

# OPORTUNIDADES E DESAFIOS PARA GERAÇÃO EÓLICA *OFFSHORE* NO BRASIL E A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO



Confederação Nacional da Indústria  
PELO FUTURO DA INDÚSTRIA



OPORTUNIDADES E  
DESAFIOS PARA GERAÇÃO  
EÓLICA *OFFSHORE* NO  
BRASIL E A PRODUÇÃO  
DE HIDROGÊNIO DE  
BAIXO CARBONO

**CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI**

*Robson Braga de Andrade*

Presidente

**Gabinete da Presidência**

*Teodomiro Braga da Silva*

Chefe do Gabinete - Diretor

**Diretoria de Desenvolvimento Industrial e Economia**

*Lytha Battiston Spíndola*

Diretora

**Diretoria de Relações Institucionais**

*Mônica Messenberg Guimarães*

Diretora

**Diretoria de Serviços Corporativos**

*Fernando Augusto Trivellato*

Diretor

**Diretoria Jurídica**

*Cassio Augusto Muniz Borges*

Diretor

**Diretoria de Comunicação**

*Ana Maria Curado Matta*

Diretora

**Diretoria de Educação e Tecnologia**

*Rafael Esmeraldo Lucchesi Ramacciotti*

Diretor

**Diretoria de Inovação**

*Gianna Cardoso Sagazio*

Diretora

**Superintendência de Compliance e Integridade**

*Oswaldo Borges Rego Filho*

Superintendente

# OPORTUNIDADES E DESAFIOS PARA GERAÇÃO EÓLICA *OFFSHORE* NO BRASIL E A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO



Confederação Nacional da Indústria  
PELO FUTURO DA INDÚSTRIA

© 2023. CNI – Confederação Nacional da Indústria.

Qualquer parte desta obra poderá ser reproduzida, desde que citada a fonte.

CNI

**Gerência Executiva de Meio Ambiente e Sustentabilidade – GEMAS**

---

FICHA CATALOGRÁFICA

---

C748o

Confederação Nacional da Indústria.

Oportunidades e desafios para geração eólica *offshore* no Brasil e a produção de hidrogênio de baixo carbono / Confederação Nacional da Indústria. – Brasília : CNI, 2023.

135 p. : il.

ISBN 978-85-7957-305-7

1.Hidrogênio de Baixo Carbono. 2. Energia Eólica. 3. I. Título.

CDU: 621.548

---

CNI  
Confederação Nacional da Indústria  
**Sede**  
Setor Bancário Norte  
Quadra 1 – Bloco C  
Edifício Roberto Simonsen  
70040-903 – Brasília – DF  
Tel.: (61) 3317-9000  
Fax: (61) 3317-9994  
<http://www.portaldaindustria.com.br/cni/>

**Serviço de Atendimento ao Cliente - SAC**  
Tels.: (61) 3317-9989/3317-9992  
[sac@cni.com.br](mailto:sac@cni.com.br)

# SUMÁRIO

<b>APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>SUMÁRIO EXECUTIVO.....</b>	<b>11</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2 EÓLICA OFFSHORE .....</b>	<b>23</b>
2.1 Potencial da eólica <i>offshore</i> no mundo .....	23
2.1.1. Eólica <i>offshore</i> na Europa .....	25
2.1.2. Eólica <i>offshore</i> na Ásia.....	27
2.1.3. Eólica <i>offshore</i> na América do Norte.....	28
2.2 Potencial da eólica <i>offshore</i> no Brasil .....	29
2.3 Aspectos técnicos.....	34
2.3.1 Turbinas.....	35
2.3.2 Fundações.....	43
2.4 Cadeia de valor da eólica <i>offshore</i> .....	45
2.4.1 Projeto, desenvolvimento e engenharia.....	50
2.4.2 Manufatura e suprimento .....	51
2.4.3 Construção e instalação.....	56
2.4.4 Logística <i>offshore</i> .....	58
2.4.5 Operação e manutenção.....	60
2.5 Custos da eólica <i>offshore</i> .....	61
<b>3 ASPECTOS REGULATÓRIOS DA EÓLICA OFFSHORE .....</b>	<b>67</b>
3.1 Regulação da eólica <i>offshore</i> .....	67
3.2 Eólica <i>offshore</i> voltada para produção de H2 no Brasil: uma análise regulatória.....	73
3.3 Licenciamento ambiental da eólica <i>offshore</i> .....	75
<b>4 EÓLICA OFFSHORE PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO .....</b>	<b>79</b>
4.1 A economia do hidrogênio de baixo carbono .....	80
4.1.1 Projetos de hidrogênio no Brasil .....	82
4.2 Configurações possíveis .....	83
4.3 Experiência internacional .....	85
4.4 Oportunidades de negócio .....	88
4.4.1 Exportação .....	88
4.4.2 Fertilizantes.....	91
4.4.3 Siderurgia.....	92
4.4.4. Refino .....	93
4.4.5. Metanol.....	94
4.4.6. Transporte .....	95
4.4.7. Geração e armazenamento de energia elétrica.....	96
4.4.8. Transição da indústria de petróleo .....	96
4.5 Aspectos econômicos.....	98

4.6 Proposição de projetos.....	103
4.6.1 Região Nordeste .....	103
4.6.2 Região Sudeste.....	108
4.6.3 Região Sul.....	111
<b>5 BARREIRAS E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>113</b>
5.1 Barreiras regulatórias e respectivas recomendações .....	114
5.2 Barreiras mercadológicas e respectivas recomendações.....	117
5.3 Barreiras de infraestrutura e respectivas recomendações.....	120
5.4 Barreiras tecnológicas e respectivas recomendações .....	122
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>125</b>
<b>APÊNDICE A – ENTES GOVERNAMENTAIS RELEVANTES PARA O PROCESSO DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL.....</b>	<b>135</b>





# APRESENTAÇÃO

O Brasil, com sua extensa linha costeira e condições favoráveis de vento, está bem-posicionado para se tornar uma potência na geração de energia eólica *offshore*. Essa modalidade, que traz muitos benefícios, é parte integrante da Estratégia da Indústria para uma Economia de Baixo Carbono, e impulsioná-la é uma das prioridades do Plano de Retomada da Indústria.

No mundo, os parques eólicos *offshore* adicionaram 21 GW de energia em 2021 – o número de instalações foi multiplicado por três em relação ao ano anterior. Estima-se que 260 GW de nova capacidade podem ser adicionados até 2030, elevando o total global para 316 GW ao fim desta década. Para isso, estão previstos investimentos de até US\$ 1 trilhão.

Sucessivos recordes mundiais ainda não tiveram muita repercussão no Brasil, cujo aproveitamento do potencial energético *offshore*, de cerca de 700 GW, segue pouco explorado. Os projetos se multiplicam – são 170 GW em pedidos de licenciamento ambiental no Ibama –, mas as regras para a implementação dos parques não estão claras.

A consolidação dessa cadeia de valor no Brasil pode impulsionar a economia e facilitar a retomada da industrialização. Além de oferecer uma fonte de energia limpa e renovável, o setor deve gerar empregos, estimular o desenvolvimento tecnológico e científico, reduzir a dependência de fontes não renováveis e colaborar para a segurança energética do país.

Como insumo primário para a produção de hidrogênio de baixo carbono, a energia eólica *offshore* tende a viabilizar a implementação de novos modelos de negócio para atender tanto o mercado nacional como o exportador.

Existe espaço para todos os agentes da cadeia prosperarem, mas há um momento oportuno para as decisões de investimento das empresas e um fluxo finito de recursos para financiamento desse mercado. A complexidade logística e os custos associados à instalação e à manutenção de parques eólicos *offshore* requerem aportes significativos e um ambiente regulatório favorável.

O presente estudo identifica as principais barreiras regulatórias, mercadológicas, de infraestrutura e tecnológicas para o aproveitamento do potencial eólico *offshore* no Brasil. Também apresenta recomendações para que essa fonte se torne um dos principais insumos primários na consolidação do segmento de hidrogênio de baixo carbono no país.

Boa leitura.

**Robson Braga de Andrade**

Presidente da CNI



# SUMÁRIO EXECUTIVO

O Brasil poderá se tornar uma potência na geração de energia eólica *offshore*, aproveitando os benefícios que essa indústria pode oferecer. A consolidação da cadeia de valor da energia eólica *offshore* no Brasil pode impulsionar a economia e promover a retomada da industrialização. Além de oferecer uma fonte de energia limpa e renovável, o setor deverá gerar empregos, estimular o desenvolvimento tecnológico e científico, reduzir a dependência de fontes não renováveis e colaborar para segurança energética do Brasil.

Globalmente, estima-se que 260 GW de nova capacidade eólica *offshore* podem ser adicionados até 2030, elevando o total global de instalações eólicas *offshore* para 316 GW ao final desta década. Para isso, estão previstos investimentos na ordem de US\$ 1 trilhão. Sucessivos recordes mundiais ainda não repercutiram no Brasil, cujo aproveitamento do potencial energético *offshore*, de cerca de 700 GW, segue inexplorado. Os projetos se multiplicam – são 170 GW em pedido de licenciamento ambiental no IBAMA –, mas as regras para implementação dos parques *offshore* não estão claras.

A implementação de parques eólicos *offshore* para a geração elétrica representa uma oportunidade para o país produzir hidrogênio de baixo carbono não apenas para o mercado doméstico, mas também para a exportação. Entretanto, ainda existem muitos desafios regulatórios, mercadológicos, de infraestrutura e tecnológicos para o aproveitamento do potencial eólico *offshore*, e que devem ser aprofundados e discutidos com a sociedade. Assim, o objetivo deste estudo é elaborar um diagnóstico das oportunidades e principais barreiras para o desenvolvimento de projetos de geração eólica *offshore* voltados para a produção de hidrogênio de baixo carbono no Brasil, bem como apresentar propostas e recomendações para que um mercado de eólica *offshore* e hidrogênio de baixo carbono seja criado no país.

A eólica *offshore* é parte integrante da Estratégia da Indústria para uma Economia de Baixo Carbono e destravar essa agenda é uma prioridade elencada no Plano de Retomada da Indústria.

## Potencial e custo

Segundo EPE (2020), a energia eólica *offshore* tem potencial de cerca de 700GW, que pode variar a depender das restrições técnicas, ambientais e econômicas que forem aplicadas. Em alguns casos, há locais que não se tornam viáveis para a realização dos projetos.

A energia eólica *offshore* segue uma tendência de redução de custos que já perdura 8 anos. Em 2021, experimentou quedas incrementais de custos globalmente, apesar das restrições da cadeia de suprimentos e da inflação e do cenário de competição da fonte mais acirrada no contexto da transição energética.

O custo nivelado médio de energia (LCOE) para projetos comissionados em 2020 caiu para níveis pouco abaixo de US\$ 95/MWh, com uma faixa de US\$ 78/MWh a US\$ 125/MWh no mundo, impulsionadas principalmente por melhorias tecnológicas e crescente maturidade da indústria. Os custos de capital (CAPEX) são os mais representativos no custo do ciclo de vida das usinas eólicas *offshore* e incluem todos os gastos incorridos antes do início da operação comercial.

Após um período de aumento entre 2014 e 2015 (Musial et al. 2017), o CAPEX tem diminuído, atingindo cerca de US\$ 3.750/kW em 2020 globalmente. Os custos operacionais (OPEX), por sua vez, mostram-se mais relevantes para a energia eólica *offshore* do que para a terrestre. Com valores de referência anual na faixa de US\$ 70 a US\$ 80/kW para *offshore* e US\$ 30 a US\$ 40/kW para *onshore* (Lazard, 2020).

### **Cadeia de valor da eólica *offshore***

Os projetos eólicos *offshore* utilizam uma tecnologia semelhante à dos projetos eólicos *onshore* (EPE, 2020), tendo sua principal diferença a fundação. Muitos desenvolvimentos e melhorias ocorreram desde o início da comercialização da tecnologia eólica, nos idos dos anos 80, e o setor eólico *offshore* contribui largamente para isso, destacando-se em termos de inovação e aprimoramento tecnológico ao longo dos últimos 30 anos.

Existem alguns tipos diferentes de fundações para instalações eólicas *offshore*, porém três principais poderiam ser citados: monoestaca, jaqueta e flutuante. Cada um com suas vantagens e desvantagens, influenciam de maneira direta no aspecto da segurança e preservação das estruturas *offshore*. Atualmente, o tipo de fundação mais comum para turbinas eólicas *offshore* é o monoestaca: uma única estaca de seis a oito metros de diâmetro e 20 a 30 m de comprimento abaixo do fundo do mar. Além deste, destacam-se também as fundações de jaqueta, cujo uso deve mais que quadruplicar em projetos futuros. À medida que os parques eólicos se movem para mais longe da costa e em águas mais profundas, o uso de turbinas eólicas flutuantes deve se acentuar.

Essencialmente, a cadeia de valor do setor de eólica *offshore* é composta dos seguintes elementos:

- Projeto, desenvolvimento e engenharia;
- Logística *offshore*: serviços de embarcações;
- Manufatura e suprimento: turbinas eólicas; fundações; subestações e cabos submarinos;

- Construção e instalação das turbinas eólicas; fundações; subestações, e lançamento dos cabos submarinos;
- Comissionamento;
- Operação e manutenção para turbinas eólicas e balanço da planta (fundações, subestações e cabos submarinos); e
- Descomissionamento.

A sinergia entre a cadeia de valor dos setores de óleo e gás e eólico *offshore* vem se consolidando em diferentes segmentos de atuação que dependem da adaptação de soluções conhecidas, como planejamento do projeto, instalações das conexões à rede elétrica (subestações e cabos submarinos) e segmento de operação e manutenção. Como é o caso de qualquer mercado emergente de energia eólica *offshore*, a cadeia de suprimentos no Brasil deve ser amplamente desenvolvida para captura do máximo benefício local disponibilizado pelo crescimento desta indústria.

### **Regulação da eólica *offshore***

Os projetos *offshore* contam com uma estrutura regulatória específica que pode contribuir para o investimento em algumas plantas piloto já nos próximos anos. O Decreto 10.946, de janeiro de 2022, traz o regramento sobre a “cessão de uso de espaços físicos e o aproveitamento dos recursos naturais em águas interiores de domínio da União, no mar territorial, na zona econômica exclusiva e na plataforma continental para a geração de energia elétrica a partir de empreendimento *offshore*”. Institui que deve ocorrer na modalidade gratuita, voltada à atividade de pesquisa e desenvolvimento (P&D), ou onerosa, quando orientada à exploração de central geradora. Além disso, pode ser ainda planejada ou independente, a depender de como são disponibilizados os prismas ou polígonos.

Complementar ao Decreto nº 10.946/2022, foram publicadas duas Portarias no Diário Oficial da União, em outubro de 2022. A Portaria Normativa GM/MME nº 52/2022 trata da “cessão de uso onerosa para exploração de central geradora de energia elétrica *offshore* no regime de produção independente de energia ou de autoprodução de energia” e a Portaria Interministerial MME/MMA nº 3/2022 cria o Portal Único para Gestão do Uso de Áreas *Offshore* para Geração de Energia (denominado PUG-*offshore*).

O PUG-*offshore* se propõe a ser um “balcão único” de projetos, devendo todas as demandas de cessão de uso serem encaminhadas por ele. Assim, busca-se evitar a sobreposição de projetos em uma mesma área, bem como reduzir a assimetria de informação entre os setores privado e público, trazendo mais transparência ao mercado.

O Decreto e as duas Portarias tentam afastar a possibilidade de se criar um mercado de títulos de cessão de usos de áreas, mitigando o risco de especulação. Esses instrumentos infralégais contribuem para a segurança jurídica, mas não têm força de lei. Nesse caso,

está em tramitação no Congresso o Projeto de Lei (PL) n.º 576/2021, que segue o rito processual do poder legislativo. A questão que fica em aberto é se lei que será sancionada a partir desse PL vai contrariar tais Portarias e o Decreto. Como os atores envolvidos de mercado envolvidos na construção dos marcos regulatórios são os mesmos, há uma expectativa de que os instrumentos regulatórios – aprovados e em análise – sejam alinhados no que couber.

### **Eólica *offshore* para produção de hidrogênio de baixo carbono**

Até 7 de dezembro de 2022, havia 70 projetos de eólica *offshore* com processos de licenciamento ambiental em aberto no Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), totalizando 176,581 MW de potência instalada (IBAMA, 2022). A questão central é como o setor elétrico irá absorver toda essa expectativa de desenvolvimento e expansão da geração. O hidrogênio de baixo carbono surge como um caminho para viabilizar estes projetos.

O Brasil tem potencial para assumir a vanguarda global na produção de hidrogênio de baixo carbono. Vasto potencial de energias renováveis, extensa costa e localização privilegiada para acessar os mercados com as maiores demandas para importação do hidrogênio. O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) publicou a Resolução n.º 6, de 23 de junho de 2022, que institui o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) e estabelece a estrutura de governança da iniciativa. Em 17 de agosto do mesmo ano, foi publicada a Portaria n.º 164/GM/MME que definiu a composição do Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio (Coges-PNH2). Este será fundamental para que o mercado seja desenvolvido no Brasil.

Apesar do Brasil ainda não ter um *roadmap* estabelecido, o mercado já se adiantou. O hidrogênio de baixo carbono provavelmente só terá mercado consumidor em cerca de 2 a 3 anos, mas é preciso iniciar os acordos, MOUs (Memorandos de Entendimento) e desenvolvimento de infraestrutura para se posicionar no mercado. Diversos projetos foram anunciados nos últimos dois anos.

Em 2010, 95% do hidrogênio (H<sub>2</sub>) utilizado no Brasil foram produzidos a partir de fontes fósseis (CGEE, 2010). Isso representa uma grande oportunidade para a indústria brasileira se descarbonizar, mantendo sua relevância frente à transição energética e protagonismo no desenvolvimento do mercado de hidrogênio de baixo carbono. Vislumbra-se, ainda, destinar a produção para o mercado externo, principalmente o europeu. O hidrogênio produzido no país também tem o potencial de desenvolver o mercado de fertilizantes, já que grande parte destes produtos são nitrogenados e utilizam a amônia como base do processo de formação.

Na siderurgia, o hidrogênio de baixo carbono pode ser usado na produção aço, conhecido como aço verde, que emerge mundialmente como uma grande oportunidade de substituição dos combustíveis fósseis no processo industrial. Assim como a indústria siderúrgica, as refinarias são consumidoras de hidrogênio cinza em larga escala. Produzido a partir da reforma do gás natural, o hidrogênio cinza poderia ser substituído pelo hidrogênio de baixo carbono. Outra alternativa de descarbonização considerada muito potente, é a produção de metanol usando hidrogênio de baixo carbono, além de suas aplicações nos setores de transporte e de armazenamento de energia elétrica.

Para que a produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água usando energia eólica *offshore* se torne viável, será preciso uma forte evolução da curva de aprendizado nos próximos 10 anos, assim como ocorreu com a eólica *onshore* e solar fotovoltaica nos últimos 20 anos.

### Proposição de projetos

A partir dos dados apresentados neste documento, foram feitas proposições de projetos para as áreas com maior potencial para projetos de produção de hidrogênio com eólica *offshore* no Brasil. O primeiro passo, é considerar o potencial de eólica *offshore* e a demanda por hidrogênio, tanto para o mercado externo como para o interno.

A região Nordeste tem o maior potencial de geração eólica no Brasil, inclusive *offshore*. É a região com maior fator de capacidade médio anual, devido a melhor constância de ventos e possui áreas com grande potencial ainda sem pedido de licenciamento. Por conta da sua proximidade com os países do hemisfério norte, o nordeste brasileiro tem uma grande vocação para exportação do H<sub>2</sub>. Cita-se como exemplo, o porto de Pecém, que tem feito investimentos para tornar-se um hub de H<sub>2</sub>, visando inclusive a exportação.

Na região Sudeste, verifica-se diversas áreas com pedidos de licenciamento que estão sobrepostas. Há portos como Açu, Macaé, Rio de Janeiro, Itaguaí e Angra dos Reis, que também podem ser adaptadas para tornar-se hubs de H<sub>2</sub>. Há ainda a construção do Porto Central, que pretende ser um hub de energia por estar na divisa dos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. O estado do Rio de Janeiro tem importantes rodovias que podem facilitar a criação desses hubs e a ligação com a indústria, inclusive com a de São Paulo e Minas Gerais.

Na região Sul, aplicando-se as restrições ambientais, econômicas e técnicas, o potencial do Rio Grande do Sul (RS) fica praticamente reduzido à Lagoa dos Patos, já que a costa deste estado tem uma grande área de conservação mapeada. Antecipando os passos nessa direção, a Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura (Sema) do RS, concluiu o estudo prévio para o futuro edital de concessão de uso de áreas (lotes) na Lagoa. Pode-se dizer, que do ponto de vista da demanda, a vocação da região Sul para utilização da eólica *offshore* é mais industrial eletrointensiva.

## Barreiras e recomendações

Para que grande potencial para aproveitamento da energia eólica *offshore* no Brasil seja explorado, é preciso: (i) transpor algumas barreiras regulatórias e institucionais, com vistas a criar um ambiente seguro para o investidor; (ii) criar um novo mercado, seja dentro e/ou fora do país, para consumo da energia que será gerada; (iii) investir na infraestrutura para que essa energia seja competitiva; e (iv) melhorar a infraestrutura tecnológica do país para que esta indústria alcance performances que a torne competitiva.

Neste estudo, foram levantadas e discutidas as principais barreiras relacionadas aos aspectos (i) regulatórios, (ii) mercadológicos, (iii) de infraestrutura e (iv) tecnológicos. Os aspectos ambientais foram levados em consideração nas discussões, sendo tratado no âmbito regulatório. Para transpor tais barreiras, foram feitas recomendações com vistas a mapear as oportunidades do aproveitamento da geração eólica *offshore* para a produção de hidrogênio de baixo carbono.

Foram levantadas 10 barreiras regulatórias e identificadas 10 recomendações para transpô-las. Para as 9 barreiras mercadológicas mapeadas, foram propostas 10 recomendações para endereçá-las. Também foram encontradas 7 barreiras de infraestrutura, sendo propostas 10 recomendações para sua transposição. Por fim, foram levantadas 4 barreiras tecnológicas e apresentadas 6 recomendações para destravá-las.

## Recomendações de aprofundamento do estudo

Com o intuito de aprofundar a discussão e apresentar um diagnóstico detalhado das barreiras encontradas, o estudo indica que ainda é preciso:

- Mapear os stakeholders envolvidos neste mercado para que sejam avaliados os pontos de conflitos e os potenciais de alianças entre eles.
- Definir de forma clara os critérios para a resolução do problema da sobreposição de cessão de áreas com pedido de licenciamento no IBAMA.
- Reduzir as incertezas nos custos dos empreendimentos de eólica *offshore* para a produção de hidrogênio, sendo necessário aplicar métodos de simulação para melhor estimar esses custos, avaliando, inclusive, alternativas tecnológicas.
- Estudar alternativas de incentivo econômico-financeiro para viabilizar os projetos de eólica *offshore* para a produção do hidrogênio, considerando as experiências internacionais.





# 1 INTRODUÇÃO

O Brasil, com sua extensa linha costeira e condições favoráveis de vento, está mais bem posicionado para se tornar uma potência na geração de energia eólica *offshore*, aproveitando os benefícios que essa indústria pode oferecer. A eólica *offshore* é parte integrante da Estratégia da Indústria para uma Economia de Baixo Carbono e destravar essa agenda é uma prioridade elencada no Plano de Retomada da Indústria.

A expansão das energias renováveis faz parte também do compromisso brasileiro no âmbito do Acordo de Paris, que tem por objetivo principal reduzir as emissões de gases de efeito estufa e limitar a temperatura global do planeta. Para atingir tal objetivo, os países signatários desse acordo definiram suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC, do acrônimo em inglês *Nationally Determined Contributions*). A atual NDC brasileira estabelece que o Brasil deve reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em 37% até 2025 e em 50% até 2030, tendo como base as emissões de 2005. Ademais, em 2022, o Brasil se comprometeu a alcançar emissões líquidas neutras até 2050 (BRASIL, 2022).

A geração de energia eólica *offshore* pode, fortemente, contribuir com o aumento da produção de energia renovável no Brasil. Segundo a EPE (2020), a energia eólica tem um potencial de cerca de 697 GW, o que certamente vai muito além da demanda atual de energia elétrica e representa uma grande oportunidade para a produção de hidrogênio (H<sub>2</sub>) de baixo carbono.

Se esse potencial for devidamente aproveitado, o hidrogênio produzido a partir das eólicas *offshore* pode não somente atender o mercado doméstico, como também seus derivados serem exportados. Uma oportunidade de aumentar a competitividade da indústria brasileira, atrair grandes volumes de investimentos estrangeiros e gerar novos modelos de negócios de maior valor agregado no país, com novas tecnologias limpas e inovação.

Para isso, é preciso transpor alguns desafios de cunho regulatório, mercadológico, de infraestrutura e tecnológico.

Em tempos de pós-pandemia e com uma guerra entre Rússia e Ucrânia persistindo, as incertezas sobre a cadeia de valor para geração de energia renovável se acirraram. Parte dos equipamentos são importados de países asiáticos, principalmente da China, e já é percebido um aumento de seus preços nos mercados internacionais, o que reflete no custo nivelado da fonte de geração eólica. Um estudo conduzido pela Bloomberg New Energy Finance (BNEF, 2022) demonstra que o custo de novas eólicas *onshore* aumentou 7% nos

últimos anos, enquanto o da energia solar saltou para 14%, recuando temporariamente para o patamar de 2019 (Canal Energia, 2022). No entanto, o aumento dos custos tem sido compensado em parte com o aumento da eficiência dos equipamentos.

O custo de investimento estimado de projetos de usinas eólicas *offshore* é aproximadamente o dobro dos projetos *onshore* (EPE, 2020), sendo o custo total de instalação de cerca de US\$ 2.850/kW (IRENA, 2018). Tais valores são elevados principalmente pelos custos de fundações, de instalação e de transporte das estruturas, sendo esse um dos principais desafios para tornar o investimento em eólica *offshore* uma realidade no país (EPE, 2020). Assim, o estabelecimento de uma cadeia de suprimentos global é uma das questões mais complexas no contexto da construção de uma indústria eólica *offshore* global (GWEC, 2019). O mercado europeu conseguiu aumentar a competitividade da eólica *offshore* ao criar uma cadeia de fornecimento, que demandou grandes volumes de investimento.

As tecnologias utilizadas nos projetos eólicos *onshore* e *offshore* são semelhantes. As instalações *offshore* possuem algumas vantagens, como a capacidade de explorar velocidades de vento mais constantes e com maiores velocidades (EPE, 2020). O conhecimento sobre as condições de operação no mar dessas usinas vem sendo aprimorado. Além disso, as estruturas das fundações de projetos eólicos *offshore* vêm evoluindo para atender às novas demandas associadas à instalação em águas mais profundas e a turbinas cada vez maiores e mais pesadas (NREL, 2017). Conforme destacado pela metodologia da Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, 2016), apesar dos principais conceitos utilizados nas plataformas eólicas *offshore* já serem de conhecimento do setor de exploração de óleo e gás, são necessárias adaptações para acomodar diferentes dinâmicas e esforços distintos, o que já ocorreu para fundações em águas rasas e em zonas de transição.

Em relação à infraestrutura, é indispensável que o modal portuário suporte os serviços de construção, montagem e transporte. Em parte, a estrutura existente para atender a indústria de óleo e gás em algumas regiões pode ser aproveitada, mas observa-se no mundo a construção de instalações criadas especificamente para atender às necessidades da indústria eólica *offshore* (EPE, 2020). A tendência é que os projetos de geração eólica *offshore* sejam implementados em locais cada vez mais distantes da costa. Surgem, assim, desafios logísticos às atividades de construção de manutenção dessas estruturas. Ao mesmo tempo, surgem novas oportunidades para empresas que atuam no mercado de óleo e gás no Brasil, devido a sua expertise em operações realizadas em águas profundas.

No que diz respeito à regulação, em 2022 foram dados os primeiros sinais aos interessados em investir em geração eólica *offshore* no Brasil, com a aprovação do Decreto nº 10.946, que regula a cessão de uso de espaços físicos e o aproveitamento dos recursos naturais em águas interiores de domínio da União, no mar territorial, na zona econômica exclusiva

(ZEE) e na plataforma continental. O Decreto foi regulamentado pela Portaria Normativa GM/MME nº 52/2022 no que se refere à legislação sobre cessão onerosa, vislumbrando uma oportunidade para uso da fonte para produção do hidrogênio de baixo carbono. Em que pese a sinalização positiva ao mercado dada pelo Decreto, as garantias necessárias para aporte pioneiro no Brasil dos investidores em projetos dessa natureza careciam de segurança jurídica e previsibilidade. Nesse ínterim, nota-se uma multiplicidade de projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) nessa área, que podem trazer mais expertise e dar celeridade à implantação dos parques eólicos, quando as condições de mercado estiverem consolidadas.

Além disso, do ponto de vista da regulação ambiental, em 2020, o Ibama publicou um Termo de Referência (TR) sobre o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e um Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para complexos eólicos marítimos *offshore*, que podem apoiar os interessados em investir nesse setor. O número de projetos cujos processos de licenciamento foram iniciados no Ibama, totalizam 176,5 gigawatts (GW) de potência instalada (IBAMA, 2022). Isso representa quase a capacidade instalada centralizada da matriz elétrica do Brasil que, segundo a Aneel, ultrapassou 190 GW em março de 2023. Há, portanto, o grande desafio de lidar com essa demanda de projetos.

Analisando o cenário sob diferentes perspectivas, este estudo realiza um diagnóstico das oportunidades e das principais barreiras para o desenvolvimento de projetos de geração eólica *offshore* voltados para a produção de hidrogênio de baixo carbono no Brasil, bem como apresenta propostas e recomendações para a consolidação de um mercado de eólica *offshore* e hidrogênio de baixo carbono no país.



## 2 EÓLICA OFFSHORE

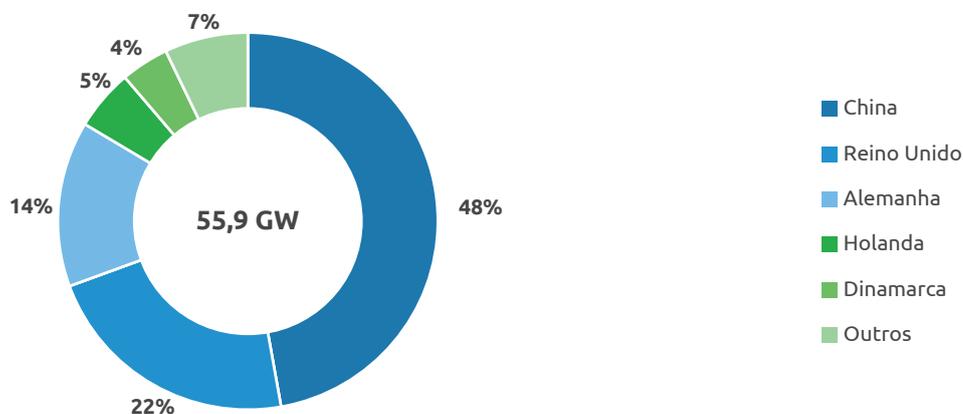
Este capítulo é dedicado a (i) análise do potencial da eólica *offshore* no Brasil e no mundo; (ii) aspectos técnicos das turbinas quando instaladas em empreendimentos *offshore*; (iii) avaliação da cadeia de valor da eólica *offshore*; e, (iv) discussão sobre os custos de geração.

### 2.1 POTENCIAL DA EÓLICA OFFSHORE NO MUNDO

O mercado eólico *offshore* global cresceu significativamente nos últimos anos, cerca de 36% ao ano na última década e alcançou, no final de 2021, o patamar de 56 GW de capacidade instalada ou cerca de 7% do montante eólico total (*onshore* e *offshore*). A expectativa é de um aumento de, no mínimo, 260 GW até 2030 (4C *Offshore*, 2022<sup>a</sup>; Bloomberg NEF, 2021<sup>a</sup>), dobrando o número de países que atualmente geram energia a partir de energia eólica *offshore* na próxima década (Ferris, 2022).

Apenas em 2021, cerca de 21,1 GW de capacidade *offshore* foram conectados à rede, triplicando o valor correspondente ao ano de 2020 (GWEC, 2022). Europa e Ásia têm dominado o mapa da geração eólica *offshore*, com predominância histórica dos europeus. Apesar disso, já em 2021, a China, com 17 GW instalados, ultrapassou o Reino Unido e assumiu a posição de país com maior capacidade instalada (figura 1). A expectativa é o país consolide a Ásia no topo do ranking global em pouco tempo.

**FIGURA 1** – Distribuição da energia eólica *offshore* por região (GW)



Fonte: Adaptado de GWEC, 2022.

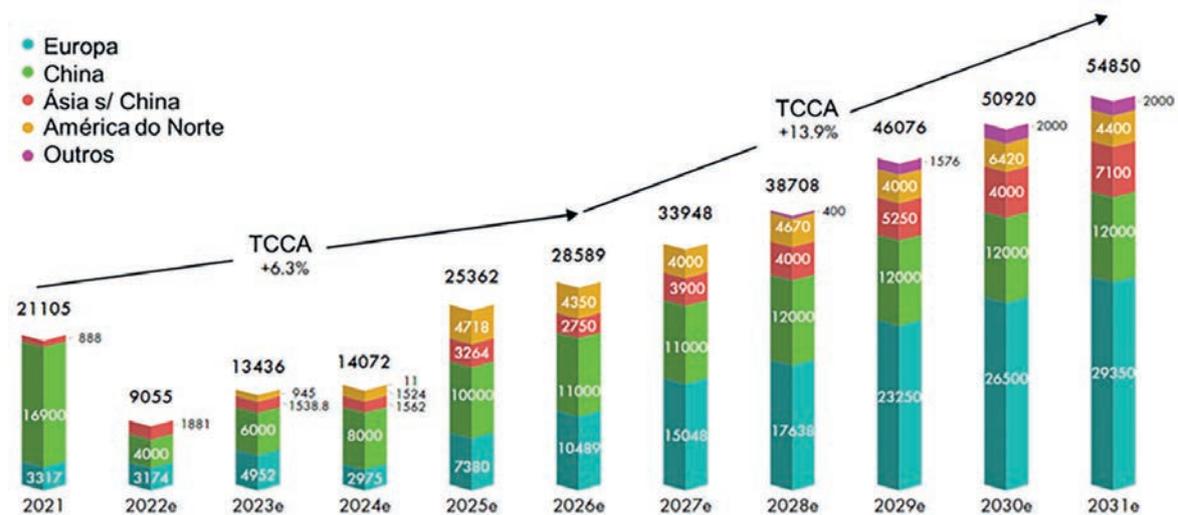
A indústria eólica *offshore* vem ganhando destaque nos planos para implementação de novas ambições de descarbonização ao redor do mundo. Eventos que combinam alinhamento e compromisso políticos entre países, como a COP26, de Glasgow, corroboram para intensificar a movimentação de lideranças governamentais no esforço de aprimorar as metas, no que aparenta ser uma resposta às recentes crises energéticas.

Segundo dados da GWEC, espera-se uma taxa de crescimento anual média de 6,3% até 2026 e de 13,9% em termos de novas instalações até o início da próxima década, o que deve fazer com que o setor eólico *offshore* ultrapasse os marcos de 30 GW em 2027. Espera-se que o volume anual de instalações eólicas *offshore* mais do que dobre de 21,1 GW em 2021 para 54,9 GW em 2031, elevando a participação *offshore* de novas instalações globais de eólicas de 23% em 2021 para 32% em 2031.

Ainda de acordo com o GWEC, é esperado que mais de 315 GW de nova capacidade eólica *offshore* seja implementada na próxima década (2022-2031), elevando a capacidade total instalada para 370 GW até o final de 2031. Estima-se que 29% desse novo volume sejam instalados na primeira metade da década (2022-2026).

A Figura 2 ilustra a perspectiva de crescimento do setor em âmbito global para a próxima década, na qual o termo TCCA corresponde ao indicador *Taxa Composta de Crescimento Anual*, referindo-se à taxa média esperada de novas instalações eólicas *offshore* por ano (GWEC, 2022).

**FIGURA 2 – Crescimento anual médio esperado para setor eólico *offshore* na década (MW)**

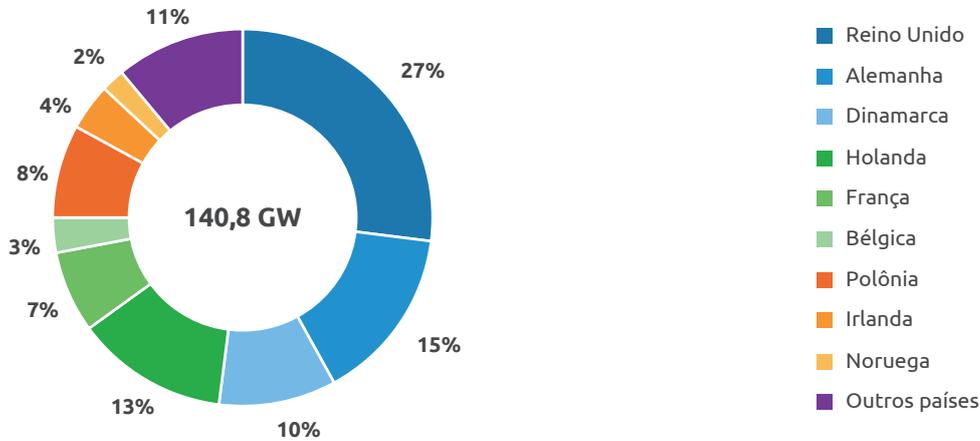


Fonte: Adaptado de GWEC, 2022.

### 2.1.1. EÓLICA OFFSHORE NA EUROPA

Recentemente, a Comissão Europeia lançou o plano REPowerEU, com o objetivo de tornar a Europa independente dos combustíveis fósseis importados da Rússia antes de 2030. O plano deve acelerar a tecnologia eólica *offshore* pelo continente. Outros acordos vêm sendo traçados, como a declaração de Esbjerg, consolidada em 2022, na qual os governos da Dinamarca, Bélgica, Alemanha e Holanda se comprometeram a substituir gradativamente os combustíveis fósseis por energia renovável produzida no Mar do Norte, com ênfase para a eólica *offshore* e o hidrogênio de baixo carbono. Por meio do acordo, os países estabeleceram uma nova meta de 150 GW de energia eólica *offshore* até 2050. Ainda no continente europeu, o governo do Reino Unido elevou a meta de energia eólica *offshore* em mais 10 GW, para 50 GW até 2030.

O Reino Unido é o líder do mercado eólico *offshore* na Europa desde 2009. Embora tenha perdido sua primeira posição para a China no final de 2021, o progresso feito nos últimos 12 meses mostra que o crescimento da energia eólica *offshore* provavelmente se recuperará. Em 2021, o Reino Unido selecionou três projetos de demonstração eólica flutuante (aquelas que são colocadas em boias) por arrendamento em escala comercial no Mar Céltico. No início de 2022, o governo do Reino Unido anunciou que passaria a realizar leilões anuais a partir de 2023 para aumentar o fornecimento de energia renovável do país. Ainda nesse ano, foram divulgados os resultados da rodada de *leasing* do território marítimo escocês lançada no verão de 2021: 17 projetos, totalizando 25 GW, sendo 15 GW de energia eólica flutuante. Adicionalmente, o Reino Unido também concluiu a segunda fase de suas tratativas junto ao setor privado para concretizar planos de até 4 GW de arrendamento de energia eólica *offshore* flutuante no Mar Céltico. Segundo o plano apresentado em abril de 2022, que reviu a meta decenal para o setor eólico *offshore* britânico, a expectativa é de que o mercado atinja a proporção de 50 GW em 2030, ao invés dos 40 GW estipulados anteriormente, dos quais 5 GW devem representar unidades de geração flutuantes. Essa é a segunda vez que o Reino Unido aumenta a meta para eólica *offshore* nos últimos dois anos.

**FIGURA 3 – Crescimento projetado do setor eólico *offshore* na Europa de 2022 a 2031**

Fonte: Adaptado de GWEC, 2022.

Na Alemanha, após as condições de mercado desfavoráveis e a falta de visibilidade no médio prazo terem desacelerado o desenvolvimento do setor eólico *offshore*, uma legislação mais favorável foi adotada nos últimos dois anos no país, trazendo novas perspectivas de crescimento. A emenda de 2020 da Lei do Vento *Offshore* (WindSeeG) aumentou a meta para eólica *offshore* do país de 15 GW para 20 GW até 2030 e estabeleceu uma meta de 40 GW de capacidade *offshore* instalada até 2040. O governo alemão mudou a legislação sobre eólica *offshore* em abril de 2022 por meio do “Pacote de Páscoa” e estabeleceu uma meta que exige 30 GW de energia eólica *offshore* operacional até 2030, 40 GW até 2035 e pelo menos 70 GW até 2045. A chave para o sucesso da energia eólica *offshore* parece clara no país e depende, em boa medida, da celeridade da Agência Federal Marítima e Hidrográfica da Alemanha no licenciamento e na abertura de novas licitações de projetos eólicos *offshore* adicionais, garantindo condições de mercado atraentes.

A Dinamarca possui um significativo potencial de expansão dos parques eólicos *offshore* tanto no Mar do Norte quanto no Mar Báltico, o que levou o governo a aprovar, em 2020, a formalização de duas “ilhas” energéticas: áreas de concentração de plantas eólicas *offshore* em cada um dos mares. O potencial total da ilha de energia do Mar do Norte é atualmente estimado em cerca de 10 GW. No ano de 2022, o país foi sede de um marco importante no contexto da cooperação internacional para eólica *offshore*, e recebeu três outros países do Mar do Norte no Esbjerg Offshore Wind Summit. Em meados de 2022, o governo lançou a proposta de aumentar sua meta eólica *offshore* para 2030 em 45%, totalizando 12,9 GW.

A expectativa de crescimento do mercado eólico *offshore* na Europa é de cerca de 3,7 GW até 2024. Tal crescimento deve se concentrar em mercados estabelecidos, como Alemanha, Dinamarca e Bélgica. Entretanto, é provável que o mercado *offshore* europeu acelere a partir de 2025, com a retomada de licitação de projetos da Alemanha, França

e Polônia. A expectativa para a década atual é de manutenção da taxa de crescimento do setor eólico *offshore* em dois dígitos, por algumas razões: i) a energia eólica *offshore* de base fixa se tornou a tecnologia de geração de eletricidade mais competitiva depois da eólica *onshore* e da energia solar fotovoltaica; (ii) o progresso contínuo na comercialização de energia eólica flutuante que, se espera, desbloqueará o potencial da modalidade em águas profundas; e (iii) a apresentação, por parte da Comissão Europeia, de uma estratégia de energia renovável *offshore* como parte de seu “Green Deal” em novembro de 2020, estabelecendo uma meta de 300 GW até 2050 no continente. Isso torna a modalidade estratégica para o alcance de metas ambiciosas de mitigação de emissões, com patamar zero líquido em 2050.

Embora seja uma tendência que a Ásia substitua a Europa como o maior mercado regional de energia eólica *offshore* do mundo por instalações cumulativas até o final de 2022, espera-se que a Europa recupere esse posto a partir de 2031, com um aumento anual das instalações eólicas *offshore* que deve superar os marcos de 10 GW em 2026 e 25 GW em 2030. A Figura 3 ilustra o crescimento esperado do setor eólico *offshore* no continente europeu, destacando a participação por país.

### 2.1.2. EÓLICA OFFSHORE NA ASIA

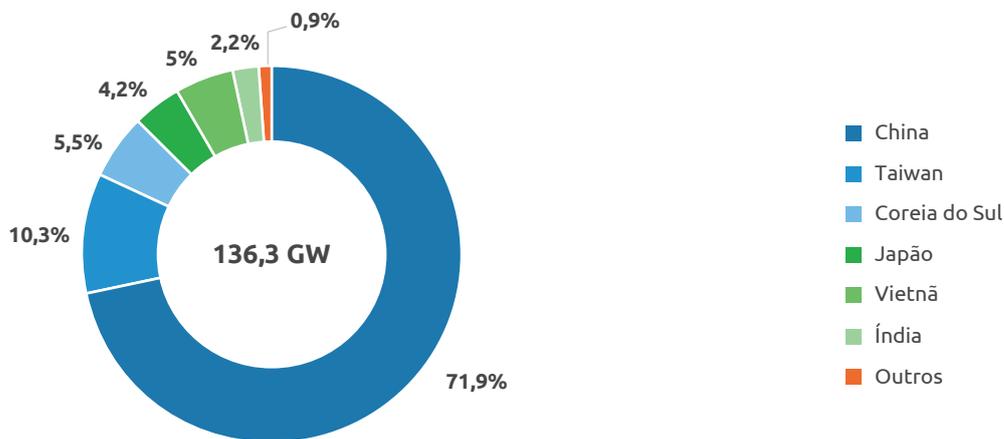
O primeiro projeto eólico *offshore* construído no continente opera há quase duas décadas. No entanto, o desenvolvimento deste tipo de empreendimento permaneceu tímido até 2018, quando a China ultrapassou o Reino Unido como principal mercado mundial em termos de novas instalações anuais. Uma significativa mudança de paradigma ocorreu em 2020, quando a Ásia substituiu a Europa como principal mercado eólico *offshore* regional em novas instalações pela primeira vez.

Parece claro que a China continuará a desempenhar o papel predominante nessa região nos próximos cinco anos (2022-2026), seguida de Taiwan. A Figura 4 apresenta o panorama esperado para o crescimento do setor eólico *offshore* no continente asiático no intervalo de 2022 a 2031.

Os chineses experimentaram um crescimento acelerado no setor eólico *offshore*, atingindo 17 GW no ano de 2021. Em 2022, tal crescimento desacelerou em função do fim de um ciclo de massivo financiamento por parte da administração federal. O crescimento do setor no país daqui para frente dependerá, em boa medida, de investimentos das províncias costeiras como Guandong, Zheijiang e Shandong. Considerando que a meta para o setor eólico *offshore* estipulada até 2030 deve ultrapassar 150 GW, a GWEC Market Intelligence prevê que a média anual de instalações eólicas *offshore* na China entre 2025 e 2031 deverá ultrapassar 10 GW, o que ajudará o país a consolidar ainda mais sua posição como líder global neste segmento.

Taiwan caminha para se consolidar como segundo país mais importante no mercado eólico *offshore* no continente asiático. Apesar do discreto crescimento no ano de 2021, de acordo com a mais recente atualização do status de desenvolvimento de energia renovável do *Bureau of Energy*, é provável que 2 GW de capacidade eólica *offshore* sejam adicionados em Taiwan até o final deste ano, colocando-o no caminho para atingir 5,6 GW de energia eólica *offshore* até 2025. Em 2022, o governo anunciou oficialmente seu plano de alocação de energia eólica *offshore* entre 2026 e 2035. Com os projetos que se espera serem alocados na próxima rodada do leilão eólico *offshore*, Taiwan provavelmente excederá as metas de 2030 estabelecidas pela Coreia do Sul e pelo Japão.

**FIGURA 4 –** Crescimento projetado do setor eólico *offshore* na Europa de 2022 a 2031



Fonte: Adaptado de GWEC, 2022.

### 2.1.3. EÓLICA OFFSHORE NA AMÉRICA DO NORTE

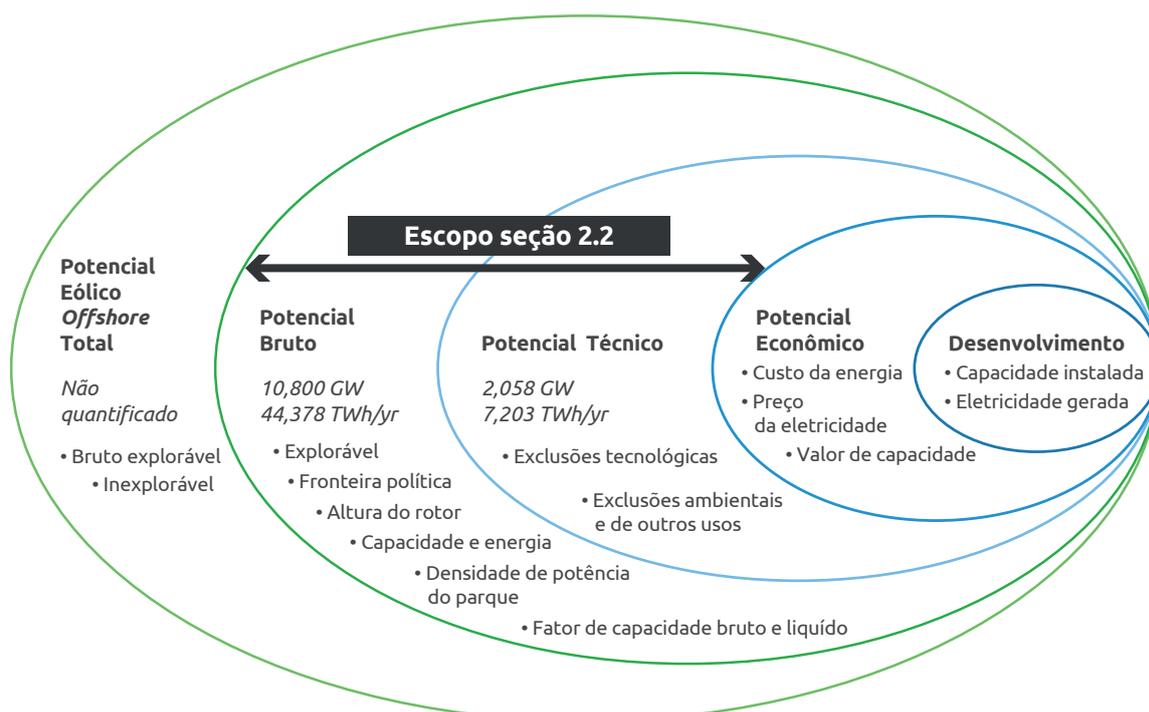
Atualmente, a América do Norte ainda é a única região fora do eixo Europa-Ásia com usinas eólicas *offshore* operacionais. Até 2021, eram apenas dois projetos *offshore* de pequena escala em operação, ambos nos Estados Unidos: Block Island de 30 MW, em Rhode Island, e Dominion Virginia de 12 MW (demonstração). Com base no mais recente cronograma de desenvolvimento de projetos no setor, é improvável que o próximo projeto eólico *offshore* em escala comercial esteja operacional na América do Norte até 2023. No total, 31,9 GW de energia eólica *offshore* estão previstos para serem construídos na região nos próximos dez anos (2022-2031), dos quais 99% deverão vir dos Estados Unidos e apenas 400 MW estão projetados para o Canadá. A expectativa é de que a América do Norte continue sendo o terceiro maior mercado eólico *offshore* até 2031, seguido pela região do Pacífico e pela América Latina.

Nos Estados Unidos, o total anunciado de metas de aquisição de energia eólica *offshore* em nível estadual aumentou 28,6%, chegando a quase 50 GW em 2022. Atualmente, apenas 42 MW de capacidade eólica *offshore* estão em operação nos EUA, mas o desenvolvimento ganhou força nos últimos 12 meses. Em maio de 2021, o projeto Vineyard Wind 1 de 800 MW recebeu a aprovação federal do *Bureau of Ocean Energy Management* (BOEM), e, em novembro do mesmo ano, a construção do parque em Massachusetts teve início. No mesmo mês, o projeto eólico *South Fork* de 132 MW também recebeu aprovação federal do BOEM, tornando-se o segundo projeto eólico *offshore* dos EUA a entrar na fase de construção.

## 2.2 POTENCIAL DA EÓLICA OFFSHORE NO BRASIL

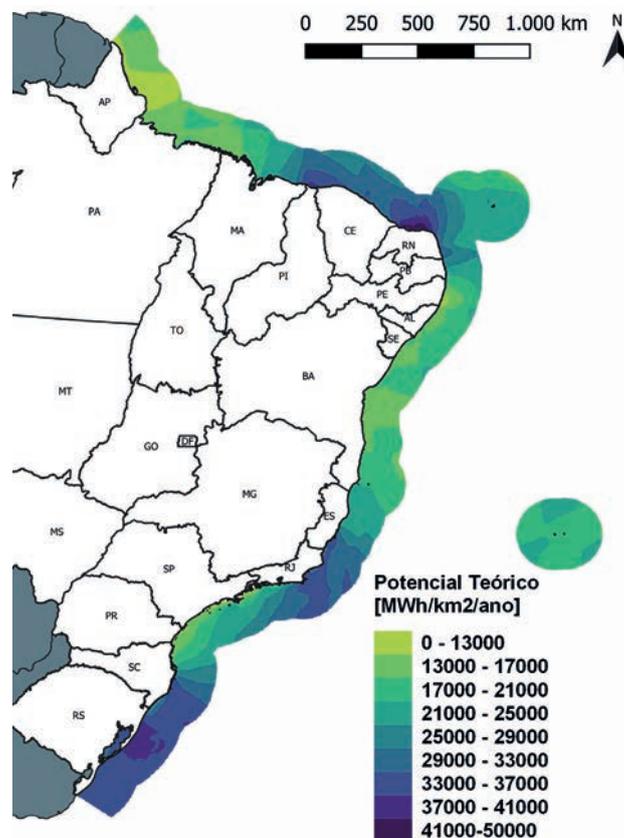
Traçar o mapa do potencial de geração de energia elétrica para fonte eólica *offshore* no Brasil é fundamental para avaliar as áreas com maior viabilidade para esses empreendimentos. O potencial teórico apresenta a quantidade de energia de forma geral que a tecnologia poderia gerar, enquanto o técnico realiza a exclusão das áreas com restrição, traçando o potencial de geração apenas nas áreas que restaram. Além disso, é possível avançar mais no sentido do potencial econômico e finalmente seguir para um potencial de mercado, ou seja, o que realmente seria desenvolvido como negócio. Nesse contexto, a Figura 5 ilustra esses potenciais.

**FIGURA 5** – Terminologia da NREL para níveis de potencial eólico *offshore*



A Figura 6 mostra o mapa<sup>1</sup> desenvolvido para este estudo com o potencial teórico para empreendimentos construídos em até 200 km da costa do Brasil. Pode-se verificar que há um grande potencial em estados do Nordeste, em especial Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí, bem como em estados do Sul do país, com destaque para Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Vale destacar, ainda, que o estado do Rio de Janeiro no Sudeste brasileiro também tem um potencial considerável.

**FIGURA 6** – Mapa do potencial teórico de geração de energia elétrica com fonte eólica *offshore* no Brasil



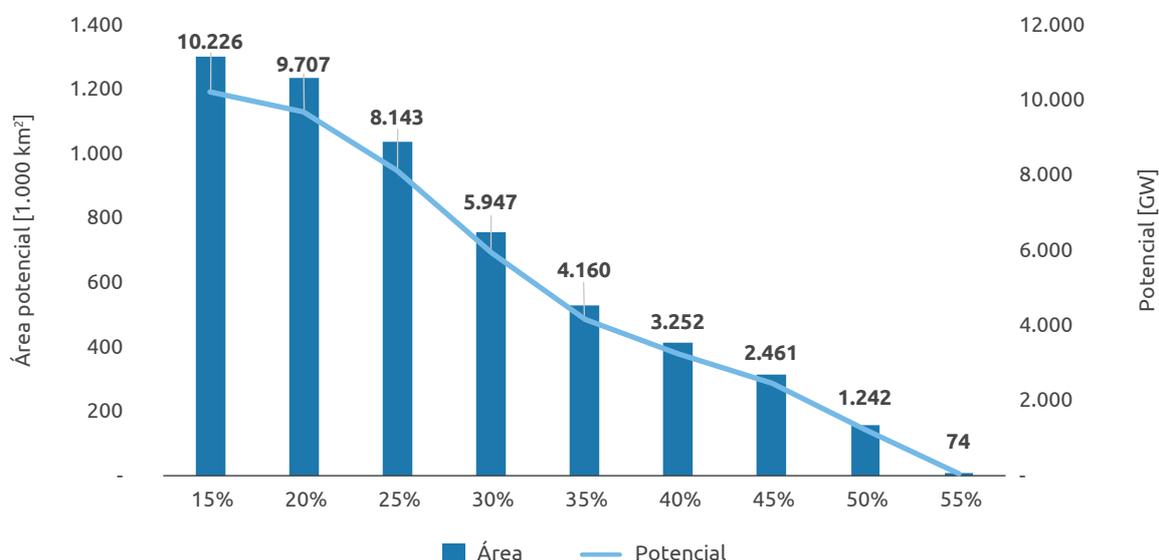
Fonte: Adaptado de Azevedo et al. (2022)<sup>9</sup>

A partir desse mapa do potencial bruto, foi realizada uma simulação para traçar o potencial e a área em função do fator de capacidade<sup>2</sup>. Na figura 7, observa-se que o potencial aumenta à medida em que se considera fatores de capacidade mínimos mais baixos, pois mais áreas são consideradas.

1 O mapa foi gerado a partir de dados georreferenciados, considerando o fator de capacidade para classes de turbina IEC-1 com ventos medidos a 100 m de altitude disponibilizados pelo Global Wind Atlas 3.1 (DTU, 2019). Para o cálculo do potencial por área, foi utilizada a metodologia IRENA, de modo a espaçar as turbinas para reduzir os efeitos de esteira do vento (IRENA, 2014). Para calcular os parâmetros do modelo, a potência e o diâmetro do rotor da turbina eólica do modelo Vestas V112-3.45 MW™ foram utilizados (Vestas, 2022).

2 Estima-se o fator de capacidade de uma estação de geração de energia elétrica a divisão da produção efetiva da usina em um período de tempo por sua capacidade total máxima nesse mesmo período.

**FIGURA 7 –** Mapa do potencial teórico de geração de energia elétrica com fonte eólica *offshore* no Brasil



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com a terminologia da NREL (*National Renewable Energy Laboratories*), o potencial eólico *offshore* pode ser classificado em diversas fases seguidas de restrições, iniciando com um potencial bruto teórico (Figura 6) e seguindo para um potencial técnico. Para elaboração do mapa de potencial técnico, é preciso incluir restrições na área costeira. Para esse fim, buscou-se o mapeamento georreferenciado das restrições expressas no Quadro 1.

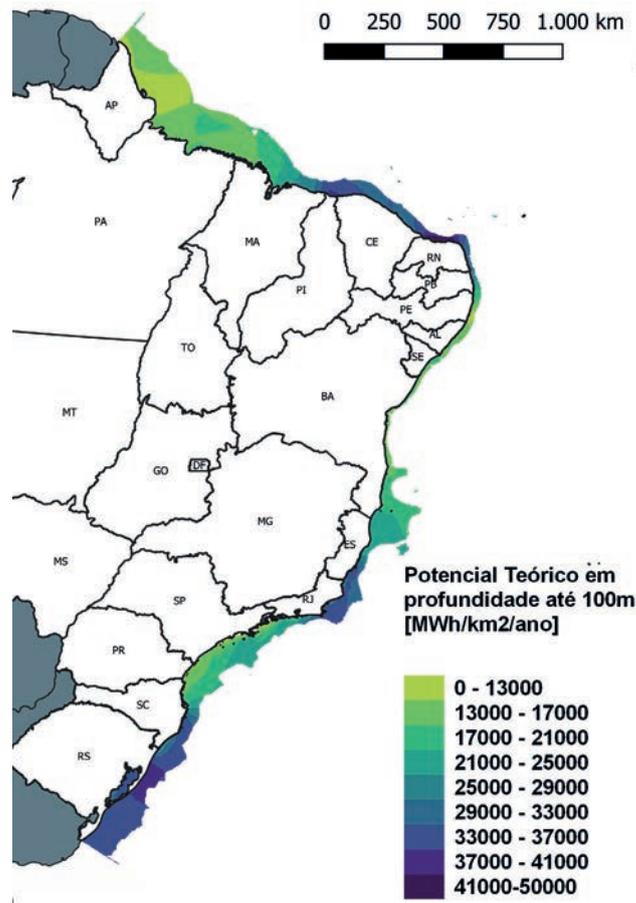
**QUADRO 1 –** Restrições utilizadas para o mapa de potencial técnico

Categoria	Tipo	Restrição	Referência
Técnica	Profundidade	Áreas com menos de 100 m de profundidade pela questão técnica atual de instalação de turbinas eólicas <i>offshore</i> .	Serviço Geológico do Brasil (CPRM)
	Distância da costa	Limitada a 200 km por restrições técnicas de projetos eólicos <i>offshore</i> atualmente e falta de dados do potencial eólico.	Global Wind Atlas (GWA 3.1)
Ambiental	Unidades de Conservação (Ucs)	Exclusão de Ucs integrais e de uso sustentável, das esferas federal, estadual e municipal.	Ministério do Meio Ambiente (MMA)
	Áreas prioritárias para conservação da biodiversidade	Exclusão de todas as áreas prioritárias classificadas como alta, muito alta e extremamente alta.	Ministério do Meio Ambiente (MMA)
Econômica	Petróleo e gás	Exclusão de blocos exploratórios sob concessão e campos de produção de petróleo e gás.	Agência Nacional do Petróleo (ANP)

Fonte: Elaboração própria.

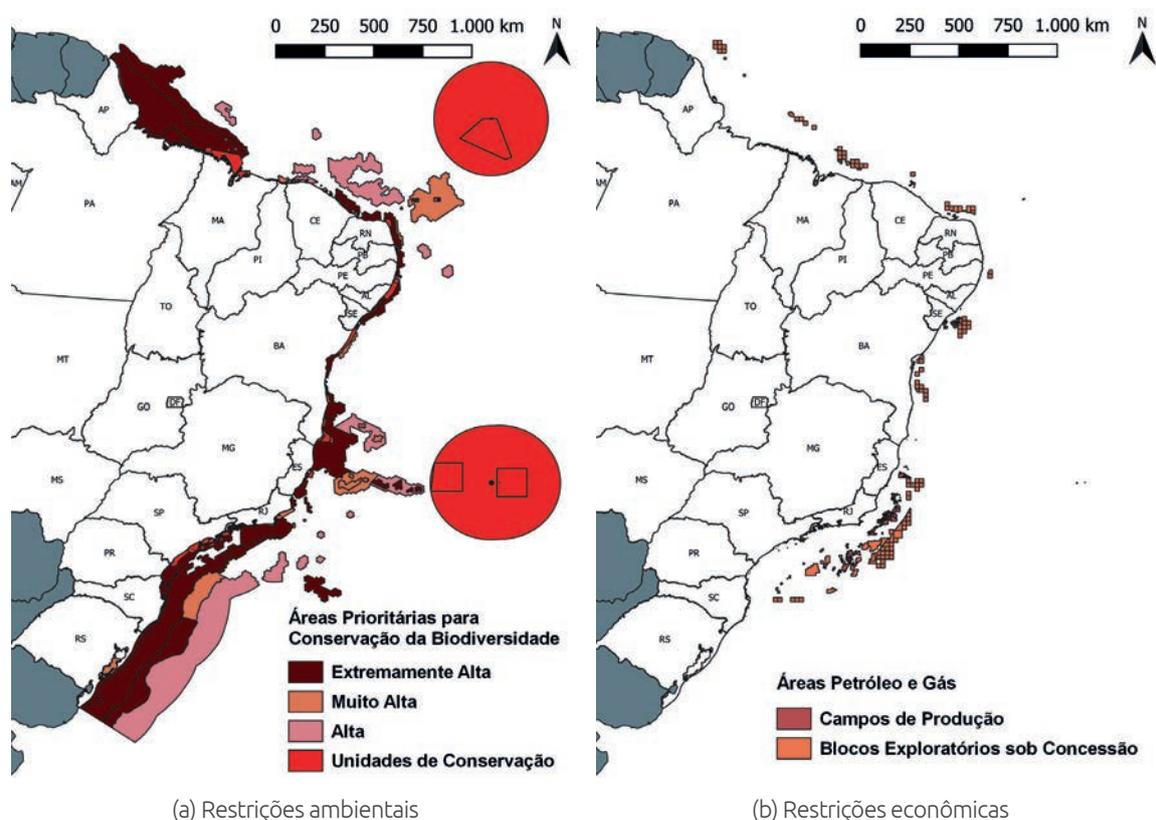
Com relação à restrição técnica de profundidade, a Figura 8 apresenta o potencial teórico com restrição para profundidade de até 100 metros. Observa-se um potencial com adição de áreas exploráveis mais concentradas na costa da Região Sul do país.

**FIGURA 8** – Mapa do potencial teórico de geração de energia elétrica com fonte eólica *offshore* no Brasil com restrições técnicas de 100 m de profundidade



Fonte: Adaptado de Azevedo et al. (2022)<sup>9</sup>

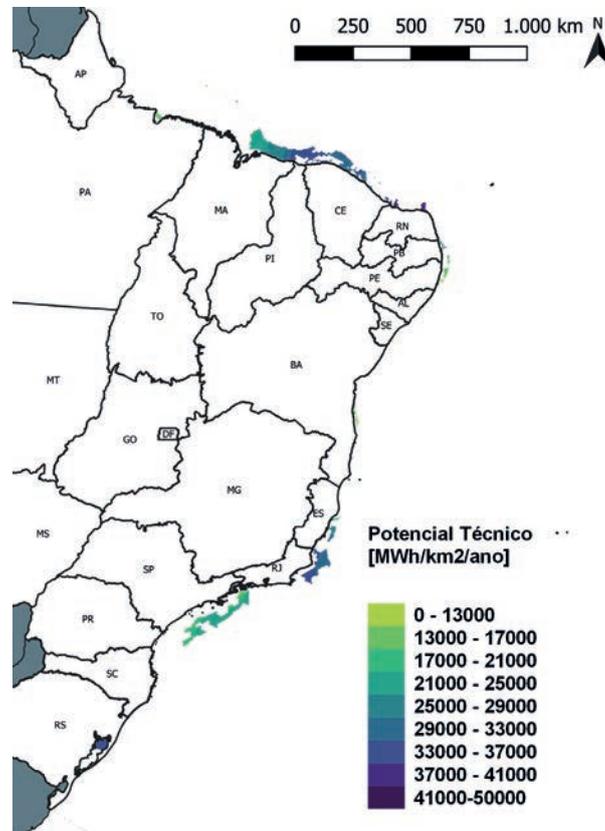
Com relação às restrições ambientais e econômicas, estas são, respectivamente, expostas na Figura 9. À esquerda, todas as áreas prioritárias para conservação da biodiversidade divididas em três categorias de prioridade (extremamente alta, muito alta e alta) e as unidades de conservação do bioma marinho costeiro. Já o mapa da direita apresenta todos os campos de produção de petróleo e gás e os atuais blocos exploratórios que estão sob concessão.

**FIGURA 9** – Mapa das restrições ambientais e econômicas na costa brasileira

Fonte: Azevedo et al. (2022)<sup>9</sup>

Ao aplicar todas as restrições consideradas no Quadro 1, é possível gerar o mapa de potencial técnico para produção de energia com eólica *offshore* na costa brasileira. Portanto, a figura 10 apresenta as áreas que têm maior possibilidade de seguir com empreendimentos de eólica *offshore* no Brasil. Com as restrições impostas, o potencial técnico revela que os locais viáveis para projetos eólicos *offshore* são bastante reduzidos. Ainda assim, no Nordeste, é observada uma grande área de viabilidade na costa entre o estado do Piauí, do Ceará e no Rio Grande do Norte. Também há uma área de grande interesse no Sudeste, entre os estados do Rio de Janeiro e do Espírito Santo. Na Região Sul, observa-se aparentemente uma área de potencial no estado do Rio Grande do Sul, na Lagoa dos Patos. Porém, por se tratar de uma lagoa, tal localidade deve ser analisada com cautela, pois pode haver alguma restrição não considerada neste estudo.

**FIGURA 10** – Mapa do potencial técnico de geração de energia elétrica com fonte eólica *offshore* no Brasil



Fonte: Adaptado de Azevedo et al. (2022)<sup>9</sup>

Vale ressaltar que existem restrições que podem não ter sido consideradas neste estudo. Na perspectiva técnica, por exemplo, outras infraestruturas *offshore* existentes, outros desenvolvimentos consentidos na área analisada, tubulações, cabos e estruturas subterrâneas ativas, rotas de navegação, locais de depósito de munição militar, contornos batimétricos abaixo de 200 m de profundidade, condições oceânicas (ex.: marés, ondas), morfologia dos fundos marinhos e sedimentos, entre outras.

Do ponto de vista ambiental, pode-se ainda considerar restrições de arqueologia marinha; atividade de pesca comercial; atividade aquícola; habitats bentônicos (incluindo os listados no Anexo I da Diretiva Habitats); ornitologia; ecologia de peixes; entre outras.

## 2.3 ASPECTOS TÉCNICOS

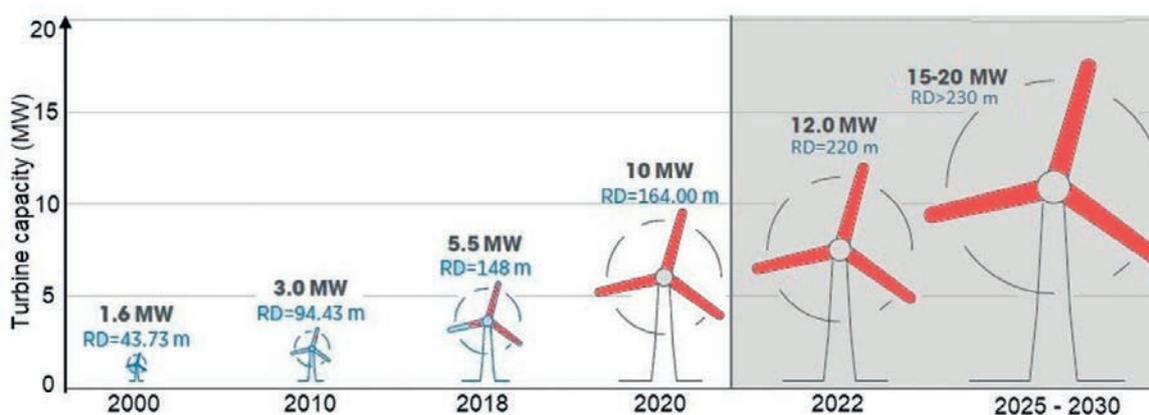
Os projetos eólicos *offshore* utilizam uma tecnologia fundamentalmente semelhante à dos projetos eólicos *onshore* (EPE, 2020), tendo sua principal diferença a fundação. Nesta seção serão tratados os aspectos técnicos da turbina e da fundação de empreendimentos de eólica *offshore*.

### 2.3.1 TURBINAS

A maioria das turbinas eólicas é caracterizada por grandes rotores ativamente guinados para preservar o alinhamento com a direção do vento. O rotor de três pás é o mais comum e normalmente tem um mancal<sup>3</sup> dianteiro separado, com eixo de baixa velocidade conectado a uma caixa de engrenagens que fornece uma velocidade de saída adequada para os geradores. Essa arquitetura geral é evidente na Figura 11. Comumente, com as maiores turbinas eólicas, o passo da pá varia continuamente sob controle ativo para regular a potência em velocidades de vento mais altas.

Diversos aprimoramentos ocorreram desde o início da comercialização da tecnologia eólica, no início dos anos 80, e o setor eólico *offshore* contribui largamente para isso, tendo se destacado em termos de inovação tecnológica ao longo dos últimos 30 anos. Desde a instalação da primeira turbina eólica *offshore* em 1991 – a Bonus-B35 450 kW –, a potência das turbinas eólicas *offshore* tem crescido de maneira significativa. A média global do tamanho da turbina eólica *offshore* ultrapassou a marca de 1,5 MW em 2000, 2,5 MW em 2005 e 6,0 MW em 2020, sendo esperada uma média de 12 MW médios por turbina em 2025 (GWEC, 2022). Alguns fatores contribuem para o fenômeno, como necessidade de diminuição do custo nivelado de energia (LCOE) para aumento da competitividade, a busca pela redução dos custos de manutenção (quantidade menor de turbinas) e de integração da rede eólica *offshore* pelo ganho de escala.

**FIGURA 11** – Potência e diâmetro de rotor de parques eólicos *offshore* existentes e planejados



Fonte: Adaptado de Bošnjaković *et al.*, 2022.

Atualmente, a maior turbina eólica em operação no mundo é o protótipo GE Haliade-X em Rotterdam, que possui uma capacidade instalada de 13 MW, *onshore*. No entanto, esta deve ser em breve ultrapassada pelo projeto da Vestas, que planeja desenvolver uma turbina

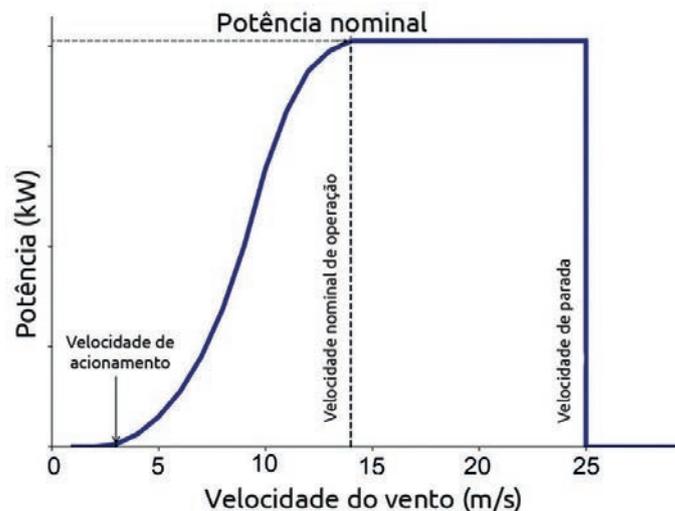
<sup>3</sup> Mancal é um elemento de máquina que serve como apoio fixo para a transmissão mecânica em elementos gigantes (eixos e rolamentos).

eólica de 15 MW de 236 m de diâmetro de rotor, cujo protótipo deve entrar em serviço em 2022 a produção seriada é esperada para o ano de 2024. Turbinas eólicas *offshore* podem atingir dimensões maiores que as *onshore*, porque o transporte até o parque é um fator menos limitante.

A prática de aumentar a potência de uma turbina existente pelo aumento do gerador e pela capacidade de transmissão com o mesmo rotor é comum entre os fabricantes do mercado de eólica. É uma forma de aumentar a potência de saída da turbina eólica na mesma plataforma sem fazer alterações no design da pá. Aumentando a saída do gerador, pode-se produzir mais energia e melhorar a eficiência. Por outro lado, o aumento da fadiga do material, devido ao aumento da carga e à redução da vida útil, deve ser cuidadosamente considerado.

Além do aumento de tamanho e potência instalada por turbina, outras melhorias devem se concretizar até o fim da década, resultando em maior eficiência, confiabilidade e disponibilidade do parque eólico. Cita-se, por exemplo, o aprimoramento aerodinâmico da pá do rotor; sistema de gestão operacional do parque eólico; e, sistema de manutenção e diagnóstico de falhas. A curva de potência de uma turbina eólica (figura 12) mostra sua potência de saída em diferentes velocidades do vento. A produção anual de eletricidade de uma turbina eólica depende, dentre outras coisas, de dois pontos importantes na curva de potência: (i) a velocidade do vento na qual a turbina eólica é movida; e, (ii) a velocidade do vento na qual a turbina eólica é desligada, para evitar estresse e danos nos componentes, caso a velocidade do vento continue a aumentar.

**FIGURA 12** – Típica curva de potência de uma turbina eólica



Fonte: Adaptado de Bošnjaković et al., 2022.

A quantidade de energia produzida por uma turbina depende dos limites de velocidade em que pode operar, de forma que quanto maior a velocidade limite, mais energia a turbina produzirá anualmente. No entanto, verifica-se também um interesse pelo desenvolvimento de turbinas eólicas que gerem energia a baixas velocidades do vento, expandindo o leque de possibilidades e permitindo a construção de parques eólicos em áreas com velocidades de vento médias anuais mais baixas. Por outro lado, é também desejável projetar turbinas eólicas capazes de produzir eletricidade com condições de vento extremamente fortes (deslocando o limite para a direita). Até para turbinas eólicas existentes, é possível melhorar sua curva de potência atualizando o sistema de controle. Ao fazê-lo, a turbina eólica pode ser submetida a forte vibração e estresse por um lado, mas por outro, o aumento da produção de energia é significativo.

Atualmente, são vários os sistemas de frenagem mecânica e aerodinâmica implementados para prevenir a sobrecarga das turbinas eólicas em condições extremas de velocidade de vento. Uma abordagem recente para a solução desse problema utiliza princípios aerodinâmicos e envolve a formação de ranhuras (aberturas) na superfície das pás. Ao colocar as ranhuras, a distribuição de pressão na superfície da lâmina é alterada e a velocidade da turbina eólica é reduzida dentro dos limites permitidos. Dessa forma, o excesso de velocidade do rotor da turbina é efetivamente reduzido sem afetar a produção de energia.

Nas próximas subseções serão tratados os aspectos técnicos dos principais componentes da turbina eólica *offshore*, quais sejam: pás, naceles e torres.

### 2.3.1.1 Pás

Os avanços na tecnologia estão levando a melhor desempenho e confiabilidade dos parques eólicos e menores custos de componentes. Para impulsionar seu desenvolvimento tecnológico, a indústria eólica tem adotado materiais, sistemas e produtos de outros setores, como sensores de engenharia elétrica, tecnologias aeroespaciais e tecnologias de construção naval para fabricação de pás de rotores. À medida em que o grau de exigência tecnológica ultrapassa cada vez mais as fronteiras desses setores, o desenvolvimento de novas soluções torna-se necessário a fim de impulsionar o desenvolvimento de turbinas eólicas.

A aerodinâmica é uma das primeiras preocupações envolvidas no projeto de pás para o setor eólico *offshore* e considerado fator primordial para garantir uma operação satisfatória e eficiente. Nesse sentido, pesquisas envolvendo simulação numérica têm se mostrado bastante úteis.

Em todo o mundo, predomina o projeto de turbinas eólicas com três pás (Bošnjaković *et al.*, 2022). Tal sistema costuma ser escolhido por sua eficiência, pelo nível de ruído dentro de limites admissíveis e pela durabilidade. Muitas alternativas foram exploradas, mas descartadas devido a maior custo e menor eficiência. Adaramola *et al.* (2014) mostram que uma

maior eficiência de custo é alcançada com a construção de turbinas com diâmetro de rotor maior. No entanto, é esperado que problemas relacionados ao transporte e à montagem imponham limites ao aumento das dimensões, fazendo com que pequenas melhorias sistemáticas no projeto das pás sejam bem-vindas. Sabe-se que a pá de rotor de turbina eólica passa por mais ciclos de fadiga em um ano do que uma asa de avião em toda a sua vida útil, sendo essa a maior preocupação de fabricantes e operadores de turbinas. O metal não é satisfatório nesse sentido, sendo comum a fabricação de pás a partir de materiais como poliéster, resina epóxi reforçada com fibras de vidro ou fibra de vidro. Fibra de carbono ou Kevlar também são usados como materiais de reforço para proteção contra quebra. A empresa Enel Green Power está desenvolvendo uma lâmina inovadora feita de um tecido técnico especial (Enel Green Power, 2022), que permite gerar mais energia, reduzir custos de fabricação e facilitar a reciclagem no final da vida útil da lâmina. Além disso, devido ao comportamento mecânico ortotrópico dos materiais compósitos, as propriedades estruturais da pá são determinadas pela orientação das fibras constituintes. Pesquisas têm apontado para as vantagens de otimizar o ângulo de cada camada do compósito (Torregrosa, 2022). Os resultados mostram que a estrutura inclinada aumenta a velocidade crítica do vento para o sistema de controle definido e o sistema elétrico em 10%, o que contribui para uma maior eficiência da turbina eólica.

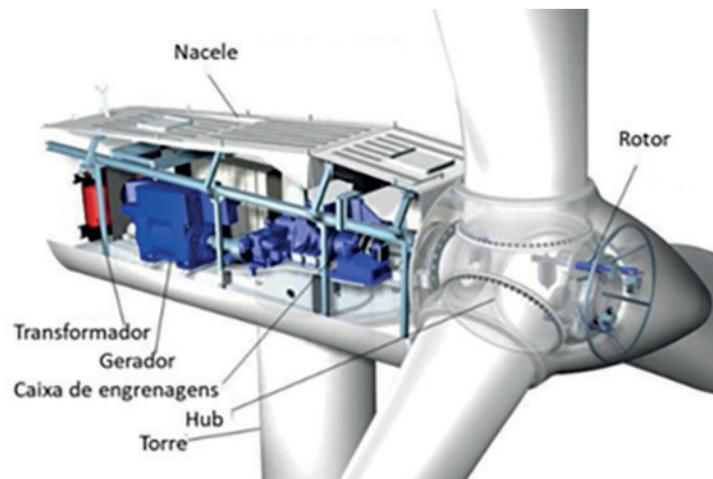
Um tópico de pesquisa atual no campo do design de pás busca desenvolver equipamentos inteligentes que mudam de forma dependendo das condições do vento. Dentro dessa categoria de projeto, inúmeras abordagens vêm sendo consideradas, incluindo superfícies de controle aerodinâmico ou materiais para atuadores inteligentes. As pesquisas têm por objetivo limitar as cargas finais e tensões que afetam a fadiga do material ou para aumentar a absorção dinâmica de energia (Adaramola *et al.*, 2014). Essas superfícies de controle aerodinâmico incluem controle de inclinação, passo de rotação e controle da camada limite. Formas de lâmina mais complexas são possíveis com a introdução de novas tecnologias e materiais de conformação. No entanto, a economia da produção combinada com a dificuldade de analisar um projeto complexo determinará a forma final das pás. Os principais fabricantes de turbinas eólicas estão otimizando características como ângulo de torção, comprimento da corda e geometria das pás.

No que se refere aos materiais empregados, compósitos com fibras de vidro e carbono são usados para a produção de pás para obter maior resistência, menor peso e melhor resistência à corrosão (Bošnjaković *et al.*, 2022). Os principais problemas relacionados a esses materiais são disponibilidade, biodegradabilidade, risco para a saúde humana e alto custo de produção. Por esse motivo, pesquisas estão sendo conduzidas sobre a possibilidade de substituição desses materiais por fibras naturais.

### 2.3.1.2. Naceles

O arranjo básico da maioria dos sistemas de transmissão abrigados na nacele de turbinas eólicas atualmente consiste em geradores conectados a caixas de engrenagens, encarregadas de acelerar a rotação relativamente lenta das pás da turbina (normalmente 5 a 15 rotações por minuto para uma máquina moderna) para altas velocidades (1.000 a 1.800 rotações por minuto), medida necessária para gerar eletricidade usando um gerador de indução de alta velocidade. Ter todas essas partes móveis torna a caixa de engrenagens uma das partes de manutenção mais frequente de uma turbina eólica.

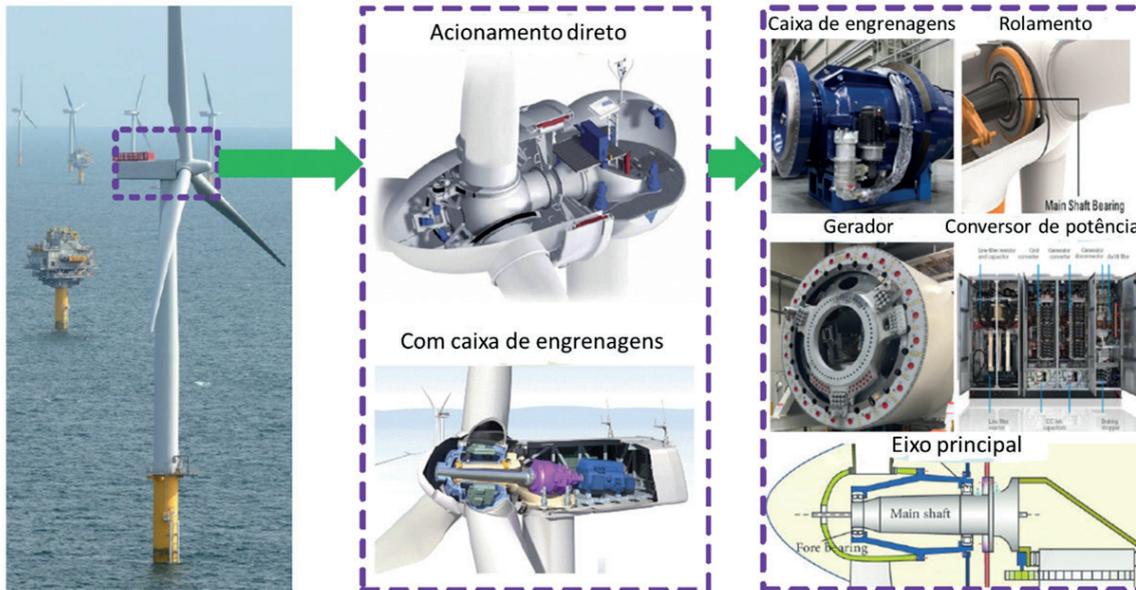
**FIGURA 13** – Nacele típico de uma turbina eólica *offshore*



Fonte: Adaptado de Bošnjaković *et al.*, 2022.

Uma alternativa é usar um gerador de “**acionamento direto**” (DI) que pode gerar eletricidade em velocidades muito mais baixas. Os sistemas de DI não requerem uma **caixa de engrenagens** e, portanto, têm menos peças móveis. No entanto, eles geralmente usam ímãs permanentes, que requerem materiais caros, pesados e de terras raras, como neodímio e disprósio, e geralmente requerem geradores mais pesados do que máquinas de engrenagens para uma determinada capacidade de turbina.

Ambas representam as **duas alternativas** principais do mecanismo dinâmico conhecido como o sistema de transmissão da turbina, segmento que promove a conversão de energia mecânica em elétrica e transmite as cargas do rotor para a base e a torre. As configurações de sistema de transmissão e os componentes que as caracterizam estão representados na Figura 14.

**FIGURA 14** – Configurações de sistemas de transmissão e respectivos componentes

Fonte: Adaptado de Guo *et al.*, 2014; OpenPR; Smalley, 2015; e Zheng *et al.*, 2020.

Há uma variedade de tecnologias de transmissão de turbinas eólicas disponível, com prós e contras para cada um em termos de custo, peso, tamanho, fabricação, materiais, eficiência, confiabilidade e operação e manutenção (O&M). Na medida em que turbinas eólicas *offshore* aumentam de tamanho, a busca por sistemas de transmissão mais compactos e leves passa a ser providência praticamente obrigatória por reduzir a massa da nacela e, conseqüentemente, massas e custos de torre e fundação ou plataforma flutuante. Para conseguir essas reduções, identifica-se uma forte tendência de aumento da integração mecânica do rolamento principal, da caixa de engrenagens e do gerador (Stehouwer; van Zinderen, 2016).

Em termos de sistema de conversão de energia, geradores magnéticos síncronos permanentes (PMSGs) com conversor de potência total estão se tornando mais comuns do que geradores de indução duplamente alimentados (DFIGs) com sistemas conversores de potência parcial. O conceito do DFIG consiste em uma máquina de anel deslizante de rotor enrolado assíncrono, na qual os enrolamentos do rotor são conectados a um conversor por meio de anéis coletores e escovas, usando um sistema de transmissão padrão de alta velocidade. A estreita faixa de velocidades suficiente para a turbina (de mais ou menos 30%) permite um tamanho pequeno do conversor, contribuindo para que esse sistema seja caracterizado por oferecer alta eficiência em carga nominal. Já nos geradores tipo PMSG, ao contrário do que ocorre nos DFIGs, toda a potência gerada passa por um conversor, oferecendo alta eficiência em todas as velocidades de operação (Veers *et al.*, 2020).

Preocupações com o fornecimento de materiais de terras raras normalmente usados em PMSGs também estimularam o interesse por tecnologias alternativas, como geradores supercondutores (Veers *et al.*, 2020). Independentemente da escolha do projeto do sistema de transmissão, as cargas e as condições operacionais às quais o sistema de transmissão está sujeito são derivadas dos casos de carga de projeto descritos na Comissão Internacional Eletrotécnica (IEC): 61400-1, padrão de projeto para vento terrestre, e IEC 61400-3-1 e IEC 61400-3-2, padrões de projeto para aplicações eólicas *offshore* fixas e flutuantes.

As usinas eólicas *offshore* modernas são ativos de alto valor e há um interesse crescente na extensão da sua vida útil. O tamanho da turbina e o arranjo do sistema de transmissão podem, no entanto, tornar a substituição do rolamento principal mais difícil e cara, geralmente exigindo a remoção do rotor. Consequentemente, os rolamentos principais serão cada vez mais considerados como parte da estrutura de carga, com implicações de custo de falha mais severas como resultado.

Uma consequência adicional de níveis de integração entre os componentes do sistema é que os requisitos operacionais do rolamento principal estarão cada vez mais vinculados aos de outros componentes. Por exemplo, além de suportar o rotor da turbina, algumas configurações DFIGs exigem que o mancal principal também suporte o rotor do gerador enquanto mantém nele uma folga apropriada. **Abordagens combinadas para a modelagem e avaliação de turbinas eólicas dos sistemas de transmissão se tornarão, portanto, cada vez mais importantes.** Por fim, novos conceitos de design de rolamentos principais também estão sendo desenvolvidos e testados, incluindo rolamentos autocompensadores de rolos assimétricos (Loriemi *et al.*, 2021), mancais principais substituíveis em campo e mancais lisos (Rolink *et al.*, 2020, 2021).

As caixas de engrenagens das turbinas eólicas continuam a aumentar em tamanho (até 3m de diâmetro) e potência (até 15 MWs) (Vaes *et al.*, 2021). Caixas de engrenagens de vários estágios usando quatro ou mais sistemas planetários, densidades de torque de 200 newton-metros por quilograma e taxas de aumento de velocidade de até 200 agora estão disponíveis (Daners e Nickel, 2021). Para obter mais reduções de custo, foram introduzidos projetos de caixas de engrenagens modulares (Wind Energy 2021). A previsão é de uma vida útil mínima de 20 anos, conforme especificado em padrões de projeto de caixas de engrenagens.

Provisões para serviço de torre ou substituição de componentes da caixa de engrenagens estão se tornando mais comuns, fazendo-se necessárias para componentes que têm uma vida útil inferior à da caixa de engrenagens. O sistema de caixa de engrenagens compreende muitos elementos (principalmente eixos rotativos, engrenagens e rolamentos), o que faz com que sua confiabilidade seja o produto da confiabilidade de todos os modos de falha para os quais existe um cálculo. Contudo, parcela significativa dos modos de falha experientes

em operação não possuem um cálculo de confiabilidade padronizado, provocando uma diferença entre a confiabilidade aparente observada em operação e a confiabilidade de referência de projeto calculada. Isso não é incomum e ocorre em outras indústrias, embora o impacto do custo de O&M para turbinas eólicas deva ser mais severo.

Projetos mais leves e compactos são a opção mais econômica, especialmente para grandes turbinas. Como resultado, a integração de sistemas eletromecânicos com o mancal principal tem sido uma tendência recente. Nesse contexto, P&D tem se voltado para a busca de maior confiabilidade e melhor entendimento dos modos de falha em operação de caixas de engrenagens e rolamentos, bem como para o desenvolvimento de novas tecnologias, como mancais lisos. (Veers et al., 2020). Os conceitos de velocidade média se mostraram capazes de conciliar demandas de alta velocidade e projetos drive-drive, enquanto caixas de engrenagens multi-estágios de alta velocidade também têm sido um foco de pesquisa em anos recentes. Para turbinas de uso *offshore*, há uma tendência recente de aumento para sistemas de acionamento direto e PMSGs com sistemas conversores de potência total, em detrimento de DFIGs com sistemas conversores de potência parcial. Os geradores supercondutores também são vistos como uma alternativa atraente para PMSGs devido à grande quantidade de materiais de terras raras necessários para PMSGs.

Dado o caráter crítico dos componentes do sistema de transmissão em turbinas eólicas, a manutenção preditiva é vista como um elemento essencial. Grande parte das turbinas mais novas e maiores, com mais de 2,5 MW ou 3 MW, tem sistemas de monitoramento de condição dedicados, que normalmente abrangem a caixa de engrenagens, os rolamentos principais e o gerador.

As tecnologias de monitoramento implantadas para sistemas de transmissão de turbinas eólicas têm boa assertividade em diagnósticos de falhas, especialmente para componentes de alta velocidade. O desempenho de algumas aplicações em termos de prognóstico ainda precisa melhorar, o que apresenta uma oportunidade para superar o progresso feito pela comunidade científica. Por outro lado, há algum tempo a indústria vem buscando obter previsões precisas da vida útil de cada componente, que é um dos objetivos dos prognósticos de falha típicos. Dentre os vários subcomponentes do sistema de transmissão, as falhas nos rolamentos mostraram ser predominantes e foram ativamente investigadas por indústrias e pesquisadores.

### 2.3.1.3. Torres

Atualmente, a torre que sustenta as turbinas eólicas é geralmente feita de aço para se obter uma estrutura sólida e resistente. Outro material utilizado para a construção da torre é o concreto, que também atende aos requisitos de integridade estrutural, resistência e durabilidade. Técnicas de otimização têm sido empregadas recentemente a fim de

promover a maximização da capacidade de carga, reduzindo o uso de material e o custo (Stratton, 2014).

Durante a operação de um parque eólico, a torre é submetida a cargas intermitentes devido às mudanças na velocidade do vento, o que pode causar alguma inclinação para a frente e para trás. Para reduzir esse movimento, a frequência da torre deve ser equilibrada com a frequência natural dos outros componentes. Portanto, torna-se imperativo analisar as relações entre torre e outros componentes da turbina eólica, como o rotor, a nacelle e a fundação. Além disso, custo do material, fabricação de componentes, montagem e questões ambientais de impacto devem ser considerados na seleção do projeto.

### 2.3.2 FUNDAÇÕES

A monoestaca, jaqueta e flutuante são hoje considerados os três principais tipos de fundação para instalações eólicas *offshore*. Cada qual com suas vantagens e desvantagens influenciam, de maneira direta, a segurança e a preservação das estruturas *offshore*. A Figura 15 oferece uma visão dos diferentes tipos de fundação eólica *offshore*.

**FIGURA 15** – Tipos de fundação eólica *offshore*



(da esquerda para a direita: monoestaca, jaqueta, jaqueta torcida, plataforma flutuante *tension-leg*, plataforma semissubmersível e mastro-boia)

O tipo de fundação mais comum para turbinas eólicas *offshore* é a monoestaca: uma única estaca de seis a oito metros de diâmetro e 20 a 30 m de comprimento abaixo do fundo do mar. Esse tipo responde por cerca de 80% das fundações instaladas.

As fundações jaqueta devem mais que quadruplicar em projetos futuros, acompanhando o que deve ser a provável queda das monoestacas, cuja participação deve experimentar queda de 28,4% de participação no mercado (Bošnjaković *et al.*, 2022). Deve-se a isso a tendência de migração dos projetos para águas mais profundas, aliada ao aumento da capacidade de fabricação para as fundações jaqueta.

A participação de fundações flutuantes também está aumentando. No entanto, ainda está em estudo a possibilidade de adaptar as fundações monoestacas para águas mais profundas, mantendo-se os custos baixos, o que pode acarretar sua permanência como o tipo de fundação dominante por algum tempo. Levando-se em conta informações sobre projetos em planejamento, as fundações de gravidade aumentarão sua participação no mercado porque são mais adequadas para solos rochosos, onde pode ser difícil cravar monoestacas.

Espera-se um aumento do uso de turbinas eólicas flutuantes, à medida que os parques eólicos se distanciam da costa, localizando-se em águas mais profundas. As primeiras experiências destacam diferenças em termos de comportamento dinâmico e vida útil do sistema de transmissão em turbinas eólicas flutuantes quando comparadas às turbinas de base fixa, especialmente para os rolamentos principais (Bošnjaković *et al.*, 2022). À medida em que aumentam os tamanhos das turbinas *offshore*, a flexibilidade desses componentes e potenciais efeitos de acoplamento dinâmico passam a adquirir maior importância durante a modelagem e análise do projeto.

A tecnologia das fundações flutuantes representa um meio fundamental para o avanço da geração eólica *offshore* pelo acesso a locais com profundidades de água superiores a 60 m, facilitação da instalação da turbina, mesmo em profundidades intermediárias (de 30 a 50 m), além de ser uma alternativa de baixo custo às fundações fixas. No geral, fundações flutuantes têm benefícios ambientais em comparação com fundações fixas pela menor necessidade de intervenção no fundo do mar durante a instalação. Há planos para instalar mais turbinas eólicas flutuantes no sudeste da Ásia, na Oceania e no norte da Europa.

O controle de vibração de uma turbina eólica flutuante torna-se cada vez mais relevante à medida que seu tamanho aumenta. Portanto, sistemas de amarração de três ramais para turbinas eólicas flutuantes têm sido alvo de pesquisa (Liu *et al.*, 2021). O balanço, o passo e os movimentos de guinada da turbina eólica em ondas regulares e irregulares são calculados para quantificar o desempenho do sistema de amarração.

As estruturas flutuantes das turbinas eólicas devem ser capazes de suportar condições adversas. A combinação dos efeitos provocados por ventos fortes e ondas intensas causam vibração, fadiga do material e cargas severas em diversos elementos da turbina eólica. São fatores que aumentam o risco de falhas e requerem maiores esforços de manutenção.

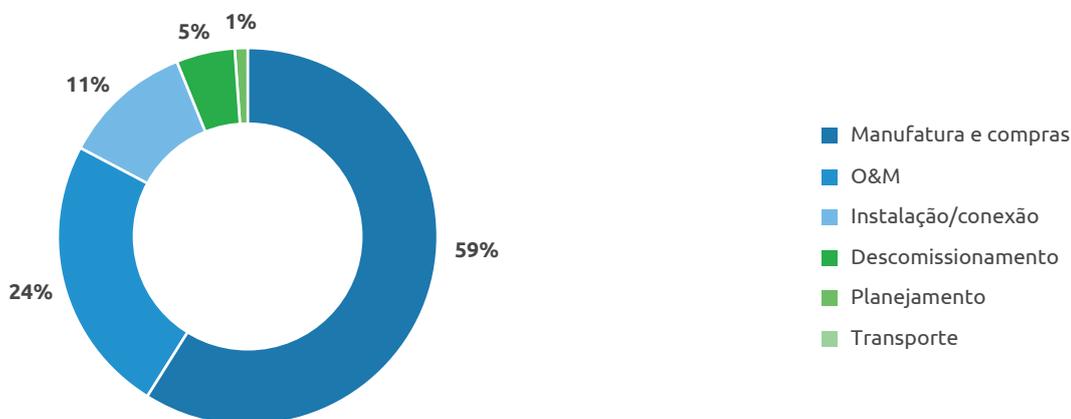
Assim, no contexto do uso das fundações flutuantes, a programação de manutenção pode reduzir custos e aumentar a disponibilidade da turbina. Isso inclui monitoramento remoto, aprimorada nos últimos anos, o que permite a detecção precoce de problemas e manutenção preventiva. Um equipamento submarino também foi desenvolvido para inspeção e reparo de componentes de difícil acesso.

## 2.4 CADEIA DE VALOR DA EÓLICA OFFSHORE

O avanço das tecnologias aplicadas à energia renovável, com sua crescente maturidade e competitividade de custo, pode ajudar a trazer benefícios econômicos e ambientais a um alinhamento próximo. Acelerar o desenvolvimento do campo das energias renováveis e de eficiência energética pode ter repercussões socioeconômicas importantes em termos de Produto Interno Bruto (PIB), bem-estar social e empregabilidade (IRENA, 2018b).

Em se tratando primeiramente de empregabilidade, há a expectativa de que o setor eólico – *onshore* e *offshore* incluídos – empregue cerca de 2,2 milhões de pessoas até 2030 e mais 2,1 milhões até 2050 (IRENA, 2018b). No setor eólico *offshore* em particular, os novos empregos criados poderiam advir da já consolidada indústria de exploração *offshore* de combustíveis fósseis. Considerando o potencial benefício econômico, a eficiência de novas políticas de incentivo ao setor *offshore* dependem de conhecimento sobre os setores que mais empregam ao longo da cadeia de valor.

A Figura 16, que toma como exemplo o desenvolvimento de uma fazenda *offshore* de 500 MW, revela que os custos dos segmentos da cadeia de valor da eólica *offshore* não se dividem de maneira equânime, havendo concentração de mão de obra nos segmentos de manufatura e compras (59%), seguido por operação e manutenção (O&M) (24%) e instalação/conexão na rede (11%). Tal distribuição permite que países que não se dediquem à atividade da manufatura ainda possam se aproveitar da relevância relativa de outras atividades que compõem uma fração importante da cadeia de valor da indústria eólica *offshore* (IRENA, 2018b).

**FIGURA 16** – Distribuição dos recursos humanos na cadeia de valor para o desenvolvimento de uma fazenda eólica *offshore* de 500 MW

Fonte: Adaptado de IRENA, 2018b.

Além de ser um gerador massivo de oportunidades de emprego, o desenvolvimento do setor eólico *offshore* também traz consigo o valor criado pelas atividades econômicas que giram em torno dele, principalmente compra de materiais, instalação de turbinas, atividades de O&M, entre outras. Considerando como exemplo uma fazenda *offshore* de base fixa de 500 MW instalada próxima à costa escocesa, os custos com a turbina (25%) e com atividades de O&M (40%) perfazem cerca de 65% do custo total. Os custos com O&M tendem a variar de região para região, dependendo fortemente das condições de trabalho locais. As turbinas também apresentam uma participação relevante na composição dos custos, tendo sua proporção influenciada fortemente pela acessibilidade de cada país a esses equipamentos (Rambol, 2022).

Nos últimos anos, houve um aumento no mercado tecnológico de componentes para produção de energia eólica *offshore*, levando a indústria do setor a tornar-se cada vez mais competitiva (Ramires, 2019). O aumento da competitividade do setor e, consequentemente, o aumento da concorrência têm contribuído para reduzir a margem de lucro dos fabricantes, mesmo em algumas das maiores produtoras do mundo. Tal aspecto resulta na redução dos preços de venda de vários produtos, com repercussões na difusão da energia eólica *offshore* para novos mercados.

Os dez principais fabricantes de aerogeradores *offshore* responderam, em 2018, por 85% de todo o mercado. Tais fabricantes encontram-se concentrados na Europa, o que revela um notável grau de amadurecimento da cadeia de valor na região. As principais empresas envolvidas na cadeia de fornecimento de aerogeradores estão descritas no Quadro 2 (Rambol, 2022).

**Basicamente, a concretização do potencial eólico *offshore* por meio do fortalecimento da cadeia de valor dependerá de capacidade da indústria local no aproveitamento de**

**atividades econômicas já existentes e adaptá-las a fim de desenvolver novas atividades.** À medida que o mundo transita de uma economia baseada em combustíveis fósseis no setor de energia para uma que depende de fontes renováveis, há muitas sinergias que podem ser aproveitadas com alguns segmentos industriais já existentes, sendo o setor de petróleo *offshore* o principal deles.

**QUADRO 2** – Principais atores de alguns dos diferentes segmentos da cadeia de valor eólica *offshore*

Componentes produzidos/ Serviços	Companhia	País
Principais fabricantes	Vestas	Dinamarca
	Siemens Gamesa	Espanha
	GE Renewable Energy	Estados Unidos
	Envision	China
	Enercon	Alemanha
	A2Sea	Dinamarca
Principais instaladoras	Van Oord/MPI	Holanda
	Fred Olsen Wind Carrier	Noruega
	Seajacks	Reino Unido
	GeoSea	Bélgica
	Ørsted	Dinamarca
	Vattenfall	Suécia
Desenvolvedoras	E-on	Alemanha
	Iberdrola	Espanha
	Innogia	Alemanha
	EEW	Alemanha
	Sif Tecade	Holanda
Fundações	Bladt Industries	Dinamarca
	Smulders JV	Bélgica
	Windar Renewables	Espanha

Fonte: Adaptado de Junqueira, 2020.

As últimas análises macroeconômicas desenvolvidas pela IRENA dão conta de que a transição energética necessária para atingir os níveis de descarbonização impostos como metas do Acordo de Paris resultaria na perda de cerca de 7,4 milhões de empregos no segmento dos fósseis até o ano de 2050. Esse impacto seria mitigado e até mesmo revertido pela oferta de 18,8 milhões de vagas de emprego no segmento dos renováveis (IRENA, 2018b). O caso do setor eólico *offshore* é simbólico ao ilustrar o que poderia ser uma transição mais suave entre esses dois cenários. Certo é que pelo menos alguns conjuntos de habilidades e *know-how* ocupacional do setor *offshore* de petróleo e gás são aplicáveis a carreiras dessa fonte de energia, permitindo a mobilidade de profissionais de um setor para o outro. Em alguns casos, a requalificação e adaptação de habilidades existentes será mais suave, enquanto, em outros, haverá a necessidade de desenvolvimento de habilidades novas e

específicas. Na Alemanha, por exemplo, o *know-how* de trabalhadores de estaleiros foi aproveitado no apoio à construção de fundações e torres para fazendas eólicas *offshore* (Hülsen, 2012).

A sinergia entre a cadeia de valor do setor de óleo e gás e o setor eólico *offshore* vem se consolidando em diferentes segmentos de atuação consonantes a ambas as atividades. Empresas do setor de óleo e gás oferecem uma gama de informações para o planejamento de projeto e levantamentos topográficos, abrangendo aspectos ambientais, geofísicos e geotécnicos relevantes para instalações das eólicas *offshore*. Dadas as semelhanças entre os dois setores no meio marinho, há desafios comuns de trabalhar em um ambiente difícil, com implicações para saúde e segurança. No segmento manufatureiro, sinergias com o setor de óleo e gás estão relacionadas com a fabricação de estruturas de suporte. A expertise em projetar estruturas de apoio para unidades *offshore* de exploração de petróleo é altamente relevante para as unidades eólicas *offshore*, especialmente em locais desafiadores, como regiões de águas profundas. Fabricantes tradicionais do setor de óleo e gás, como Bladt, EEW, Sif e Smulders, fizeram a transição em direção ao setor eólico *offshore*.

Ampla possibilidade de sinergia se dá, igualmente, em instalações e conexões de rede relacionadas às atividades de fundações da turbina, arranjo de cabos, estruturas de subestações, estruturas de aço etc. Empresas de petróleo e gás já desenvolvem trabalhos de instalação eólica *offshore* (3sun, Ecosse Subsea e ROVOP, por exemplo) aproveitando as competências existentes. Também na área de cabos e conexões, há empresas realizando a transição do setor de óleo e gás para o eólico *offshore*, como a JDR Cables (IRENA, 2020). Embora as necessidades nessa área diverjam de um setor para o outro, há uma semelhança muito grande quando se olha para os componentes mais simples do sistema de cabos, como conectores, terminais, materiais de proteção, entre outros.

Subestações eólicas *offshore* e óleo e gás são outro componente de projeto em que também se vê muita semelhança. Os contratos de subestação são geralmente terceirizados, havendo procura por parte dos desenvolvedores de parceiros altamente qualificados em transmissão de energia e engenharia *offshore*. Fornecedores do setor de óleo e gás surgem como os parceiros ideais, dada a sua vasta compreensão dos modelos de contratação prevalentes para esse tipo de estrutura e o seu forte historial num setor mais maduro. Como exemplo se pode incluir Bladt, Heerema, HSM Offshore e Sembmarine SLP.

Finalmente, no segmento de O&M, fornecedores de óleo e gás já têm uma experiência considerável na manutenção de ativos *offshore* e há sinergia relevante em termos de manutenção planejada, detecção de defeitos e reparo de ativos. Além disso, padrões de segurança e prática de manutenção são altamente transferíveis para a eólica *offshore*. Habilidades necessárias para realizar inspeção subaquática, manutenção e reparo, que podem ser transferidas após um treinamento incremental. Na verdade, muitos fornecedores de petróleo e gás têm disponibilizado serviços de manutenção e inspeção para

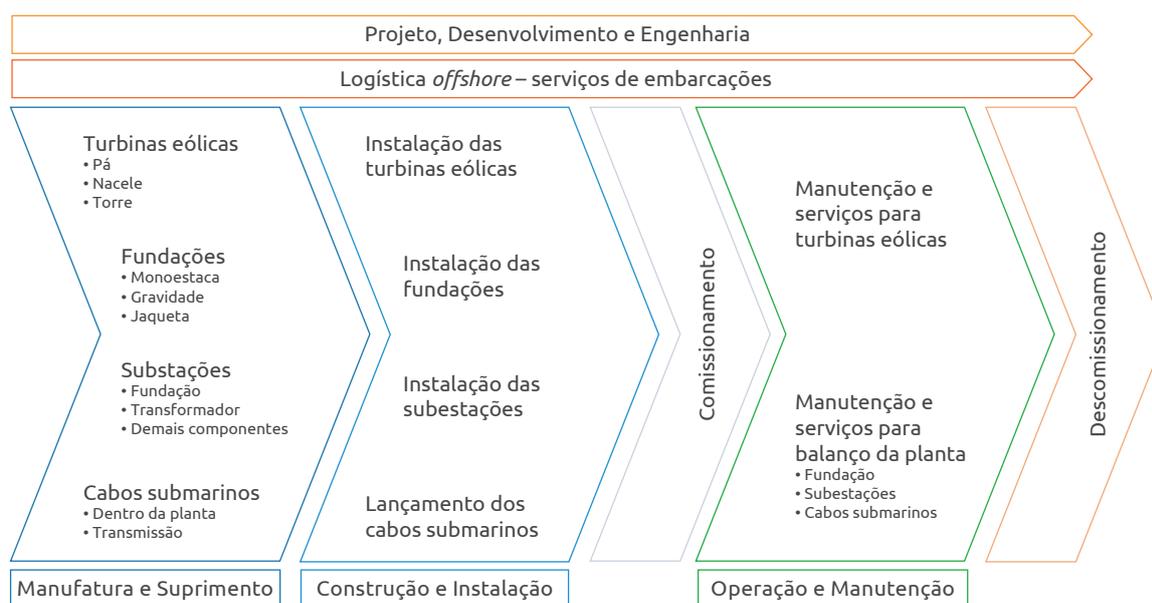
unidades eólicas *offshore* (Briggs Marine, 3Sun e engenharia de subsuperfície da Hughes, por exemplo) (IRENA, 2020).

O caso brasileiro é emblemático no contexto supracitado. Como em qualquer mercado emergente dessa natureza, será exigido da cadeia de suprimentos do Brasil um amplo desenvolvimento para captura do máximo benefício local disponibilizado pelo crescimento da indústria eólica *offshore*. **Assim, com cadeias de suprimentos maduras nos setores relacionados de energia eólica *onshore*<sup>4</sup> e petróleo e gás<sup>5</sup>, o Brasil tem uma excelente posição inicial em comparação com muitos mercados emergentes.**

Contudo, questiona-se a previsibilidade e a segurança jurídica do atual quadro regulatório no Brasil, configurando-se como um grande obstáculo para os investimentos iniciais da cadeia de suprimentos eólicos *offshore* no país (Ramboll, 2022). De qualquer forma, a velocidade e a eficiência em suprir essas lacunas podem ser alavancadas pela cooperação com países estrangeiros e governos com experiência em energia eólica *offshore*.

A cadeia de valor da indústria eólica *offshore* consiste em sete segmentos: projeto, desenvolvimento e engenharia; gerenciamento de projetos; logística *offshore*; manufatura e suprimento; construção e instalação, operação e manutenção; comissionamento; e descomissionamento. A Figura 17 relaciona ilustrativamente os principais segmentos da cadeia de valor da indústria eólica *offshore*. Nas seções a seguir, cada umas das fases da cadeia serão analisadas.

**FIGURA 17 – Segmentos principais da cadeia de valor do mercado eólico *offshore***



Fonte: Adaptado de RAMBOLL, 2022.

4 Mais de 20 GW de energia eólica *onshore* instalada no final de 2021, prevista para 40 GW até 2029.

5 Previsão de 5,5 milhões de barris por dia até 2029.

## 2.4.1 PROJETO, DESENVOLVIMENTO E ENGENHARIA

O gerenciamento, ao longo do ciclo de vida de uma fazenda eólica *offshore*, pode variar de projeto para projeto. Alguns desenvolvedores dispõem de equipes técnicas preparadas em seu próprio corpo constitutivo, que lidam com todo o ciclo. Outros, acionam prestadores de serviço, que arcam com a maior parte do gerenciamento.

Prestadores de serviço no setor eólico *offshore* incluem tanto serviços de gerenciamento de projetos e suporte técnico quanto serviços especializados, com serviços de engenharia, suporte regulatório e de licenciamento, certificação, gestão, assessoria comercial, gestão de seguros, meio ambiente, consultoria, entre outros. Esses serviços são bem estabelecidos no Brasil para setores relacionados ao eólico *offshore*, como eólico *onshore* e óleo e gás.

Por exemplo, a ABEEólica, Associação que congrega mais de 100 empresas de toda a cadeia produtiva do setor eólico no Brasil, tem 23 membros que estão alocados na categoria “Engenharia, Consultoria e Construção” e que poderão estender seus serviços para a indústria eólica *offshore*. No entanto, ainda é necessário que o país adquira mais conhecimento especializado em energia eólica *offshore* a partir da experiência consolidada de agentes de fora do Brasil, como AECOM, Arcadis, DNV, ERM, Ramboll e TetraTech (Ramboll, 2022).

Desenvolvedores de projetos em energia eólica *offshore* são os agentes responsáveis pelos estágios iniciais das atividades, como projeto de engenharia, financiamento e, em muitos países, pelas pesquisas no local e licenciamento de obras. Muitos desenvolvedores permanecem no projeto, arcando com a construção e operação do parque eólico *offshore*. Historicamente, desenvolvedores buscam expandir seus portfólios, com o objetivo de desenvolver e vender os ativos, bem como *joint ventures* e combinações de parcerias estratégicas.

Empresas globais como Equinor e Shell têm se mobilizado para desenvolver parques eólicos *offshore* no Brasil. Há também interesse por parte de desenvolvedores brasileiros como a Eólica Brasil e a Neoenergia (holding do grupo Iberdrola). O setor de energia eólica *onshore* no Brasil já conta com atores importantes, como Casa dos Ventos, Omega, Ecoenergia, Enel e EDPR. No entanto, há de se ressaltar que o custo de um típico parque eólico *offshore* é bem maior do que um *onshore* convencional. Outras barreiras podem incluir a distância entre os setores no que se refere à complexidade do ambiente marinho, ao aumento da escala dos componentes e ao tamanho da organização interna para gerenciamento e manutenção. Além disso, verifica-se que os maiores desenvolvedores *onshore* locais não estão entrando no mercado *offshore*, já que o potencial do mercado eólico *onshore* brasileiro ainda tem espaço para crescimento.

Os desenvolvedores brasileiros de petróleo e gás também estão começando a avaliar as oportunidades no segmento de energia eólica *offshore*. É previsto que tais companhias possam ter alguma dificuldade na transição, tendo de se esforçar para adaptar seus

projetos habituais e especializados com margens de lucro mais generosas, para projetos de produção e instalação em série de energia eólica *offshore*, com margens de lucro mais baixas. Um exemplo é a Petrobras, que em 2018 entrou em acordo com a Equinor para o desenvolvimento conjunto da energia eólica *offshore* no Brasil. Em maio de 2022, os parques eólicos *offshore* Aracatu 1 e 2, com capacidade conjunta de mais de 4 GW, foram anunciados como em avaliação de viabilidade ambiental pela Equinor e Petrobras.

No que se refere à cadeia de suprimentos de materiais, embora os setores relacionados possam facilitar a transição para o fornecimento de componentes eólicos *offshore*, o desenvolvimento de capacidades consistentes de fornecimento requer instalações e equipamentos adequados, força de trabalho treinada e acesso a matérias-primas. Embora seja desafiador desenvolver uma cadeia de suprimentos de parques eólicos *offshore*, a maior parte dos empregos gerados no ciclo de vida de um projeto encontra-se na cadeia de fornecimento. Um aspecto-chave para o desenvolvimento de uma cadeia de suprimentos forte é a continuidade do projeto. Os fabricantes exigem um *pipeline* completo e contínuo de projetos eólicos *offshore* para garantir que seus investimentos, em geral de grande porte, obtenham retorno.

## 2.4.2 MANUFATURA E SUPRIMENTO

### 2.4.2.1 Turbinas

As turbinas eólicas *offshore* possuem os mesmos princípios de funcionamento das turbinas *onshore*, havendo diferença de tamanho e robustez, com ampla superioridade das primeiras, bem como de tratamento anticorrosivo aplicado aos seus componentes, sendo os principais nas nacelle, pás, torre e fundações. Essas últimas serão tratadas posteriormente em seção especial, por abrangerem uma seara bastante vasta.

Primeiramente, as nacelles e os *hubs* de uma turbina eólica *offshore* abrigam os elementos-chave da geração de energia (caixa de engrenagens, gerador, sistema de frenagem e unidade de controle), encarregando-se de converter a energia cinética do vento em energia elétrica.

Os principais fabricantes de nacelle eólica *offshore* são também os mesmos de turbinas eólicas *offshore*: Vestas, Siemens Gamesa Renewable Energy (SGRE) e GE Energia Renovável (GE). Cada um desses *players* já estabeleceu sua capacidade de fabricação no Brasil dentro do segmento *onshore* (ABDI, 2022). A Vestas fabrica e monta nacelles e polos no estado do Ceará (Governo do Ceará, 2019). A SGRE produz nacelles no estado da Bahia (Panorama Offshore, 2019). Finalmente, a GE monta turbinas, também na Bahia, com mais de 60% de seus componentes fornecidos.

Enquanto a cadeia de fornecedores da indústria eólica *onshore* tem capacidade para atender ao mercado doméstico, as aplicações *offshore* veem aumentar significativamente o tamanho dos componentes da nacela e do cubo, o que impede que as atuais instalações de fabricação sejam usadas para energia eólica *offshore*. O transporte terrestre de componentes não é econômico nem tecnicamente viável em virtude das grandes dimensões e do peso. É necessário que haja grandes investimentos em novos polos produtivos perto do destino de fornecimento. Assim, é preciso estabelecer uma capacidade manufatureira local de naceles e *hubs* específicos para aplicações *offshore*. Entretanto, essa realidade mostra-se um pouco distante, uma vez que requer um grande volume de demanda.

O setor de fornecimento de pás é visto como estratégico da cadeia de valor da energia eólica. A fabricação de pás para eólicas *offshore* se dá, em grande medida, por meio de relações já consolidadas entre fornecedores e *players* da indústria manufatureira já consagrados, havendo pouca margem para a entrada de novos agentes devido às altas barreiras tecnológicas, bem como ao valor da propriedade intelectual associada ao design da lâmina e à fabricação (Ramboll, 2022).

Ao contrário do que ocorre no setor eólico *offshore*, muitas das pás de turbinas eólicas terrestres do Brasil são subcontratadas para a empresa brasileira Aeris Energy, a maior fabricante de pás de turbinas eólicas da América Latina. A Aeris Energy atualmente fornece pás de turbinas eólicas para Vestas, Nordex-Acciona, WEG, GE e SGRE. Em 2021, a Aeris fabricou pás com mais de 80 metros de comprimento para a Nordex-Acciona, que foram embarcadas diretamente do Complexo Portuário do Pecém-CE, onde a fábrica da Aeris Energy tem capacidade de produção anual de 9 GW (Ramboll, 2022).

Apesar de uma robusta indústria de eólica *onshore* e força de trabalho experiente na fabricação de pás no Brasil, verifica-se ainda a necessidade de investimentos na fabricação de novas áreas portuárias e equipamentos adicionais para produção de pás para a eólica *offshore de maior porte*. Um desafio adicional que o Brasil enfrentará na localização da fabricação de pás é a fragmentação do mercado. As pás para turbinas eólicas *offshore* são específicas para um modelo de turbina, o que significa que os seus fabricantes estão tomando decisões de entrada no mercado não com base na capacidade instalada total, mas na capacidade instalada total de um determinado modelo de turbina eólica. Não está claro até que ponto as indústrias manufatureiras estariam dispostas a reorientar suas cadeias de suprimentos estabelecidas para usar um fornecedor local e compartilhado, a exemplo da Aeris Energy.

As torres têm a função de sustentar a nacela e transmitir as cargas do conjunto rotor-nacela na fundação. No vento *offshore*, as torres são geralmente fabricadas em três ou quatro seções, que são então transportadas para a área de triagem do projeto, antes da pré-montagem e do carregamento para a instalação. Ao contrário das turbinas eólicas terrestres, onde

as torres de concreto também podem ser utilizadas, as torres dos aerogeradores *offshore* são fabricadas em aço. Como ocorre com todos os outros componentes, é necessária a instalação de fábricas nas regiões costeiras, em virtude da inviabilidade do transporte.

O setor eólico *onshore* brasileiro tem expertise na fabricação de torres de aço, mas em dimensões menores do que o necessário para a energia eólica *offshore*. Porém, a produção de torres para energia eólica *offshore*, que podem atingir até 8,5 m, exigirá estruturas de aço significativamente maiores do que as atualmente fabricadas no Brasil. As atualizações para instalações e equipamentos, bem como a necessidade logística para transportar os grandes componentes, pode retardar a consolidação de uma rede de fornecimento de torres eólicas *offshore* (Ramboll, 2022).

Torres Eólicas do Nordeste S.A. (TEN) é uma empresa brasileira que fabrica estrutura, revestimento e componentes internos de torres de aço. Conta com uma unidade no interior da Bahia, em Jacobina, região com alta concentração de parques eólicos *onshore*. É improvável que a localização da TEN no interior seja viável para suprir a demanda de componentes *offshore*. A Torrebras é mais uma empresa do setor eólico *onshore* no mercado de fabricação de torres de aço energético que atua desde 2013 na Bahia, cerca de 20 quilômetros para o interior. Por fim, a GRI Renewable Industries, com sede em Madri, na Espanha, possui 16 fábricas de componentes para energia eólica em oito países, incluindo GRI Towers Brasil. A empresa anunciou, em 2021, que eles irão construir uma planta em novo local no Reino Unido (Ramboll, 2022).

Pode-se dizer que a força de trabalho brasileira está relativamente bem-posicionada pela experiência em eólica *onshore* e com uma indústria siderúrgica nacional sólida e de qualidade reconhecida, que produz placas de aço carbono semiacabadas de alta qualidade. Empresas como a CSP, localizada no complexo do Porto do Pecém, assim como a Usiminas e o Grupo Aço cearenses, são bons exemplos de potenciais fornecedores de matéria-prima para torres.

#### 2.4.2.2. Fundações

Também há a necessidade de um mercado forte no setor produtivo de fundações para a indústria eólica *offshore*. As fundações de turbinas são comercializadas em um espectro bastante variado de tipos, como monoestaca, fundações de jaqueta, fundações baseadas em gravidade, fundações flutuantes, entre outros.

Embora o Brasil não tenha uma indústria de monoestacas, fornecedores de tubos laminados pode entrar no mercado eólico *offshore* com barreiras relativamente baixas. No entanto, espera-se que novas instalações à beira-mar sejam dedicadas a fornecer as dimensões eólicas *offshore* necessárias e transportar as fundações. O principal desafio técnico para essa transição é a laminação das placas, com diâmetros e espessuras de parede significativamente

maiores. Especialmente os diâmetros de fundo e as espessuras gerais da parede excedem em muito as clássicas torres de turbinas *onshore*. Um desafio secundário é a logística e o armazenamento dos componentes maiores. Dada a inviabilidade de transporte pelos modais rodoviário e ferroviário, faz-se necessário grandes investimentos em instalações à beira-mar para transportar monoestacas, exigindo transportadores modulares automotores com classificação adequada (SPMTs), acesso via embarcação, bem como adaptação de áreas de armazenamento para garantir o abastecimento deste mercado.

### 2.4.2.3. Subestações

Há também o mercado das subestações, que podem ser vistas como o “coração” de uma instalação eólica *offshore*. Esse componente abriga a infraestrutura elétrica necessária para transformar a tensão das turbinas/cabos entre matrizes para os cabos de exportação e o sistema terrestre. A subestação tem duas estruturas primárias: a subestrutura e a parte superior. A subestrutura é, na maioria das vezes, uma fundação do tipo jaqueta com alfinetes e, às vezes, uma fundação monoestaca. O *topside* pode assumir uma variedade de formas, mas é mais frequentemente uma plataforma de vários andares feita sob medida que abriga equipamentos elétricos e sistemas auxiliares, como transformadores e aparelhagem.

Muitas vezes, os locais de fabricação da plataforma superior e dos componentes elétricos primários não estão próximos ao local do parque eólico *offshore*. Por exemplo, estruturas *topside* de parques eólicos *offshore* europeus são frequentemente fabricados na Ásia. Embora o Brasil não tenha histórico na fabricação de subestações eólicas *offshore*, há uma experiência considerável na fabricação e integração de subestações *offshore* de O&G e unidades flutuantes de produção e descarga (FPSO). Muitas sinergias podem ser encontradas entre as indústrias de O&G e as indústrias eólicas *offshore* para plataformas *offshore*, embora a primeira seja geralmente menor que a segunda. A SBM Offshore é uma dessas empresas que projeta, fornece e integra unidades em uma embarcação FPSO. Outros fabricantes globais de OSS, como Keppel Offshore e Marine, também possuem instalações à beira-mar no Brasil que podem ser adaptadas para o negócio de subestações eólicas *offshore* com a assistência de sua sede internacional. Projetistas estruturais, como Ramboll, também já têm escritórios no Brasil (Ramboll, 2022).

O Brasil também abriga empresas como ABB, GE e Siemens, que fabricam certos componentes elétricos de uma subestação, embora não esteja claro se os componentes elétricos necessários para uma subestação eólica *offshore* estão atualmente disponíveis no Brasil.

Em resumo, pode-se dizer que o Brasil ainda não possui experiência na fabricação de *topsides* de subestações eólicas *offshore*, mas indústrias paralelas, principalmente de óleo e gás, realizam projetos semelhantes em menor escala. Com essa experiência,

espera-se que certas áreas de fabricação de subestações *offshore* possam ser uma área de localização inicial da cadeia de suprimentos, embora ainda seja necessário superar altas barreiras de investimento.

Por fim, a infraestrutura elétrica *onshore* de um parque eólico *offshore* recebe a energia dos cabos de exportação *offshore*, o que garante que ela possa ser distribuída na rede ou no sistema de transmissão *onshore*. Tais subestações terrestres são muito semelhantes a outras concessionárias de geração de energia já existentes no Brasil. Os equipamentos elétricos incluem aparelhagens e transformadores, que podem ser facilmente encontrados no mercado e não são vistos como potenciais gargalos no desenvolvimento da indústria eólica *offshore* no Brasil. Devido às capacidades da indústria eólica *onshore* brasileira, a geração de energia de outras fontes renováveis, bem como o setor de transmissão e distribuição de energia (integradores de sistemas), a experiência que abrange a fabricação de *onshore* subestações e a infraestrutura elétrica necessária já estão presentes no Brasil. Algumas empresas que prestam esses serviços no país são ABB, GE, Siemens, WEG e Schneider (Ramboll, 2022).

#### 2.4.2.4. Cabos submarinos

No que se refere aos cabos submarinos, atualmente há um número limitado de fornecedores globais e altas barreiras à entrada no mercado, como altos custos iniciais de investimento combinados com a alta complexidade técnica implicada. Logo, não se espera que o mercado global de suprimentos cresça à mesma taxa necessária para atender à demanda futura. Setores relacionados, como transmissão e distribuição, ou petróleo e gás podem reagir à alta demanda e aliviar um pouco a pressão do mercado por cabos de alta tensão. Se o Brasil experimentar um alto crescimento no mercado eólico *offshore*, a indústria local de fornecimento de cabos submarinos no Brasil poderia ser iniciada justamente a partir de tais setores. Por exemplo, a Oceaneering está presente no Brasil desde a década de 1970 e tem fábrica de cabos umbilicais em Niterói, no Rio de Janeiro. A capacidade de fornecimento da Oceaneering nos setores de O&G e renováveis, tanto para cabos submarinos quanto para acessórios de cabos, como sistemas de proteção de cabos (CPS) é mundialmente conhecida. Outro exemplo, a MFX é uma empresa pioneira no Brasil, fabricando cabos umbilicais submarinos em Salvador, na Bahia, para empresas como Schlumberger e Petrobras. Cabos umbilicais em comparação com os cabos eólicos *offshore* clássicos são projetados para um ambiente mais dinâmico e utilizam mais fiação blindada, além de conter cabos de baixa tensão, cabos de controle e linhas hidráulicas. No entanto, com alguns ajustes, ambas as empresas podem ser capazes de fornecer cabos submarinos ao mercado eólico *offshore* brasileiro (Ramboll, 2022).

### 2.4.3 CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO

A instalação de um parque eólico *offshore* é possivelmente a parte mais sensível do setor. Após a fabricação e pré-montagem, embarcações industriais especializadas se encarregam de transportar os componentes para o local *offshore* e completar o processo de instalação. Os principais focos de atenção no aspecto das instalações são: gerador, subestações, cabos submarinos e fundações.

Primeiramente, a instalação dos geradores na nacele da turbina se dá por meio de uma embarcação especializada, também conhecida como embarcação de instalação de turbinas eólicas. A demanda global por esses navios é bastante alta, considerando que apenas cerca de 10 a 15 unidades estão em operação e, mesmo assim, nem todos se encontram preparados para lidar com tamanhos crescentes de componentes de turbina. O Brasil ainda não conta com experiência local para instalação de turbinas (embarcações ou mão de obra treinada), já que nenhuma das empresas de instalação está em operação no país. Atualmente, espera-se que a frota global das embarcações especializadas também opere no mercado eólico *offshore* brasileiro para instalação de turbinas, ampliando ainda mais a demanda sobre esses ativos (Bošnjaković *et al.*, 2022).

Outras opções seriam embarcações novas construídas localmente, ou talvez modernização de embarcações brasileiras existentes em setores relacionados, como petróleo e gás. Os navios de construção nova costumam ser muito caros, requerendo capacidades de construção naval especializadas. Quase todas as embarcações desse gênero são construídas na Ásia, e geralmente os requisitos da legislação local e/ou o volume de demanda não chegam a justificar o tamanho esforço em outros países.

Os mercados de petróleo e gás geralmente contam com embarcações menores, que, contudo, não atendem aos requisitos da energia eólica *offshore*, sendo dificilmente adaptáveis. Recentemente, houve uma tentativa, por parte da Associação Brasileira de Empresas de Apoio *Offshore*, de incentivar o desenvolvimento da frota existente, a fim de atender às necessidades da nascente indústria eólica *offshore*. A Keppel, sediada em Singapura, conta com dois estaleiros à beira-mar no Brasil e experiência no desenvolvimento de algumas estruturas dessas embarcações especializadas (Aborgela *et al.*, 2022).

Quanto à instalação de fundações, o processo é muito dependente do tipo de fundação envolvida. A monoestaca, mais simples, é em geral carregada diretamente para a embarcação de instalação no porto de triagem. A embarcação pode ser autoelevatória (*Jack-Up Vessels* ou JUV), semelhante ao que ocorre na instalação de turbinas. No entanto, isso depende da profundidade da água e, nos últimos anos, o mercado *offshore* tem perdido para a instalação de fundações flutuantes utilizando embarcações pesadas (*Heavy Lift Vessels* ou HLV).

Portanto, assim como na instalação de turbinas, as embarcações JUV e HLV são um recurso de alta demanda na instalação das fundações. Atualmente, nenhum dos proprietários ou fabricantes desse tipo de ativo atua no Brasil, o que significa que ainda é inexistente a experiência para instalação de fundações no país (navios ou mão de obra treinada). Há a expectativa de que a frota internacional de JUV ou HLV possa suprir as necessidades da indústria eólica *offshore* brasileira no que diz respeito às instalações de fundações, aumentando a demanda por esses ativos (Ramboll, 2022).

Com o aumento do tamanho da turbina, o tamanho da fundação também aumenta. No que poderia ser tomado como um dos exemplos da situação brasileira, pode-se mencionar os projetos esperados para o Porto do Pecém, no Ceará. As águas costeiras relativamente rasas do Ceará (em comparação com a Europa) devem contribuir para o uso de monoestacas menos robustas. Monoestacas menores podem oferecer a vantagem de se aproveitar navios de instalação de outros mercados destinados à instalação de fundações mais pesadas, que, no entanto, já não podem mais ser utilizadas para a mesma demanda. (GWEC, 2022).

Oportunidades para novas embarcações, ou talvez modernização de embarcações brasileiras existentes em setores relacionados, como petróleo e gás, no entanto, exigiriam alta demanda e fortes investimentos em termos de projeto.

Quanto à questão dos cabos submarinos, sabe-se que os mercados eólicos *offshore* estabelecidos utilizam embarcações especializadas em instalação de cabos (*Cable Lay Vessels* ou CLV) para instalar seus cabos submarinos de exportação e entre matrizes. Dependendo de alguns fatores, como profundidade da água, diâmetro dos cabos e método de instalação necessários, os projetos geralmente usam vários vasos para completar o processo.

Embora as embarcações especializadas CLV sejam os ativos preferidos do setor *offshore* para instalação de cabos submarinos, há uma barreira bem menor para entrada nesse ramo de cabos quando comparado com a instalação de turbinas ou fundações. Embora nenhum cabo eólico *offshore* tenha sido colocado no Brasil ou por uma empresa brasileira até agora, setores relacionados, como oleodutos e gasodutos e linhas de transmissão submarinas, utilizam metodologia comparável. Um exemplo é o desembarque de cabos e dutos em terra, que é semelhante.

A instalação da Subestação *Offshore* (OSS) (sem incluir o comissionamento) costuma ser uma parte breve dentro do cronograma de instalação de um parque eólico envolvendo apenas dois componentes principais – estrutura superior (*topside*) e subestrutura. O processo de instalação começa com a subestrutura, que é trazida na embarcação de instalação para o local *offshore* ou via barcaça. A embarcação de instalação utilizada é tipicamente uma HLV com suficiente capacidade em termos de elevação (guindaste). A segunda fase é a instalação da estrutura superior. Como essas plataformas normalmente pesam em torno

de 2.000 Mt, geralmente são transportadas por barca até o local *offshore* onde uma HLV eleva o lado superior para a subestrutura (Aborgela *et al.*, 2022).

O HLV utilizado globalmente para instalação de subestação *offshore* é frequentemente fretado de proprietários que operam tanto no setor de petróleo e gás quanto na eólica *offshore*. Equipamentos equivalentes da indústria de óleo e gás, quando fixados no fundo, apresentam metodologias semelhantes às das subestações eólicas *offshore*. O Brasil é conhecido por suas plataformas de petróleo instaladas em águas profundas, que, em muitos casos, são estruturas flutuantes de armazenamento e produção e desembarque (*floating, production, storage and offloading* ou FPSO). Os navios de guindaste *sheerleg*, embarcações empregadas durante a montagem dessas unidades, poderiam ser utilizados na instalação de subestações eólicas *offshore*, apesar de ser necessária a análise sobre a adequação dessas embarcações para operar nas condições de maior distância da costa (Aborgela *et al.*, 2022).

#### 2.4.4 LOGÍSTICA OFFSHORE

Tão importante quanto as tecnologias a serem instaladas ou mesmo o projeto de tais tecnologias, é a parte de logística operacional dessas instalações realizada pelas embarcações. Elas fornecem uma ampla variedade de serviços *offshore*, incluindo, entre outros, transferência de pessoal, logística de abastecimento e armazenamento de determinados componentes e materiais, acomodação noturna para a equipe de trabalho e embarcações de segurança para o local *offshore*. As embarcações são divididas em duas categorias principais: embarcações de serviço e embarcações de suporte de instalação.

As embarcações de serviço são utilizadas durante a fase de instalação e de operações, ou em ambas as fases. Uma grande variedade de embarcações poderia ser enquadrada apenas nesse seguimento. Três tipos comuns de embarcações de serviço estão resumidos na Figura 18. Embarcações de transferência de pessoal (*Crew Transfer Vessel* ou CTV) dedicam-se ao transporte de funcionários e, ocasionalmente, equipamentos, como peças de reposição e ferramentas menores, da base *onshore* para o local *offshore*. Embarcações de serviço de operação (*Service Operation Vessels* ou SOV) destinam-se a oferecer alojamento de longa duração do pessoal *offshore*, muitas vezes até por duas semanas.

Os SOVs são usados durante a fase de instalação, bem como em campanhas de operações maiores. Por fim, as chamadas embarcações de guarda (*Guard Vessels* ou GV) são conhecidas por exercer o monitoramento e a segurança do *site offshore* durante a instalação, tanto por parte do desenvolvedor, para evitar danos acidentais aos ativos *offshore* ou paralisação dos trabalhos causados por outros usuários marítimos, quanto para garantir que estes saibam que a construção está em andamento.

**FIGURA 18** – Embarcações de serviço: (a) Embarcação de transferência de pessoal, (b) Embarcação de serviço de operação e (c) Embarcação de guarda (Ramboll, 2022)

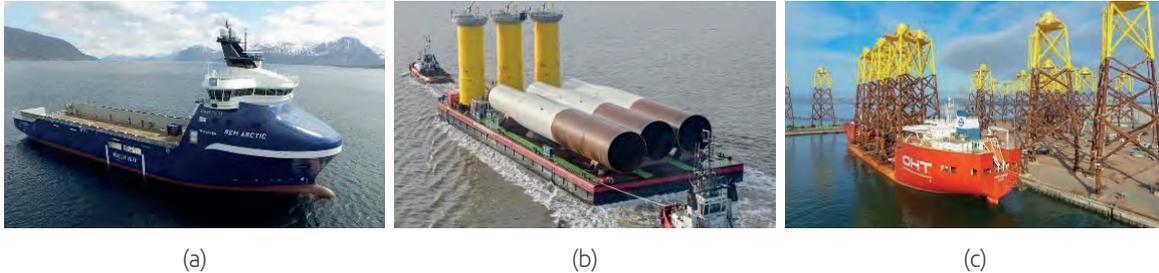


Na última década, a indústria brasileira de petróleo e gás deflagrou uma campanha para aumentar o número de embarcações de serviço construídas no Brasil a serem utilizadas no O&G indústria, em parte por meio do programa Plano Decenal de Expansão Energética 2029. A campanha pode ser considerada bem-sucedida, por ter permitido a disponibilização de 367 embarcações de apoio em 2019, das quais 328 construídas no Brasil. Embora muitas dessas embarcações de apoio não se apliquem exatamente às características de uma embarcação de serviço, é estimado que 94 delas tenham sido classificadas como pequenos navios de abastecimento/apoio ou abastecimento rápido (Offshore Engineering Digital, 2019).

A frota existente de embarcações brasileiras de serviço *offshore* é operada por várias empresas, incluindo Wilson Sons, BRAM *Offshore*, Grupo CBO (Companhia Brasileira de *Offshore*) e STARNAV. Tais embarcações podem não ter certas características específicas para aplicabilidade eólica *offshore*, mas permitem suporte ao mercado local de embarcações de serviço *offshore*. Os estaleiros no Brasil também são capazes de modernizar as embarcações existentes, por exemplo, atualizando as de abastecimento ou construindo novos CTVs especializados em energia eólica *offshore*. Para a fase de operações, os SOVs também podem ser construídos partindo do zero, uma vez que um projeto de construção de propósito é geralmente mais eficaz e eficiente (Offshore Engineering Digital, 2019).

A Figura 19 ilustra os três tipos principais de embarcações de apoio à instalação, que se dedica a transportar os ativos para embarcações maiores, a fim de supri-los com os componentes, materiais e equipamentos necessários para manter a continuidade do funcionamento das unidades *offshore* (Ramboll, 2022).

**FIGURA 19** – Embarcações de serviço: (a) Embarcação de abastecimento de plataforma, (b) Embarcação de manuseio de âncora e (c) Embarcação de transporte pesado (Ramboll, 2022)



Pode-se dizer que os atributos básicos das embarcações O&G resultantes da campanha de incentivo à fabricação de navios de apoio ao setor, mencionada anteriormente, são adequados para o setor eólico. Em 2019, estima-se que 178 embarcações se enquadravam nos parâmetros necessários às embarcações de apoio à instalação. Logo, a conversão e redistribuição dessas embarcações podem ser consideradas um projeto razoável na medida em que o mercado eólico *offshore* vier a crescer e a demanda, a aumentar. Os estaleiros no Brasil são capazes de avançar nos projetos de *retrofit* ou instalação especializada em energia eólica *offshore* de embarcações de apoio.

#### 2.4.5 OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

A manutenção das turbinas eólicas é extremamente importante durante sua vida útil, pois garante operação confiável. Os parques eólicos mais bem-sucedidos empregam turbinas eólicas confiáveis e seguem bons programas de operação e manutenção.

Práticas de O&M costumam ser gerenciadas a partir de unidades *onshore*, que geralmente incluem escritórios de planejamento para inspeções, manutenção e reparo de componentes, atividades de coordenação marítima, bem como peças de reposição e armazenamento de consumíveis. Devido às viagens frequentes de técnicos para o local *offshore*, essas bases *onshore* geralmente estão localizadas em um porto próximo ao local do parque eólico *offshore*. Ocasionalmente, serão necessárias grandes campanhas de manutenção, a exemplo de substituição de pás. Essas campanhas exigem embarcações maiores, que podem requerer um porto diferente.

A manutenção e o serviço do gerador de turbina eólica *offshore* são normalmente concluídos pelo fabricante original do equipamento, pelo menos nos primeiros cinco anos de operação. Os técnicos eólicos *onshore* no Brasil já possuem a expertise necessária para a manutenção de turbinas *offshore*, embora não estejam habituados com os desafios que o ambiente marinho apresenta.

Nos últimos anos, a O&M para cabos submarinos, bem como seus sistemas de proteção de cabos, receberam maior atenção na indústria eólica *offshore* europeia. A perda dispendiosa com os danos em cabos, incluindo O&M para cabos, monitoramento regular e inspeções de enterro, é um elemento crítico. Espera-se que a manutenção e os serviços de *Balance of Plant*<sup>6</sup> (BoP) sejam áreas de curva de aprendizado mais rápida no caso brasileiro do que a manutenção e o serviço da turbina. No entanto, certas habilidades e metodologias já existem no mercado local, como inspeções subaquáticas e operações de ROV de petróleo e gás. Essas competências podem ser aplicadas à indústria eólica *offshore* com relativa facilidade (Veers *et al.*, 2020).

## 2.5 CUSTOS DA EÓLICA OFFSHORE

A energia eólica *offshore* tem mantido uma tendência de redução de custos que já perdura por oito anos e experimentou quedas incrementais de custos em 2021 globalmente. Apesar das restrições da cadeia de suprimentos e da inflação, o cenário é positivo e aponta para a consolidação de um mercado cada vez mais competitivo no contexto da transição energética. De fato, a tecnologia eólica *offshore* amadureceu rapidamente desde 2010. Houve um aumento de 18 vezes na capacidade implantada cumulativa entre 2010 e 2021, de 3,1 GW para 55,7 GW (IRENA, 2022a). Planos e metas para implantação futura estão se proliferando com a redução dos custos e a maturação da tecnologia. Por exemplo, Bélgica, Dinamarca, Alemanha e a Holanda anunciaram, em 2021, uma meta de adicionar nova capacidade suficiente para atingir um total combinado de 150 GW de energia eólica *offshore* até 2050. Segundo relatório do *Department of Energy* (DOE, 2022), a difusão e a consolidação da tecnologia abrem caminho para reduções de custo ainda maiores nas próximas décadas.

O custo nivelado médio de energia (LCOE) para projetos comissionados em 2020 caiu para níveis pouco abaixo de US\$ 95/MWh, com uma faixa de US\$ 78/MWh a US\$ 125/MWh globalmente. Essa queda representa uma redução de 16% em média em relação a 2019 (Musial *et al.*, 2020). Segundo dados da IRENA, que contabilizam a redução considerando uma janela temporal maior, o custo nivelado da energia eólica *offshore* diminuiu em 60% entre 2010 e 2021, de US\$ 188/kWh para US\$ 75/MWh. Ainda entre 2010 e 2021, os custos médios totais caíram 41%, de US\$ 4.876/kWh a US\$ 2.858/kWh. No seu auge, em 2011, o LCOE foi de US\$ 5.584/kWh, o dobro do valor de 2021 (IRENA, 2022).

6 *Balance of Plant* é um termo geralmente usado no contexto da engenharia de energia para referir-se a todos os componentes de suporte e sistemas auxiliares de uma usina necessária para fornecer energia, além da própria unidade geradora.

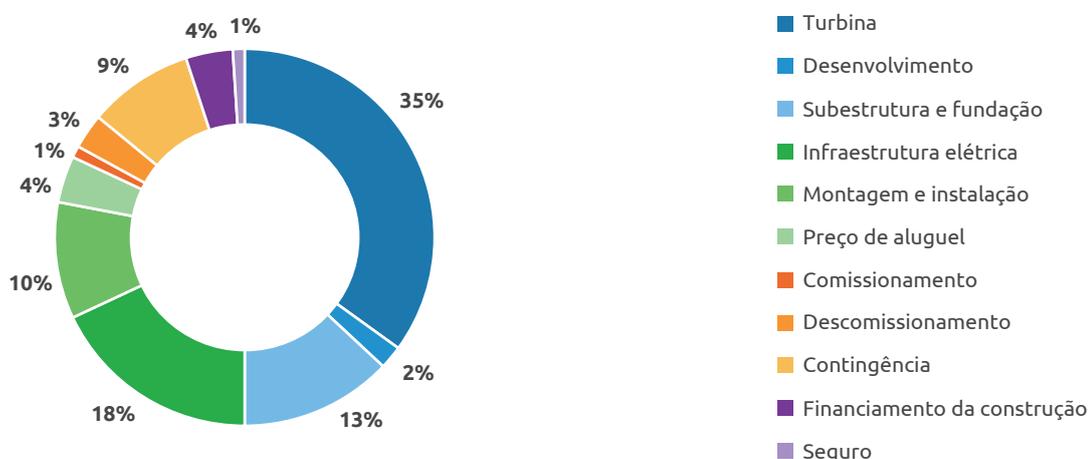
As reduções de LCOE foram impulsionadas principalmente por melhorias tecnológicas e a crescente maturidade da indústria. De fato, a crescente expertise acumulada no desenvolvimento, uma maior padronização de produtos e o fortalecimento de polos manufatureiros regionais têm contribuído para a redução de custos (IRENA, 2022).

Os gastos de capital (CAPEX) são os de maior peso no custo do ciclo de vida das usinas eólicas *offshore* e incluem todos os gastos incorridos antes do início da operação comercial. Após um período de aumento até 2014-2015 (Musial *et al.* 2017), o CAPEX vem diminuindo e alcançou cerca de US\$ 3.750/kW em 2020 globalmente.

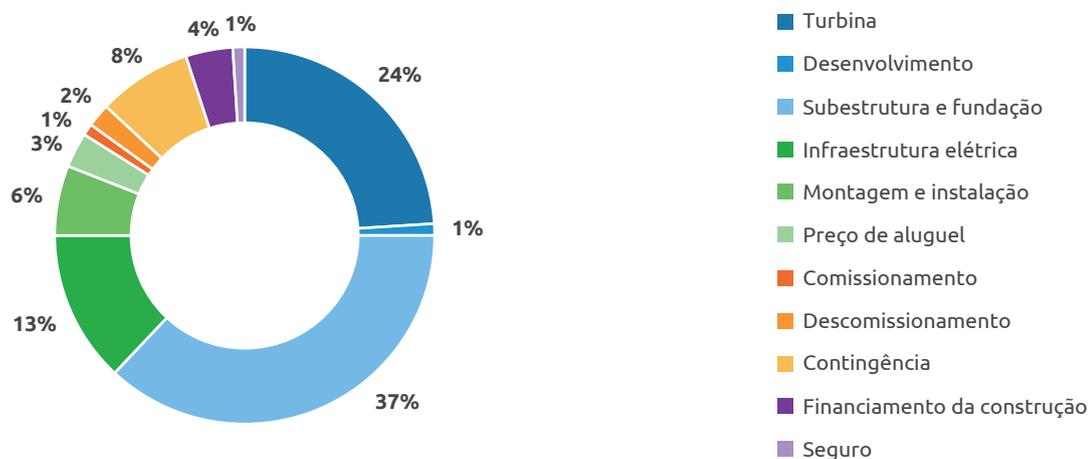
Em 2020, o CAPEX na Europa e nos Estados Unidos foi maior em média do que na Ásia. No entanto, o CAPEX parece estar convergindo desde 2015, com a Europa e os Estados Unidos atingindo níveis semelhantes, em média, aos da Ásia até 2027. A WindEurope relatou um CAPEX de US\$ 4.000/kW em 2020 para projetos europeus, uma margem considerável em relação ao valor mais baixo de todos os tempos: CAPEX de US\$ 2.900/kW em 2018.

Vários fatores podem explicar a variação do CAPEX em um determinado ano e ao longo do tempo (Stehly, 2021), incluindo: variação nas condições espaciais (por exemplo, profundidade da água, distância até o porto, ponto de interconexão e altura das ondas dos locais que afetam os requisitos técnicos de instalação e operação de um parque eólico); tamanho do projeto; diferentes níveis de escassez na cadeia de suprimentos (por exemplo, componentes, embarcações e mão de obra qualificada); mudança de preços de commodities; e energia, entre outros. Um detalhamento do CAPEX para o projeto de referência *offshore* de base fixa e para uma unidade de referência com base flutuante é mostrado nas Figuras 20 e 21, respectivamente.

**FIGURA 20** – Detalhamento do custo CAPEX de uma turbina eólica *offshore* de base fixa



Fonte: Stehly, 2021.

**FIGURA 21** – Detalhamento do custo CAPEX de uma turbina eólica *offshore* de base flutuante

Fonte: Stehly, 2021.

Como visto, o componente que mais pesa no CAPEX das unidades eólicas *offshore* é a turbina, que contribui com cerca de 25% a 45% do custo CAPEX total. Dados das demonstrações financeiras mostram que os preços das turbinas eólicas permaneceram entre aproximadamente US\$ 1.400/kW e US\$ 1.700/kW entre 2018 e 2020. Os dados da BNEF apresentam um preço consideravelmente mais baixo das turbinas eólicas de US\$ 1.000/kW, projetado para diminuir ainda mais para US\$ 850/kW em 2030.

A tendência de aumento de tamanho das turbinas eólicas é frequentemente identificada como um fator de custo primário (Wiser *et al.* 2021). O uso de turbinas maiores para um determinado tamanho de projeto reduz o número de turbinas que precisam ser instaladas e reparadas. A tendência dos desenvolvedores de projetos de optar pelo modelo de turbina de classificação mais alta disponível no mercado demonstra que existem vantagens econômicas associadas a turbinas eólicas maiores e mais potentes. Em particular, o avanço do mercado em fabricar turbinas maiores torna mais acessíveis os preços, de forma que a economia gerada nos gastos com O&M (\$/kW/ano) acabam por superar os custos adicionais de uma turbina desse tipo (\$/kW). Essa redução nos custos totais do sistema de dimensionamento da turbina é possibilitada por inovações contínuas, como o uso de materiais leves, métodos avançados de fabricação, controle de carga em todo o sistema e economias de escala na produção e entrega.

Outro fator que contribui para o encarecimento da tecnologia *offshore* frente à *onshore* é o custo envolvido na transmissão da energia gerada. No caso das eólicas *offshore*, esse custo pode chegar à proporção de 15 a 30% do custo total do projeto (EWA, 2009). Uma estimativa média geral do custo de infraestrutura de transmissão e sua instalação é avaliada em 21% dos custos totais do projeto eólico *offshore*. Dessa parcela, 41% são devidos à subestação e seus equipamentos, 30% aos cabos de conexão à rede em terra, 18% da instalação da conexão ao sistema e 11% ao cabeamento interno da planta eólica.

Os custos referentes a essas conexões internas que ligam os geradores à subestação coletora, por sua vez, podem ser considerados constantes e representam apenas uma pequena parte do investimento associado.

Os gastos operacionais (OPEX) são maiores para a energia eólica *offshore* do que para a geração eólica terrestre, com OPEX anual na faixa de US\$ 70 a US\$ 80/kW para *offshore* e US\$ 30 a US\$ 40/kW para *onshore* (Lazard, 2020). O acesso da equipe de manutenção a locais *offshore* é um componente importante dessa diferença de custos. As condições de vento e ondas podem limitar o acesso a esses locais, levando a um aumento do tempo de inatividade ou a investimentos necessários em embarcações ou helicópteros especializados para transferência de pessoal que podem operar em condições de mar desafiadoras.

Os analistas do setor projetam que o OPEX diminuirá de 7% a 16% em relação aos valores de até 2025 e de 14% a 29% até 2030.

Há também a influência do aumento de capacidade das turbinas eólicas sobre custos de manutenção. Os custos de muitas atividades de O&M dependem do número de turbinas eólicas e não de sua capacidade. Para uma determinada capacidade da usina eólica, o OPEX tende a diminuir para um menor número de turbinas de maior porte do que para uma quantidade maior de turbinas de menor porte, devido à redução no número de operações de serviço. A Ørsted relatou uma redução de 33% em OPEX/MW para turbinas de 6 a 8 MW em comparação com turbinas de 3 a 4 MW.

A manutenção não programada ou corretiva e as peças de reposição são responsáveis por 58% do OPEX anual (Liu e Garcia da Fonseca, 2020). Reduzir o número de reparos necessários e melhorar a capacidade de planejar a manutenção com antecedência (permitindo a otimização do cronograma) pode reduzir os custos. Nesse sentido, diversas estratégias de monitoramento remoto estão sendo adotadas, incluindo: monitoramento remoto para permitir a detecção precoce de problemas e facilitar a manutenção preventiva; e dispositivos aerotransportados, submarinos ou de rastreamento de lâminas para inspeção e reparo de componentes de difícil acesso.

Um fator que pode aumentar o custo de O&M é a tendência de instalar usinas eólicas *offshore* mais distantes da costa (Figura 22), o que leva a tempos de trânsito mais longos que podem reduzir a disponibilidade da turbina. Possíveis estratégias para mitigar os efeitos de distâncias maiores até a costa incluem o uso de embarcações de operação de serviço que fornecem acomodações à tripulação por períodos mais longos no mar. Estas podem operar em condições de mar mais desafiadoras do que as embarcações típicas de transferência de tripulação, bem como na manutenção de operações em grupos de usinas eólicas para otimizar a logística e a utilização de embarcações.





# 3 ASPECTOS REGULATÓRIOS DA EÓLICA OFFSHORE

Em 2022, houve um avanço significativo na regulação das eólicas *offshore* no Brasil, visando impulsionar seu desenvolvimento. Esse progresso se deu, especialmente, em relação à cessão de uso de espaços físicos e aproveitamento dos recursos naturais em águas interiores de domínio da União, no mar territorial, na zona econômica exclusiva (ZEE) e na plataforma continental. Além disso, em 2020, o Ibama publicou um TR sobre o EIA-RIMA para complexos eólicos marítimos (*offshore*).

Neste capítulo, avalia-se regulação da energia eólica *offshore*. Na seção 3.1, é apresentada a evolução do arcabouço regulatório do setor. Assim, os aspectos relacionados à cessão de uso de recursos da União e às regras de mercado que possam envolver a geração de energia eólica *offshore* foram investigados. Já na seção 3.2, conduz-se uma análise dos obstáculos regulatórios para desenvolvimento de projetos de geração eólica *offshore* no Brasil voltados para produção de H2 de baixo carbono. Por fim, na seção 3.3, discute-se as questões regulatórias relacionadas ao licenciamento ambiental.

## 3.1 REGULAÇÃO DA EÓLICA OFFSHORE

A geração de energia eólica *offshore* pode se beneficiar de um mercado de energias renováveis já estabelecido no país. O primeiro instrumento regulatório específico para fomentar a geração renovável no Brasil foi o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), instituído pela Lei nº 14.380 de 2002. O programa era principalmente voltado para o incentivo à energia solar, além da geração de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), usinas térmicas a biomassa e usinas de geração eólica.

Em relação à geração renovável de menor porte, as Resoluções Normativas nº 482/2012 e 687/2015 definiram as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída (MMGD) aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Além disso, em 2022, a Lei nº 14.300 instituiu o marco legal da MMGD, visando trazer maior segurança jurídica para os investidores nesse mercado. Dentre as fontes contempladas nesses instrumentos normativos estão a energia solar fotovoltaica, a energia eólica, a geração térmica à biomassa e a cogeração qualificada. Embora a fonte de geração eólica esteja contemplada nessa regulação, seu avanço no mercado de MMGD não foi tão significativo como no mercado de maior porte (ambiente de contratação livre e regulado – ACL e ACR, respectivamente).

Esses dois ambientes de contratação de energia (ACL e ACR) foram instituídos pela Lei nº 10.848/2004 e pelo Decreto nº 5.163/2004, que estabeleceram um importante marco regulatório à época, que ficou conhecido como “novo modelo do setor” elétrico”. No ACR, o governo fica responsável por realizar leilões regulados para compra de energia com vistas a suprir, no mínimo, em 100% os mercados das distribuidoras de energia elétrica. Em virtude dos leilões, em especial do Leilão de Energia de Reserva realizado em 2009 (LER nº 03/2009), dedicado à contratação exclusiva de fonte eólica, foram contratados 71 empreendimentos com uma capacidade instalada de 1.806 MW, o que garantiu um investimento de R\$ 9,4 bilhões nessa fonte (Gannoum, 2020). De lá para cá, a instalação desses sistemas na modalidade *onshore* aumentaram vertiginosamente, graças não somente aos leilões regulados que continuaram acontecendo nos anos seguintes, mas também ao crescimento do mercado livre (ACL).

A contratação de energia no ACR, como no ACL, foi viabilizada por dois instrumentos regulatórios estabelecidos já na década de 90, que definiram os Produtores Independentes de Energia (PIEs): Lei nº 9.074/1995 e Decreto nº 2.003/1996. Ainda nos anos 90, a Lei nº 9.427/1996 estabeleceu que descontos nas tarifas de uso dos sistemas de transmissão e distribuição (TUST e TUSD) deveriam ser concedidos para a produção e o consumo de energia proveniente de fontes renováveis, chamadas de “fontes incentivadas”. As fontes geração eólica se beneficiaram muito dessa lei, vendendo um montante considerável de energia no mercado livre (ACL).

Desde 2016, se discute a abertura do mercado livre no Brasil, o que poderia ampliar a comercialização para a energia eólica (*onshore* ou *offshore*). O instrumento legal que abriu as discussões sobre esse tema, conhecido como “modernização do setor elétrico”, foi a Consulta Pública MME nº 33/2017. Com a expansão do mercado livre, deve ser criado um mercado varejista de energia e espera-se aumentar a competitividade do setor, trazendo benefícios para o mercado de energia eólica *onshore*, uma das fontes de geração mais competitivas no país. Há um contraponto nessa discussão pois, com uma abertura total do mercado, em tese, seriam extinguidos os leilões regulados. Estes podem ser um porto seguro para a contratação de energia dos empreendimentos de eólica *offshore*, já que os riscos da venda de energia são bem menores nos leilões quando comparados com a venda de energia no mercado livre.

Ainda em relação à criação do mercado varejista de energia, alguns passos já foram dados: (i) as Resoluções Normativas nº 570/2013 e nº 654/2015 regulamentam a comercialização varejista; (ii) as Portarias MME nº 514/2018 e nº 465/2019 reduzem os limites de carga (demanda contratada junto às distribuidoras) para contratação de energia elétrica no ACL; e (iii) a Portaria Normativa GM/MME nº 50/2022 estabelece que, a partir de janeiro de 2024, todos os consumidores de alta tensão estarão elegíveis ao ACL. Todavia, para que a abertura

do mercado seja estendida aos consumidores de baixa tensão, é necessária a aprovação do Projeto de Lei (PL) nº 414/2021, que está em tramitação no parlamento brasileiro.

Em razão da abertura do mercado, vislumbram-se oportunidades de crescimento para a geração eólica, como já preconizado. Entretanto, a Lei nº 14.182/2021, cujo principal objeto é a desestatização da Eletrobras, pode restringir o crescimento desse mercado, já que determinou a contratação via leilões de 8 GW de geração termelétrica movida a gás natural (a ser entregue entre os anos de 2026 e 2030).

Os projetos *offshore*, além de contar com um arcabouço regulatório de mercado que parece ser favorável, já tem à disposição uma estrutura regulatória específica que pode contribuir para que sejam feitos investimentos em algumas plantas-piloto já nos próximos anos. O Decreto nº 10.946, de janeiro de 2022, é emblemático, pois, considerando o exposto nas Leis nº 8.617/1993 e 9.636/1998, traz o regramento sobre “a cessão de uso de espaços físicos e o aproveitamento dos recursos naturais em águas interiores de domínio da União, no mar territorial, na zona econômica exclusiva e na plataforma continental para a geração de energia elétrica a partir de empreendimento *offshore*”, o que inclui geração eólica. Vale destacar que o decreto está alinhado ao Projeto de Lei nº 576/2021, que trata do mesmo tema, tendo sido aprovado pelo Senado Federal e direcionado para Câmara dos Deputados.

A cessão de uso de que trata o Decreto nº 10.946/2022 pode ocorrer na modalidade gratuita, voltada à atividade de pesquisa e desenvolvimento (P&D), ou onerosa, quando orientada à exploração de central geradora. Além disso, pode ser ainda planejada ou independente. Na cessão planejada, o Ministério de Minas e Energia (MME) é quem irá delimitar os prismas previamente. Já na cessão independente, é permitido aos interessados que apresentem requerimento para cessão de prisma ainda não definido pelo poder concedente. Os projetos-piloto de P&D trarão maior conhecimento sobre esse tipo de geração eólica e podem abrir as portas para esse novo mercado.

Complementar ao Decreto nº 10.946/2022, em outubro de 2022, duas portarias foram publicadas no Diário Oficial da União (DOU): uma que trata da “cessão de uso onerosa para exploração de central geradora de energia elétrica *offshore* no regime de produção independente de energia ou de autoprodução de energia”, a Portaria Normativa GM/MME nº 52/2022; e outra que cria o Portal Único para Gestão do Uso de Áreas *Offshore* para Geração de Energia (denominado PUG-*offshore*), a Portaria Interministerial MME/MMA nº 3/2022. O PUG-*offshore* será visto como um “balcão único” de projetos, devendo todas as demandas de cessão de uso serem feitas nesse portal. Assim, com o Portal, há uma tendência de se evitar a sobreposição de projetos em mesma área, além de reduzir a assimetria de informação entre os setores privado e público, trazendo mais transparência ao mercado. Além disso, com o PUG-*offshore*, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL),

órgão responsável por sua gestão, poderá responder de forma mais célere às demandas de cessão de uso de áreas feita pelos empreendedores.

O decreto e as duas portarias tentam impedir especulações, pois evita criar um mercado de títulos de cessão de usos de áreas. Ainda, essa regulação infralegal pode dar um sinal ao mercado de eólica *offshore*, trazendo maior segurança jurídica, já que o PL se encontra em discussão no Congresso. A questão que fica em aberto é se a lei que será sancionada a partir desse PL vai contrariar tais portarias e o decreto. Espera-se que não, já que os atores envolvidos no mercado de eólica têm visto com bons olhos a aprovação desses instrumentos regulatórios.

Tanto a Portaria Normativa GM/MME nº 52/2022, como o PL nº 576/2021, explicitam que a energia eólica *offshore* pode ser utilizada para produção do hidrogênio de baixo carbono. Na seção 3.2, o aspecto regulatório será pormenorizado.

**QUADRO 3 –** Quadro-resumo dos instrumentos regulatórios relacionados à eólica *offshore*

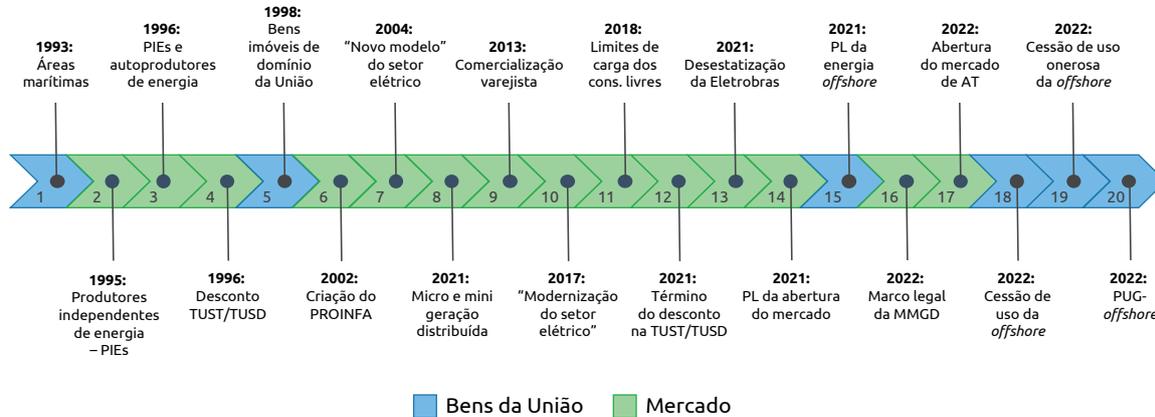
#	Instrumentos regulatórios	Descrição dos instrumentos regulatórios	Breve resumo
1	Lei nº 8.617/1993	Áreas marítimas	Dispõe sobre o mar territorial, a zona contígua, a zona econômica exclusiva e a plataforma continental do Brasil.
2	Lei nº 9.074/1995	Produtores Independentes de Energia (PIEs)	Além de dispor sobre o processo de outorga de concessões e autorizações de geração de energia elétrica, facultava aos consumidores que tivessem, inicialmente, carga igual ou maior que 10 MW, atendidos em tensão igual ou superior a 69kV, a possibilidade de contratar seu fornecimento de energia elétrica, total ou parcial, com Produtores Independentes de Energia (PIEs). Esta lei também autoriza o poder concedente a continuar a redução dos limites de enquadramento como consumidor livre.
3	Decreto nº 2.003/1996	Autoprodutor e produtor independente de energia	Regulamenta a produção de energia elétrica realizada por autoprodutor e produtor independente de energia.
4	Lei nº 9.427/1996	Desconto na TUST/TUSD para fontes renováveis	Além de instituir a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), esta lei estabelece percentuais de desconto nas tarifas de uso dos sistemas de transmissão e distribuição (TUST/TUSD) para a produção e o consumo de energia proveniente de fontes renováveis.
5	Lei nº 9.636/1998	Bens imóveis domínio da União	Em se tratando de aproveitamento econômico de interesse nacional, poderão ser cedidos imóveis da União a pessoas físicas ou jurídicas, o que pode ocorrer para o caso da geração de energia elétrica em áreas marítimas.
6	Lei nº 10.438/2002	Criação do PROINFA	Institui o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), que foi o primeiro ato legislativo fomentador da introdução das fontes renováveis na matriz energética brasileira. A fonte de geração de energia eólica é considerada nesse programa.

#	Instrumentos regulatórios	Descrição dos instrumentos regulatórios	Breve resumo
7	Lei nº 10.848/2004 e Decreto nº 5.163/2004	“Novo modelo” do setor elétrico brasileiro	Cria o “novo modelo do setor elétrico”, em que foram estabelecidos o Ambiente de Contratação Regulado (ACR) e o Ambiente de Contratação Livre (ACL). Os Contratos de Concessão de Energia no Ambiente Regulado (CCEAR) provenientes de empreendimentos existentes podem sofrer reduções para compensar a diminuição do seu mercado em virtude da migração de consumidores potencialmente livres para o ACL. Criação da CCEE e extinção do MAE (Lei nº 10.433/2002).
8	Resoluções Normativas ANEEL nº 482/2012 e nº 687/2015	Micro e minigeração distribuída (MMGD)	Define as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída (MMGD) aos sistemas de distribuição de energia elétrica e estabelece as regras do sistema de compensação de energia elétrica (SCEE).
9	Resoluções Normativas ANEEL nº 570/2013 e nº 654/2015	Comercialização varejista	Estabelece os requisitos e procedimentos atinentes à comercialização varejista de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN). Possibilitou a participação indireta na CCEE (atacado) de pessoas físicas ou jurídicas por meio de comercialização varejista devidamente habilitadas na CCEE. A figura do comercializador varejista regulada pela Resolução Normativa (REN) nº 570 em 2013 foi alterada pela REN nº 654 em 2015.
10	Consulta Pública MME nº 33/2017	“Modernização do setor elétrico”	Teve por finalidade ouvir a sociedade para aprimorar o marco legal do setor elétrico, contemplando elementos básicos que levassem a um modelo adaptado às pressões externas às quais o setor elétrico brasileiro é exposto e que garantissem sua sustentabilidade no longo prazo.
11	Portarias MME nº 514/2018 e nº 465/2019	Limites de carga dos consumidores livres	A Portaria MME nº 514/2018 teve redação complementar dada pela Portaria MME nº 465/2019, para regulamentar o disposto no art. 15, § 3º, da Lei nº 9.074/1995, que se refere à redução dos limites de carga (demanda contratada junto às distribuidoras) para contratação de energia elétrica no ACL. Para migração, são considerados consumidores livres: em Jan/2021, carga mínima de 1,5 MW; em Jan/2022, carga mínima de 1 MW; em Jan/2023, carga mínima de 0,5 MW; e em Jan/2024, carga mínima a definir.
12	Lei nº 14.120/2021	Término do desconto da TUST/TUSD para fontes renováveis	Término dos descontos da TUST/TUSD para novos empreendimentos proveniente de fontes renováveis (Lei nº 9.427/1996). Tal lei estabelece as regras de transição para o fim da percepção do desconto na TUSD/TUST (solicitação de outorga até 2 de março de 2022, com prazo para entrada em operação comercial em 54 meses). Os empreendimentos existentes manterão o desconto até o término das suas atuais outorgas.
13	Lei nº 14.182/2021	Desestatização da Eletrobras	Esta lei dispõe sobre a desestatização da Eletrobras. A obrigatoriedade de leilões de geração termelétrica movida a gás natural com energia entregue é: 2026, de 1 GW na região Amazônica; 2027, de 2 GW nas Regiões Norte e Nordeste; 2028, de 3 GW na Região Centro-Oeste; e em 2029 e 2030, de 2 GW na Região Sudeste.
14	Projeto de Lei nº 414/2021	Modelo comercial do setor elétrico e abertura gradual do mercado	Dispõe sobre o aprimoramento do modelo regulatório e comercial do setor elétrico com vistas à expansão do mercado livre, e dá outras providências.

#	Instrumentos regulatórios	Descrição dos instrumentos regulatórios	Breve resumo
15	Projeto de Lei nº 576/2021	Geração de energia <i>offshore</i>	Este projeto de lei dispõe sobre o aproveitamento de bens da União para geração de energia a partir de empreendimento <i>offshore</i> .
16	Lei nº 14.300/2022	Marco legal da MMGD	Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). Com a nova legislação, as distribuidoras poderão comprar os créditos não compensados pelos usuários de MMGD, o que é proibido na regra atual, desde que seja demonstrado que essa é a alternativa de menor custo global ao consumidor. Tais regras entram em vigência em janeiro de 2023.
17	Portaria Normativa GM/MME nº 50/2022	Abertura do mercado para todos os consumidores de alta tensão (Grupo A)	Complementar às Portarias MME nº 514/2018 e nº 465/2019, a partir de janeiro de 2024, todos os consumidores de alta tensão serão elegíveis ao Mercado Livre (ACL).
18	Decreto nº 10.946/2022	Cessão de uso de espaços físicos para empreendimentos <i>offshore</i>	Dispõe sobre a cessão de uso de espaços físicos e aproveitamento dos recursos naturais em águas interiores de domínio da União, no mar territorial, na zona econômica exclusiva e na plataforma continental para a geração de energia elétrica a partir de empreendimento <i>offshore</i> .
19	Portaria Normativa GM/MME nº 52/2022	Cessão de uso onerosa para exploração de central geradora de energia elétrica <i>offshore</i>	Estabelece as normas e os procedimentos complementares relativos à cessão de uso onerosa para exploração de central geradora de energia elétrica <i>offshore</i> no regime de produção independente de energia ou de autoprodução de energia. Tal medida atende a uma determinação do Decreto nº 10.946/2002.
20	Portaria Interministerial MME/MMA nº 3/2022	Criação do PUG- <i>Offshore</i>	Todos os serviços de requerimento e acompanhamento de autorização para produzir energia <i>offshore</i> serão realizados no Portal Único para Gestão do Uso de Áreas <i>Offshore</i> para Geração de Energia (PUG- <i>offshore</i> ). Tal medida também atende a uma determinação do Decreto nº 10.946/2002.

Fonte: Elaboração própria

A Figura 22 abaixo apresenta um resumo dos instrumentos regulatórios supracitados, organizados em ordem cronológica. Além disso, a Figura 3, na sequência, mostra uma linha do tempo desses instrumentos regulatórios, identificados por duas cores: a verde, que se refere aos instrumentos normativos que tratam da cessão de uso dos bens da União; e a azul, sobre a regulação do mercado de energia eólica no Brasil.

**FIGURA 22** – Linha do tempo dos instrumentos regulatórios relacionados à eólica *offshore*

Fonte: Elaboração própria

Vale ressaltar que não foram examinados instrumentos regulatórios que tratam do acesso às redes de transmissão e distribuição para empreendimentos de eólica *offshore*, já que os trâmites são idênticos aos empreendimentos de geração já conectados aos sistemas elétricos brasileiros. É bem provável que tais projetos sejam de grande porte e que, por isso, sejam conectados à Rede Básica, cujo acesso é de responsabilidade do Operador Nacional do Sistema (ONS), devendo seguir seus Procedimentos de Rede<sup>7</sup>. Nos casos em que as conexões ocorrerão nos sistemas de distribuição da média e alta tensão, os pareceres de acesso devem seguir os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)<sup>8</sup>.

### 3.2 EÓLICA OFFSHORE VOLTADA PARA PRODUÇÃO DE H2 NO BRASIL: UMA ANÁLISE REGULATÓRIA

Como apresentado na seção anterior, a Portaria Normativa GM/MME nº 52/2022 dispõe que a energia eólica *offshore* pode ser utilizada para produção do hidrogênio de baixo carbono. Se já está sendo um desafio criar um mercado e definir um arcabouço regulatório para eólica *offshore*, especificar o uso dessa fonte de energia para produção do H2 pode ser ainda mais. A estrutura regulatória necessária para viabilizar um modelo de negócio como esse é muito mais complexa, pois entraria na alçada de várias agências, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural

7 **Submódulo 7.1 - Acesso às instalações de transmissão:** De forma sucinta, estabelece os produtos, as responsabilidades, os prazos e as etapas dos processos relativos à solicitação de acesso às instalações sob responsabilidade de transmissora, que abrange a conexão na Rede Básica, nas Demais Instalações de Transmissão (DIT), nas instalações de transmissão de interesse exclusivo de centrais de geração para conexão compartilhada (ICG) ou nas instalações de transmissão de energia elétrica destinadas a interligações internacionais conectadas à Rede Básica.

8 **Módulo 3 - Acesso ao sistema de distribuição:** Estabelece as instruções detalhadas e os requisitos complementares sobre a regulação da conexão ao sistema de distribuição de energia elétrica disposta nas Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica.

e Biocombustíveis (ANP) e a Agência Nacional de Águas (ANA). Isso sem citar a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), já que será necessária a utilização da infraestrutura de portos para viabilizar tal modelo de negócio. Assim, é de suma importância se estabelecer uma governança institucional e legal.

No caso do hidrogênio, o arcabouço institucional, legal e regulatório adequado é inexistente no Brasil (EPE, 2021), uma adversidade a ser superada para a produção desse combustível a partir da fonte eólica *offshore*. Acredita-se que o desenho de uma regulação de mercado adequada poderia não somente tornar a eólica *offshore* mais competitiva, mas também aumentar a competitividade do hidrogênio de baixo carbono nos mercados nacional e internacional. Muitas regiões próximas a portos ainda podem se tornar *hubs* de hidrogênio a partir da geração eólica *offshore* (CNI, 2021).

O hidrogênio produzido a partir da energia de usinas eólicas *offshore* pode ser empregado principalmente em três mercados (CNI, 2021; EPE, 2021): (i) transporte, com o uso em células de combustível; (ii) indústria, como a química e a siderúrgica; e (iii) exportação, por meio da produção de amônia verde<sup>9</sup>.

No caso do setor de transporte, vislumbra-se, a exemplo da União Europeia (UE), utilizar o hidrogênio de baixo carbono para os transportes terrestre pesado, marítimo e aéreo (CNI, 2021). O Brasil, por suas dimensões continentais, poderia ter políticas específicas para o uso do hidrogênio nesse setor, reduzindo a dependência do transporte rodoviário de carga movido a diesel.

Poderiam ser criadas políticas específicas para o fomento da indústria química e siderúrgica com o uso de hidrogênio de baixo carbono. Além disso, os *hubs* de hidrogênio de baixo carbono deveriam ser fomentados em parceria entre indústrias e portos estratégicos. Uma política nesse sentido poderia colocar o Brasil como polo produtor de hidrogênio, possibilitando inclusive sua exportação.

Embora o custo de produção do hidrogênio de baixo carbono, a partir de eletrólise, seja cerca de duas a três vezes maior que do hidrogênio cinza (IRENA, 2019), o Brasil apresenta um dos custos nivelados de geração de energia renovável mais baixos no mundo (IRENA, 2021). Assim, o país seria um forte candidato à produção de hidrogênio de baixo carbono para exportação para outros países a preços bem competitivos (CNI, 2021). Esse hidrogênio poderia ser transportado em forma de amônia verde produzida próximo aos portos. Portanto, uma política específica para criação de *hubs* de hidrogênio, conectando a indústria de geração energia limpa (eólica *offshore*, inclusive) à indústria química e aos segmentos de portos, seria essencial para viabilizar o hidrogênio para exportação, evidenciando ainda mais a força do país no mercado de commodities.

9 Amônia verde é um termo utilizado para caracterizar a amônia produzida a partir do hidrogênio de baixo carbono (CNI, 2021).

No caso de *hubs* de hidrogênio, em que esse energético é produzido a partir da energia eólica *offshore*, o sistema eólico deve ser conectado à rede elétrica, dado que o processo de produção de hidrogênio exige uma energia elétrica estável. Assim, poderiam ser licenciadas linhas de transmissão, que fossem dedicadas aos *hubs* de hidrogênio.

### 3.3 LICENCIAMENTO AMBIENTAL DA EÓLICA OFFSHORE

Em relação ao licenciamento ambiental da eólica *offshore*, a experiência do setor de óleo e gás pode ser tomada como base para o EIA-RIMA. Muitos dos impactos são semelhantes, a exemplo de estrutura e logística, mas outros são bem específicos de cada setor. No de óleo e gás, há uma grande preocupação com possíveis vazamentos. Já no setor de eólica *offshore*, tem-se, por exemplo, as atenções voltadas para os processos migratórios de aves e espécies marinhas.

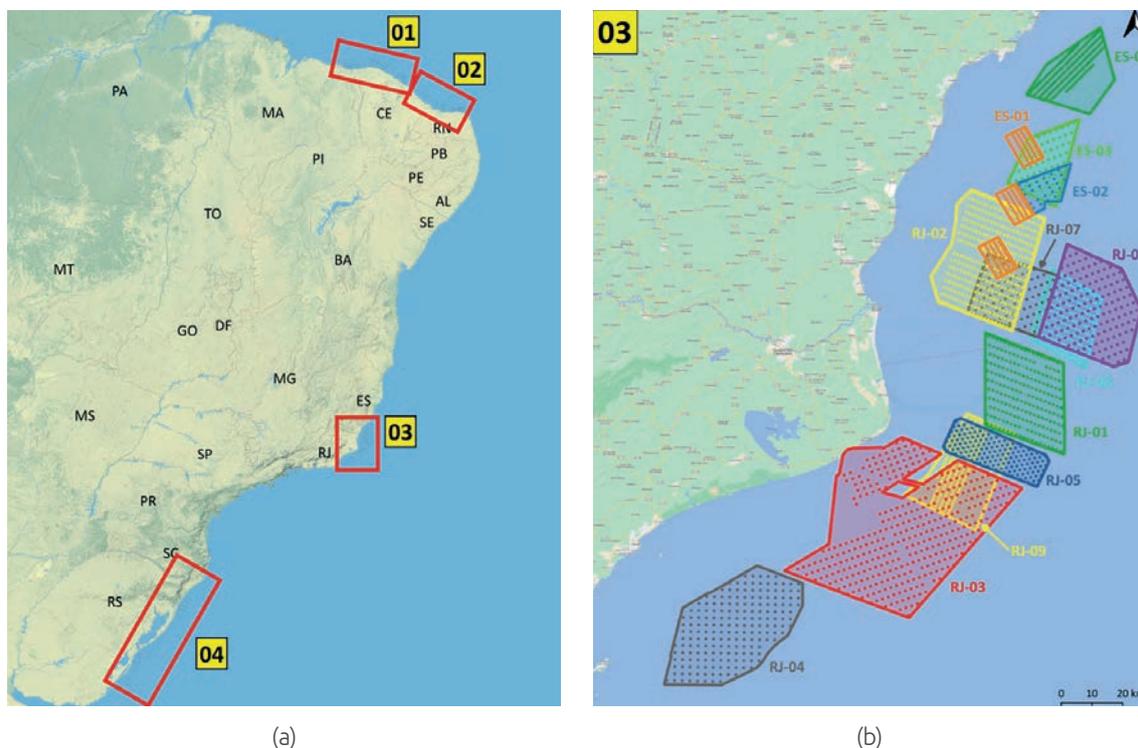
Em novembro de 2020, o Ibama publicou um TR que tem por objetivo determinar as diretrizes e os critérios técnicos gerais que deverão fundamentar a elaboração do EIA e do respectivo RIMA de complexos eólicos marítimos *offshore* (IBAMA, 2020). O escopo desse TR inclui: as unidades geradoras de energia eólica; a rede conectora submarina; a subestação marítima; a rede de transmissão de energia, incluindo seu trecho submarino e seu trecho terrestre subterrâneo, assim como o segmento aéreo até a conexão com o Sistema Interligado Nacional (SIN); a subestação terrestre; e as áreas de apoio exclusivas para a obra.

Em relação à legislação ambiental, a Lei nº 13.123/2015, conhecida como “Lei da Biodiversidade”, dispõe sobre o acesso ao patrimônio genético, a proteção e o acesso ao conhecimento tradicional associado, a repartição de benefícios para conservação e uso sustentável da biodiversidade. Além disso, no plano infralegal, como colocado por EPE (2021), é relevante mencionar os seguintes instrumentos normativos que podem gerar impactos no licenciamento de empreendimentos *offshore*: (i) a Resolução Conama nº 237/1997, que expõe a competência do Ibama para o licenciamento com significativo impacto ambiental no mar territorial, na plataforma continental e na ZEE; (ii) a Resolução Conama nº 279/2001, que institui o licenciamento ambiental simplificado; (iii) o Decreto nº 4.339/2002, em que é regulamentada a Política Nacional de Biodiversidade; (iv) a Resolução Conama nº 462/2014, que trata especificamente da fonte eólica em superfície terrestre; e (v) a Portaria Interministerial nº 60/2015, que estabelece os procedimentos administrativos que disciplinam a atuação dos órgãos e das entidades da administração pública federal em processos de licenciamento ambiental de competência do Ibama.

Segundo a EPE (2021), no caso de instalação de eólicas *offshore*, além dos impactos ambientais, há que se destacar a preocupação com os múltiplos usos do espaço oceânico, quais sejam: a pesca artesanal e comercial; a navegação; a recreação; a extração de areia e cascalho; o turismo; as atividades militares; a guarda costeira; e a extração de óleo e gás.

Até 24 de março de 2023, havia 74 projetos de eólica *offshore* com processos de licenciamento ambiental em aberto no Ibama, totalizando 183 GW de potência instalada (IBAMA, 2023). Como pode ser visto na Figura 3.2 (a), no Nordeste do Brasil, tais projetos se encontram nos estados do Ceará (região 01) e do Rio Grande do Norte (região 02). Já no Sudeste, há projetos nos estados do Rio de Janeiro e do Espírito Santo (região 03). No sul do país, esses projetos estão concentrados principalmente no Rio Grande do Sul (região 04).

**FIGURA 23** – Projetos de eólica *offshore* com processos de licenciamento em aberto no Ibama



Fonte: Ibama, 2022.

Ao fazer um zoom na região 03 apresentada, tem-se o mapa da Figura 23 (b), na qual podem ser observadas várias sobreposições de áreas. Por exemplo, o prisma do projeto RJ-07, cujo processo de licenciamento foi solicitado em 21/01/2022, se sobrepõe ao projeto RJ-02, que iniciou tal processo em 20/08/2020. Essa é uma questão de ordem regulatória que deve ser equacionada. Por exemplo, quem teria direito ao licenciamento? Quem deu entrada primeiro nesse processo, ou quem atende a alguns requisitos, como menor impacto ambiental, maior retorno socioeconômico, maior potência gerada etc.?

Vale ainda ressaltar que o Ibama conta com recursos limitados e insuficientes para avaliar todos os projetos ao mesmo tempo. Todavia, pode ser que avalie apenas os projetos que tiverem o termo de cessão de uso, em conformidade com Decreto nº 10.946/2022, e que estejam publicados no PUG-*Offshore* (Portaria Normativa GM/MME nº 52/2022). Esse assunto deve ser mais bem discutido com os investidores interessados e a sociedade.

A sobreposição de prisms é uma experiência já enfrentada por outros países e que precisará ser solucionada no Brasil.

Em 2023, o governo da Suécia emitiu duas licenças ambientais sobrepostas para parques eólicos offshore, Vattenfall Vindkraft e Galatea-Galene Vindpark. Atualmente, não há um arcabouço legal sueco para definir como os pedidos de permissão sobrepostos devem ser tratados. No entanto, o governo analisa dois caminhos possíveis para lidar com os projetos sobrepostos:

- decidir sobre os pedidos de licença na ordem em que são recebidos, ou seja, dando direito de exclusivo aquele que deu entrada primeiro no pedido de licenciamento;
- decidir que os pedidos de autorização sobrepostos serão tratados em conjunto. Tal abordagem significaria que o pedido mais adequado do ponto de vista do interesse público receberia a licença ou que a área sobreposta seria dividida entre os requerentes (Setterwalls, 2023).

Na Austrália, já há arcabouço legal estabelecido para casos de pedidos de licença de viabilidade com áreas sobrepostas. Nestes casos, o governo pode simplesmente determinar a emissão de uma licença a um requerente considerado de maior mérito. No entanto, se o governo estiver convencido de que os pedidos são de igual mérito e que, se não fosse pela sobreposição, uma licença de viabilidade poderia ser oferecida para cada um dos pedidos, pode se determinar que os pedidos formem um “grupo de pedidos sobrepostos”. Os candidatos desse grupo são convidados a rever e reenviar as suas candidaturas para remover a sobreposição, buscando um acordo entre as partes. Se as sobreposições não forem resolvidas e as candidaturas reenviadas ainda forem consideradas de igual mérito, o governo pode determinar que as candidaturas formem um “grupo de oferta financeira”. Os candidatos desse grupo serão convidados a enviar ofertas financeiras, iniciando um processo de licitação competitivo entre os demandantes (Australian Government, 2022).

Este problema pode se complicar ainda mais quando há ainda pedidos sobrepostos de exploração de área no mar para projetos com finalidades distintas. Na Inglaterra, isto aconteceu em uma disputa entre BP e Orsted. A primeira, com projeto de captura e armazenamento de carbono (CCS), e a segunda, com um parque eólico offshore. No cerne da questão está o risco de barcos usados para monitorar vazamentos de carbono colidirem com turbinas eólicas fixadas no leito do mar. Após anos de disputa, em julho de 2023, as duas empresas encontraram uma maneira de avançar tanto com o projeto de energia eólica offshore quanto com o projeto de CCS por meio de um acordo comercial (Offshorewind.biz, 2023).



## 4 EÓLICA OFFSHORE PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO

Como dito no capítulo anterior, há um total 74 empreendimentos com fonte eólica *offshore* com pedidos de licenciamento no Ibama (IBAMA, 2022). Além da eólica *offshore*, há uma fila de cerca de 200 GW de projetos de energia solar e eólica *onshore* com pedido de outorga (MEGAWHAT, 2022). A questão central é como o setor elétrico irá absorver toda essa expectativa de desenvolvimento e expansão da geração. O hidrogênio de baixo carbono, produzido a partir das fontes renováveis de energia, surge como um caminho para viabilizar tais projetos.

A molécula do hidrogênio (H<sub>2</sub>) é um vetor energético muito versátil e com o grande potencial de descarbonizar setores *hard-to-abate*, ou seja, setores com dificuldade de reduzir as emissões de GEE no processo de transição energética. Dentre eles, destacam-se os setores petroquímico, de ferro e aço e de cimento. O hidrogênio pode ser utilizado tanto na produção de calor em caldeiras e energia em turbinas a gás com sua combustão quanto como insumo para composição de produtos que já utilizam o hidrogênio cinza, aquele produzido por meio da reforma a vapor do metano. Atualmente, o setor de agricultura é um dos que mais consome hidrogênio como insumo, por ser essencial para produção de fertilizantes nitrogenados que têm como insumo a amônia (NH<sub>3</sub>)

Não obstante, o hidrogênio também é uma forma de armazenamento de energia. O que é produzido e armazenado pode ser utilizado para geração de energia a partir de uma célula de combustível. Já existem soluções comerciais para utilização de células combustíveis em meios de transporte, mas ainda com uma tímida participação global. O armazenamento de hidrogênio também ajudaria a mitigar a intermitência das fontes renováveis como solar e eólica. O hidrogênio pode ser obtido em momento de produção excessiva dessas fontes renováveis (*peak-shaving*<sup>10</sup>), evitando o *curtailment*<sup>11</sup>, e utilizado para injetar energia na rede por meio de células de combustível, em momentos em que a rede elétrica tenha maior necessidade.

10 Utilizar a energia em momentos de alta geração para armazená-la.

11 Corte de recurso da usina gerado pelo excesso de recurso com relação à carga e/ou congestão de linhas de transmissão.

Este capítulo busca apresentar as oportunidades de negócio e configurações de projetos para produção de hidrogênio no Brasil a partir da eólica *offshore*, considerando as experiências internacionais e nacionais já existentes ou previstas no curto e médio prazo. Por fim, apresenta-se proposições de projetos para a consolidação de uma economia do hidrogênio no Brasil, com o desenvolvimento da sua cadeia de valor.

## 4.1 A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO

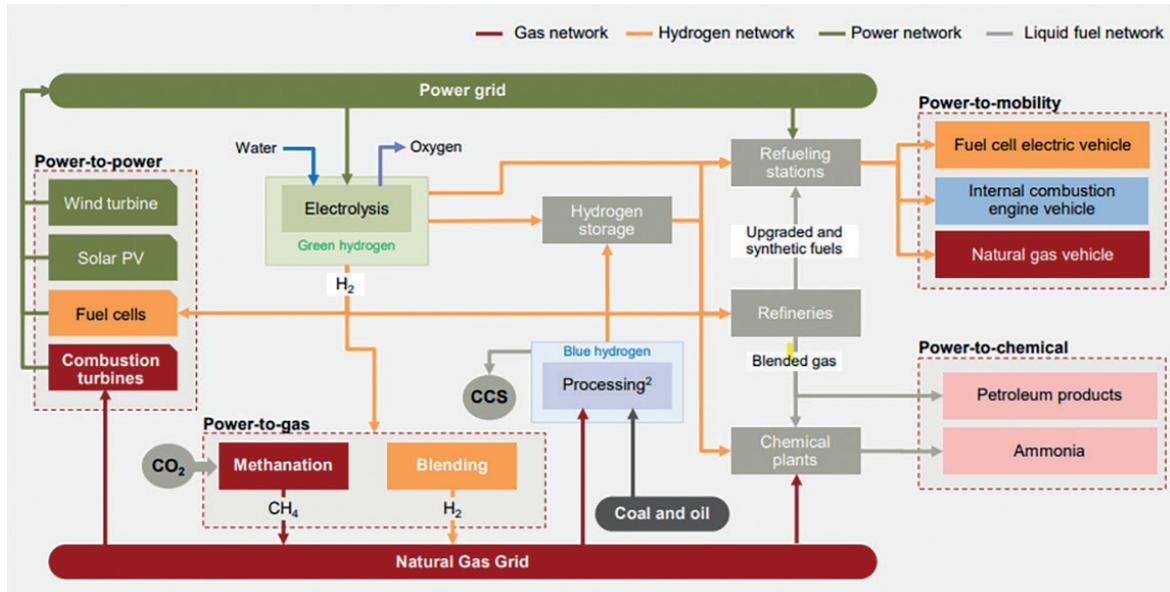
Apesar da molécula do gás hidrogênio ter sido descoberta no século 17, o termo “economia do hidrogênio” só foi introduzido no século 20. A economia do hidrogênio corresponde a uma proposta de economia futura baseada no uso de hidrogênio como fonte de energia. De fato, existem diversas aplicações como fonte energética, mas a possibilidade de se criar uma economia do hidrogênio de baixo carbono tornou-se ainda mais real com a necessidade de diminuição do uso de combustíveis fósseis.

O hidrogênio pode ser produzido a partir de diversas rotas. Hoje, a maior parte é produzida a partir de rotas fósseis, sendo cerca de 71% a partir da reforma do gás natural e 27%, da gaseificação do carvão<sup>12</sup> (IEA, 2019). Porém, em termos de transição energética, é preciso priorizar a produção por rotas de baixo carbono.

O hidrogênio produzido a partir da eletrólise com fontes de energia elétrica renovável, se apresenta como uma rota com grandes expectativas para crescimento no futuro próximo. A eólica *offshore* pode assumir um papel relevante para produção de hidrogênio de baixo carbono. A Figura 24 apresenta a versatilidade do hidrogênio produzido a partir da eletrólise.

---

12 Referente ao uso energético para produção direta em Mtep.

**FIGURA 24** – Versatilidade do hidrogênio de baixo carbono como vetor energético

Fonte: Kearney, 2020.

O termo *Power-to-X* é utilizado para designar o processo em que se converte energia elétrica em outra forma de energia. O Quadro 4 apresenta os termos utilizados para explicar, de forma resumida, as tecnologias *Power-to-X* com o uso do hidrogênio. Pode-se notar, portanto, a versatilidade do hidrogênio.

**QUADRO 4** – Tecnologias *Power-to-X* com o uso do hidrogênio

Tecnologia	Definição	Relevância
<i>Power-to-Power</i>	Reconversão do hidrogênio de baixo carbono na rede elétrica, via pilhas a combustível, turbinas ou geradores a hidrogênio.	Integração de energias renováveis (intermitentes) e suporte à redução dos desbalanceamentos entre a geração e a demanda de energia. O excedente de energia gerado ( <i>surplus</i> ) pode ser transformado em hidrogênio de baixo carbono por meio de eletrolise. Quando a demanda superar a produção, a energia estocada pode ser reconvertida em energia elétrica.
<i>Power-to-Gas</i>	Hidrogênio de baixo carbono para produção de gases como o metano sintético, a partir da combinação de H <sub>2</sub> e CO <sub>2</sub> , ou ainda injeção diretamente na rede de gás natural.	Redução das emissões de CO <sub>2</sub> metano sintético: utilização do CO <sub>2</sub> para a reação <sup>13</sup> . Injeção de H <sub>2</sub> de baixo carbono na rede de gás natural (atualmente limitado a 20%): redução da utilização do gás natural de fonte fóssil.
<i>Power-to-Mobility</i>	Utilização de energia elétrica para abastecer carros elétricos direto por carregamento de baterias ou uso de hidrogênio de baixo carbono com abastecimento em veículos elétricos movidos a célula de combustível. O veículo necessita de hidrogênio e oxigênio para produzir eletricidade e água.	Pelo escapamento, é eliminado apenas vapor de água, não havendo emissões de CO <sub>2</sub> . A ampla sinergia de sistemas e componentes para os veículos elétricos a hidrogênio e os totalmente elétricos é relevante para promover a redução de custos na produção em escala desses componentes.

Tecnologia	Definição	Relevância
<i>Power-to-Fuel</i> (também se refere a <i>Power-to-Chemical</i> )	Hidrogênio de baixo carbono para a produção de combustíveis líquidos sintéticos ( <i>e-fuel</i> ). O hidrogênio em conjunto de CO <sub>2</sub> passa por uma série de processos envolvidos na produção do chamado óleo sintético ( <i>syn crude</i> ) e posterior refino em combustíveis como diesel sintético, gasolina sintética ou ainda querosene de aviação sintético ( <i>jet fuel</i> ).	A biomassa pode servir tanto como fonte de geração de hidrogênio como também como fonte de carbono substituindo, dessa forma, o CO <sub>2</sub> , podendo ser denominada <i>Bio-to-Fuel</i> . Novos biocombustíveis como o óleo vegetal hidrogenado (HVO) apresentam um mercado promissor em função das tecnologias de hidrogenação de bio-óleos disponíveis. No Brasil, tais tecnologias encontram-se em fase de testes e demonstração em campo.
<i>Power-to-Ammonia</i> (também se refere a <i>Power-to-Chemical</i> )	Hidrogênio de baixo carbono para a geração química de amônia (NH <sub>3</sub> ).	Substituição do gás natural, nafta ou carvão por hidrogênio de baixo carbono, que por sua vez será sintetizado com o nitrogênio para a obtenção de e-amônia, sem a emissão de CO <sub>2</sub> .

Fonte: GIZ, 2021.

#### 4.1.1 PROJETOS DE HIDROGÊNIO NO BRASIL

O Brasil tem potencial para assumir a vanguarda global na produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis: possui vasto potencial de geração de energias renováveis, extensa costa, acesso para o mar e localização privilegiada para acessar os mercados com as maiores demandas para importação do hidrogênio. O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) publicou a Resolução nº 6, de 23 de junho de 2022, que institui o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) e estabelece a estrutura de governança da iniciativa. Em 17 de agosto, foi publicada a Portaria de Pessoal nº 164/GM/MME, que definiu a composição do Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio (Coges-PNH2). Este será fundamental para que o mercado seja desenvolvido no Brasil.

Apesar de o país ainda não ter um *roadmap* estabelecido, o mercado já se adiantou. O hidrogênio de baixo carbono provavelmente só terá mercado consumidor em cerca de 2 a 3 anos, mas é preciso iniciar as tratativas, que tem se materializado por meio da celebração de Memorandos de Entendimento (MdE), acordos de parcerias e desenvolvimento de infraestrutura para se posicionar no mercado. Diversos projetos já vêm sendo anunciados nos últimos dois anos, os quais o Quadro 5 busca resumir.

#### QUADRO 5 – Projetos para produção de hidrogênio anunciados no Brasil

Nº.	Nome do projeto	D / O*	Aplicação
1	Projeto de ônibus a célula a combustível para o transporte urbano no Brasil	O	Injeção na rede de gás natural, mobilidade, produção de eletricidade
2	FURNAS/Base Energia Sustentável	O	Geração de energia elétrica
3	CESP/Base Energia Sustentável	O	Injeção na rede de gás natural, produção de eletricidade

Nº.	Nome do projeto	D / O*	Aplicação
4	Itaipu Binacional - Produção de H2 por eletrólise alcalina	D	E-combustíveis, matéria-prima industrial, injeção na rede de gás natural, mobilidade, geração de eletricidade, calor industrial
5	CEMIG	D	Combustíveis eletrônicos, matéria-prima industrial, mobilidade
6	Vale Powership	D	Injeção na rede de gás natural, mobilidade, produção de eletricidade
7	Bioquerosene de aviação	D	Injeção na rede de gás natural, mobilidade, produção de eletricidade
8	COPPE UFRJ - Ônibus híbrido a célula de combustível	D	Mobilidade, geração de energia elétrica
9	COPPE UFRJ – PACOS – BNDES	D	Marítima
10	Green Hydrogen Hub Pécem - Ceará	D	Matéria-prima industrial, injeção em redes de gás natural, mobilidade, geração de eletricidade
11	Green Hydrogen Hub Ceará - Fortescue	D	Exportação
12	Green Hydrogen Hub Ceará - Qair	D	Exportação
13	Green Hydrogen Hub Ceará - Enegix	D	Exportação
14	Piloto Hidrogênio Verde Ceará - EDP	D	Matéria-prima industrial
15	Green Hydrogen Hub Ceará - Engie	D	Produção de aço, matéria-prima industrial, injeção na rede de gás natural, mobilidade, exportação
16	Green Hydrogen Hub Rio Grande do Norte - Enterprise Energy	D	Exportação
17	Usina de Hidrogênio Pernambuco Verde da Quair	D	Exportação
18	Green Hydrogen Hub Ceará - Transhidrogênio	D	Matéria-prima industrial
19	Nexway e Casa dos Ventos no Piauí	D	Matéria-prima industrial, mobilidade, exportação
20	Raízen e Yara Biometano para H2 para fertilizante	D	Matéria-prima industrial
21	Green Hydrogen Hub Ceará - AES Brasil	D	Exportação
22	Polo de Hidrogênio Verde Ceará - Total EREN	D	Geração de energia elétrica

**Legenda:** D = Em desenvolvimento; e O = Em operação

**Fonte:** Hiniçio, 2022.

## 4.2 CONFIGURAÇÕES POSSÍVEIS

Falando especificamente da utilização da eólica *offshore* para produzir hidrogênio de baixo carbono, é possível encontrar na literatura diversas configurações. O Quadro 5 busca resumir os modelos mais recentes encontrados, com seus respectivos conceitos e suas referências.

**QUADRO 5 – Modelos encontrados na literatura para produção de hidrogênio a partir da eletrólise com eólica offshore**

Referência	Ano	País	Modelo explorado	Conceito
Jang <i>et al.</i>	2022	Korea	Produção distribuída de hidrogênio	Um sistema de eletrólise é instalado para cada turbina eólica, e o hidrogênio é produzido usando eletricidade gerada diretamente em estruturas flutuantes. O hidrogênio produzido em cada turbina é coletado por meio de <i>risers</i> e <i>manifolds</i> e transportado para a terra por meio de um gasoduto.
			Produção centralizada de hidrogênio	Uma plataforma <i>offshore</i> é instalada para um sistema de eletrólise em grande escala próximo à usina eólica, coletando a energia gerada para produzir hidrogênio e transportando-a para a terra através de um gasoduto.
			Produção de hidrogênio em terra	Uma subestação <i>offshore</i> é instalada perto da usina eólica e a tensão é aumentada o suficiente para fornecer correntes para a terra e transmiti-las através de cabos de alta tensão.
Luo <i>et al.</i>	2022	China	Produção de hidrogênio em terra	Parque eólico <i>offshore</i> gera energia e transmite através de cabo. O hidrogênio é produzido em terra.
			Produção parcial de hidrogênio <i>offshore</i>	Parque eólico <i>offshore</i> gera energia e é integrado através de cabo submarino na rede elétrica em terra. Parte da energia também pode ser utilizada para produção de hidrogênio com unidade que fica <i>offshore</i> junto ao parque eólico.
			Produção direta de hidrogênio <i>off-grid</i>	Parque eólico e produção de hidrogênio são construídos de forma <i>offshore</i> e sem ligação com a rede em terra.
Hunt & Nascimento	2021	Brasil	Hydrogen Electrolysis Ship	O autor propõe um conceito de um barco contendo dessalinizador de água, eletrolisador e planta para liquefação do hidrogênio. Este pode ser produzido ou transportado para outros locais, de acordo com disponibilidade de energia renovável, demanda e preço da eletricidade, de forma a otimizar sua utilização.
Scolaro & Kittner	2021	Alemanha	Parque eólico <i>offshore</i> híbrido com <i>power-to-hydrogen</i>	Os principais componentes são o parque eólico <i>offshore</i> , um eletrolisador, um sistema de armazenamento de hidrogênio e uma célula de combustível. O eletrolisador usa a eletricidade do parque eólico para gerar hidrogênio e oxigênio. O hidrogênio pode então ser armazenado ou usado para atender a aplicações industriais ou de transporte. Alternativamente, o hidrogênio armazenado pode ser usado em uma célula de combustível, que o reconverte em eletricidade. O sistema considerado não inclui o transporte de hidrogênio para os usuários.
Settino <i>et al.</i>	2021	Malta	Planta de produção <i>offshore wind-to-hydrogen</i> com armazenamento FLASC	O trabalho propõe uma planta eólica <i>offshore</i> acoplada a uma Unidade Flutuante de Produção de Hidrogênio (FHPU), acoplada a um sistema pneumático inovador para armazenamento de energia denominado FLASC.
Dinh <i>et al.</i>	2021	Irlanda	Parque eólico <i>offshore</i> dedicado com armazenamento subterrâneo de hidrogênio	O autor propõe uma planta eólica <i>offshore</i> dedicada, acoplada a uma plataforma composta por eletrolisador, purificador de água e componentes elétricos. O hidrogênio produzido é armazenado de forma subterrânea e é periodicamente transportado por navios-tanque.

Referência	Ano	País	Modelo explorado	Conceito
Groenemans <i>et al.</i>	2022	EUA	Turbinas eólicas <i>offshore</i> com eletrolisador dedicado descentralizado	O trabalho explora um modelo de parque eólico <i>offshore</i> , onde cada turbina trabalha com seu próprio eletrolisador de forma descentralizada. O hidrogênio produzido é então transportado via dutos para ser armazenado por compressão em terra para abastecimento de caminhões-tanque.

Fonte: Elaboração própria.

### 4.3 EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL

Tanto a produção de hidrogênio com fonte renovável como a geração de energia com eólica *offshore* são tecnologias ainda pouco difundidas e estão em estágio de desenvolvimento quando se considera a curva de difusão tecnológica. Atualmente, há poucas propostas de projetos anunciados de produção de hidrogênio com eólica *offshore* no mundo, sendo estes mostrados no Quadro 6.

**QUADRO 6** – Projetos divulgados de produção de hidrogênio com eólica *offshore*

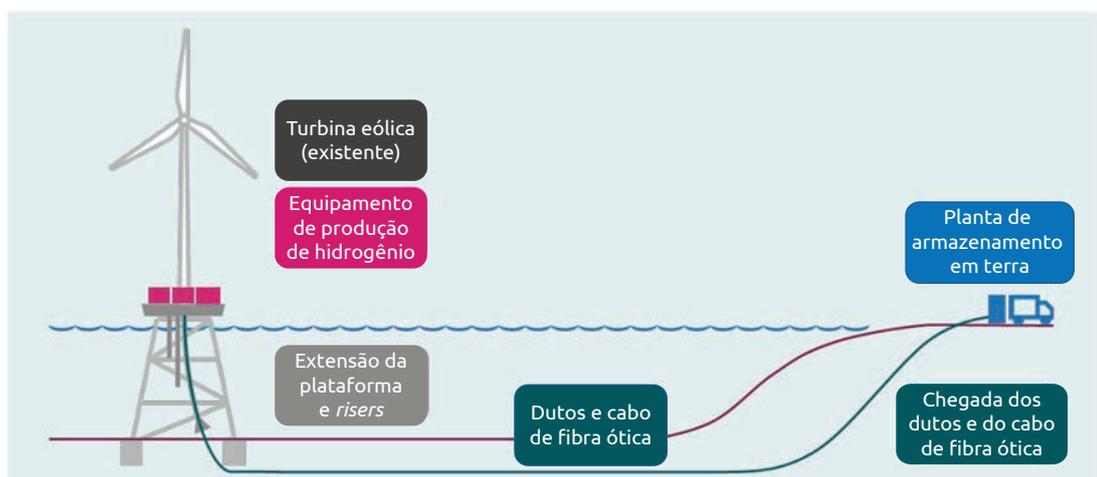
Nome do projeto	Local	Empresas responsáveis	Potência	Ano de conclusão esperado
Sealhyfe	Saint-Nazaire, France	Lhyfe	1 MW	2022
AquaPrimus (AquaVentus Initiative)	Mar do Norte, Alemanha	RWE	28 MW	2024
OYSTER	Grimsby, Inglaterra	ITM Power, Ørsted, Element Energy and Siemens Gamesa	1 MW-scale	2024
H2Mare	Alemanha	Siemens Gamesa and Siemens Energy	-	2025
Hydrogen Turbine 1	Aberdeen, Escócia	Vattenfall	8,8 MW	2025
The Salamander Project	Peterhead, Escócia	Ørsted, Simply Blue Group and Subsea7	100 MW	2026
HØST PtX Esbjerg	Esbjerg, Dinamarca	DLG, Danish Crown, Arla, DFDS and Maersk	10 GW	2026
Bantry Bay green energy facility	Irlanda	EI-H2 and Zenith Energy	3,2 GW	2028
Dolphyn	Reino Unido	ERM	4 GW	2030
PosHYdon	Mar do Norte, Holanda	Neptune Energy, Nextstep and TNO	1 MW	-
Deep Purple	Kongsberg, Noruega	TechnipFMC, Vattenfall, Repsol, NEL, UMOE, DNV and Slåttland	-	-
OCEANH2	Espanha	ACCIONA, Redexis, Ariema, TSI, Wunder Hexicon and BlueNewables	-	-

Fonte: Elaboração própria.

Em 22 de setembro de 2022, a Lhyfe inaugurou sua primeira plataforma para produção de hidrogênio com eólica *offshore*. A Sealhyfe é um projeto-piloto de 1 MW de potência, com capacidade de produzir até 400 kg hidrogênio por dia, que fica localizado no Porto de Saint-Nazaire, na França. Apesar da inauguração, passará por seis meses de testes. Após esse período, haverá seu lançamento na costa do Atlântico por 12 meses para obtenção de dados e posterior fabricação em larga escala para diversos locais.

O projeto *Hydrogen Turbine 1* (HT1) envolve a colocação de um eletrolisador diretamente em uma turbina operacional existente no parque eólico *offshore* de Vattenfall, de 97 MW, em Aberdeen, Escócia (também conhecido como European Offshore Wind Deployment Centre). O hidrogênio produzido no mar será canalizado para a costa no Porto de Aberdeen. O projeto-piloto terá uma potência de 8,8 MW e deve entrar em operação até 2025 (Vattenfall, 2022) e a Figura 25 mostra suas partes principais. Será preciso realizar uma ampliação da plataforma em uma das turbinas eólicas existentes e a adição de *risers* (tubos verticais) à fundação, inclusive para captação de água do mar. Na mesma plataforma, estará localizado o eletrolisador para produção do hidrogênio. Está previsto a instalação de cerca de 12 km de gasoduto sob o fundo do mar para transportar o hidrogênio para a costa. Também será preciso construir uma instalação *onshore* incluindo compressão e armazenamento para utilização local do hidrogênio no abastecimento de veículos de transporte.

**FIGURA 25** – Representação esquemática do projeto Hydrogen Turbine 1 da Vattenfall na Escócia



Fonte: Adaptado de RWE, 2022.

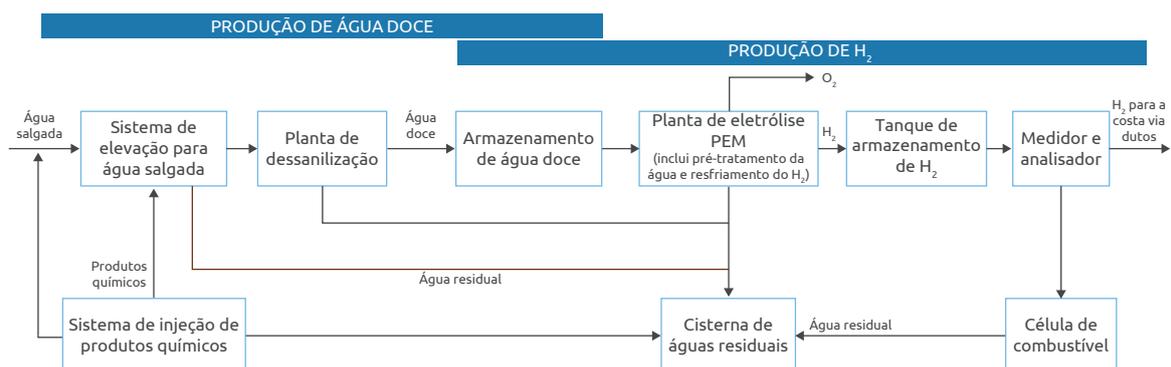
Na costa da Alemanha, no Mar do Norte, pretende-se implementar, até 2035, um projeto chamado AquaVentus, cujo objetivo geral é instalar 10 GW de capacidade de geração de hidrogênio de baixo carbono a partir da energia eólica *offshore* e estabelecer uma infraestrutura de transporte associada. Nesse grande projeto, há alguns subprojetos: o desenvolvimento de turbinas eólicas *offshore* com produção integrada de hidrogênio (AquaPrimus); um parque de hidrogênio *offshore* de grande porte (AquaSector); um gasoduto

central (AquaDuctus); e uma plataforma de pesquisa (AquaCampus). A empresa responsável pelo empreendimento, RWE, anunciou que a planta-piloto do AquaPrimus, com potencial de 28 MW, seja implementada em 2024. Já a AquaSector (SEN-1) foi colocada para leilão de investimento em 2022 pelo *German Federal Maritime and Hydrographic Agency* (BSH), com implementação iniciada já em 2023. Com uma capacidade instalada de 300 MW, produzirá grandes quantidades de hidrogênio de baixo carbono numa plataforma central de eletrólise do parque eólico. Até 22.000 toneladas de hidrogênio serão entregues em terra por meio do gasoduto central de coleta AquaDuctus (RWE, 2022).

Também no Mar do Norte, porém na costa da Holanda, um projeto-piloto chamado PosHYdon pretende utilizar uma plataforma de óleo e gás já existente para produção de hidrogênio com eólica *offshore*. O projeto consiste em instalar um eletrolisador de 1 MW na plataforma Q13a-A operada pela Neptune Energy, que espera produzir o máximo de 400 kg H<sub>2</sub>/dia. O parque eólico Luchterduinen está localizado a aproximadamente 23 Km da costa de Zandvoort/Noordwijk e cerca de 25 Km ao norte da plataforma Q13a-A. Para o piloto, não haverá conexão direta entre os aerogeradores e plataforma. No entanto, a Eneco, responsável pelo parque eólico, irá fornecer dados simulados da geração de vento, que serão utilizados para modelar com precisão o uso de eletricidade por parte do eletrolisador (Poshydon, 2022).

Outro projeto com expectativa de entrar em funcionamento até 2030 no Reino Unido é o Dolphyn (*Deepwater Offshore Local Production of HydrogeN*), da empresa ERM. Está programada a instalação de 400 turbinas eólicas de 10 MW, com estrutura de produção de hidrogênio especificada na Figura 26. O projeto consiste em uma base flutuante na qual serão instalados a turbina eólica, o eletrolisador com sistema de armazenamento de hidrogênio, placas fotovoltaicas e o dessalinizador. A energia gerada pela turbina eólica e pelas placas fotovoltaicas e a água dessalinizada, será direcionada para produção de hidrogênio através do eletrolisador. O hidrogênio poderá ser previamente armazenado para ser enviado via dutos para utilização *onshore*.

**FIGURA 26 –** Representação esquemática do projeto Dolphyn



Fonte: ERM, 2021.

## 4.4 OPORTUNIDADES DE NEGÓCIO

Esta seção investigará as principais oportunidades de negócio, tanto no mercado externo quanto interno, apontando as questões mais importantes a serem observadas dentro de cada. Desde 2010, 95% do hidrogênio utilizado no Brasil vêm sendo produzidos a partir de fontes fósseis (CGEE, 2010). Isso representa uma grande oportunidade para a indústria brasileira se descarbonizar, mantendo sua relevância frente à transição energética e seu protagonismo no desenvolvimento do mercado de hidrogênio de baixo carbono.

### 4.4.1 EXPORTAÇÃO

Percebe-se que muitos projetos de produção de hidrogênio têm como objetivo destinar a produção para o mercado externo, principalmente o europeu que pretende importar 10 milhões de toneladas de hidrogênio até 2030.

É sabido que a produção de hidrogênio de baixo carbono é ainda mais cara do que a fóssil a partir da reforma do gás natural. Porém, mecanismos de financiamento como a H2 Global podem viabilizar essa exportação no médio prazo. O mecanismo é destinado apenas à importação para a Europa e busca pagar a diferença entre o preço praticado pelo produtor de hidrogênio renovável e o que o comprador está disposto a pagar. Os procedimentos para as primeiras três licitações, compondo um subsídio de 900 milhões de euros, foram publicados, além do anúncio de um fundo com mais 4 bilhões de euros para as próximas licitações (Hydrogen Central, 2022). O recurso é destinado exclusivamente a derivados de hidrogênio de baixo carbono como amônia, metanol e e-SAF.

Os *hubs* para produção de hidrogênio no Brasil estão sendo formados principalmente nos portos, destacando o Porto do Pecém, o Porto do Açu e o Porto de Suape. No entanto, como é possível ver na Figura 27, o Brasil tem uma grande quantidade de portos que poderiam ser explorados para esse fim. Para tanto, seriam necessários investimentos em infraestrutura em tais portos para adequá-los a essa nova demanda.

**FIGURA 27 – Principais portos brasileiros**

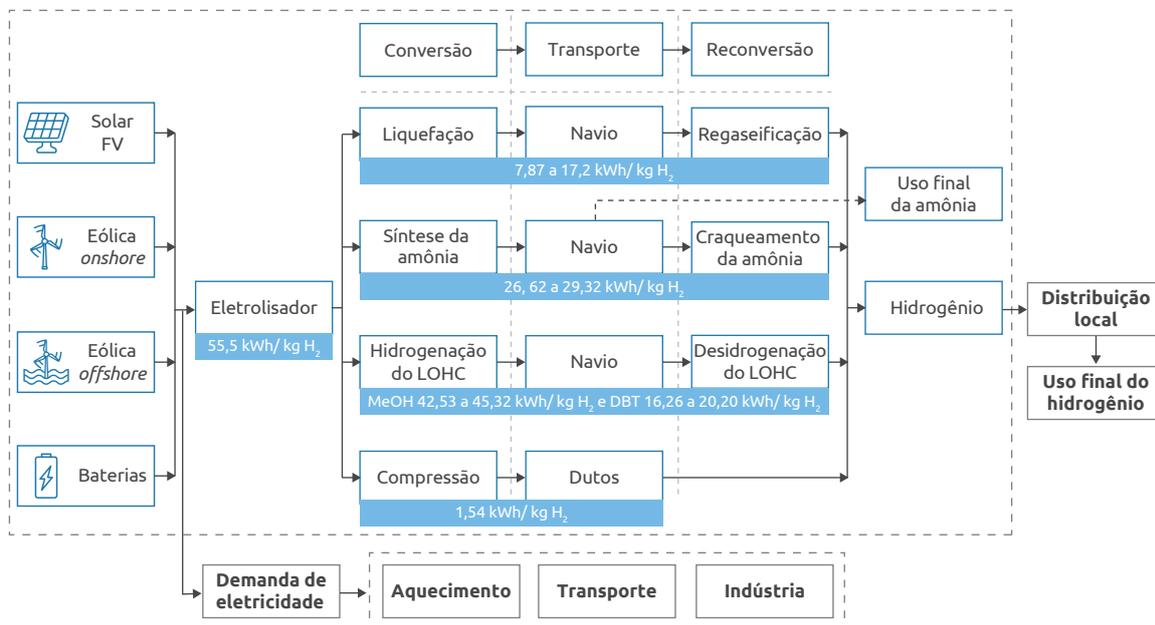
Fonte: Ministério dos Transportes.

O transporte de hidrogênio em longas distâncias ainda é um desafio tecnológico que precisa ser superado. O hidrogênio tem uma alta densidade de energia por massa (MJ/kg), porém uma baixa densidade de energia por volume (MJ/m<sup>3</sup>). Quando comprimido, é possível aumentar a quantidade de energia por volume, mas ainda assim não se torna economicamente viável para transporte em longas distâncias. Um grande navio cheio de hidrogênio comprimido carregaria pouca energia, não justificando a exportação.

Outra forma atualmente explorada é o transporte do hidrogênio liquefeito. À pressão atmosférica, o hidrogênio só atinge seu estado líquido a -253 °C. Nessas condições, a densidade do hidrogênio é 70,83 g/L, cerca de 2,3 vezes maior do que comprimido a 500 bar, que seria próximo de 30 g/L (Cebolla *et al.*, 2022). Porém, nessas condições, os gastos energéticos para manter o hidrogênio resfriado em longas distâncias são bastante expressivos.

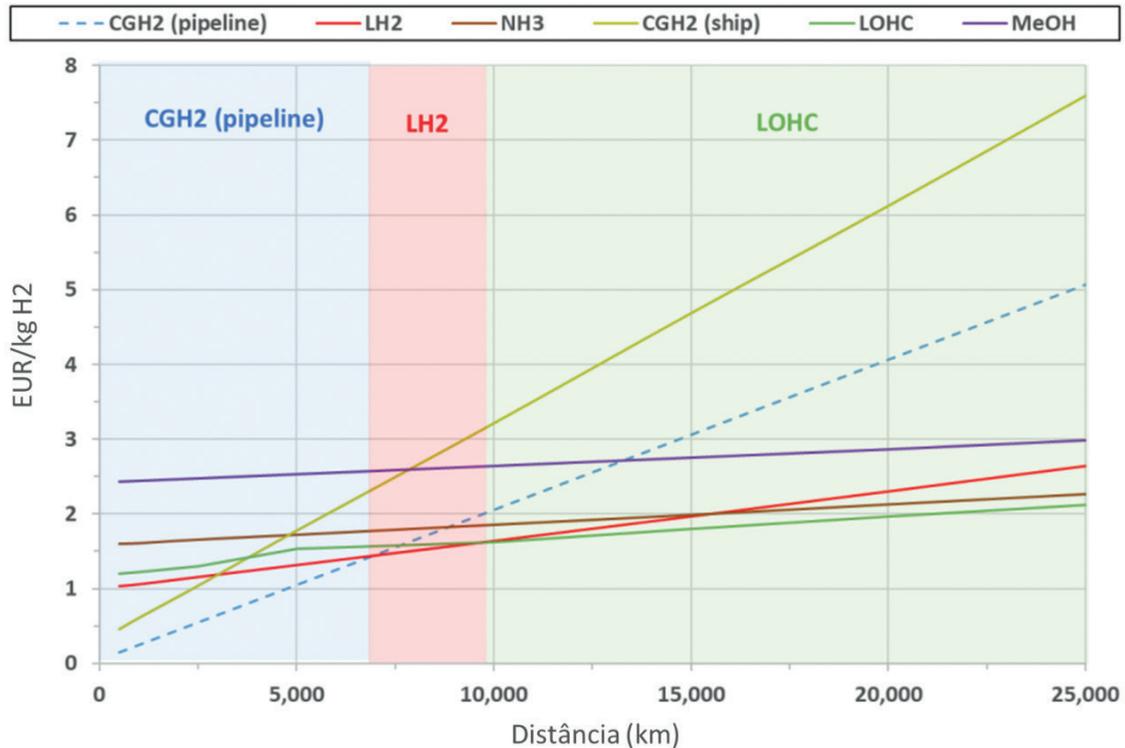
Há ainda a possibilidade de transporte do hidrogênio por meio de outros componentes químicos, chamados carreadores, como a amônia (NH<sub>3</sub>), o metanol (MeOH) e o DBT (dibenziltolueno). Todavia, todos eles precisam passar por um processo de conversão, transporte propriamente dito e reconversão em hidrogênio, o que demanda uma quantidade significativa de energia. Na Figura 28, são apresentados os caminhos para produção e transporte a longas distâncias de hidrogênio de baixo carbono, com as respectivas demandas energéticas.

**FIGURA 28** – Rotas para produção e transporte a longas distâncias de hidrogênio de baixo carbono com as respectivas demandas energéticas



Fonte: Adaptado de IRENA (2022) com informações de Cebolla *et al.* (2022) e ANL (2022).

O uso direto da amônia sem a necessidade de reconversão em hidrogênio pode ser uma vantagem competitiva para transporte a longas distâncias. Cerca de 80% da amônia produzida no mundo é destinada à produção de fertilizantes e outros 10% para produção de fibras da indústria têxtil (Patonia & Poudineh, 2022). A opção de transporte de hidrogênio comprimido através de dutos mostra ser uma opção interessante com relação à baixa demanda energética, mas é preciso analisar a viabilidade técnica e econômica de tais rotas para longas distâncias. Cebolla *et al.* (2022) realizaram uma análise no continente europeu, revelando que essa opção seria economicamente viável para transporte até cerca de 6.500 km. Após isso, o LH<sub>2</sub> (hidrogênio liquefeito) seria a mais promissora até 10.000 km e em seguida, o DBT (LOHC – *Liquid Organic Hydrogen Carrier*). A Figura 29 mostra os resultados do estudo. Tal simulação assume valores do custo de eletricidade esperado para 2030.

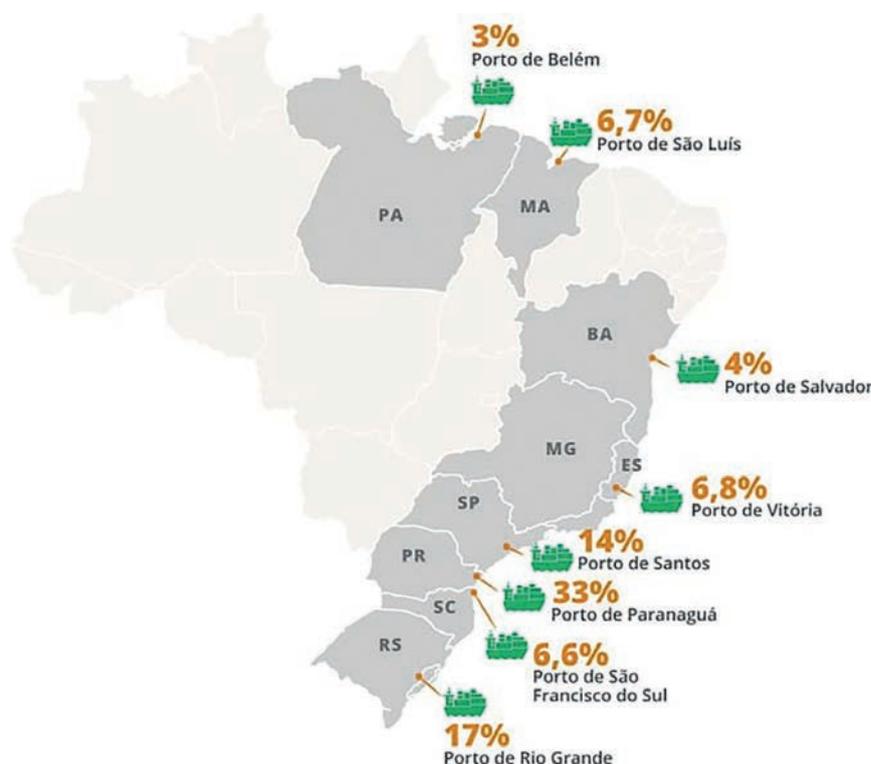
**FIGURA 29** – Custo por quilo de hidrogênio de acordo com a distância para diversas tecnologias

Fonte: Cebolla *et al.* (2022).

#### 4.4.2 FERTILIZANTES

Nos últimos 10 anos, a indústria de fertilizantes consumiu cerca de US\$ 100 bilhões, totalizando quase 290 milhões de toneladas líquidas (MDIC, 2022). Na Figura 30 são mostrados os principais portos de entrada de fertilizante no Brasil. No ano de 2018, os portos de Paranaguá, Rio Grande e Santos foram responsáveis por 64% do volume importado de fertilizantes no Brasil, o equivalente a 16 milhões de toneladas, com importação de 33%, 17% e 14%, respectivamente (GlobalFert, 2019).

Grande parte desses fertilizantes é nitrogenado e utilizam a amônia como base do processo de formação. O Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços registrou, em 2021, que fertilizantes nitrogenados como ureia, sulfato de amônia e nitrato de amônia responderam por 31,23% em massa de todo o fertilizante importado. Esse número pode chegar a 45,6% dos fertilizantes, se forem considerados os adubos compostos por nitrogênio (MDIC, 2022). Assim, tem-se uma grande oportunidade de se utilizar o hidrogênio produzido a partir da energia gerada por empreendimentos de eólica *offshore* para a produção de fertilizantes.

**FIGURA 30** – Entrada de fertilizantes importados nos portos brasileiros em 2018

Fonte: GlobalFert, 2019.

#### 4.4.3 SIDERURGIA

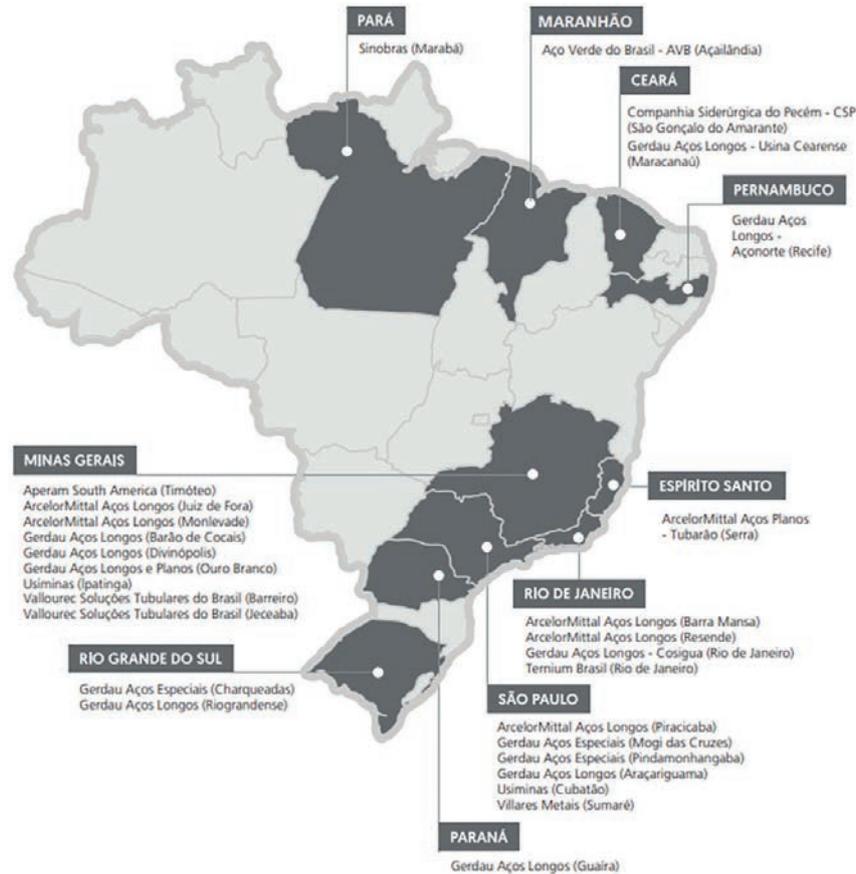
Outra opção para uso do hidrogênio de baixo carbono seria a produção de aço, o chamado aço verde. Este emerge mundialmente como uma grande oportunidade, já que o mercado europeu, por exemplo, irá impor taxas de carbono para produtos não sustentáveis.

O *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM) é um mecanismo de taxação de carbono aduaneiro para produtos exportados para a União Europeia. Tem como objetivo igualar o preço do carbono de importações provenientes de fora da UE ao preço pago caso fossem produzidos em território europeu e, conseqüentemente, sujeitos ao Regime de Comércio de Licenças de Emissão (*Emissions Trading System* – ETS, na sigla em inglês). O CBAM entrará em vigor a partir de 2026, mas em 2023 começará um período de transição em que os importadores da UE terão de reportar o total de emissões de carbono embutidas nos produtos que importaram (WayCarbon, 2022).

A Agência das Nações Unidas para o Comércio e o Desenvolvimento (UNCTAD) mostra que o produto mais vulnerável é o aço brasileiro, que pode ser submetido a uma taxa de carbono de US\$ 3,3 por tonelada, de acordo com os cálculos feitos pela agência. Levando em conta que o Brasil exportou mais de 600 mil toneladas para a União Europeia em 2021, o baque não seria nada desprezível (UDOP, 2022).

Na Figura 31, pode-se visualizar as empresas da indústria de aço no Brasil. Grande parte também está localizada de forma estratégica próximo aos principais portos brasileiros.

**FIGURA 31** – Empresas da indústria do aço no Brasil



Fonte: Instituto Aço Brasil, 2022.

#### 4.4.4. REFINO

Assim como a indústria siderúrgica, as refinarias também enfrentam um grande desafio com o estreitamento das regulações ambientais. As opções disponíveis para reduzir a pegada de carbono de suas operações estão sendo avaliadas, a fim de continuarem cumprindo um papel relevante no mundo da energia de baixo ou zero carbono.

Cerca de 74% do hidrogênio consumido na indústria brasileira é destinado às refinarias. Estas produzem hidrogênio a partir da reforma do gás natural e são autoprodutoras. Segundo o GIZ (2021), as refinarias brasileiras produziram, em 2018, cerca de 4.400 mil Nm<sup>3</sup> de hidrogênio em 2018, ou seja, cerca de 320 mil toneladas. A substituição desse hidrogênio cinza por hidrogênio de baixo carbono demandaria uma elevada capacidade instalada de fontes renováveis de energia elétrica.

O hidrogênio é utilizado em refinarias principalmente para o hidrocraqueamento de petróleo cru pesado, visando à obtenção de maiores rendimentos em derivados mais nobres (leves e médios) e no hidrotreatamento para a especificação de combustíveis (particularmente, na remoção de enxofre, oxigênio, nitrogênio e metais). Por meio da utilização de catalisadores bifuncionais, o hidrocraqueamento é um dos processos mais importantes no refino de petróleo moderno (CNI, 2022). Além disso, ele é valorizado por sua pronunciada versatilidade, existindo inúmeras variantes de processo que ajudam a atender aos requisitos específicos em refinarias ou plantas petroquímicas.

O uso de hidrogênio em refinarias cresceu de forma importante nas últimas décadas em função da necessidade de aumentar a produção de derivados mais nobres, em detrimento da produção de óleo combustível. Essa mudança do perfil da demanda de combustíveis, com a redução do uso do óleo combustível na indústria, exigiu das refinarias um aumento da capacidade de conversão para produzir mais gasolina, óleo diesel e QAV (querosene de aviação). Adicionalmente, a evolução das regulações ambientais levou a especificações mais severas para poluentes locais como o SO<sub>x</sub>, o NO<sub>x</sub> e metais pesados. A mudança das especificações nos combustíveis implicou maior consumo de hidrogênio para hidrotreatamento dos derivados de petróleo (CNI, 2022).

#### 4.4.5. METANOL

A produção de metanol usando hidrogênio de baixo carbono é considerada uma alternativa de descarbonização muito potente. O metanol pode ser usado como um material conveniente de armazenamento de energia, como combustível e como matéria-prima para sintetizar hidrocarbonetos e seus produtos. O hidrogênio pode ser armazenado convertendo-o em metanol empregando dióxido de carbono de efluentes industriais ou da atmosfera. O hidrogênio necessário também pode ser obtido a partir da eletrólise da água com fontes renováveis. Os gases de combustão de usinas de energia que queimam combustível fóssil podem ser uma fonte abundante de dióxido de carbono. Em vez de apenas sequestrar, esse processo reciclaria o dióxido de carbono em combustível útil e forneceria uma fonte de hidrocarbonetos para os demais produtos petroquímicos.

Uma grande vantagem de converter hidrogênio de baixo carbono em metanol é que o processo não exige o desenvolvimento de uma infraestrutura nova, extremamente cara e não comprovada, nem sofre com as barreiras de segurança, como com o uso direto de hidrogênio. Em contrapartida, o metanol verde é consideravelmente mais caro do que a variante tradicional, pois sua produção e uso requerem a combinação de tecnologias (bem como sua logística) que ainda não alcançaram economias de escala e rendimentos atrativos (MME/EPE, 2019).

O metanol é produzido na indústria química e petroquímica, principalmente por hidrogenação do monóxido de carbono. A principal matéria-prima utilizada na sua produção é o gás natural, empregado para se obter uma mistura de carbono e hidrogênio, principalmente a partir da reforma a vapor do gás natural. O monóxido de carbono e o hidrogênio são recombinados reagindo sobre um catalisador para produzir metanol e água. Em seguida, o metanol é convertido, principalmente, em formaldeído, amplamente utilizado em diversas áreas, mas, em especial, no processo de produção de polímeros. É também o precursor das metilaminas mais simples (alguns produtos farmacêuticos, pesticidas e solventes), halogenetos de metila (usados em vários processos químicos como precursor e como extrator, a exemplo da produção de silicone, anestésicos locais etc.) e éteres metílicos (DME, usados para a produção do agente de metilação).

A EPE (MME/EPE, 2019) aponta que, desde 2016, não há produção nacional de metanol e o produto é integralmente importado de países como Trinidad e Tobago, Chile e Venezuela. Não há previsão de novos empreendimentos nesse segmento, devido a dificuldades associadas à disponibilidade e ao preço do gás natural, à competição internacional, assim como ao volume de investimentos requeridos. Como em outros setores, as fábricas de metanol estão procurando os melhores caminhos para descarbonizar sua produção, e o hidrogênio de baixo carbono é a única alternativa que compete com o hidrogênio cinza.

#### 4.4.6. TRANSPORTE

No setor de transportes, há uma grande expectativa de que o hidrogênio cumpra um papel fundamental. Um estudo realizado pela Climate Watch, em 2020, atestou que 16,2% das emissões provêm desse setor, sendo que 11,9% são para transporte em rodovias, 1,9% para aviação, 1,7% para navios e 0,4% para veículos sobre trilhos (Our World Data, 2020).

Com relação ao transporte rodoviário, os veículos híbridos e a bateria têm ganhado espaço na classe de veículos de passageiros. Para esse modal, já há soluções a hidrogênio consagradas no mercado como Toyota Mirai, Hyundai Nexu e Honda Clarity. Também há um grande esforço para desenvolver veículos de carga e longa distância de baixa emissão. Nesse contexto, o hidrogênio tem grande potencial comparado à solução de bateria tradicional. Apesar de precisar de grandes volumes, o hidrogênio armazena muito mais energia por quilo do que as baterias de *ion-lithium* tradicionais. Além disso, o tempo de carregamento é menor, se comparado aos veículos a bateria.

No transporte ferroviário, em 2022, a empresa Alstom colocou em funcionamento o primeiro trem 100% a hidrogênio na Alemanha (Alstom, 2022).

Empresas como Embraer, Airbus e Boeing estão investindo em soluções de turbinas a hidrogênio para o setor de aviação. Há metas importantes para descarbonização do setor com a introdução dos *Sustainable Aviation Fuels* (SAF). Até 2035, células de combustível de hidrogênio poderão ser usadas para eletrificar voos de médio alcance e aeronaves de combustão de hidrogênio poderão ser usadas em voos de longa distância (World Economic Forum, 2022).

#### 4.4.7. GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

Com a mudança para economia do hidrogênio, o setor elétrico não se beneficia apenas da geração renovável que será construída, mas também da possibilidade de utilização do hidrogênio para armazenar energia. Em setembro de 2022, o cancelamento do leilão para contratação de reserva de capacidade, previsto para dezembro, causou surpresa no mercado (Agência Infra, 2022). No entanto, em uma perspectiva positiva, o MME e a EPE terão tempo hábil para viabilizar a inclusão de soluções de armazenamento, abrindo oportunidades de concorrência para as renováveis no leilão. Isso inclui não apenas armazenamento em baterias tradicionais, mas também o próprio hidrogênio com células de combustível. Essa energia armazenada pode ser utilizada tanto em horários de maior demanda como para serviços ancilares para o SIN.

O hidrogênio pode gerar energia elétrica por meio de uma célula de combustível ou até mesmo em combustão direta em uma turbina. Grandes fabricantes de turbina a gás, como GE, Siemens e Mitsubishi têm lançado no mercado tecnologias que trabalham com até 100% de hidrogênio (Azevedo *et al.*, 2022b). Taamallah *et al.* (2015) pontuam que todas as turbinas a gás podem aceitar quantidades consideráveis de hidrogênio na mistura com gás natural, realizando pequenas modificações no sistema de combustão. Em uma publicação da fabricante de turbina a gás Mitsubishi Power, é relatado que as turbinas existentes hoje aceitam até 20% de hidrogênio (MITSUBISHI POWER, 2020). De acordo com a GE, a nova geração da turbina 7HA, a mesma que foi instalada na Termelétrica Porto de Sergipe, tem capacidade para aceitar níveis de até 50% de hidrogênio em volume (Goldmeer, 2020).

#### 4.4.8. TRANSIÇÃO DA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO

Para além da vantagem geopolítica, o Brasil também conta com o conhecimento e a infraestrutura adquiridos nas últimas duas décadas, em particular, na indústria de óleo e gás. As similaridades entre as duas indústrias podem ser aproveitadas. Há também grande interesse da indústria de óleo e gás que, para participar da transição energética, está reavaliando seus modelos de negócio. Hunt *et al.* (2022) realizaram uma análise de como a indústria de óleo e gás no Brasil pode aproveitar a infraestrutura de exploração *offshore* em águas profundas hoje existentes para um futuro sustentável com o hidrogênio. O Quadro 7 resume os principais pontos do estudo.

**QUADRO 7 – Aproveitamento da economia de hidrogênio e a indústria de petróleo e gás**

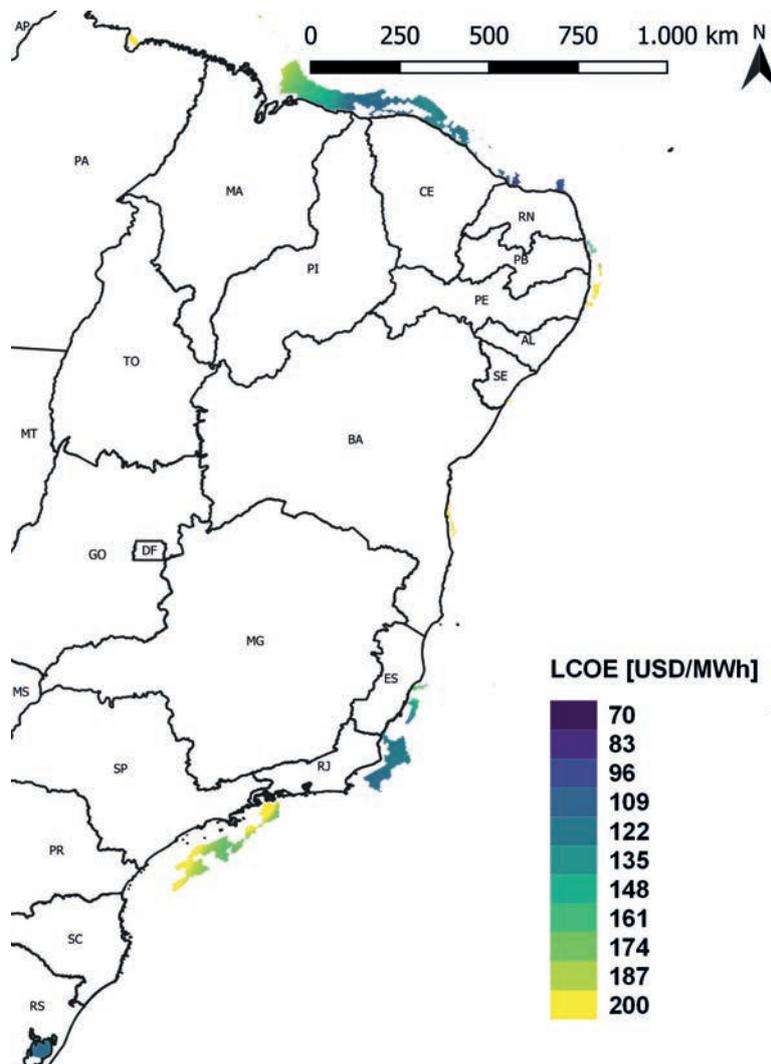
Atividade O&G	Atividade relacionada	Descrição
Exploração e extração ( <i>upstream</i> )	Hidrogênio natural	Estima-se que haja um fluxo natural de hidrogênio de $2,54 \times 10^{11} \text{ m}^3 \text{ H}_2/\text{ano}$ saindo da crosta terrestre. Alguns países já usam hidrogênio natural para geração de eletricidade. Essa alternativa tem potencial para se tornar competitiva na produção de $\text{H}_2$ .
Atividades oceânicas ( <i>upstream</i> )	Energia eólica <i>offshore</i>	A experiência em gerenciamento de projetos e engenharia com operação <i>offshore</i> pode ser uma vantagem para as empresas de petróleo e gás. A energia eólica <i>offshore</i> tem sinergias para aprimorar a implementação da captura e armazenamento de carbono nas atividades <i>offshore</i> de O&G.
	Transmissão subaquática	A tecnologia de dutos submarinos já foi consolidada pela indústria de O&G. Essa experiência pode ser aplicada para transmissão elétrica e apoiar a construção de uma rede global de energia.
Indústria de gás ( <i>midstream</i> )	Liquefação de hidrogênio	Oportunidade para a indústria de gás natural liquefeito (GNL) migrar gradualmente para a liquefação de hidrogênio.
	Armazenamento de hidrogênio em cavernas de sal	Da mesma forma que o gás natural é armazenado em cavernas de sal, o hidrogênio também pode ser armazenado. O armazenamento subterrâneo de gás natural foi implementado com sucesso em todo o mundo. Isso pode ser replicado com o hidrogênio.
	Gasoduto de hidrogênio	Existem possibilidades de adaptar o transporte de hidrogênio por meio da atualização da infraestrutura de gasoduto existente e da mistura de hidrogênio ao sistema de gás natural. Dessa forma, a construção de infraestrutura de dutos de hidrogênio para transporte e distribuição pode se tornar economicamente viável no longo prazo.
	Distribuição de hidrogênio	A estratégia pode incluir o transporte de hidrogênio em tanques pressurizados e caminhões de hidrogênio líquido criogênico.
Indústria de gás ( <i>downstream</i> )	Hidrogênio para aquecimento	O gás natural pode ser substituído por hidrogênio com algumas atualizações nas caldeiras existentes. Com a eletrificação do setor de aquecimento, o hidrogênio tende a se tornar uma alternativa para o aquecimento elétrico, ajudando o setor elétrico a superar a intermitência e as variações sazonais das fontes de energia renováveis.
	Turbinas a gás de hidrogênio	A substituição do gás natural pelo hidrogênio na operação das turbinas a gás pode ser uma solução para facilitar a transição do gás natural para uma economia baseada no hidrogênio. Este desempenha um papel essencial para equilibrar as flutuações na geração de eletricidade em um futuro sistema de energia com uma alta participação de fontes de energia renováveis variáveis.
Refinarias ( <i>downstream</i> )	Biocombustível	Existe a conveniência de misturar alguns tipos de biocombustíveis com derivados de petróleo. Converter uma refinaria de petróleo em uma refinaria de biocombustível pode ser preferível a fechar a usina.

Fonte: Hunt et al. (2022).

## 4.5 ASPECTOS ECONÔMICOS

Os aspectos econômicos da produção de hidrogênio com eólica *offshore* são importantes para que haja uma base de comparação com outras rotas de produção. Nas rotas de hidrogênio de baixo carbono, o parâmetro que mais influencia no preço é o custo da energia. Para que tenhamos um parâmetro de comparação com outras fontes de energia renovável disponíveis, o Custo Nivelado de Energia (LCOE) é um indicador adequado para a comparação. A Figura 32 corresponde ao LCOE para eólica *offshore* na área de potencial técnico traçada. Para o cálculo foi utilizado uma taxa de desconto de 8% a.a., CAPEX de 3.137 US\$/kW e um OPEX de 80 US\$/kW/ano (EPE, 2022).

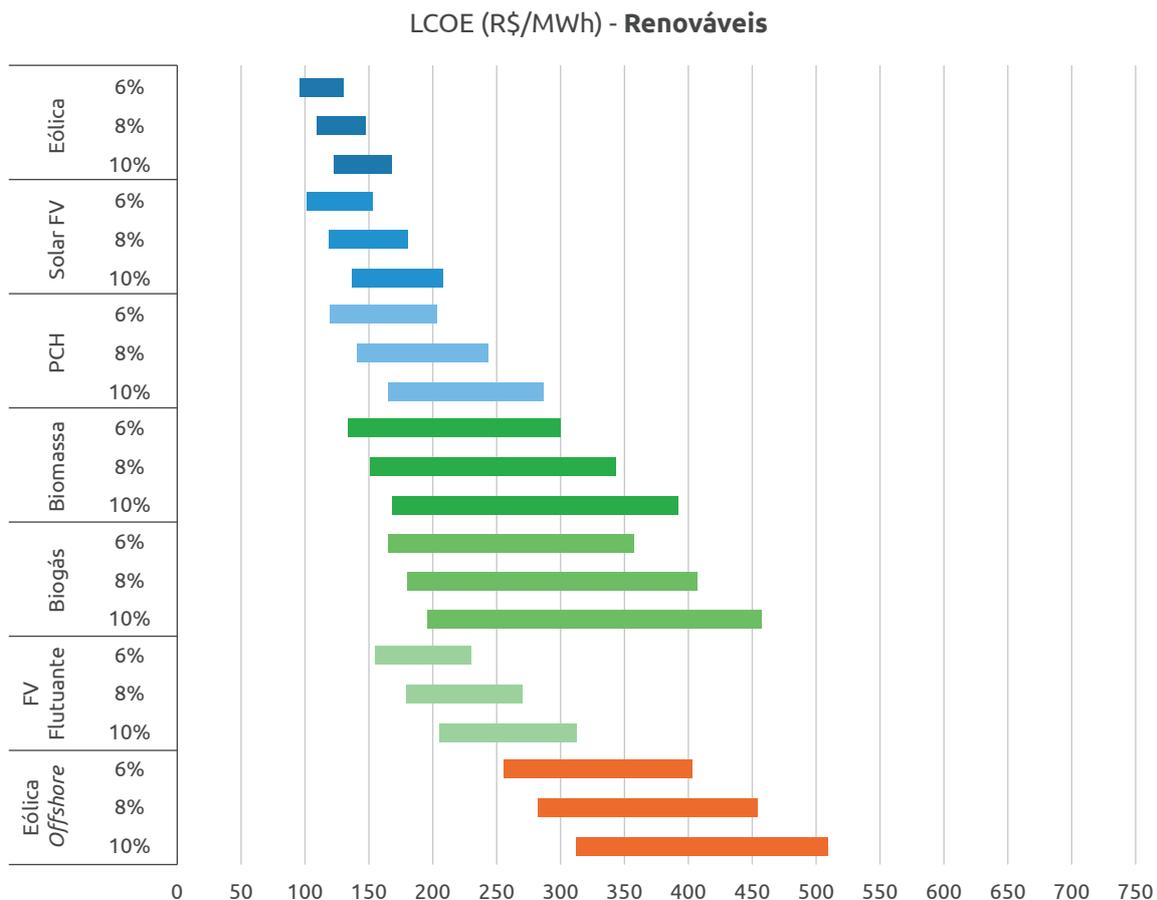
**FIGURA 32** – Mapa do potencial econômico da eólica *offshore* no Brasil através do LCOE



Fonte: Azevedo et al. (2022a)

Comparando esse resultado obtido com dados da literatura, é possível constatar, na Figura 33, que os dados encontrados para eólica *offshore* estão de acordo. No entanto, comparando dados de outras tecnologias de geração, verifica-se que a eólica *offshore* ainda não é competitiva com outras tecnologias, necessitando de aprimoramento tecnológico.

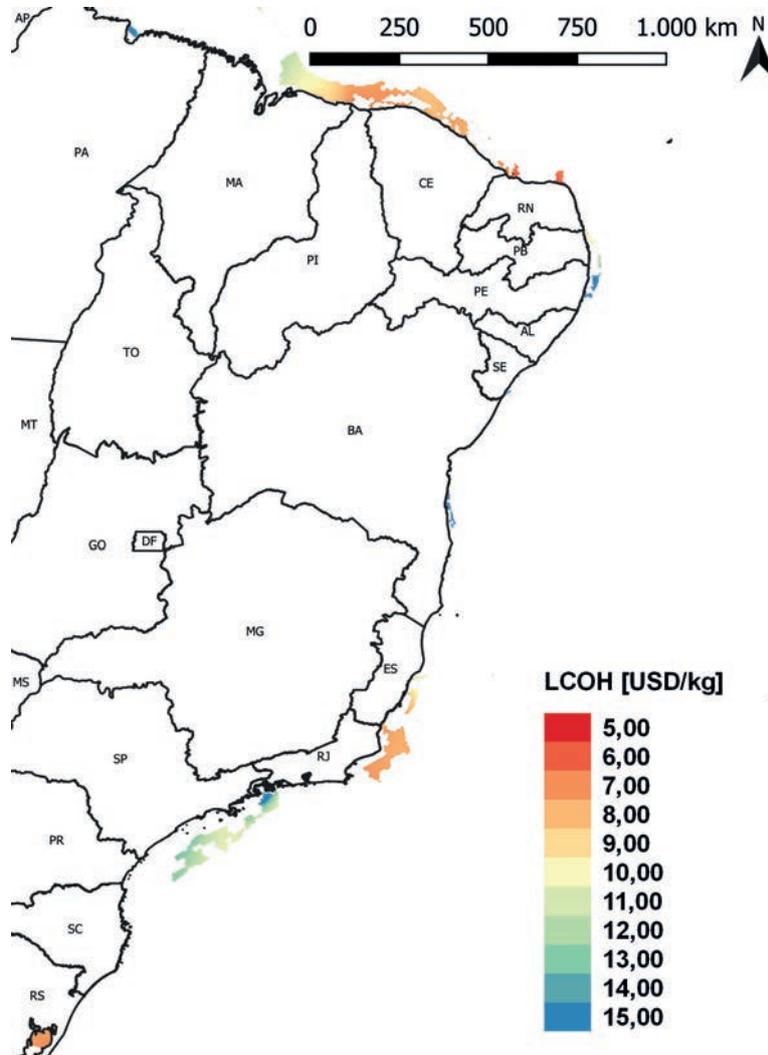
**FIGURA 33** – Custo nivelado de energia para fontes renováveis no Brasil



Fonte: EPE (2021).

A partir desses modelos traçados, é possível iniciar tentativas de modelagem econômica para buscar o cálculo do custo nivelado de produção de hidrogênio (LCOH – *Levelized Cost of Hydrogen*, na sigla em inglês). O LCOH é o custo de produção do quilo de hidrogênio, incluindo custos com geração de eletricidade, CAPEX de eletrolisador e OPEX. Porém, não inclui custos de configuração, como linhas de transmissão, dutos e armazenamento, nem custos de distribuição e transporte. Dessa forma, foi traçado o LCOH para produção de hidrogênio *offshore* a partir de eólica *offshore* no modelo com conexão direta *off-grid*, o que é mostrado na Figura 34.

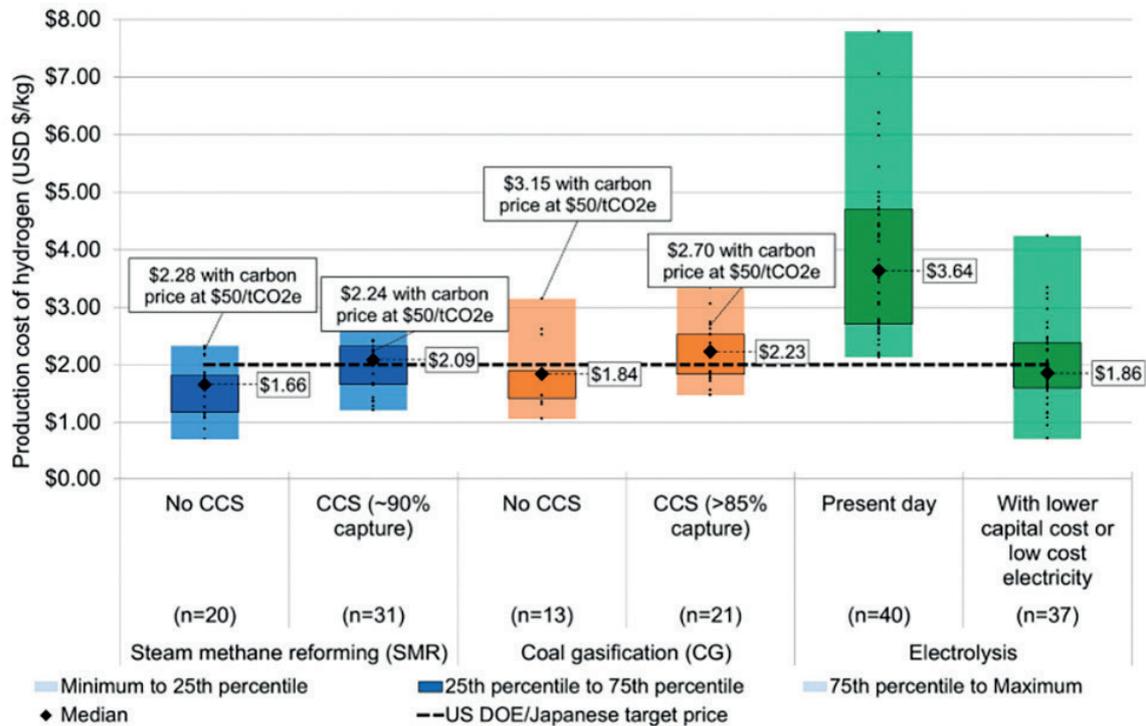
**FIGURA 34** – Mapa do potencial econômico da produção de hidrogênio com eólica *offshore* no Brasil através do LCOH



Fonte: Azevedo et al. (2022a)

De fato, são dois mercados em desenvolvimento e ainda é preciso obter dados mais concretos para previsões mais claras do custo para produção do hidrogênio. Para fins de comparação, a Figura 35 mostra a estatística do custo de produção para as principais tecnologias, com dados da literatura. Para a eletrólise nos dias de hoje, por exemplo, foram coletados 40 dados de referências da literatura de 2018 a 2020. Percebe-se que o LCOH encontrado para produção de hidrogênio com eólica *offshore* no Brasil está bem acima da média. De fato, o custo de produção de hidrogênio é muito dependente do LCOE. Portanto, apenas outras tecnologias atuais como eólica *onshore* e solar FV oferecem uma oportunidade de negócio viável no momento.

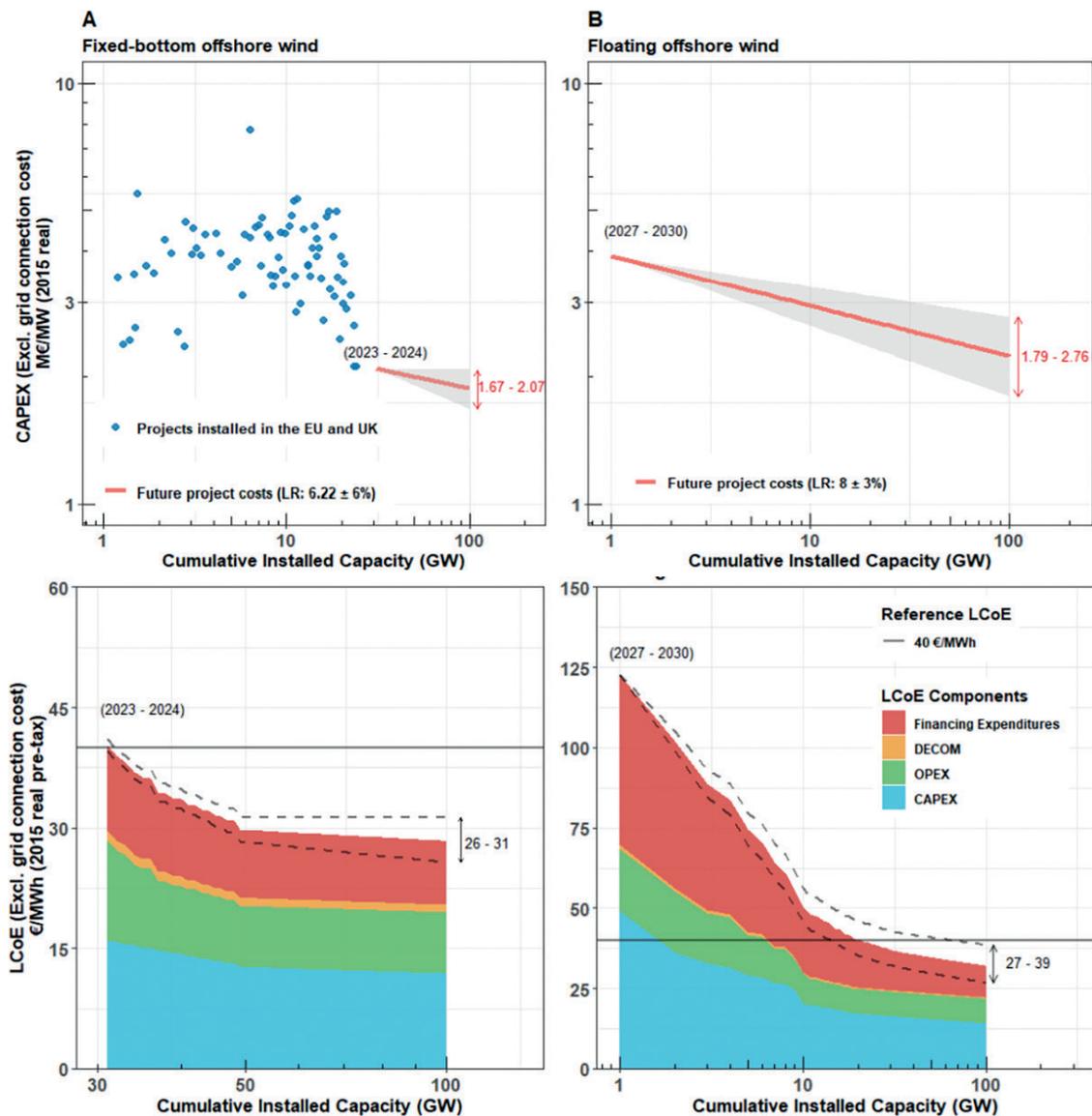
**FIGURA 35** – Box plot do LCOH encontrado em diversas referências da literatura



Fonte: Longden *et al.* (2021).

Para que a produção de hidrogênio a partir da eletrólise com eólica *offshore* se torne viável, será preciso uma forte evolução da curva de aprendizado nos próximos 10 anos, assim como ocorreu com a eólica *onshore* e solar fotovoltaica nos últimos 20 anos. No trabalho de Santhakumar *et al.* (2022), foi realizado um estudo no qual foi aplicada uma modelagem de custos de *bottom-up* e realizado o potencial de redução de custos a longo prazo da energia eólica *offshore* de fundo fixo e flutuante. A Figura 36 ilustra potenciais desenvolvimentos de CAPEX, que reduzem para 1,87 M€/MW para eólica *offshore* de fundo fixo e 2,23 M€/MW para eólica *offshore* flutuante com 100 GW de capacidade instalada, já significativamente mais baixo do utilizado para a Figura 32. O LCOE reduziria então para 28,4 €/MWh para eólica *offshore* de fundo fixo (30%) e 32,0 €/MWh (74%) para eólica *offshore* flutuante.

**FIGURA 36** – Perspectiva de CAPEX e LCOE da energia eólica *offshore*. a) eólica *offshore* de fundo fixo projetada para 31 a 100 GW de capacidade instalada. b) eólica *offshore* flutuante projetada para 1 a 100 GW de capacidade instalada



Fonte: Santhakumar *et al.* (2022).

De fato, essa redução de custos na fonte de energia irá reduzir o custo de produção de hidrogênio. No entanto, é necessário que o Brasil tenha uma estratégia de desenvolvimento e investimento muito bem alinhada. Os EUA, por exemplo, lançaram, no ano de 2022, uma atualização do seu *roadmap* para hidrogênio no país. A estratégia, chamada de 1:1:1, promete levar o custo de produção de hidrogênio para US\$ 1/kg em uma década. Para isso, apenas este ano serão US\$ 9,5 bilhões, sendo US\$ 1 bilhão para aprimorar equipamentos de eletrólise, US\$ 0,5 bilhões para aprimoramentos nos métodos de produção e reciclagem dos equipamentos e US\$ 8 bilhões para os chamados *hubs* de hidrogênio (DOE, 2022). Estes serão centros de desenvolvimento do mercado de hidrogênio, no qual será iniciado e

demonstrado o funcionamento do mercado de hidrogênio limpo, com produtores, potenciais consumidores e infraestrutura de conexão. Esses centros promoverão a produção, o processamento, a entrega, o armazenamento e o uso final de hidrogênio limpo, permitindo benefícios regionais sustentáveis e equitativos, bem como a aceitação do mercado. Além disso, por meio do *Inflation Reduction Act*, lei federal instituída em 2022 pelos EUA, foi estabelecido um programa de incentivo para produção de hidrogênio limpo que pode pagar até US\$ 3 de subsídio por quilo de hidrogênio limpo produzido. Esse mecanismo financeiro será primordial para o desenvolvimento do mercado no curto e no médio prazo.

## 4.6 PROPOSIÇÃO DE PROJETOS

A partir dos dados apresentados neste estudo, esta seção aponta áreas com maior potencial para projetos de produção de hidrogênio com eólica *offshore* no Brasil. O primeiro passo é considerar o potencial de eólica *offshore* e a demanda por hidrogênio, tanto para o mercado externo como para o interno. De acordo com a Figura 10, referente ao mapa do potencial técnico para produção de energia com eólica *offshore*, são analisadas as regiões com maior potencial e os projetos propostos para cada uma, de acordo com as vocações locais para economia do hidrogênio.

### 4.6.1 REGIÃO NORDESTE

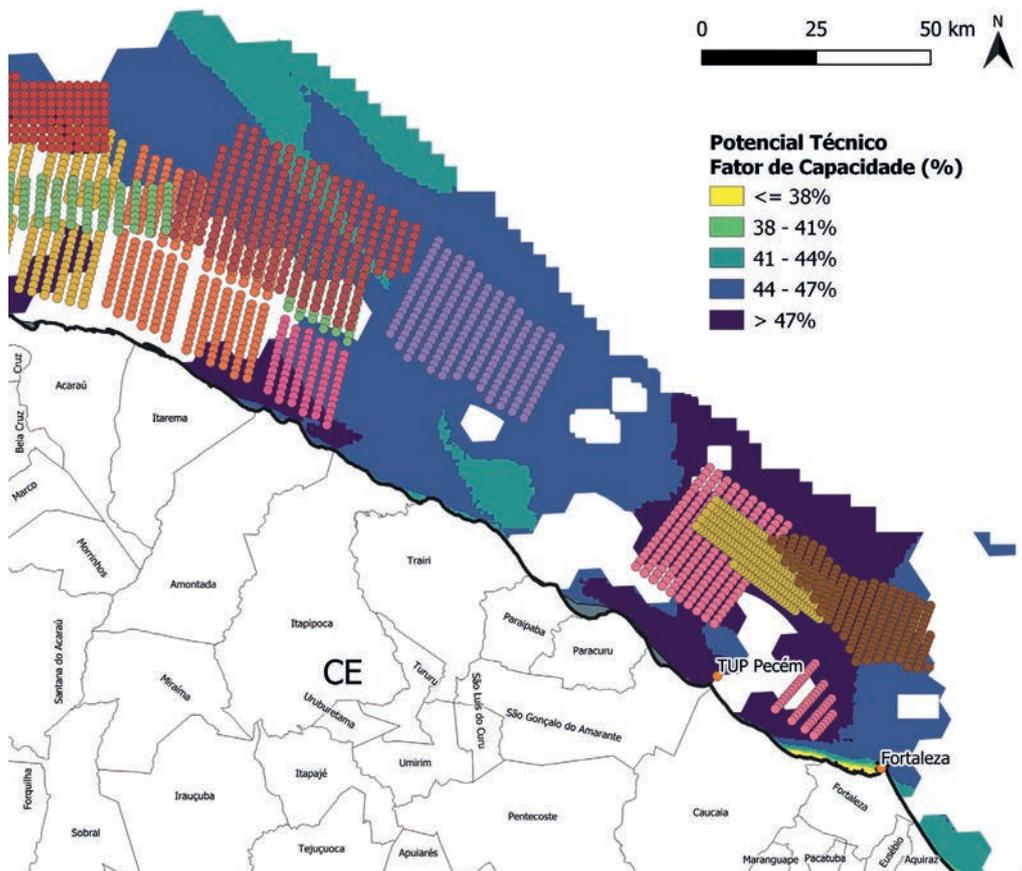
Na Região Nordeste encontra-se a área com os maiores potenciais de geração de energia eólica *offshore* no Brasil, principalmente nos estados do Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí e uma parte do Maranhão. Verifica-se que mesmo com a aplicação das restrições técnicas, econômicas e ambientais especificadas no Quadro 1, ainda há grande potencial.

Essa região também possui grande capacidade de geração solar fotovoltaica e eólica *onshore*, com áreas ainda a serem exploradas. Para o investidor, é preciso justificar o investimento na tecnologia *offshore* e a decisão é normalmente tomada a partir de critérios puramente econômicos, ou seja, é necessário que haja viabilidade para investimento nesses projetos. O maior fator de capacidade médio anual, a melhor constância de ventos e a possibilidade de diminuição de custos com infraestrutura e logística, por exemplo, podem ser pontos que levem a uma maior rentabilidade do projeto no longo prazo.

A vocação principal da região Nordeste para produção de hidrogênio de baixo carbono e seus derivados seria para exportação para o continente europeu. A distância entre o Porto do Pecém (São Gonçalo do Amarante-CE) e o Porto de Rotterdam na Holanda é cerca de 7.500 km ou de nove dias por transporte marítimo. Mecanismos de financiamento como o H2Global, por exemplo, que abriu concorrência para contrato de longo prazo de importação de amônia verde, e-metanol e e-SAF para a Europa, podem viabilizar tais projetos.

Há cerca de 35 empreendimentos de eólica *offshore* com pedidos de licenciamento na costa da região Nordeste, sendo que 21 deles estão concentrados na costa do estado do Ceará. Observa-se na Figura 37, que há uma grande área potencial para eólica *offshore* próximo do Porto do Pecém. Apesar disso, apenas dois dos três empreendimentos com pedidos de licenciamento devem conseguir a cessão de área, pois há sobreposição em três deles. No entanto, ainda assim, há uma grande área ainda sem pedido de licenciamento com grande potencial para geração eólica *offshore*.

**FIGURA 37** – Mapa do fator de capacidade na área de potencial técnico e os empreendimentos de eólica *offshore* com pedido de licenciamento no Ibama no estado do Ceará



Fonte: Elaboração própria.

O Porto do Pecém é um terminal portuário da costa do Nordeste brasileiro, estilo *offshore*, localizado em um acidente geográfico denominado Ponta do Pecém, local onde foram construídas as obras do terminal portuário, no distrito do Pecém no município de São Gonçalo do Amarante. Este fica situado no litoral oeste do estado do Ceará, dentro da Região Metropolitana de Fortaleza, a cerca de 60 quilômetros por rodovia da capital.

Pelo seu desenvolvimento industrial local, está sendo chamado de Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) e possui a Zona de Processamento de Exportação (ZPE) Ceará, com incentivos administrativos, fiscais e cambiais para indústrias exportadoras. A Figura 38 demonstra o projeto para o *hub* de hidrogênio de baixo carbono que está sendo construído. Segundo o próprio CIPP (2022), além da localização favorável, os incentivos tributários e o grande potencial de geração de energia renovável constituem vantagens competitivas importantes para o desenvolvimento de um *hub* de H<sub>2</sub> no Ceará.

**FIGURA 38** – Hub de hidrogênio de baixo carbono no Complexo Industrial e Portuário do Pecém



Fonte: CIPP, 2022.

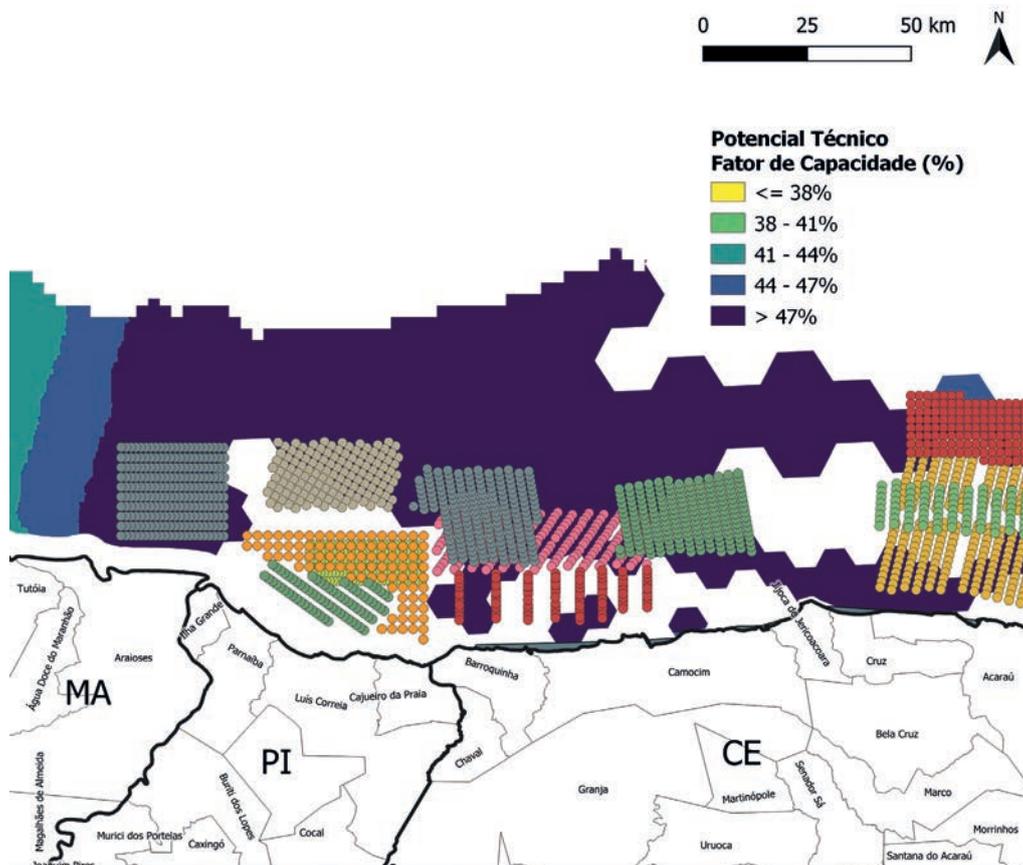
Na costa do estado do Rio Grande do Norte, também há um grande potencial para produção de energia eólica *offshore*. O estado já é o maior produtor de energia eólica *onshore*, com 6,7 GW. Há nove empreendimentos que somam 17,8 GW com pedidos de licenciamento para eólica *offshore* no estado, mas como observado na Figura 39, possivelmente muitos deles projetos enfrentarão barreiras com o licenciamento, por se situarem em local de prioridade de conservação (figura 9), ou por estarem sobrepostos a outros empreendimentos. Ainda assim, é observada uma área com potencial que ainda não há pedido de licenciamento no Ibama (figura 39).



No estado do Piauí e no início da costa leste do estado do Maranhão há, ao todo, cinco pedidos de licenciamento para eólica *offshore*. São quatro projetos no Piauí e um no Maranhão. A Figura 40 revela que há ainda uma área significativa com alto fator de capacidade que poderia ser explorada para construção desses empreendimentos.

O Piauí carece de infraestrutura para desenvolvimento industrial. Há mais de 40 anos, o estado planeja construir o primeiro porto. O projeto, iniciado nos anos 80, nunca foi finalizado e o estado é o único do país sem terminais próprios. Em 2018, foram retomados os estudos de viabilidade do projeto (PPP Piauí, 2022). A implantação do porto, na modalidade de concessão, abrirá espaço para o reposicionamento do estado no cenário político e econômico do país, especialmente no escoamento da produção local e regional, bem como contribuirá para potencializar toda a sua cadeia produtiva. O Porto de Luís Correia deverá ser implantado no litoral piauiense, no norte do estado, na região das planícies litorâneas. Ele está situado a 20 km da Zona de Processamento e Exportação (ZPE) de Parnaíba, a 30 km dos tabuleiros litorâneos, e a cerca de 800 km dos cerrados piauienses.

**FIGURA 40** – Mapa do fator de capacidade na área de potencial técnico e os empreendimentos de eólica *offshore* com pedido de licenciamento no Ibama no estado do Piauí e no leste do Maranhão

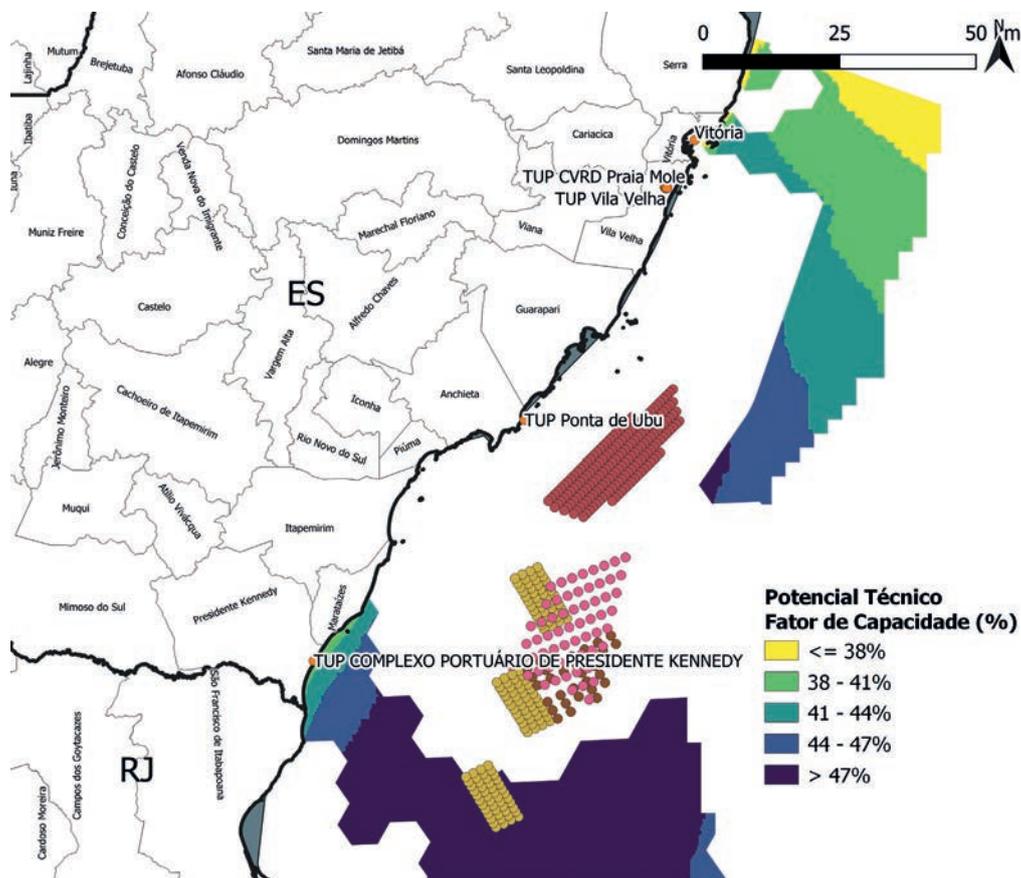


Fonte: Elaboração própria.

## 4.6.2 REGIÃO SUDESTE

A região Sudeste possui um enorme potencial eólico *offshore* no litoral norte fluminense do Rio de Janeiro e sul do Espírito Santo. São quatro pedidos de licenciamento no Espírito Santo e nove no Rio de Janeiro, somando cerca de 33,2 GW de potência. Na Figura 41, observa-se o litoral do Espírito Santo com os respectivos pedidos de licenciamento e o fator de capacidade na área de potencial técnico. Dos quatro projetos, apenas dois poderão prosseguir em razão da sobreposição. Todos eles se encontram em áreas de conservação de extrema prioridade (Figura 41) e há risco de terem suas licenças negadas.

**FIGURA 41** – Mapa do fator de capacidade na área de potencial técnico e os empreendimentos de eólica *offshore* com pedido de licenciamento no Ibama no estado do Espírito Santo



Fonte: Elaboração própria.

Próximo às áreas de maior potencial e dos projetos com pedidos de licenciamento no Ibama, há um projeto da construção do Porto Central em andamento, que pretende ser um complexo industrial portuário único e de referência mundial. A intenção é que seja um porto para a movimentação de diferentes tipos de carga, como petróleo e gás, grãos, fertilizantes, minerais, contêineres, carga geral, dentre outras. Está previsto também um terminal para a indústria eólica *offshore*, a fim de atrair investimentos para produzir

hidrogênio de baixo carbono em larga escala, tanto para o mercado doméstico quanto internacional, podendo ser a planta instalada dentro da Zona de Processamento de Exportação (ZPE) do Porto Central, já licenciada.

**FIGURA 42** – Projeto esquemático do Porto Central



Fonte: Porto Central, 2022.

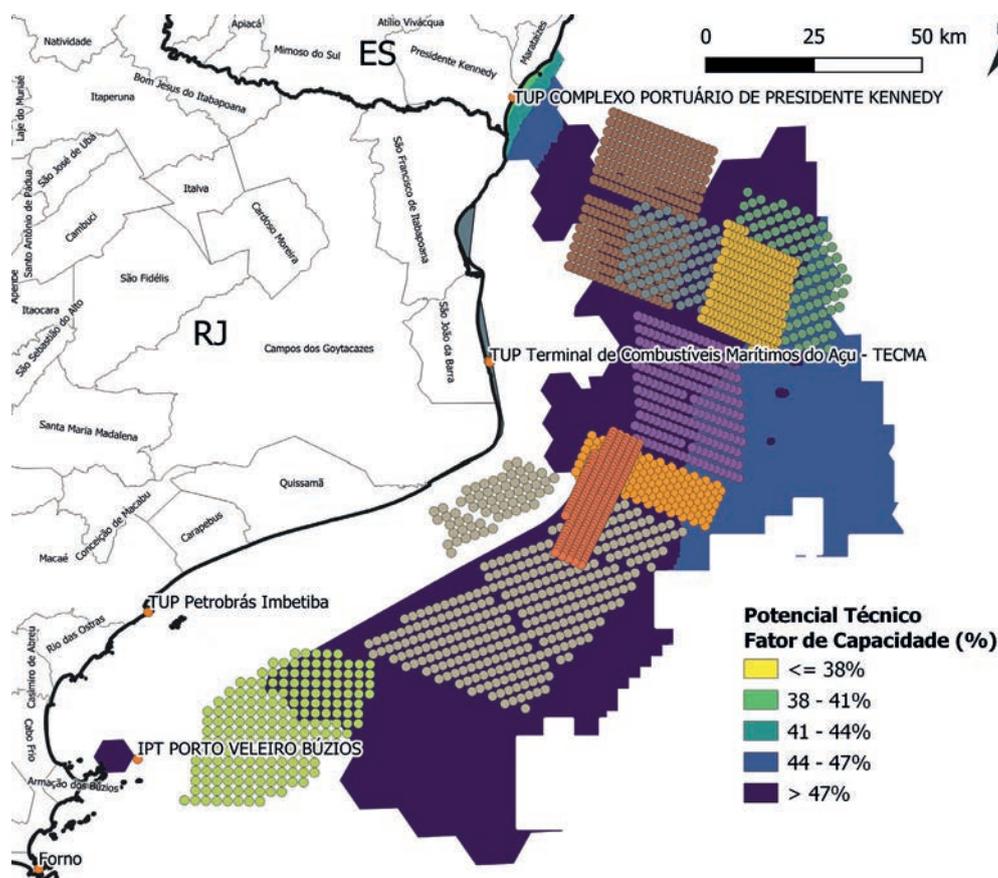
Grande parte dos projetos com pedido de licenciamento no Rio de Janeiro se encontra na área mapeada com potencial técnico. No entanto, nem todos devem prosseguir, dada a sobreposição. A Figura 43 mostra, que, ainda assim, há projetos em áreas de conservação com prioridade extremamente alta. Logo, deverão contar com a autorização do Ibama e de autoridades competentes para seguir com a cessão de uso de área.

O estado é o terceiro menor da federação, mas responde por 15% de todos os portos do país e 50% de todos os estaleiros. Seus cinco grandes portos são: Açu, Macaé, Rio de Janeiro, Itaguaí e Angra dos Reis. Além disso, há dois portos em fase de construção: Tepor e Maricá.

Em que pese existir outros portos com potencial, o Porto do Açu tem se despontado como o mais promissor e se posicionando como um *hub* de energia. Nele, trabalha-se para ser desenvolvido um *hub* de hidrogênio que atraia diversos espectros da cadeia de valor: produtoras e distribuidoras de H<sub>2</sub>, indústrias de amônia verde e biorrefinaria, indústrias

de aço de baixo carbono, que podem utilizar H<sub>2</sub> de baixo carbono (seja como vetor de energia, seja como matéria-prima do seu processo produtivo), bem como fabricantes de equipamentos que atuam na indústria do H<sub>2</sub>.

**FIGURA 43** – Mapa do fator de capacidade na área de potencial técnico e os empreendimentos de eólica *offshore* com pedido de licenciamento no Ibama no estado do Rio de Janeiro



Fonte: Elaboração própria.

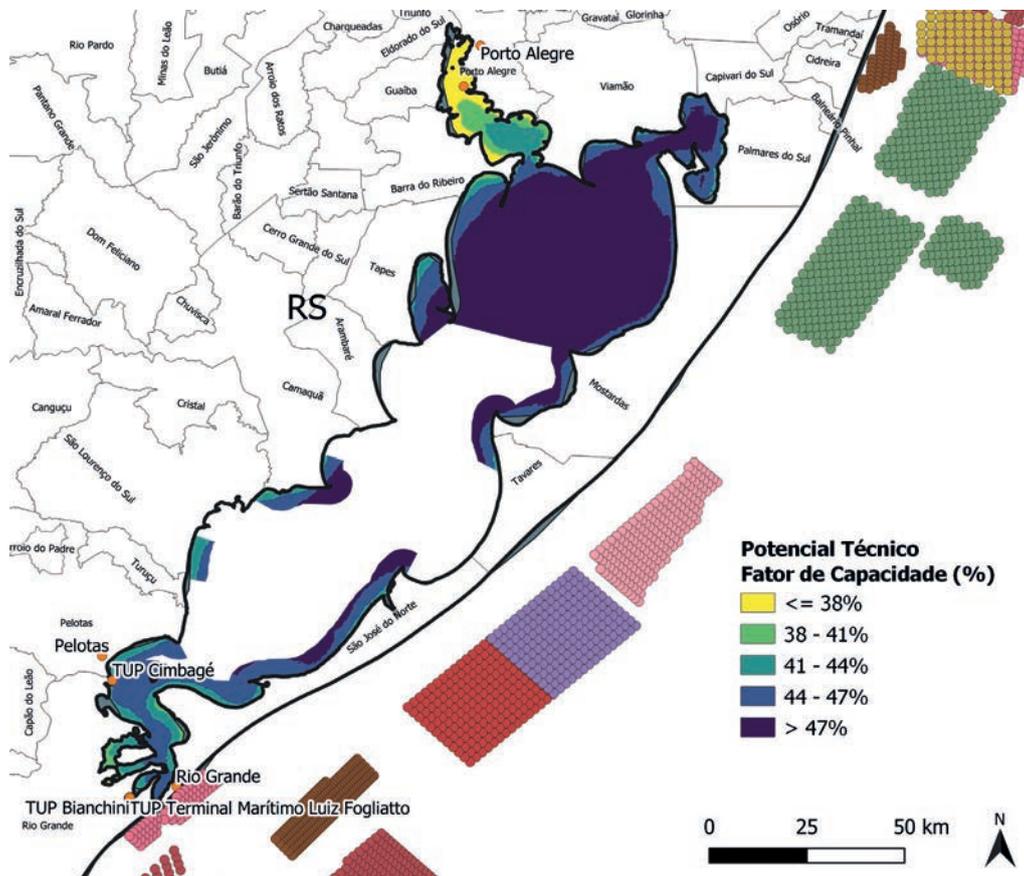
No caso do Rio de Janeiro, a energia das eólicas *offshore* pode ser utilizada para consumo interno, não apenas do estado, mas próximo do centro de carga também de São Paulo e Minas Gerais. Como o mais bem posicionado *hub* de energia, o Porto do Açú conta com uma retroárea equivalente a quase duas ilhas, de Manhattan, o que é importante para os investidores.

A infraestrutura do estado agrega diferentes modais de transporte. Há rodovias interligando as principais partes do país. Recentemente, foi aprovada a construção da estrada de ferro EF 118, que liga o Porto do Açú até o Terminal Anchieta no Espírito Santo. Se seguir a ferrovia, chega-se no Centro-Oeste. Essa integração é importante, pois ajuda a transportar a produção de fertilizantes nitrogenados para o interior do país. E, no caminho inverso, levar a produção de grãos para exportação pelo Porto do Açú.

### 4.6.3 REGIÃO SUL

A região Sul conta com o maior potencial bruto do Brasil para eólica *offshore*. No entanto, com a aplicação das restrições técnicas, ambientais e econômicas, as áreas de exploração ficam praticamente reduzidas à Lagoa dos Patos no Rio Grande do Sul (RS). Deve-se a isso, a área de conservação mapeada na costa da região Sul, considerada como de extrema prioridade. Como pode ser observado na Figura 44, a região conta com 21 projetos no Rio Grande do Sul e um em Santa Catarina.

**FIGURA 44** – Mapa do fator de capacidade na área de potencial técnico e os empreendimentos de eólica *offshore* com pedido de licenciamento no Ibama no estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Elaboração própria

Apesar disso, a Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura (Sema) do RS concluiu o estudo prévio para o lançar o edital de concessão de uso de áreas (lotes) da Lagoa dos Patos, que prevê a implantação de aerogeradores de energia elétrica (parque eólico) pela iniciativa privada (SEMA-RS, 2022). Há também a possibilidade de exportação de hidrogênio e seus derivados para a Argentina, o Uruguai e, mais adiante, o Paraguai.



# 5 BARREIRAS E RECOMENDAÇÕES

Como apresentado, existe um grande potencial para aproveitamento da energia eólica *offshore* no Brasil, mas é preciso: (i) transpor algumas barreiras regulatórias e institucionais, com vistas a criar um ambiente seguro para o investidor; (ii) criar um novo mercado para consumo desse montante de energia, seja dentro e/ou fora do país; (iii) investir na infraestrutura para que a energia gerada com essa tecnologia seja competitiva; e (iv) melhorar a infraestrutura tecnológica do país para que essa indústria alcance performances que a tornem competitiva.

Tal potencial é da ordem de 697 GW (EPE, 2020), três vezes maior do que a potência instalada do país<sup>13</sup>. Há, portanto, oportunidades para se criar um mercado de hidrogênio de baixo carbono a partir da geração de energia eólica *offshore*, mas há barreiras que precisam ser mapeadas para que recomendações sejam feitas. Assim, nesta seção, serão discutidas as principais barreiras relacionadas aos aspectos (i) regulatórios (seção 5.1), (ii) mercadológicos (seção 5.2), (iii) de infraestrutura (seção 5.3) e (iv) tecnológicos (seção 5.4). Os aspectos ambientais são levados em consideração nas discussões, no âmbito regulatório. Para transpor as barreiras elencadas, foram elencadas recomendações com vistas ao aproveitamento da geração eólica *offshore* para a produção de hidrogênio de baixo carbono. Este poderá ser absorvido pela indústria do país, mas vislumbra-se também a possibilidade de suprir o mercado internacional desta commodity.

Nas subseções seguintes, as discussões sobre as barreiras e recomendações seguirão a mesma lógica para cada um dos aspectos listados anteriormente. Primeiramente, será apresentada uma lista de barreiras com seus respectivos códigos (por exemplo, a primeira barreira regulatória será a BR.1 e assim por diante – Quadro 8). Na sequência, serão apresentadas as recomendações que podem transpor uma ou mais barreiras. No Quadro 9, por exemplo, nota-se que a primeira recomendação para a primeira barreira regulatória listada (RBR.1) é endereçada às barreiras BR.1 e BR.2.

13 Segundo o Balanço Energético Nacional, a capacidade instalada do parque gerador brasileiro em 2021 era de 181,6 GW (EPE, 2022).

Para consolidação das listas de barreiras e suas respectivas considerações, foram consultados diversos documentos que se encontram listados nas referências bibliográficas. Além disso, as percepções de especialistas sobre os debates ocorridos durante o *Brazil Wind Power 2022* também foram levadas em consideração.

Ao final deste capítulo, na seção 5.5, propõe-se uma agenda de estudos para que algumas das barreiras apresentadas sejam transpostas.

## 5.1 BARREIRAS REGULATÓRIAS E RESPECTIVAS RECOMENDAÇÕES

No Quadro 8, é apresentada as barreiras regulatórias. Na sequência, no Quadro 9, as recomendações para se suplantar as barreiras levantadas são também listadas. Por fim, são feitas considerações sobre as barreiras regulatórias e suas respectivas recomendações.

**QUADRO 8** – Barreiras regulatórias

Barreiras regulatórias (BR)	Código
Grande número de <i>stakeholders</i> envolvidos nesse mercado	BR.1
Não clareza na governança das políticas públicas e dos mecanismos de incentivo	BR.2
Processos de normalização e regulamentação do setor de eólica <i>offshore</i>	BR.3
Conflitos de uso do território marítimo com outras atividades econômicas	BR.4
Insegurança regulatória para eólica <i>offshore</i> por existirem apenas mecanismos normativos infralegais	BR.5
Necessidade de tratar o problema de sobreposição de áreas já existentes nos pedidos de licenciamento do Ibama	BR.6
Falta de regulação específica sobre a base para cálculo dos valores a serem pagos no caso da cessão onerosa	BR.7
Demora na abertura do mercado varejista de energia elétrica	BR.8
Altos custos da energia gerada pela eólica <i>offshore</i>	BR.9
Falta de uma regulação que remunere os serviços ancilares <sup>14</sup> de forma adequada	BR.10

Fonte: Elaboração própria

14 Os serviços ancilares contribuem para a garantia de operacionalidade do SIN e, segundo a regulamentação vigente, são constituídos pelos (ONS, 2019): (i) controles primário e secundário de frequência das unidades geradoras; (ii) suporte de reativos; (iii) despacho complementar para manutenção da reserva de potência operativa; (iv) autorrestabelecimento parcial e integral; e (v) Sistema Especial de Proteção (SEP).

**QUADRO 9 – Recomendações para as barreiras regulatórias**

Recomendações para as barreiras regulatórias (RBR)	Barreira
RBR.1 – A fim de definir responsabilidades dos <i>stakeholders</i> , mapear todos os pontos de conflitos e alianças entre eles	BR.1, BR.2
RBR.2 – Trazer todos os <i>stakeholders</i> para a discussão das políticas públicas (MME, MDR, MCTI, MMA, MF, Marinha, entre outras) e definir suas responsabilidades em todo o processo. Sugere-se que o MME seja órgão articulador	BR.1, BR.2, BR.3
RBR.3 – Reduzir as incertezas sobre os potenciais conflitos socioeconômicos que poderão surgir entre a atividade eólica <i>offshore</i> e outras atividades, por meio da Implementação de um Planejamento Espacial Marítimo (PEM)	BR.3, BR.4
RBR.4 – Alinhar o texto do Projeto de Lei em discussão no Congresso com o Decreto nº 10.946/2022	BR.5
RBR.5 – Definir critérios claros para o tratamento do problema de sobreposição de áreas	BR.6
RBR.6 – Dar celeridade ao processo de publicação da regulamentação que tratará sobre os valores a serem pagos no caso de empreendimentos de eólica <i>offshore</i> que tenham cessão onerosa	BR.7
RBR.7 – Dar celeridade ao processo de abertura do mercado varejista, definindo prazos e consumidores habilitados a participarem	BR.8
RBR.8 – Realizar leilão de reserva de capacidade na forma de potência para atendimento de ponta com tecnologias de armazenamento	BR.8, BR.9
RBR.9 – Revisar a regulação de serviços ancilares	BR.9

Fonte: Elaboração própria

Para um melhor entendimento das responsabilidades que os diversos *stakeholders* devem ter em um mercado futuro de eólica *offshore* e de hidrogênio de baixo carbono (BR.1), sugere-se que seja feita a avaliação dos interesses recíprocos e seus principais pontos de conflito. Esse é um exercício importante e não muito simples, pois, segundo a EPE (2020), existem pelo menos 17 entes governamentais envolvidos somente no licenciamento ambiental (Apêndice 1). Além desses órgãos, é necessário envolver os atores da sociedade civil, tais como investidores, consumidores, indústrias, associações, entidades de financiamento etc. Somente com essa ação será possível estabelecer, de forma clara, a governança quando da definição das políticas para impulsionar a criação desses dois mercados por meio de mecanismos de incentivo (BR.2). Além disso, é preciso definir os processos de normalização e regulamentação (BR.3). Para sucesso dessa empreitada, sugere-se ainda que o MME seja o órgão responsável pela articulação com todas as entidades públicas e privadas envolvidas.

Recomenda-se, ainda, que seja feito um Planejamento Espacial Marítimo (PEM)<sup>15</sup> (EPE, 2020; BEP 2020), a fim de reduzir as incertezas sobre os potenciais conflitos socioeconômicos que poderão surgir entre a atividade eólica *offshore* e outras atividades (BR.4). Tal planejamento tem por objetivo regular várias áreas de atuação (Carneiro, 2022): transporte marítimo, energia renovável, conservação/proteção marinha, mineração, pesca, aquicultura, exploração de óleo e gás e defesa militar. Com isso, pode-se promover a geração de divisas

15 O Planejamento Espacial Marinho (PEM) pode ser entendido como um instrumento público, multissetorial, jurídico e prático que organiza o uso compartilhado, eficiente, harmônico e sustentável dos mares (Carneiro, 2022).

e empregos e trazer maior segurança jurídica, o que pode fomentar o desenvolvimento econômico sem desprezar os interesses estratégicos e de defesa nacional, além de maximizar os interesses privados e públicos.

Tanto o Projeto de Lei nº 576/2021 quanto o Decreto nº 10.946/2022 tratam sobre o aproveitamento de bens da União para geração de energia a partir de empreendimento *offshore*. Quanto ao PL, é importante que, quando das discussões na Câmara e no Senado, não haja mudanças drásticas do texto do decreto, de modo a garantir segurança jurídica aos investidores em projetos de eólica *offshore*. O receio dos entes que avaliam investir nessa fonte de geração de energia é que aconteça algo parecido como ocorrido com a Lei nº 14.182/2021, que dispõe sobre a desestatização da Eletrobras, onde emendas parlamentares, que não têm relação direta com o texto principal, foram incluídas. É importante assegurar que os mecanismos infralegais que hoje tratam desse tema (Decreto nº 10.946/2022, Portaria Normativa GM/MME nº 52/2022 e Portaria Interministerial MME/MMA nº 3/2022) não tenham seus textos alterados, para que seja dada a devida segurança jurídica e regulatória aos investidores (BR.5).

Ainda em relação à regulamentação sobre cessão de área, é importante que sejam definidos, de forma transparente, os critérios para o tratamento do problema de sobreposição de áreas dos projetos que já têm pedidos de licenciamento solicitados ao Ibama (BR.6). A regra definida pela Portaria Normativa GM/MME nº 52/2022 não é muito clara e deve ser mais bem especificada, já que dos 70 projetos submetidos até dezembro de 2022, havia mais de 30 com sobreposição, chegando alguns a se sobrepor a quatro outros projetos. Esse é um problema que deve ser tratado com celeridade e discutido com as partes interessadas, a fim de se evitar a judicialização desse mercado e o uso especulativo da água. Tais critérios devem estar mais evidentes quando da criação do PUG-*offshore*, que foi estabelecido pela Portaria Interministerial MME/MMA nº 3/2022. Assim, sugere-se não apenas considerar critérios econômicos, mas também os sociais e ambientais, com vistas a trazer o maior retorno socioeconômico para a sociedade.

No caso específico da cessão de área onerosa, de que trata a Portaria Normativa GM/MME nº 52/2022, é importante que seja célere o processo de publicação da regulamentação que deverá tratar dos valores a serem pagos (BR.7). Com isso, torna-se possível equacionar os interesses da sociedade e permitir que a iniciativa privada possa estimar melhor esses custos em seus modelos financeiros. Sugere-se que, para definição da metodologia de cálculo desses valores, seja considerada a experiência de dois grandes segmentos do setor de energia: das grandes hidrelétricas e da exploração de petróleo e gás.

Quando se trata do uso da energia produzida por empreendimentos de eólica *offshore* na indústria, pode-se trilhar dois caminhos: (i) a produção direta de eletricidade demandada pela indústria; e (ii) a produção de hidrogênio de baixo carbono, que também pode ser utilizado pela indústria ou ser armazenado para produção de energia elétrica para o sistema.

No primeiro caso, deve-se dar celeridade à abertura do mercado varejista, definindo os prazos e os consumidores habilitados a participar, especialmente os industriais supridos em baixa tensão (BR.8).

No caso da utilização da energia eólica para produção de hidrogênio, o caminho natural seria o uso direto na indústria (por exemplo, produção de amônia e fertilizantes, produção de metanol para indústria química e petroquímica, uso na siderurgia, produção de cerâmica e vidro e produção de cimento). Vislumbra-se, ainda, utilizar esse hidrogênio como energia armazenada, a ser utilizada para a produção de eletricidade nos horários críticos do uso do sistema elétrico (horário de ponta, por exemplo) ou como serviços ancilares. Para isso, sugere-se a realização de um leilão de reserva de capacidade na forma de potência para atendimento de ponta com tecnologias de armazenamento (BR.8), pois, assim, empreendimentos híbridos de geração de energia renovável com armazenamento poderiam ser viabilizados (eólica *offshore* e armazenamento de hidrogênio, por exemplo). Além disso, recomenda-se que seja considerada uma revisão do submódulo 14.3 dos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema (nos), que trata da remuneração dos serviços ancilares (BR.9). O atual valor está desatualizado, já que a última revisão da metodologia de cálculo foi realizada em 2008 (ONS, 2008).

## 5.2 BARREIRAS MERCADOLÓGICAS E RESPECTIVAS RECOMENDAÇÕES

É apresentada, no Quadro 10, as barreiras mercadológicas elencadas a partir do levantamento documental realizado pelos autores. No Quadro 11, as recomendações para se transpor tais barreiras são também listadas. E, na sequência, são feitas as considerações sobre as barreiras mercadológicas e suas respectivas recomendações.

**QUADRO 10** – Barreiras mercadológicas

Barreiras mercadológicas (BM)	Código
Custos altos iniciais da adoção de soluções tecnológicas relacionadas aos empreendimentos de eólica <i>offshore</i> e hidrogênio de baixo carbono	BM.1
Baixa disponibilidade de informação sobre o potencial e os custos das oportunidades	BM.2
Pouca oferta de linhas de crédito específicas para o mercado de eólica <i>offshore</i> e de hidrogênio	BM.3
Retração dos investimentos em CT&I com impacto no mercado de energia	BM.4
Inexistência de um mercado interno e externo de hidrogênio	BM.5
Restrição de sistemas transacionais de carbono à União Europeia e aos Estados Unidos	BM.6
Falta de demanda por produtos verdes	BM.7
Possível falta de isonomia para todos os <i>players</i> participantes do mercado de geração <i>offshore</i>	BM.8
Falta de experiência no licenciamento para usinas eólicas <i>offshore</i>	BM.9

Fonte: Elaboração própria

**QUADRO 11 – Recomendações para as barreiras mercadológicas**

Recomendações para as barreiras mercadológicas (RBM)	Barreira
RBM.1 – Criar mecanismos competitivos de expansão da oferta de energia no país e nos instrumentos de planejamento energético para inserção da eólica <i>offshore</i> e hidrogênio na matriz	BM.1, BM.2, BM.3
RBM.2 – Criar processos licitatórios para cessão de área planejada	BM.1, BM.2
RBM.3 – Aumentar o número de estações de medição para se mensurar com maior precisão o potencial de geração de eólica <i>offshore</i>	BM.2
RBM.4 – Garantir a criação de linhas financiamentos estáveis, confiáveis e a preços competitivos, utilizando a experiência da indústria eólica <i>onshore</i>	BM.2, BM.3
RBM.5 – Criar programas e publicar editais específicos para os setores de eólica <i>offshore</i> e de hidrogênio com o objetivo de fortalecer as bases de pesquisas e desenvolvimento tecnológico com essas especificidades	BM.2, BM.4, BM.5
RBM.6 – Implementar um mercado de carbono como pilar para incentivar a descarbonização dos segmentos <i>hard-to-abate</i> <sup>16</sup> na indústria	BM.6
RBM.7 – Desenvolver mecanismos públicos para induzir a demanda por produtos verdes no país	BM.7
RBM.8 – Isonomia em relação à definição dos critérios de cessão de área para exploração da eólica <i>offshore</i>	BM.8
RBM.9 – Utilizar a experiência de licenciamento ambiental de grandes empreendimentos de exploração de petróleo e de geração eólica <i>onshore</i>	BM.9

Fonte: Elaboração própria

Por meio de instrumentos regulatórios, devem ser estabelecidos mecanismos competitivos para expansão da oferta de energia no país com a inserção da eólica *offshore* e hidrogênio na matriz energética do Brasil. Tais mecanismos são muito relevantes para viabilizar a adoção de soluções tecnológicas que sejam utilizadas em empreendimentos de geração eólica *offshore* e na produção de hidrogênio de baixo carbono (BM.1), de modo a criar, assim, as bases para o desenvolvimento desse mercado. Alguns desses mecanismos foram citados na seção 5.1, pois há a necessidade de um arcabouço regulatório para que esse mercado possa se desenvolver de forma harmônica e ordenada no país.

Uma importante ação seria a criação de processos licitatórios para cessão planejada de área, pois, além de ser um mecanismo indutor para que a geração eólica *offshore* comece a ser inserida na matriz, traz mais informações sobre o potencial dessa fonte de energia e dos custos das oportunidades (BM.2). Os estudos de potencial de geração e de impacto ambiental, por exemplo, ficam a cargo do governo. Assim, seriam refinados alguns dados disponíveis, além de se fazer o levantamento de informações não disponíveis, inclusive potencial de geração, o que pode ser realizado por meio da ampliação do número de estações de medição. Com isso, seria possível mensurar, de forma mais precisa, esse potencial de geração, diminuindo, assim, as incertezas em relação à aptidão dos sítios e aos riscos para os investidores.

16 Emissões *hard-to-abate* são aquelas proibitivamente caras ou impossíveis de reduzir com as tecnologias de redução atualmente disponíveis. Ocorre em algumas indústrias pesadas como as de cimento, aço e química (Paltsev *et al.*, 2021).

Além dos mecanismos regulatórios, deveriam ser criadas linhas de financiamentos estáveis, confiáveis e a preços competitivos, utilizando a experiência da indústria de fontes renováveis. Instituições como o BNDES e o BNB têm uma importante participação na concessão de crédito para projetos de eólica *onshore*. Segundo o BEP (2022), essas duas instituições estão adquirindo conhecimento sobre a eólica *offshore* e consideram que serão financiadoras de projetos para esse setor (BM.3).

Sugere-se, ainda, que o BNDES seja o órgão acelerador dessa iniciativa com o financiamento de estudos sobre os gargalos para a produção de bens e serviços, tanto da cadeia de eólica *offshore* quanto da cadeia de hidrogênio, identificando uma estratégia para desenvolvimento desses setores no país (BM.1 e BM.3).

A Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) tem um papel relevante para se conhecer melhor o mercado de eólica *offshore* e de hidrogênio de baixo carbono no Brasil. Segundo o BEP (2021), o Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) tem dado suporte para o desenvolvimento do setor, por meio de parcerias com universidades e centros tecnológicos. Todavia, nos últimos anos, em razão da retração da economia causada especialmente pela pandemia, houve também uma retração nos investimentos em CT&I no país, com impacto direto no mercado de energia (BM.4). Além disso, ainda não há no Brasil publicações de editais específicos para o setor eólico *offshore*, nem programas para o fortalecimento de bases de pesquisas e desenvolvimento tecnológico com essa especificidade (BEP, 2021).

Sugere-se, portanto, que sejam criados programas e publicados editais direcionados aos setores de energia eólica *offshore* e hidrogênio, com vistas a reduzir a baixa disponibilidade de informações sobre potencial e custos de oportunidade (BM.2), possibilitando inclusive criar as bases para se estabelecer um mercado interno e externo de hidrogênio (BM.5). O Brasil apresenta um dos custos nivelados de geração de energia renovável mais baixos no mundo (IRENA, 2021), sendo um forte candidato à produção de H<sub>2</sub> de baixo carbono para exportação para outros países a preço bem competitivo (CNI, 2022).

Outra forma de trazer maior competitividade para o hidrogênio produzido a partir de geração eólica *offshore* é a possibilidade de introduzi-lo em uma economia verde, por meio da implementação de um mercado de carbono que tenha como incentivo a descarbonização dos segmentos *hard-to-abate* na indústria (BM.6). Assim, pode-se criar maior demanda por produtos verdes no país (BM.7).

Em relação à definição dos critérios de cessão de área para exploração da eólica *offshore*, defendemos a isonomia. Recomenda-se que as regras sejam bem estabelecidas para os casos em que a exploração de petróleo e a geração de eólica possam se sobrepor. Essa é uma regra importante para se garantir a isonomia a todos os investidores interessados em explorar as áreas marítimas do país (BM.8) e garantir um bom funcionamento do futuro mercado de geração eólica *offshore*.

Em relação ao licenciamento ambiental da geração eólica *offshore* no Brasil (BM.9), sugere-se considerar a experiência do setor de óleo e gás, pela similitude dos impactos são parecidos. Todavia, há de se tomar cuidado com impactos específicos de cada setor. No de óleo e gás há uma grande preocupação com possíveis vazamentos; já no setor de eólica *offshore*, merecem atenção os processos migratórios das aves e espécies marinhas. Além disso, recomenda-se avaliar as experiências de países estrangeiros que já investiram nessa fonte, especialmente o Reino Unido.

### 5.3 BARREIRAS DE INFRAESTRUTURA E RESPECTIVAS RECOMENDAÇÕES

A seguir, no Quadro 12, são listadas as barreiras de infraestrutura considerando os estudos realizados. Para se transpor essas barreiras, são elencadas recomendações que podem ser avaliadas no Quadro 13. Na sequência, seguem as considerações acerca do conteúdo apresentado nesses dois quadros.

#### QUADRO 12 – Barreiras de infraestrutura

Barreiras de infraestrutura (BI)	Código
Crises mundiais (Covid-19 e Guerra da Ucrânia) inflacionaram os preços dos equipamentos no mercado mundial	BI.1
Baixa competitividade da indústria de equipamentos de geração eólica quando comparada com a indústria internacional	BI.2
Falta de infraestrutura logística (estradas e portos)	BI.3
Inexistência de um mercado global de hidrogênio	BI.4
Limitações técnicas dos <i>players</i> da indústria de eólica <i>offshore</i> e de hidrogênio de baixo carbono	BI.5
Necessidade de que os projetos de eólica <i>offshore</i> sejam grandes e demandem estudos de planejamento da transmissão	BI.6
Grande demanda de outros setores por guindastes	BI.7

Fonte: Elaboração própria

#### QUADRO 13 – Recomendações para as barreiras de infraestrutura

Recomendações para as barreiras de infraestrutura (RBI)	Barreiras
RBI.1 – “ <i>Hedgear</i> ” as variações dos preços das commodities internacionais (insumo da indústria)	BI.1
RBI.2 – Identificar competências disponíveis de outros setores econômicos que podem ser utilizadas na indústria eólica <i>offshore</i>	BI.1, BI.2
RBI.3 – Trazer parceiros internacionais para aumentar o nível de qualidade dos componentes da cadeia de fornecedores	BI.2
RBI.4 – Criar polos locais de produção de componentes da cadeia de produção eólica para suprir o mercado interno e de países da América	BI.1, BI.2, BI.3
RBI.5 – Nas proximidades de portos, fomentar a produção de grandes equipamentos que fazem parte dos aerogeradores (pás e torres, por exemplo)	BI.1, BI.2, BI.3

Recomendações para as barreiras de infraestrutura (RBI)	Barreiras
RBI.6 – Incentivar a parceria público-privada para melhorar portos e estradas próximos às áreas licitadas	BI.3
RBI.7 – Incentivar colaborações para a criação de um mercado de hidrogênio global	BI.4
RBI.8 – Estabelecer acordos e convênios com universidades e outras instituições, como SEBRAE e SENAI, que possam atuar na formação mais qualificada	BI.5
RBI.9 – Realizar (a EPE e a ONS) estudos prévios dos projetos que já estão protocolados no Ibama	BI.6
RBI.10 – Mapear, em setores estratégicos como construção civil, portos e energia (eólica e O&G), as empresas no Brasil que oferecem serviços de içamento e guindaste	BI.7

Fonte: Elaboração própria

Em razão das crises mundiais, especialmente da pandemia e da Guerra entre Rússia e Ucrânia, houve um aumento dos preços das commodities e dos componentes eletrônicos produzidos na China (cotados em dólar), que acabaram por inflacionar os preços dos equipamentos no mercado mundial. No setor de energia eólica, isso não foi diferente, em grande medida por ser este um setor totalmente dependente de commodities (BI.1). É necessário criar no país uma cultura de *hedge* para que as indústrias não fiquem sujeitas às variações do preço das commodities e de câmbio. Um fundo garantidor criado pelo BNDES, por exemplo, poderia trazer maior segurança para um futuro mercado de eólica *offshore*.

Com o objetivo de aumentar a competitividade da indústria de geração eólica no país (BI.2), sugere-se identificar competências disponíveis de outros setores econômicos que possam ser utilizadas na indústria eólica *offshore*, como a própria experiência da indústria de óleo e gás. Além disso, essa competitividade pode ser ampliada por meio de parcerias entre as indústrias nacionais e parceiros internacionais, com vistas a aumentar o nível de qualidade dos componentes da cadeia de fornecedores no país.

Outra recomendação para aumentar a competitividade do setor de energia eólica (BI.2) seria criação de polos locais de produção de componentes da cadeia produtiva para suprir o mercado interno e os países da América (BI. 1, BI. 2, BI. 3). Obviamente, a criação destes polos demandaria muito tempo e volumes vultosos de investimento, mas poderia mitigar os impactos causados pela dependência do país por produtos fabricados na China, além de fortalecer nossa indústria nesse setor. Além disso, pode apoiar o fortalecimento da infraestrutura de portos e estradas no país (BI. 3), já que a produção de grandes equipamentos que fazem parte dos aerogeradores (pás, torres e estruturas, por exemplo) ocorreria próximo a portos para facilitar a logística dos empreendimentos de eólica *offshore*.

Os investimentos necessários para a criação de polos locais poderiam vir por meio de uma parceria público-privada, em que os investimentos em infraestrutura, portos e estradas (BI. 3), por exemplo, poderiam ser feitos em regime de concessão, nos moldes do que é feito hoje para concessão de estradas, aeroportos etc. Recomenda-se, portanto, fazer um levantamento detalhado da infraestrutura portuária atual brasileira, a fim de identificar possíveis obras de melhorias e adaptações necessárias.

Para que juntas as indústrias de eólica *offshore* e de hidrogênio de baixo carbono possam se desenvolver rapidamente no país, sugere-se que sejam feitas colaborações internacionais para a criação de um mercado de hidrogênio global (BI. 4). Poderiam ser criados *hubs* de hidrogênio nos portos brasileiros, em que esse hidrogênio seria exportado (amônia verde, por exemplo). Com a Guerra da Ucrânia, um grande mercado consumidor para esse hidrogênio seria a Europa, que passa por uma das piores crises energéticas da sua história.

Para criação de infraestrutura forte no país, é preciso entender as limitações técnicas dos *players* da indústria de eólica *offshore* e de hidrogênio de baixo carbono, bem como suprir as deficiências dos profissionais que devem atuar nesses mercados (BI. 5). Para tanto, recomenda-se estabelecer acordos e convênios com universidades e outras instituições, como SEBRAE e SENAI, que possam atuar na formação mais qualificada para treinar os profissionais que devem atuar nesses dois setores. Sugere-se, ainda, a formação de centros de pesquisa nas localidades de maior potencial eólico *offshore* como forma de desenvolvimento regional (BEP, 2020).

Mesmo que um projeto de geração eólica *offshore* esteja dedicado à produção de hidrogênio de baixo carbono, é importante que essa usina seja conectada à rede elétrica, pois esta precisa ser estável. Além disso, os projetos de eólica *offshore* devem ser grandes e demandar estudos de planejamento da transmissão (BI. 6). Assim, sugere-se que a EPE e o ONS façam uma avaliação prospectiva da transmissão frente ao desempenho elétrico da rede, considerando o mapeamento do potencial eólico *offshore* e a localização de projetos viáveis (EPE, 2020), em especial aqueles que já estão protocolados no Ibama.

Da mesma forma, com o aumento do mercado de eólica *offshore*, haverá grande demanda por guindastes que hoje são utilizados em outros setores da economia, como o de óleo e gás, por exemplo (BI. 7). Assim, há a necessidade de mapear, em setores estratégicos como construção civil, portos e energia (eólica e petróleo), as empresas no Brasil que oferecem serviços de içamento e guindaste. Além disso, deve haver a necessidade de adaptar as embarcações que hoje prestam serviços no mercado de óleo e gás para receberem guindastes mais altos que estejam habilitados a prestar serviços para a indústria de eólica *offshore*.

## 5.4 BARREIRAS TECNOLÓGICAS E RESPECTIVAS RECOMENDAÇÕES

A lista de barreiras tecnológicas é apresentada no Quadro 14. Já as recomendações para transpô-las estão elencadas no Quadro 15. Por fim, as considerações sobre tais barreiras e as recomendações para suplantá-las.

**QUADRO 14 – Barreiras tecnológicas**

Barreiras tecnológicas (BT)	Código
Estágio embrionário no país da padronização de processos, materiais e equipamentos para o mercado de eólica <i>offshore</i> e de hidrogênio	BT.1
Infraestrutura limitada da indústria local e falta de maturidade técnica de algumas empresas para participar da cadeia de valor da eólica <i>offshore</i> e de hidrogênio	BT.2
Falta de embarcações que estejam adaptadas aos desafios da indústria de eólica <i>offshore</i>	BT.3
Demanda crescente dos eletrolisadores	BT.4

Fonte: Elaboração própria

**QUADRO 15 – Recomendações para as barreiras tecnológicas**

Recomendações para as barreiras tecnológicas (RBT)	Barreira
RBT.1 – Adequar a indústria que hoje é direcionada para o mercado <i>onshore</i> para o mercado <i>offshore</i>	BT.1, BT.2
RBT.2 – Criar um programa de desenvolvimento industrial para o setor eólico <i>offshore</i> , considerando a experiência e infraestrutura da eólica <i>onshore</i>	BT.1, BT.2
RBT.3 – Compreender o modelo de difusão do hidrogênio na matriz energética, para se revelar a sequência de desenvolvimento de mercado que impulsionará o crescimento dessa indústria	BT.1, BT.2
RBT.4 – Definir ou incentivar o desenvolvimento de projeto-piloto que utilize plataformas de O&G <i>offshore</i> em fase de descomissionamento para fins da produção do hidrogênio de baixo carbono para instalação de turbinas eólicas <i>offshore</i>	BT.1, BT.2
RBT.5 – Fazer o mapeamento da frota de embarcações que dão suporte às atividades <i>offshore</i> disponíveis no país	BT.3
RBT.6 – Investir numa indústria local de eletrolisadores	BT.2 e BT.4

Fonte: Elaboração própria

Uma vez que o mercado de eólica *offshore* e de hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis estão em um estágio embrionário, não existe ainda a padronização de processos, materiais e equipamentos para suprir esses mercados (BT.1). Além disso, a infraestrutura limitada da indústria local e a falta de capacidade técnica de algumas empresas para participar da cadeia de valor da eólica *offshore* e de hidrogênio trazem grandes desafios para criação desses mercados (BT.2).

Apesar disso, o mercado de eólica *offshore* pode se beneficiar da experiência de mais de uma década adquirida pelo mercado *onshore*. Assim, sugere-se identificar possíveis oportunidades de adequação da cadeia de suprimento, por meio de levantamento e avaliação das tecnologias oferecidas pelos atuais fornecedores e fabricantes de todos os segmentos atuantes no mercado brasileiro de energia eólica. Podem também ser criados programas de desenvolvimento industrial para o setor eólico *offshore*, considerando a experiência e infraestrutura da eólica *onshore*.

No caso do hidrogênio de baixo carbono, os avanços na padronização e certificação de indústrias e parcerias com países que tenham desenvolvido as tecnologias desse setor fazem parte de uma estratégia para o desenvolvimento dessa indústria no país. Além disso, há a necessidade de se compreender o modelo de difusão do hidrogênio na matriz energética, para se revelar a sequência de desenvolvimento de mercado que impulsionará o crescimento dessa indústria, evitando trancamentos tecnológicos em segmentos que poderão ser atendidos pelo hidrogênio no futuro (EPE, 2021).

Recomenda-se incentivar o desenvolvimento de projetos-piloto que utilizem plataformas de óleo e gás *offshore* em fase de descomissionamento para fins da produção do hidrogênio de baixo carbono ou para instalação de turbinas eólicas *offshore*.

Atualmente não existem muitas embarcações que operam no mercado de óleo e gás que estejam inteiramente adaptadas às necessidades da indústria de eólica *offshore* (BT. 3). Sugere-se, portanto, fazer o mapeamento da frota de embarcações que dão suporte às atividades *offshore* disponíveis no país com vistas a verificar a possibilidade de adaptações para que possam suprir a demanda da indústria de eólica *offshore*.

Vários países do mundo estão interessados em investir em mercado de hidrogênio. Por causa disso, há uma demanda crescente por eletrolisadores (BT. 4). Assim, o Brasil pode se beneficiar ao investir numa indústria local desses equipamentos, já que é grande a expectativa da criação de *hubs* de hidrogênio para venda desse insumo na indústria local ou para fins de exportação.

# REFERÊNCIAS

ABOLHOSSEINI, S.; HESHMATI, A. The main support mechanisms to finance renewable energy development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 876-885, 2014.

ABORGELA, Taha *et al.* Heavy lift semi-submersible ships utilization in offshore wind turbines industry. **Energy Reports**, v. 8, 2022, pp. 834-847, 2022.

ACCIONA. **OCEANH2, the industrial research project coordinated by ACCIONA, launches.** 2022. Disponível em: [https://www.accionacom/updates/articles/ocenh2-industrial-research-project-coordinated-accionacom-launches/?\\_adin=02021864894](https://www.accionacom/updates/articles/ocenh2-industrial-research-project-coordinated-accionacom-launches/?_adin=02021864894). Acesso em: 27 dez. 2022.

ADARAMOLA, M. **Wind turbine technology: principles and design.** New York: Apple Academic Press, 2014. p. 364.

AERIS ENERGY. **Nosso jeito Aeris de ser.** 2021. Disponível em: <https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/4270cd01-7524-4011-ae86-d125baa81b06/a6b57772-1431-be-18-5184-ff059271b9e9?origin=1>. Acesso em: 9 dez. 2022.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL - ABDI. **Atualização do Mapeamento da Cadeira Produtiva da Indústria Eólica no Brasil.** 2017. Disponível em: [http://inteligencia.abdi.com.br/wp-content/uploads/2017/08/2018-08-07\\_ABDI\\_relatorio\\_6-1\\_atualizacao-do-mapeamento-da-cadeira-produtiva-da-industria-eolica-no-brasil-WEB.pdf](http://inteligencia.abdi.com.br/wp-content/uploads/2017/08/2018-08-07_ABDI_relatorio_6-1_atualizacao-do-mapeamento-da-cadeira-produtiva-da-industria-eolica-no-brasil-WEB.pdf). Acesso em: 16 abr. 2022.

AGÊNCIA INFRA. **Cancelamento do Leilão de Reserva de Capacidade surpreende e divide o setor.** 2022. Disponível em: <https://www.agenciainfra.com/blog/cancelamento-do-leilao-de-reserva-de-capacidade-surpreende-e-divide-o-setor/>. Acesso em: 05 dez. 2022.

ALSTOM. **Novidade mundial da Alstom: 14 comboios Coradia iLint para iniciar serviço de passageiros na primeira linha 100% a hidrogênio.** 2022. Disponível em: <https://www.alstom.com/pt/press-releases-news/2022/8/novidade-mundial-da-alstom-14-comboios-coradia-ilint-para-iniciar>. Acesso em: 05 dez. 2022.

ARENA PRO. **Cluster Catch-Up: TechnipFMC – Deep Purple pilot.** 2022. Disponível em: <https://www.oceanhywaycluster.no/news/ccp-technipfmc>. Acesso em: 27 nov. 2022.

AUSTRALIAN GOVERNMENT. Guideline: Offshore Electricity Infrastructure License Administration – Feasibility Licenses. **Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water.** 2022. Disponível em: [https://www.nopta.gov.au/\\_documents/oei/Guideline\\_OEI\\_Licence\\_Administration\\_Feasibility\\_Licences\\_Dec\\_2022.pdf](https://www.nopta.gov.au/_documents/oei/Guideline_OEI_Licence_Administration_Feasibility_Licences_Dec_2022.pdf). Acesso em: 04 ago. 2023.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY - ANL. **Hydrogen Life-Cycle Analysis in Support of Clean Hydrogen Production**. 2022. Disponível em: <https://a9w7k6q9.stackpathcdn.com/wpcms/wp-content/uploads/2022/08/Global-trade-of-hydrogen-what-is-the-best-way-to-transfer-hydrogen-over-long-distances-ET16.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2023.

AZEVEDO, J. H. P.; PRADELLE, F. A. Y.; BRAGA, S. L. **Avaliação Técnica e Econômica Georreferenciada do Potencial de Produção de Hidrogênio Verde com Eólica Offshore no Brasil**. CONGRESSO BRAZIL WIND POWER, 2022a.

AZEVEDO, J. H. P.; CALILI, DE R. F.; BRAGA, S. L. **Avaliação da Eficiência Energética da Adição de Hidrogênio a Redes de Gás Natural**. SNPTEE, 2022b.

UNITED NATIONS. **Nationally Determined Contribution (NDC)**: the Paris agreement and NDCs. New York: United Nations, 2022.

BRAZIL ENERGY PROGRAMME – BEP. **Offshore Wind economic, social and environmental impact assessment**. [S.l.: s.n.], 2020.

BRAZIL ENERGY PROGRAMME – BEP. **Cadeias de valor e de inovação da eólica offshore no Brasil**. [S.l.: s.n.], 2022.

BULJAN, A. A Win for Coexistence in North Sea | BP and Ørsted Reach Agreement on Offshore Wind-CCS Project Overlap Area. **Offshorewind.biz**. 2023. Disponível em: <https://www.offshorewind.biz/2023/06/26/bp-and-orsted-reach-agreement-on-offshore-wind-carbon-storage-project-overlap-area/>. Acesso em: 04 ago. 2023.

CANAL ENERGIA. **BNEF**: custos das renováveis registram aumento temporário. 2022. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53216931/bnef-custos-das-renovaveis-registram-aumento-temporario#:~:text=An%C3%A1lise%20da%20Bloomberg%20New%20Energy,para%20o%20patamar%20de%202019>. Acesso em: 10 nov. 2022.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. **Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025**. 2010. Disponível em: [https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio\\_energetico\\_completo\\_22102010\\_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.5](https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.5). Acesso em: 11 dez. 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA - CNI. **Hidrogênio sustentável**: perspectivas e potencial para a indústria brasileira. Brasília: CNI, 2022. ISBN 978-65-86075-53-3.

COMPLEXO DO PECÉM - CIPP. **Hub de Hidrogênio Verde do Complexo do Pecém**. 2022. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/hubh2v/>. Acesso em: 13 dez. 2022.

CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - CEBDS (2018). **O que é o Acordo de Paris e as metas da NDC brasileira?** 2018. Disponível em: [https://cebds.org/acordo-de-paris-e-ndc-brasileira/#.Y3K\\_HXbMK3B](https://cebds.org/acordo-de-paris-e-ndc-brasileira/#.Y3K_HXbMK3B). Acesso em: 04 nov. 2022.

CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - CEBDS. **Proposta de Marco Regulatório para o Mercado de Carbono brasileiro**. [S.l.]: CEBDS, 2021.

CARNEIRO, M. L. S. Planejamento espacial marinho: o caminho para o crescimento econômico do Brasil. **Revista de Direito e Negócios Internacionais da Maritime Law Academy - International Law and Business Review**, v. 2, n. 1, p. 196-214, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.56258/issn.2763-8197.v2n1.p196-214>. Acesso em: 13 dez. 2022.

DANERS, D.; NICKEL, V. **More torque is better than torque**: higher torque density for gearboxes. CONFERENCE FOR WIND POWER DRIVES, 35. 2021.

DINH, Van Nguyen *et al.* Development of a viability assessment model for hydrogen production from dedicated offshore wind farms. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, 2020. 10.1016/j.ijhydene.2020.04.232.

DEPARTMENT OF ENERGY – DOE. **Doe National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap**. [S.l.: s.n.], 2022.

EI-H2; ZENITH ENERGY. **Joint Venture for Green Energy Facility at Bantry Bay Announced**. 2022. Disponível em: <https://afloat.ie/marine-environment/power-from-the-sea/item/51023-joint-venture-for-green-energy-facility-at-bantry-bay-announced>. Acesso em: 27 nov. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Competitividade do Gás Natural: Estudo de Caso na Indústria de Metanol. **Informe Técnico N EPE-DEA-IT-005/2019**, 14 out. 2019. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/EPE-DEA-IT-05-19%20-%20GN\\_Metanol%20\(002\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/EPE-DEA-IT-05-19%20-%20GN_Metanol%20(002).pdf). Acesso em: 11 dez. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Roadmap Eólica Offshore Brasil**: perspectivas e caminhos para energia eólica marítima. Rio de Janeiro: EPE, 2020.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2021). Caderno de Preços de Geração 2021. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Caderno de Preços de Geração 2021**. 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublishingImages/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-de-precos-da-geracao/CadernodePre%c3%a7osdeGera%c3%a7%c3%a3o\\_r0.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublishingImages/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-de-precos-da-geracao/CadernodePre%c3%a7osdeGera%c3%a7%c3%a3o_r0.pdf). Acesso em: 28 jun. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. EPE-DEA-NT-003/2021. Rio de Janeiro: EPE, 2021.

ENEL GREEN POWER. **Wind turbines made with fabric**: a new frontier for efficiency and sustainability. 2022. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com/media/news/2021/10/act-blade-innovative-wind-turbines>. Acesso em: 9 dez. 2022.

ENERGIA HOJE. **Rio Grande do Norte e Nordex celebram acordo para instalação de porto-indústria.** 2022. Disponível em: <https://energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/rio-grande-do-norte-e-nordex-celebram-acordo-para-instalacao-de-porto-industria/>. Acesso em: 13 dez. 2022.

ENEVOLDSEN, P.; XYDI, G. Examining the trends of 35 years growth of key wind turbine components. **Energy Sustain. Dev.**, n. 50, p. 18–26, 2019.

ERM. **ERM Dolphyn Hydrogen: phase 2 - final report.** 2021. Disponível em: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/1051827/Phase\\_2\\_Report\\_-\\_ERM\\_-\\_Dolphyn.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1051827/Phase_2_Report_-_ERM_-_Dolphyn.pdf). Acesso em: 20 nov. 2022.

GANNOUM, Elbia. **Dez anos do Leilão de 2009 para eólicas.** Rio de Janeiro: GESEL, 2019.

GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT – GIZ. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde.** 2021. Disponível em: [https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user\\_upload/brazil/media\\_elements/Mapeamento\\_H2\\_-\\_Diagramado\\_-\\_V2h.pdf](https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf). Acesso em: 28 jun. 2023.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL - GWEC. **Global offshore wind report 2019.** fev. 2020. Disponível em: [https://wfo-global.org/wp-content/uploads/2021/04/WFO\\_Global-Offshore-Wind-Report-2019.pdf](https://wfo-global.org/wp-content/uploads/2021/04/WFO_Global-Offshore-Wind-Report-2019.pdf). Acesso em: 28 jun. 2023.

GLOBALFERT. Conheça os principais portos de entrada de fertilizantes no Brasil em 2018. 2019. Disponível em: <https://globalfert.com.br/boletins/conheca-os-principais-portos-de-entrada-de-fertilizantes-no-brasil-em-2018/>. Acesso em: 29 nov. 2022.

GOLDMEER, J. **Fuel Flexible Gas Turbines as Enablers for a Low or Reduced Carbon Energy,** maio 2018. Disponível em: [https://www.ge.com/content/dam/gepower/global/en\\_US/documents/fuel-flexibility/GEA33861%20-%20Fuel%20Flexible%20Gas%20Turbines%20as%20Enablers%20for%20a%20Low%20Carbon%20Energy%20Ecosystem.pdf](https://www.ge.com/content/dam/gepower/global/en_US/documents/fuel-flexibility/GEA33861%20-%20Fuel%20Flexible%20Gas%20Turbines%20as%20Enablers%20for%20a%20Low%20Carbon%20Energy%20Ecosystem.pdf). Acesso em: 28 jun. 2023.

CEARÁ (Estado). Inaugurada nova fábrica de turbinas de energia eólica em **Aquiraz.** 2019. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2019/11/12/inaugurada-nova-fabrica-de-turbinas-de-energia-eolica-em-aquiraz/>. Acesso em: 12 nov. 2019.

GROENEMANS, Hugo *et al.* Techno-economic analysis of offshore wind PEM water electrolysis for H2 production. **Current Opinion in Chemical Engineering**, n. 37, 2022. 100828. 10.1016/j.coche.2022.100828.

GUO, Y. *et al.* Improving wind turbine drivetrain reliability using a combined experimental, computational and analytical approach. *In: International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, v. 46407, p. V007T05A004, 2014.

H2MARE. How partners in the H2Mare flagship project intend to produce hydrogen on the high seas. 2021. Disponível em: <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/projects/h2mare>. Acesso em: 27 de nov. de 2022.

HINICIO. **Estado del hidrógeno verde em américa latina y el caribe**: Hojas de ruta y perspectiva regional. 2022. Disponível em: [https://h2lac.org/wp-content/uploads/2022/08/Infografia\\_Estado-H2-Verde-LAC\\_2022\\_GIZ\\_Hinicio\\_vf.pdf](https://h2lac.org/wp-content/uploads/2022/08/Infografia_Estado-H2-Verde-LAC_2022_GIZ_Hinicio_vf.pdf). Acesso em: 28 nov. 2022.

HØST PTX ESBJERG. **About Us**. 2023. Disponível em: <https://hoestptxesbjerg.dk/about-host/>. Acesso em: 27 de nov. de 2022.

HÜLSEN, I. German shipyards see future in wind power. **Spiegel Online**, 2012. Disponível em: [www.spiegel.de/international/business/german-shipyards-see-future-inwindpower-a-850368.html](http://www.spiegel.de/international/business/german-shipyards-see-future-inwindpower-a-850368.html). Acesso em: 27 nov. 2022.

HUNT, Julian; NASCIMENTO, Andreas. Electrolysis ship for green hydrogen production and possible applications. *International Journal of Electrical*, Paris, v. 15, n. 1, p. 1-5, 2021.

HYDROGEN CENTRAL. Scholz Ups Global Hydrogen Ambitions, Dwarfs EU Initiative, Plan to Invest More than €4 Billion Into H2global. Disponível em: <https://hydrogen-central.com/scholz-ups-global-hydrogen-ambitions-dwarfs-eu-initiative-plan-invest-more-e4-billion-h2global/>. Acesso em: 28 de nov. de 2022.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário Estatístico 2022**. 2022. Disponível em: [https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2022/07/AcoBrasil\\_Anuario\\_2022.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2022/07/AcoBrasil_Anuario_2022.pdf). Acesso em: 29 nov. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Termo de Referência**: estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental EIA/Rima: tipologia: complexos eólicos marítimos (offshore). nov. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Complexos eólicos offshore**: projetos com processos de licenciamento ambiental abertos no Ibama. 24 mar. 2023. Disponível em: [https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/arquivos/20230328\\_Usinas\\_Eolicas\\_Offshore\\_reduzido.pdf](https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/arquivos/20230328_Usinas_Eolicas_Offshore_reduzido.pdf). Acesso em: 16 jul. 2023.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA. **IRENA Global atlas spatial planning techniques 2-day seminar**. Session 2b. 2014. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Events/2014/Jul/15/12\\_Wind\\_power\\_spatial\\_planning\\_techniques\\_Arusha\\_Tanzania.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Events/2014/Jul/15/12_Wind_power_spatial_planning_techniques_Arusha_Tanzania.pdf). Acesso em: 02 nov. 2022.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. **Innovation outlook**: offshore wind. 2016. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA\\_Innovation\\_Outlook\\_Offshore\\_Wind\\_2016.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Innovation_Outlook_Offshore_Wind_2016.pdf). Acesso em: 29 jun. 2023.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. **Renewable power generation costs in 2017**. 2018a. Disponível: <https://www.irena.org/publications/2018/jan/renewable-power-generation-costs-in-2017>. Acesso em: 29 jun. 2023.

International Renewable Energy Agency – IRENA. **The Future of Hydrogen**. 2019b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 29 jun. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY RENEWABLE AGENCY – IRENA. **Renewable energy benefits: leveraging local capacity for offshore wind**. Abu Dhabi: IRENA, 2018b. Acesso em: 29 jun. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY RENEWABLE AGENCY – IRENA. **Green hydrogen: a guide to policy ranking**. 2019. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>. Acesso em: 29 jun. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY RENEWABLE AGENCY – IRENA. **Making the breakthrough: green hydrogen policies and technology costs**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2021a.

INTERNATIONAL ENERGY RENEWABLE AGENCY – IRENA. **Renewable Power Generation Costs in 2020**. 2021b. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>. Acesso em: 29 jun. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY RENEWABLE AGENCY – IRENA. **Fostering a blue economy: offshore renewable energy**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020.

INTERNATIONAL ENERGY RENEWABLE AGENCY – IRENA. **Global hydrogen trade to meet the 1.5 °C climate goal: part I – trade outlook for 2050 and way forward**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022a.

INTERNATIONAL ENERGY RENEWABLE AGENCY – IRENA. **Global hydrogen trade to meet the 1.5 °C climate goal: part III – Green hydrogen cost and potential**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022a.

JAHANI, K.; LANGLOIS, R. G.; AFAGH, F. F. Structural dynamics of offshore wind turbines: a review. **Ocean Eng.**, v. 251, n. 111136, 2022,.

JANG, D. *et al.* Techno-economic analysis and Monte Carlo simulation of green hydrogen production technology through various water electrolysis technologies. **Energy Conversion and Management**, v. 258. 2022.

KEARNEY. **Hydrogen's hole in energy transition**. [S.l.]: Energy Transition Institute. 2020.

LIU, S. *et al.* Proposal of a novel mooring system using three-bifurcated mooring lines for spar-type off-shorewind turbines. **Energies**, v. 14, 2021.

LONGDEN, Thomas. 'Clean' hydrogen? An analysis of the emissions and costs of fossil fuel based versus renewable electricity based hydrogen. **Zero-Carbon Energy for the Asia-Pacific ZCEAP Working Paper**, ZCWP02-21, 2021. Disponível em: <https://ccep>.

[crawford.anu.edu.au/sites/default/files/publication/ccep\\_crawford\\_anu\\_edu\\_au/2021-03/ccep\\_2103\\_clean\\_hydrogen\\_0.pdf](https://crawford.anu.edu.au/sites/default/files/publication/ccep_crawford_anu_edu_au/2021-03/ccep_2103_clean_hydrogen_0.pdf). Acesso em: 29 jun. 2023.

LORIEMI, A. Experimental and simulation-based analysis of asymmetrical spherical roller bearings as main bearings for wind turbines. **Forschung im Ingenieurwesen**, v. 85, p. 1-9, 2021.

MEGAWHAT. **Brasil terá leilão inédito para reduzir fila de projetos de energia renovável, diz governo – Edição da Tarde**. 10 nov. 2022. Disponível em: <https://megawhat.energy/news/148403/brasil-tera-leilao-inedito-para-reduzir-fila-de-projetos-de-energia-renovavel-diz-governo-edicao-da-tarde>. Acesso em: 28 de nov. de 2022.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS – MDIC. **Dados de importação de adubo (fertilizante) de 2013 a 2022**. 2022. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/41075>. Acesso em: 29 nov. 2022.

MITSUBISHI POWER. **Hydrogen Power Generation Handbook**, 2020. Disponível em: [https://solutions.mhi.com/sites/default/files/assets/pdf/power/hydrogen\\_power-handbook.pdf](https://solutions.mhi.com/sites/default/files/assets/pdf/power/hydrogen_power-handbook.pdf). Acesso em: 29 nov. 2022.

MUSIAL, W. *et al.* **2016 Offshore Wind Energy Resource Assessment for the United States**. NREL/TP-5000-67414. Golden: NREL, 2016.

MUSIAL, W. *et al.* **Offshore wind market: 2021 edition**. 2021. Disponível em: [https://www.energy.gov/sites/default/files/202108/Offshore%20Wind%20Market%20Report%202021%20Edition\\_Final.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/202108/Offshore%20Wind%20Market%20Report%202021%20Edition_Final.pdf). Acesso em: 11 dez. 2022.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY - NREL. **2016 Offshore wind technologies market report**. Oak Ridge: NREL, 2017.

OFFSHORE ENGINEER. **Brazil OSV Update**, 2019. Disponível em: <https://www.oedigital.com/news/464213-brazil-osv-update>. Acesso em: 13 dez. 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA - ONS. **Submódulo 14.1: administração dos serviços ancilares: visão geral**. 2019. Disponível em: <https://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2014%2FSubm%C3%B3dulo%2014.1%2FSubm%C3%B3dulo%2014.1%202019.08.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2022.

ORTIZ CEBOLLA, R.; DOLCI, F.; WEIDNER, E. Assessment of Hydrogen Delivery Options. Luxembourg, 2022. doi:10.2760/869085, JRC130442.

OUR WORLD DATA. **Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?** 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>. Acesso em: 05 dez. 2022.

OYSTER. **Project**. Disponível em: <https://oysterh2.eu/about/project/>. Acesso em: 27 nov. 2022.

PALTSEV, S. *et al.* Hard-to-Abate Sectors: the role of industrial carbon capture and storage (CCS) in emission mitigation. *Applied Energy*, v. 300, 15 October 2021.

PANORAMA OFFSHORE. **Siemens Investe em Produção de Conversores no Brasil**. 25 ago. 2019. Disponível em: [https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/18630-siemens-investe-em-producao-de-conversores-no-brasil](https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/18630-siemens-investe-em-producao-de-conversores-no-brasil). Acesso em: 20 jul. 2022.

PATONIA, Aliaksei; POUDINEH, Rahmat. **Global trade of hydrogen: what is the best way to transfer hydrogen over long distances?** 2022. Disponível em: <https://a9w7k6q9.stackpathcdn.com/wpcms/wp-content/uploads/2022/08/Global-trade-of-hydrogen-what-is-the-best-way-to-transfer-hydrogen-over-long-distances-ET16.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2023.

PORTO CENTRAL. **Quem somos**. 2022. Disponível em: <https://portocentral.com.br/pb/>. Acesso em: 13 dez. 2022.

POSHYDON. **About us**. 2022. Disponível em: <https://poshydon.com/en/home-en/about-poshydon/>. Acesso em: 27 nov. 2022.

PPP PIAUÍ. **Porto de Luís Correia**. 2022. Disponível em: <http://www.ppp.pi.gov.br/pppteste/wp-content/uploads/2019/02/FOLDER-Porto-Luis-Correia-pt.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2022.

RAMBOLL. **Paving the Way for Ceará's offshore wind industry: supply chain and port infrastructure assessment for bottom-fixed offshore wind in Ceará**. [S.l.: s.n.], 2022.

RAMÍREZ, L. *et al.* **Offshore Wind in Europe: Key Trends and Statistics 2019**. Brussels: Wind TV, 2019. v. 3.

RENEWABLE ENERGY MAGAZINE. **Lhyfe Launches Offshore Renewable Green Hydrogen Production Pilot Site**. 2022. Disponível em: <https://www.renewableenergymagazine.com/hydrogen/lhyfe-launches-offshore-renewable-green-hydrogen-production-20220923#:~:text=In%202021%2C%20Lhyfe%2C%20inaugurated%20the,the%20clean%20energy%20source%20offshore>. Acesso em: 27 nov. 2022.

ROLINK, A. *et al.* Feasibility study for the use of hydrodynamic plain bearings with balancing support characteristics as main bearing in wind turbines. *In: Journal of Physics: Conference Series*, v. 1618, p. 052002, 2020.

RWE. **Aquaventus**. 2022. Disponível em: <https://www.rwe.com/en/research-and-development/hydrogen-projects/aquaventus>. Acesso em: 18 nov. 2022.

SANTHAKUMAR, S. *et al.* **Technological learning potential of offshore wind technology and underlying cost drivers**. 2022. Disponível em: DOI10.21203/rs.3.rs-1298062/v1. Acesso em: 18 nov. 2022.

SCOLARO, Michele; KITTNER, Noah. Optimizing hybrid offshore wind farms for cost-competitive hydrogen production in Germany. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, 2021. 10.1016/j.ijhydene.2021.12.062.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA - SEMA-RS. **Concessão de uso público para instalação de parque eólico: Geração de energia elétrica na Laguna dos**

**Patos**. 2022. Disponível em: <https://sema.rs.gov.br/concessao-da-laguna-dos-patos>. Acesso em: 13 dez. 2022.

SETTERWALLS. **Overlapping permit applications for offshore wind farms in the Swedish economic zone**. 2023. Disponível em: <https://setterwalls.se/en/article/overlapping-permit-applications-for-offshore-wind-farms-in-the-swedish-economic-zone/>. Acesso em: 04 ago. 2023.

SETTINO, J. *et al.* (2022). Offshore Wind-to-Hydrogen Production Plant Integrated with an Innovative Hydro-Pneumatic Energy Storage Device. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2151, n. 012013, 2022. DOI10.1088/1742-6596/2151/1/012013.

SILVA, Amanda Jorge Vinhoza de Carvalho. **Potencial Eólico Offshore no Brasil: Localização de Áreas Nobres através de Análise Multicritério**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

SMALLEY, J. **Turbine components: bearings**. 2015. Disponível em: <https://www.windpowerengineering.com/turbine-components-bearings-brakes-generators-hydraulics-seals-towers/>. Acesso em: 16 jun. 2021.

STEHLY, Tyler and Patrick Duffy. 2021. 2020 Cost of Wind Energy Review. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-81209.

STEHOUWER, E.; VAN ZINDEREN, G. J. Conceptual nacelle designs of 10-20 MW wind turbines, **Tech. Rep. Deliverable D3**, v. 41, 2016.

STRATTON, D. *et al.* Selection of Sustainable Wind Turbine Tower Geometry and Material Using Multi-Level Decision Making. In: **Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference**, Buffalo, 2014.

TAAMALLAH, Soufien *et al.* Fuel flexibility, stability and emissions in premixed hydrogen-rich gas turbine combustion: Technology, fundamentals, and numerical simulations. **Applied Energy**, n. 154, p. 1020–1047, 2015. 10.1016/j.apenergy.2015.04.044.

TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK – DTU. **Global Wind Atlas v3**. 2019. Disponível em: [https://data.dtu.dk/articles/dataset/Global\\_Wind\\_Atlas\\_v3/9420803](https://data.dtu.dk/articles/dataset/Global_Wind_Atlas_v3/9420803). Acesso em: 02 nov. 2022.

TORREGROSA, A. J.; GIL, A.; QUINTERO, P.; CREMADES, A. On the effects of orthotropic materials in flutter protection of wind turbine flexible blades. **J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.** v. 227, n. 105055, 2022.

VATTENFALL. **Hydrogen Turbine 1**. 2022. Disponível em: <https://group.vattenfall.com/uk/what-we-do/our-projects/european-offshore-wind-deployment-centre/aberdeen-hydrogen>. Acesso em: 18 nov. 2022.

UNIÃO NACIONAL DA BIOENERGIA – UDOP. **Taxa de carbono europeia pode prejudicar exportações do Brasil.** 2022. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2022/3/28/taxa-de-carbono-europeia-pode-prejudicar-exportacoes-do-brasil.html>. Acesso em: 04 dez. 2022.

VEERS, P.; SETHURAMAN, L.; KELLER, J. Wind-power generator technology research aims to meet global-wind power ambitions. **Joule**, n. 4, p. 1861–1863, 2020.

VESTAS. **V112-3.45 MW at a glance.** 2022. Disponível em: <https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/V112-3-45-MW>. Acesso em: 02 nov. 2022.

WAYCARBON. **O que é o CBAM e como afetará empresas brasileiras?** 2022. Disponível em: <https://blog.waycarbon.com/2022/06/o-que-e-o-cbam-e-como-afetara-empresas-brasileiras/>. Acesso em: 04 dez. 2022.

WIND ENERGY TECHNOLOGIES OFFICE. **Top Trends in Offshore Wind.** 2021. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/top-trends-offshore-wind>. Acesso em: 13 dez. 2022.

WORLD ECONOMIC FORUM. **Could hydrogen-fuelled flights be a reality by 2035?** 2022. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2022/07/how-to-achieve-net-zero-in-aviation/>. Acesso em: 05 dez. 2022.

ZHENG, J. *et al.* Internal loads and contact pressure distributions on the main shaft bearing in a modern gearless wind turbine. **Tribology International**, v. 141, n. 105, p. 960, 2020.

ZHIBIN, Luo *et al.* Hydrogen production from offshore wind power in South China. **International Journal of Hydrogen Energy**. 2022. ISSN 0360-3199. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.162>. Acesso em: 13 dez. 2022.

# APÊNDICE A – ENTES GOVERNAMENTAIS RELEVANTES PARA O PROCESSO DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL

Instituição / Órgão	Sigla
Agência Nacional de Aviação Civil	ANAC
Agência Nacional de Energia Elétrica	ANEEL
Agência Nacional de Transportes Aquaviários	ANTAQ
Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis	ANP
Comando da Aeronáutica	COMAER
Conselho Nacional do Meio Ambiente	CONAMA
Fundação Cultural Palmares	FCP
Fundação Nacional do Índio	FUNAI
Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis	IBAMA
Instituto Chico Mendes de Conservação e Biodiversidade	ICMBio
Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional	IPHAN
Marinha do Brasil	MB
Ministério de Minas e Energia	MME
Ministério do Meio Ambiente	MMA
Operador Nacional do Sistema Elétrico	ONS
Secretaria de Patrimônio da União	SPU/ME
Secretaria Especial de Aquicultura e Pesca	SEAP/PR
Serviço Geológico do Brasil	CPRM

Fonte: Adaptado de EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Roadmap Eólica Offshore Brasil: perspectivas e caminhos para energia eólica marítima.** Rio de Janeiro: EPE, 2020.

**CNI**

*Robson Braga de Andrade*  
Presidente

**DIRETORIA DE RELAÇÕES INSTITUCIONAIS – DRI**

*Mônica Messenberg Guimarães*  
Diretora de Relações Institucionais

**Gerência Executiva de Meio Ambiente e Sustentabilidade – GEMAS**

*Davi Bomtempo*  
Gerente Executivo de Meio Ambiente e Sustentabilidade

**Gerência de Clima e Energia – GEMAS**

*Juliana Falcão*  
Gerente de Clima e Energia

*Danielle Guimarães*  
*Erica Villarinho*  
Equipe Técnica

**DIRETORIA DE COMUNICAÇÃO – DIRCOM**

*Ana Maria Curado Matta*  
Diretora de Comunicação

**Superintendência de Publicidade e Mídias Sociais**

*Mariana Caetano Flores Pinto*  
Superintendente de Publicidade e Mídias Sociais

*Marcela Louise Moura Santana*  
*Sarah de Oliveira Santana*  
Produção Editorial

**DIRETORIA DE SERVIÇOS CORPORATIVOS – DSC**

*Fernando Augusto Trivellato*  
Diretor de Serviços Corporativos

**Superintendência de Administração – SUPAD**

*Maurício Vasconcelos de Carvalho*  
Superintendente Administrativo

*Alberto Nemoto Yamaguti*  
Normalização

---

## Consultoria

*Edmar de Almeida*  
*Eloy Fernandez y Fernandez*  
*Rodrigo Flora Calili*  
*Edson de Souza Laya Júnior*  
*João Henrique Paulino de Azevedo*  
Instituto de Energia - PUC-Rio

*Renata Portella*  
Revisão Gramatical

*Editorar Multimídia*  
Projeto Gráfico e Diagramação



 .cni.com.br

 /cniBrasil

 @CNI\_br

 @cniBr

 /cniweb

 /company/cni-brasil



9 788579 573057



Confederação Nacional da Indústria  
**PELO FUTURO DA INDÚSTRIA**