia solar e à energia eólica *onshore* — constitui uma opção interessante não apenas para preencher essa lacuna, mas também para servir como atenuante da variabilidade interanual da energia hidrelétrica. A análise apresentada neste relatório indica que a energia eólica *offshore* tem um caráter especial de complementaridade à energia hídrica, uma vez que é contracíclica numa base sazonal e tem menor variabilidade interanual. A figura 1.1 compara a produção real de energia hidrelétrica com a produção simulada de energia eólica *offshore* durante um período de sete anos, indicando que a produção eólica *offshore* seria maior nos meses em que os níveis hídricos estivessem mais baixos. Segundo a análise, a variabilidade anual da energia eólica *offshore* seria significativamente inferior à da energia hidrelétrica em grande parte do país. Logo, se implementada em grande escala, a energia eólica *offshore* pode oferecer uma “proteção energética” para anos com secas inusitadas, como foi observado, por exemplo, na última década. Nesses casos, a energia eólica *offshore* pode ocupar seu lugar ao lado da energia hidrelétrica como parte intrínseca da base de geração limpa do país.

FIGURA 1.1 FATORES DE CAPACIDADE MENSAIS (2015–2022) DE ENERGIA HIDRELÉTRICA E ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NO BRASIL



Fonte: DNV.

Custos competitivos e preços estáveis no longo prazo. Atualmente, nos mercados mais desenvolvidos, como a Europa e a China, a eólica *offshore* é uma das fontes de nova geração mais competitivas em termos de custos. Contudo, em novos mercados como o brasileiro, a expectativa é que o custo inicial dos primeiros projetos seja significativamente mais alto. A análise apresentada neste relatório indica que, com metas de alto volume e condições apropriadas, o custo da energia eólica *offshore* poderia cair de US\$ 64 [R\$ 344]⁴ por MWh (valor dos primeiros projetos, cerca de 50% acima dos preços das energias solar e eólica *onshore*) para uma faixa de US\$ 52 [R\$ 279] a US\$ 40 [R\$ 215] por MWh até 2050. Nesse

³ Cenário de atividades normais (*business as usual*) do CCDR, com base no Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2031.

⁴ Conforme a taxa de conversão cambial de 12 de junho de 2024: US\$ 1 = R\$ 5,37.

patamar, a energia eólica *offshore* já seria competitiva com formas de geração mais convencionais. Essa situação não é diferente do caso histórico da energia eólica *onshore* no Brasil, que foi lançada por meio do Proinfa há 20 anos e é, atualmente, uma das maiores e mais econômicas fontes de geração elétrica do país (com capacidade instalada de 30 GW em 2024)⁵. Vale ressaltar que há uma expectativa de variações regionais nos custos da energia eólica *offshore*, com tarifas mais baratas na região Nordeste, onde se encontram os ventos mais rápidos do Brasil.

Geração próxima à demanda para reduzir perdas na transmissão. Os recursos eólicos *offshore* mais favoráveis do Brasil estão localizados relativamente perto do litoral e tendem a se agrupar em torno de grandes centros populacionais. Conforme ilustra a figura 1.2, as principais zonas eólicas *offshore* das regiões Nordeste, Sudeste e Sul estão próximas a grandes cidades, como Rio de Janeiro, Fortaleza e Porto Alegre. Instalar a produção em área próxima à demanda pode, em princípio, reduzir perdas na transmissão, desde que seja mantido um equilíbrio regional adequado entre a oferta e a demanda. Vale notar que volumes mais altos de energia eólica *offshore* podem levar a congestionamentos em nível local se a demanda não for suficientemente elevada ou se a capacidade de evacuação for insuficiente. Isso poderia ser mitigado em nível local por meio de maior capacidade de armazenamento ou de um aumento na demanda (por exemplo, produção de hidrogênio verde (H₂V)).

FIGURA 1.2 PROXIMIDADE ENTRE AS ZONAS EÓLICAS OFFSHORE E A POPULAÇÃO



Energia eólica *offshore* como base para a produção de H₂V. O Brasil anunciou metas ambiciosas para a produção de hidrogênio de baixo carbono, com foco em grandes portos, como Pecém e Açu, que podem atender os mercados doméstico e internacional com a criação de *hubs* de hidrogênio. Para poder participar dos mercados internacionais de H₂V de forma competitiva, o Brasil precisará ampliar substancialmente seu setor de energias renováveis, especialmente diante da baixa expectativa de expansão da geração hidrelétrica e das limitações enfrentadas pelos segmentos solar e eólico *onshore*. A análise contida neste relatório indica que, para atender a 5% da demanda global de H₂V até 2050, serão necessários cerca de 100 GW de novas energias renováveis. A energia eólica *offshore* pode satisfazer uma parte significativa dessa demanda, especialmente se for instalada perto de centros designados para a produção de H₂V.

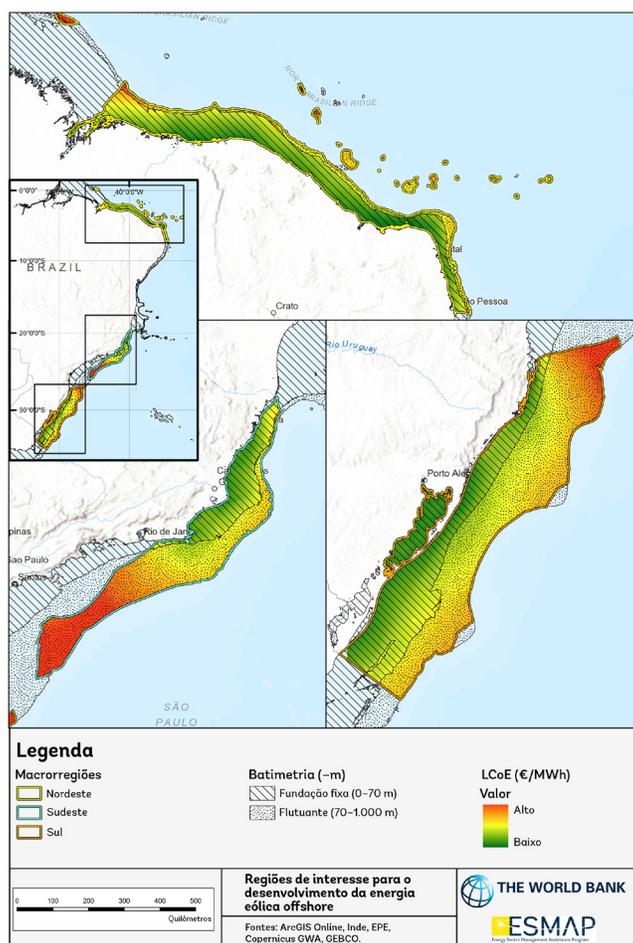
5 Relatório Global de Energia Eólica 2024 do Conselho Global de Energia Eólica (GWEC).

Desenvolvimento econômico e geração de empregos. O Brasil tem um longo histórico de produção *offshore* de petróleo e gás e de geração em grande escala de energia eólica *onshore*. Esses setores constituem pontos de partida úteis para o desenvolvimento da energia eólica *offshore*, considerando a infraestrutura existente, a cadeia de suprimentos e os recursos humanos. Em grande parte da Europa, a indústria de geração eólica *offshore* começou com uma base semelhante há menos de 20 anos. Segundo a análise apresentada neste relatório, o Brasil poderia, no cenário mais ambicioso de desenvolvimento da energia eólica *offshore*, criar mais de 516 mil empregos equivalentes em tempo integral (ETI) até 2050, com um valor agregado bruto (VAB) de US\$ 168 bilhões [R\$ 902 bilhões].

POTENCIAL DA ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NO BRASIL

Com base numa análise geoespacial preliminar, este relatório identificou três macrorregiões de possível desenvolvimento *offshore* dentro da Zona Econômica Exclusiva do Brasil. A figura 1.3 apresenta o custo nivelado de energia (LCoE) relativo de cada macrorregião, refletindo as despesas de capital relativas previstas (Capex, em função da distância da costa e da profundidade da água), as despesas operacionais (Opex, em grande parte como função da distância da costa) e produção de energia (em função da velocidade do vento). É claro que cada macrorregião representa um potencial significativo, embora com diferentes níveis de atratividade do ponto de vista de preços.

FIGURA 1.3 LCOE RELATIVO EM TRÊS ÁREAS DESIGNADAS



Nordeste. A região Nordeste apresenta uma das melhores condições de vento *offshore* no Brasil, com velocidades médias de 7 m/s a 10 m/s a 100 m de altitude⁶ em águas rasas relativamente próximas à costa. O potencial total é de 356 GW numa área de leito marinho tecnicamente viável de 89 mil km². Várias das zonas mais favoráveis estão próximas ao Porto do Pecém; essas zonas seriam adequadas para o desenvolvimento de projetos eólicos *offshore* com melhorias de mínimas a moderadas. No entanto, há importantes áreas de pesca artesanal e comercial nas proximidades dessas zonas, bem como atividades turísticas significativas. Logo, há uma expectativa de sensibilidades sociais elevadas, o que exigiria uma consideração cuidadosa.

Sudeste. A região Sudeste tem um bom potencial para a produção de energia eólica com fundação fixa ou flutuante, com ventos médios de 8 m/s e um potencial total de 340 GW numa área de leito marinho de 85 mil km². A região também abriga atividades consideráveis de petróleo e gás concentradas em águas mais profundas, o que representa tanto uma oportunidade para a energia eólica *offshore* (por meio da utilização da infraestrutura existente) quanto um desafio (coexistência com plataformas). A área também registra um tráfego marítimo relativamente intenso, o que exigiria um planejamento cuidadoso para evitar interferências indevidas nas principais rotas marítimas.

Sul. A região Sul é a que tem a maior extensão de leito marinho (165 mil km²), com boas velocidades de vento (acima de 8 m/s) em águas rasas próximas aos principais centros de demanda industrial. Além disso, apresenta o maior potencial técnico de todas as três áreas (660 GW). No entanto, a região está localizada quase inteiramente dentro de uma área marinha ecológica ou biologicamente significativa (EBSA, na sigla em inglês), o que aumenta a necessidade de mitigação de riscos e de designação cuidadosa das zonas de desenvolvimento.

Não há dúvidas de que o Brasil apresenta suficiente potencial técnico (em termos de área e recursos eólicos) para o desenvolvimento da energia eólica *offshore* em grande escala. Como próximo passo, é necessário refinar o potencial comercial relacionado às restrições e exclusões que limitam as áreas passíveis de desenvolvimento, tais como: restrições sociais (por exemplo, turismo e pesca), restrições ambientais (ou seja, minimização dos impactos sobre a biodiversidade sensível) e restrições comerciais (ou seja, áreas em que o LCoE resultante seria tão elevado a ponto de inviabilizar os projetos). Este relatório inclui análises para embasar o exame dessas restrições por meio de um Planejamento Espacial Marinho (PEM) pragmático, ou de um planejamento espacial setorial direcionado, o que é necessário para designar polígonos específicos para o desenvolvimento da energia eólica *offshore*. Como tal, não especifica áreas “permitidas” e “proibidas”; em vez disso, apresenta um mapeamento dos riscos e sensibilidades a partir de perspectivas ambientais, sociais e comerciais.

6 Acima do nível do mar.

CENÁRIOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA ENERGIA EÓLICA OFFSHORE

A análise que sustenta este relatório é baseada em três cenários potenciais para o desenvolvimento da energia eólica *offshore* no Brasil. Os impactos mais notáveis dos três cenários estão resumidos na figura 1.4.

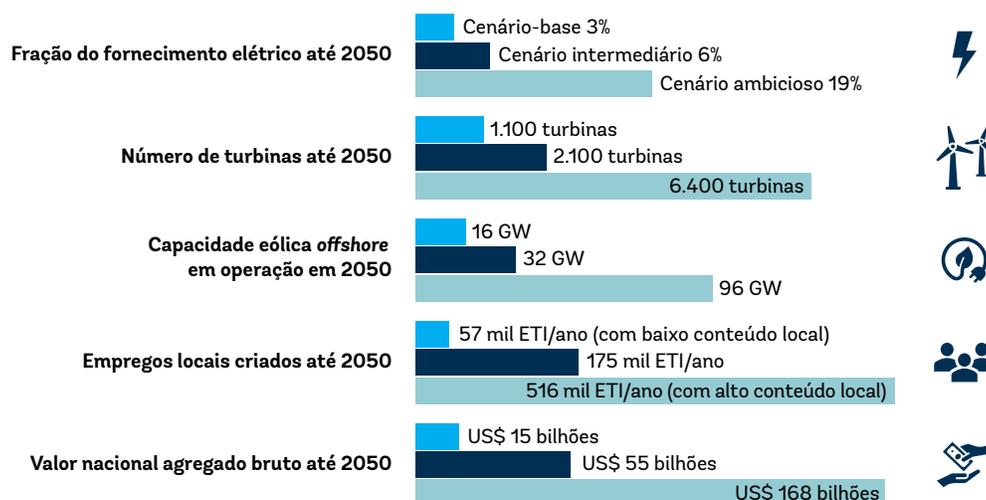
1. Cenário-base. Este cenário considera uma expansão modesta da energia eólica *offshore* em linha com as projeções do Roadmap Eólica *Offshore* da EPE, que projeta 4 GW operacionais em 2035 e 16 GW até 2050, quando a energia eólica *offshore* já representaria 3% da geração total projetada para o país. Isso significa um investimento de US\$ 40 bilhões [R\$ 215 bilhões] até 2050 e uma taxa média de instalação de pouco menos de 1 GW ao ano. Dada a extensa linha costeira do Brasil, isso equivaleria ao uso de apenas 1,2% do leito marinho disponível. Considerando a distribuição dos recursos eólicos, é provável que a maior parte desse desenvolvimento ocorra na região Nordeste, embora isso dependa de restrições relacionadas ao turismo, à pesca e à capacidade de evacuação da rede. É improvável que os níveis modestos de expansão desencadeiem investimentos significativos em infraestrutura associada (portos, navios e rede elétrica) e na indústria manufatureira (turbinas, fundações, cablagem, balanço da usina [*balance of plant*] etc.). Neste cenário, o desenvolvimento da energia eólica *offshore* seria ofuscado pelo desenvolvimento da energia solar e da energia eólica *onshore*, bem como pela produção hidrelétrica e termelétrica existente.

Os cenários 2 (intermediário) e 3 (ambicioso) não foram definidos (e tampouco testados) por meio da modelagem do sistema energético, o que é algo recomendado para o futuro. Eles se baseiam em premissas gerais sobre a capacidade eólica *offshore* necessária para descarbonizar a economia brasileira e gerar as emissões líquidas de carbono.

2. Intermediário. Este cenário de expansão moderada considera um futuro no qual a energia eólica *offshore* começará a desempenhar um papel importante na matriz elétrica do Brasil, com 8 GW em capacidade instalada até 2035 e 32 GW até 2050, quando representaria 6% da capacidade total de geração do país. Neste cenário, a energia eólica *offshore* ocupa apenas 2,3% do leito marinho tecnicamente viável. A capacidade instalada seria distribuída de forma mais uniforme nas três macrorregiões, provavelmente impulsionada por melhorias na transmissão que facilitassem a evacuação para os principais centros de demanda e reformas portuárias que permitissem tanto a construção/triagem quanto a operação e manutenção das instalações. Esses investimentos são justificados pela implantação, em ritmo regular, de 1,8 GW ao ano de projetos com um Capex total de US\$ 80 bilhões [R\$ 430 bilhões].

3. Ambicioso. Este cenário considera um futuro no qual a energia eólica *offshore* seria um elemento importante para a matriz elétrica brasileira, respondendo por quase um quinto da geração total do país até 2050, com 96 GW de capacidade instalada. Neste caso, a energia eólica *offshore* torna-se uma presença constante ao longo da costa nas três macrorregiões, ocupando 7,1% do leito marinho tecnicamente viável. Este cenário foi concebido com o objetivo de colocar o Brasil como liderança importante no desenvolvimento da energia eólica *offshore* e considera a necessidade de uma maior capacidade *offshore* para atingir as metas de eletrificação e descarbonização industrial, especialmente as necessidades de energia renovável para a demanda prevista de H₂V até 2050. Este cenário exigiria um investimento total de US\$ 240 bilhões [R\$ 1,289 trilhão] e uma taxa média de instalação de 5,3 GW ao ano, o que seria uma taxa de crescimento muito maior que a de qualquer país atualmente, com exceção da China. Como referência, em 2022, apenas 2.460 MW de energia eólica *offshore* foram instalados em toda a Europa (bem atrás da China, com 5 GW). Adições anuais de 5,3 GW exigiriam — e impulsionariam — atualizações substanciais nas infraestruturas existentes e novas adições para a capacidade de produção, resultando em US\$ 168 bilhões [R\$ 902 bilhões] de valor agregado bruto acumulado e 6 milhões de anos ETI acumulados de 2028 a 2050.

FIGURA 1.4 IMPACTOS DOS TRÊS CENÁRIOS



DESAFIOS E OPORTUNIDADES DA ENERGIA EÓLICA OFFSHORE

Este relatório demonstra que a energia eólica *offshore* pode desempenhar um papel importante no futuro da energia no Brasil. Contudo, vários desafios importantes podem afetar a natureza desse desenvolvimento, em função da rota que o país selecionar.

Alto custo inicial. Sem dúvida, os primeiros projetos eólicos *offshore* terão um custo inicial relativamente elevado, pois a indústria precisará criar as bases para o setor e “aprender fazendo”. Para eliminar essa lacuna de custos, o Brasil terá de explorar opções de financiamento concessional — tanto do setor público quanto do setor privado. Terá, também, de garantir que os direitos iniciais sobre os leitos marinhos sejam atribuídos principalmente com base em critérios qualitativos, e não baseados em preços, o que acabaria por inflacionar os custos do projeto. A expectativa é que os custos permaneçam altos no cenário 1 (base), ao passo que, no cenário 3 (ambicioso), seria observada uma rápida queda no LCoE.

Acesso a financiamento. O Brasil desenvolveu sua atual indústria eólica *onshore* principalmente graças ao papel robusto desempenhado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). A indústria eólica *offshore* é diferente da indústria eólica *onshore* no caso de implantação em grande escala; isto é, trata-se de um setor que faz um uso muito mais intensivo de capital e exige estruturas financeiras complexas, além do envolvimento de muitos atores de instituições financeiras públicas e privadas. No âmbito do cenário 1 (base), o BNDES deve manter seu papel de liderança, dados os modestos requisitos de Capex. No cenário 3 (ambicioso), a expectativa é que bancos comerciais e instituições financeiras internacionais assumam a liderança (mais que uma expectativa, uma necessidade).

Aquisições. Tradicionalmente, o Brasil obtém sua energia mediante leilões regulamentados, tecnologicamente neutros, baseados em metas anuais, bem como — mais recentemente — acordos bilaterais de compra e venda de energia (PPAs, na sigla em inglês). O alto custo inicial dos primeiros projetos eólicos *offshore* pode exigir uma abordagem modificada, na qual a energia eólica *offshore* receba uma alocação específica, com o delta de custos coberto pelos contribuintes e, na medida do possível, por financiamento concessional. A expectativa é que os leilões possam mudar dentro de alguns anos, passando a depender menos de mecanismos de financiamento e mais do mercado livre para vendas de energia. No cenário 3 (ambicioso) e em processos de aquisição regulares, a expectativa é que o delta se reduza rapidamente.

Integração à rede. Segundo as experiências de outros países, um desenvolvimento significativo da energia eólica *offshore* pode levar a congestionamentos (sobrecargas ou problemas de excursão de potência) em nível local se o sistema estiver conectado a redes de transmissão com potencial de evacuação limitado. A complementaridade entre a energia eólica *offshore* e as energias renováveis *onshore* e hidrelétrica teria um impacto na evacuação de energia, embora de forma menos pronunciada em certas regiões. Em níveis mais altos de penetração dessa fonte, como os previstos nos cenários 2 (intermediário) e 3 (ambicioso), é provável que sejam necessárias obras de modernização do sistema de transmissão. Também seria importante considerar uma maior flexibilidade da rede por meio de armazenamento local de energia para gerir o excesso e a suboferta no curto prazo. O aumento da demanda por H₂V e da produção de eletrocombustíveis (ou e-combustíveis) também pode ajudar a reduzir os impactos na rede.

Considerações ambientais e sociais. As considerações ambientais e sociais (A&S) relacionadas à energia eólica *offshore* são diferentes daquelas da energia eólica *onshore* em termos de receptores e populações afetadas, que, no caso da energia eólica *offshore*, incluem a pesca, o tráfego marítimo e outros usos do mar. A pressão sobre a biodiversidade marinha, especialmente a avifauna, os mamíferos marinhos e as tartarugas, pode aumentar com o crescimento do tráfego marítimo. No cenário 1 (base), os impactos seriam relativamente baixos, dado o uso limitado do leito marinho disponível. No cenário 2 (intermediário), os impactos seriam maiores, principalmente se o desenvolvimento se estender rumo ao Sul, pois o potencial de energia eólica *offshore* encontra-se, quase em sua totalidade, numa área marinha ecológica ou biologicamente significativa (EBSA). No cenário 3 (ambicioso), o uso do leito marinho (7,1%) seria suficientemente alto para gerar preocupações mais altas com sensibilidades socioambientais. Nesses casos, será fundamental alinhar os requisitos de estudos de impacto ambiental e social (EIAS) às Normas de Desempenho do Banco Mundial e da IFC e realizar consultas iniciais com as comunidades afetadas. Recomenda-se, também, a realização de um mapeamento de sensibilidade ambiental e social para embasar e complementar os processos de planejamento espacial.

Portos e logística. O Brasil dispõe de uma infraestrutura portuária robusta, incluindo terminais e estaleiros ao longo de todo o litoral. No entanto, atualmente, nenhum desses portos é capaz de satisfazer as exigências de um projeto eólico *offshore*, principalmente do ponto de vista de construção e triagem (*marshalling*). No âmbito do cenário 1 (base), a necessidade de desenvolvimento portuário seria limitada, pois a escala de expansão e o Capex não seriam suficientes para fomentar esses investimentos. No entanto, no cenário 2 (intermediário), seriam necessários investimentos nos principais portos regionais identificados nas três macrorregiões (por exemplo, Pecém, Açu e Rio Grande), que precisam de melhorias na capacidade de carga e na área de armazenamento do cais, tanto para movimentação de carga quanto para atividades de triagem.

Cadeia de suprimentos. O Brasil desenvolveu uma cadeia de suprimentos robusta para a energia eólica *onshore* (em geral, turbinas de 3 MW a 6 MW), mas seria necessário um investimento significativo para o fornecimento das turbinas maiores usadas para a geração de energia eólica *offshore* (15 MW+). No cenário 1 (base), é improvável que isso ocorra, pois os volumes das novas usinas eólicas *offshore* seriam insuficientes para justificar o aumento da capacidade de fabricação. No cenário 3 (ambicioso), haveria uma mudança substancial na cadeia de suprimentos, pois os fabricantes ampliariam a produção de turbinas maiores e aumentariam sua presença em áreas próximas à infraestrutura portuária, já que muitos componentes da geração eólica *offshore* não podem ser transportados por via terrestre. Para viabilizar esse processo, será necessário estabelecer

um plano de ação para a cadeia de suprimentos mediante diálogos com a indústria. Recomenda-se que, inicialmente, sejam adotados requisitos limitados de conteúdo local (explícitos ou por meio de financiamento preferencial do BNDES para fabricantes qualificados), pois isso poderia elevar o preço dos primeiros projetos. À medida que o setor se consolidar, os incentivos ao conteúdo local podem ser aumentados.

H₂V. Com sua base predominantemente hidrelétrica, o Brasil está numa boa posição para se tornar um líder na produção de H₂V (especialmente considerando o mercado europeu, onde diretrizes recentes estabelecem que pelo menos 90% da matriz deva ser de energia renovável para que a produção de hidrogênio seja considerada “verde”). A energia eólica *offshore* pode contribuir para a realização dessa ambição, desde que seja desenvolvida em escala e seus custos caiam com rapidez suficiente para que o custo nivelado do hidrogênio (LCoH) resultante atinja níveis competitivos. A análise apresentada neste relatório indica que o LCoH baseado na energia eólica *offshore* pode cair para cerca de US\$ 3 [R\$ 16] por kg de H₂ até 2050 (no caso da energia eólica *offshore* com fundação fixa). A viabilidade deste LCoH nos mercados de exportação dependeria dos preços de mercado.

RECOMENDAÇÕES



Conforme descreve o relatório *Fatores-chave* do Grupo Banco Mundial, o primeiro passo crucial em qualquer mercado eólico *offshore* emergente é definir uma estratégia energética clara que sinalize o papel de longo prazo da energia eólica *offshore* no futuro energético do país. Está claro que cada uma das três possíveis rotas representa um resultado bastante diverso para o Brasil. No cenário 1 (base), a energia eólica *offshore* representa uma pequena parcela da matriz energética e não fomenta uma mudança econômica significativa. Por outro lado, o cenário 3 (ambicioso) acarreta uma mudança generalizada dos pontos de vista econômico, comercial, técnico e socioambiental. Ao elaborarem uma estratégia de longo prazo, os formuladores de políticas públicas e as partes interessadas devem considerar o seguinte:

- A energia eólica *offshore* pode ser a “nova energia hidrelétrica do Brasil”, mas somente se atingir escala suficiente, como preveem as metas estabelecidas nos cenários 2 (intermediário) e 3 (ambicioso).
- O Brasil precisará realizar investimentos significativos na expansão de sua rede de transmissão, em sua estrutura portuária e em sua capacidade manufatureira para que possa concretizar os cenários 2 e 3; tais investimentos são requisitos essenciais para o desenvolvimento da energia eólica *offshore*. Nesse sentido, o Brasil poderia concentrar os leilões em múltiplas áreas próximas aos portos designados para permitir o compartilhamento dos custos de investimento e reduzir o LCoE dos projetos numa base regional.
- O Brasil precisará agir rapidamente para aproveitar o interesse atual, especialmente à luz das condições de mercado que estão reduzindo o apetite dos investidores por mercados não essenciais. Os investidores exigirão clareza sobre as rotas para o mercado, incluindo um processo para obter exclusividade dos leitos marinhos e a possibilidade de participar de leilões iniciais específicos para a energia eólica *offshore*.
- Dado o longo cronograma de desenvolvimento da energia eólica *offshore*, o Brasil deve agir rapidamente para concluir o mapeamento das sensibilidades ambientais e sociais e designar as zonas iniciais para o desenvolvimento da energia eólica *offshore*.

Este relatório tem, como objetivo, avaliar o potencial eólico *offshore* e possíveis cenários de expansão dessa fonte no Brasil, por meio de uma visão ampla das capacidades atuais, sinergias potenciais, mudanças necessárias e ações para embasar a tomada de decisões. Ele constitui um primeiro passo para avaliar como a fonte eólica *offshore* poderia se desenvolver no país, suas oportunidades e desafios e, o mais importante, como chegar lá por meio da adoção de um conjunto de 45 recomendações práticas, divididas por tópicos.

O relatório *Cenários de desenvolvimento da energia eólica offshore no Brasil* está estruturado da 1 seguinte forma:

- Resumo do relatório de cenários
 - Seção 1: Resumo executivo
 - Seção 2: Descrição dos três cenários propostos para este estudo e dos desafios e potenciais implicações para o desenvolvimento da energia eólica *offshore* no Brasil
 - Seção 3: Recomendações para o desenvolvimento da energia eólica *offshore* no Brasil
- Informações de apoio
 - Seções 4 a 17: Análise dos principais aspectos do futuro da energia eólica *offshore* no Brasil
- Apêndices
 - Os apêndices de A a G contêm informações de apoio adicionais, tais como mapas, relatórios, análises e metodologias relacionadas à biodiversidade, ao marco regulatório ou ao hidrogênio, entre outros.



FUNDADO POR:



Energy Sector Management Assistance Program
The World Bank

1818 H Street, N.W.
Washington, DC 20433 USA
esmap.org | esmap@worldbank.org