

FATORES QUE INFLUENCIAM NA REDUÇÃO DE CUSTOS NA INDÚSTRIA EÓLICA *OFFSHORE*: O CASO NO REINO UNIDO

Andressa Santiso¹, Monalisa Godeiro², Nícolas Oliveira³, David Cassimiro⁴,
Jéssica Rodrigues⁵, Mario González⁶, Rafael Vasconcelos⁷

1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 Creation – Grupo de pesquisa em Inovação de Produtos e Processos para Energias
Renováveis/ Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção/ UFRN

andressa.santiso.014@ufrn.edu.br; monalisa.godeiro.104@ufrn.edu.br; nicolas.oliveira.115@ufrn.edu.br;
david.cassimiro.096@ufrn.edu.br; jessica.rayany.jr@gmail.com; mariogonzalez@ufrn.edu.br;
rafaelmonteirov@yahoo.com.br

RESUMO

O desenvolvimento da energia eólica *offshore* é uma realidade em diversos países, como uma fonte com grande contribuição para a transição energética global. Embora existam desafios logísticos e de implantação dessa tecnologia, percebe-se a existência de aspectos que estão corroborando para, dentre variados benefícios, a redução nos custos. Portanto, o objetivo deste estudo é analisar os principais impulsionadores e fatores que têm contribuído para essa redução de custos na indústria eólica *offshore*, além de fornecer um panorama atual de sua evolução. Para alcançar esse objetivo, o estudo adotou uma abordagem qualitativa-quantitativa, utilizando uma revisão sistemática da literatura e um estudo de caso focado no Reino Unido. Os resultados obtidos revelaram dez fatores principais que justificam o rápido desenvolvimento dessa fonte de energia e a subsequente redução de custos ao longo dos anos: 1) o ganho de aprendizado (*learn-by-doing*) na cadeia de valor; 2) custos de financiamento; 3) desenvolvimento tecnológico da turbina, do BoP e da cadeia de suporte; 4) economia de escala; 5) sinergias com outros setores econômicos; 6) maior colaboração com os *stakeholders* no detalhamento do projeto; 7) maior concorrência na cadeia de valor; 8) otimização na construção de parques eólicos; 9) produção em massa de alguns componentes (estrutura de suporte e outros); 10) otimização de atividades de O&M. Além disso, por meio do estudo de caso do Reino Unido, observaram-se direcionadores que foram cruciais para o desenvolvimento do setor: estabelecimento de uma cadeia de suprimentos madura; P&D e parcerias público-privadas; adoção do mecanismo de CfD; e a criação de grupos de trabalho de estudos para a redução de custos.

Palavras-chaves:

Energia eólica *offshore*; redução de custos; LCOE; desenvolvimento tecnológico.

ABSTRACT

The development of offshore wind energy is a reality in several countries, as a source with great contribution to the global energy transition. Although there are logistical and implementation challenges associated with this technology, various factors are driving cost reduction and providing numerous benefits. Therefore, the objective of this study is to analyze the primary factors and drivers that have contributed to the substantial cost reduction in the offshore wind industry, as well as provide an overview of the current state of its evolution. To achieve this objective, the study employed a qualitative-quantitative approach, including a systematic literature review and a case study focused on the UK. The study identified ten key factors that

have facilitated the rapid development of offshore wind energy and the subsequent cost reduction over the years: 1) the learning gain (Learn-by-Doing); 2) financing costs; 3) technological development of the turbine, BoP (Balance of Plant), and support chain; 4) economy of scale; 5) synergies with other economic sectors; 6) increased collaboration with stakeholders in project detailing; 7) increased competition in the value chain; 8) optimization in wind farm construction; 9) mass production of certain components (support structure and others); 10) optimization of O&M (Operations and Maintenance) activities. Furthermore, through the UK case study, drivers were found to be crucial for the development of the sector: establishment of a mature supply chain; R&D and public-private partnerships; adoption of the CfD mechanism; and the creation of study working groups for cost reduction.

Keywords:

Offshore wind power; cost reduction; LCOE; technological development.

1. INTRODUÇÃO

Em razão da complexidade de sua instalação em escala marítima, a energia eólica *offshore* possui maiores custos atrelados a cadeia de valor quando comparada a tecnologia *onshore*, que variam conforme modelos de fundações instaladas, profundidade de lâmina d'água, distância a costa, dentre outros fatores (JOHNSTON et al., 2020).

Nos últimos anos, o setor eólico *offshore* tem experimentado avanços tecnológicos, inovações e uma conseqüente economia de escala, tornando-se uma indústria madura e ainda mais eficiente em termos de custos de produção (GWEC, 2022; VAN DER ZWAAN et al., 2012), além de atingir maior competitividade em alguns países em comparação a outras fontes fósseis e renováveis (GWEC, 2022).

Uma das principais razões para essa redução é o aumento do tamanho e da capacidade das turbinas eólicas *offshore* (VAN DER ZWAAN et al., 2012). Além disso, melhorias nas técnicas de instalação, como a utilização de embarcações especializadas, contribuíram para a otimização dos processos e redução dos custos de construção e manutenção dos parques eólicos *offshore*.

Outro fator importante é o aprendizado e a experiência acumulada ao longo do tempo. Com a crescente instalação de parques eólicos *offshore* em todo o mundo, as empresas têm adquirido conhecimentos que permitem aprimorar a eficiência operacional, a manutenção preventiva e a gestão dos ativos. O conjunto desses aspectos resulta em uma maior disponibilidade das turbinas, reduzindo os custos associados a paradas não programadas e reparos técnicos (VAN DER ZWAAN et al., 2012).

Além disso, a concorrência na cadeia de suprimentos do setor eólico *offshore* tem aumentado, impulsionando a inovação e a busca por soluções mais eficientes e econômicas. Fabricantes de turbinas e equipamentos estão investindo em pesquisa e desenvolvimento para criar tecnologias avançadas, reduzindo os custos de produção e aumentando o desempenho das turbinas (BVG, 2015; ORE CATAPULT, 2021).

A redução de custos, provocada pela combinação desses fatores, tem impulsionado o crescimento do setor eólico *offshore*, permitindo que mais países ao redor do mundo explorem o potencial das energias renováveis em ambiente marítimo como uma fonte de energia viável para investimentos. À medida que a energia eólica *offshore* se torna mais acessível e competitiva em termos de custos, abre-se um vasto

potencial para o desenvolvimento de projetos em regiões com recursos eólicos marítimos promissores, visto que mercados emergentes podem enfrentar desafios na implantação de infraestrutura devido aos altos custos iniciais de desenvolvimento e instalação de parques eólicos *offshore*.

Nesse sentido, com a finalidade de promover a energia eólica *offshore* em novos mercados e demonstrar que é esta uma fonte viável, o presente estudo tem como objetivo analisar os principais fatores e direcionadores que têm contribuído para a significativa redução de custos na indústria eólica *offshore*, bem como o status atual da evolução desses custos nesse setor, considerando o caso do Reino Unido.

O artigo está organizado em cinco seções, sendo a primeira delas a introdução à temática abordada. A segunda seção apresenta a fundamentação teórica, com os componentes de custos de um parque eólico e a evolução dos custos e direcionadores para a redução dos custos no setor eólico *offshore*. A terceira seção descreve o método da pesquisa. Na quarta seção é apresentado um estudo de caso detalhado sobre a evolução dos custos da energia eólica *offshore* no Reino Unido, considerado como mercado maduro no setor. Por fim, na quinta seção estão concentradas as considerações finais, conclusões e recomendações da pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Componentes de custos de uma usina eólica *offshore*

Para se ter uma visão macro dos custos envolvidos na usina eólica *offshore* é importante analisar o conjunto de fases que o empreendimento percorre ao longo de sua criação, desenvolvimento e finalização. Nesse sentido, o ciclo de vida de uma usina eólica *offshore*, representado na Figura 2.1, possui três macrofases (pré-desenvolvimento, desenvolvimento e operação; e pós-operação), no qual cada macrofase é um conjunto de fases (CREATION, 2019).



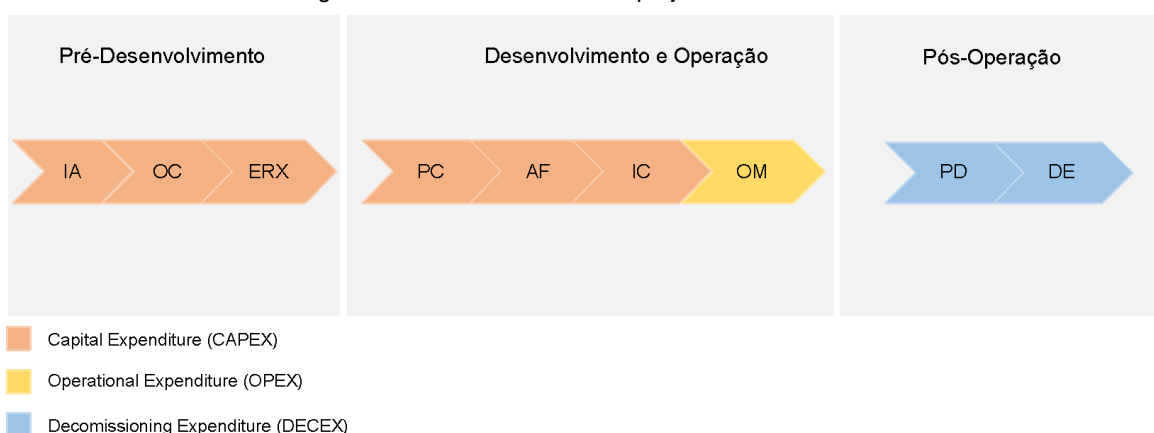
A macrofase de **pré-desenvolvimento** considera a concepção do projeto, tendo como principal meta o resultado do estudo de viabilidade técnico-econômica. Compreende três fases: identificação da área; obtenção da concessão da área; e estudo do recurso eólico, ambiental, econômico e outros.

A macrofase de **desenvolvimento e operação** considera a tradução de informações do projeto em ações concretas e objetos tangíveis. Compreende as fases: planejamento detalhado de construção; aquisição e fabricação; instalação e comissionamento; e operação e manutenção.

A macrofase de **pós-operação** considera a retirada de todos os componentes da usina do local do empreendimento. Compreende as fases: planejamento detalhado para o descomissionamento e descomissionamento.

Considerando esse ciclo de vida, os elementos de custos de uma usina são agrupados nas categorias *Capital Expenditure* (CAPEX), *Operational Expenditure* (OPEX), *Decommissioning Expenditure* (DECEX) e *Financial Expenditure* (FINEX) (GONZALEZ-RODRIGUES, 2017), conforme ilustra a Figura 2.2.

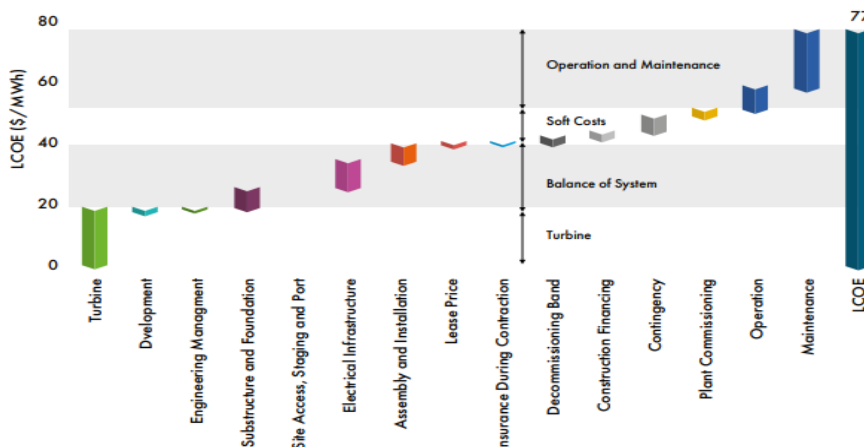
Figura 2.2: Ciclo de vida de um projeto de usina eólica *offshore*



Fonte: Creation (2019).

O custo nivelado de energia ou LCOE representa o custo equivalente de cada unidade de eletricidade gerada ao longo da vida útil do projeto, levando em consideração o investimento inicial (CAPEX), os custos de manutenção e operação (OPEX) e os demais custos associados a juros sobre quaisquer empréstimos (CASTRO-SANTOS, 2016). Assim, o LCOE relaciona os custos envolvidos e a energia gerada pelo empreendimento ao longo da sua vida útil, representando quanto o produtor de energia deveria obter de receita por kWh, de modo que seja suficiente cobrir as despesas operacionais, os investimentos, os juros e remunerar os investidores (NAKABAYASHI, 2014). Conjecturando o ciclo de vida, a Figura 2.3 ilustra a participação de cada componente nos custos do projeto refletido no LCOE.

Figura 2.3: Composição do LCOE a partir dos componentes da turbina



Fonte: NREL (2021).

2.2 Direcionadores para a redução de custos no setor eólico offshore

Devido ao avanço tecnológico, turbinas de maiores dimensões têm sido desenvolvidas, e o *design* e operação de usinas têm sido otimizadas, resultando no ganho de escala dos projetos e na redução no custo de geração de energia. De acordo com Irena (2019), estima-se que o custo médio total de instalação de projetos eólicos *offshore* cairá ainda mais nas próximas décadas, entre USD 1.700 e 3.200/kW até 2030 e entre USD 1.400 e 2.800/kW até 2050.

A capacidade das turbinas é considerada o fator que mais contribui para a redução do custo, visto que, às mais longas e com maior área de varredura, maior diâmetro do rotor e maior altura da torre, podem alcançar maiores velocidades de vento, maior potencial de captura e, conseqüentemente, maior capacidade nominal e aumento no fator de capacidade técnica, o que por sua vez expande a Produção Anual de Energia (AEP) (EPE, 2020; GWEC, 2020; IEA, 2019).

Com maior capacidade de geração, é necessária uma menor quantidade de turbinas para gerar a mesma quantidade de energia, o que também permite reduzir a quantidade dos componentes, como fundações e cabos, além de diminuir os tempos de instalação, operação e manutenção (JENNINGS et al., 2020). Em contrapartida, há uma pressão sobre os custos de investimento, pois turbinas maiores representam desafios de construção e exigem fundações maiores, os custos de operação e manutenção são reduzidos, o que leva a menores custos nivelados de eletricidade (IEA, 2019). A Tabela 2.1 descreve exemplos de modelos de turbinas e algumas de suas especificações.

Tabela 2.1 - Modelos de turbinas ao longo do tempo

Modelo	SG 8.0 MW - 167 DD	GW175-8,0 MW	V174-9,5 MW	V164-10,0 MW	DEC 10MW	SG 11.0 MW-200 DD	Haliade-X 12 MW	SG 14 MW-222 DD	V236-15.0 MW	MySE1 6 MW - 242	GWH252 16MW
Fabricante	Siemens Gamesa	Goldwind	MHI Vestas	MHI Vestas	Dongfang	Siemens Gamesa	GE	Siemens Gamesa	Vestas	Mingyang	Goldwind
Disponível no mercado	2019	2020	-	2018	2020	2020	2021	2024	2025	-	2023
Comprimento da pá (m)	81,5	~ 87	85	80	90	97	107	108	115,5	118	123

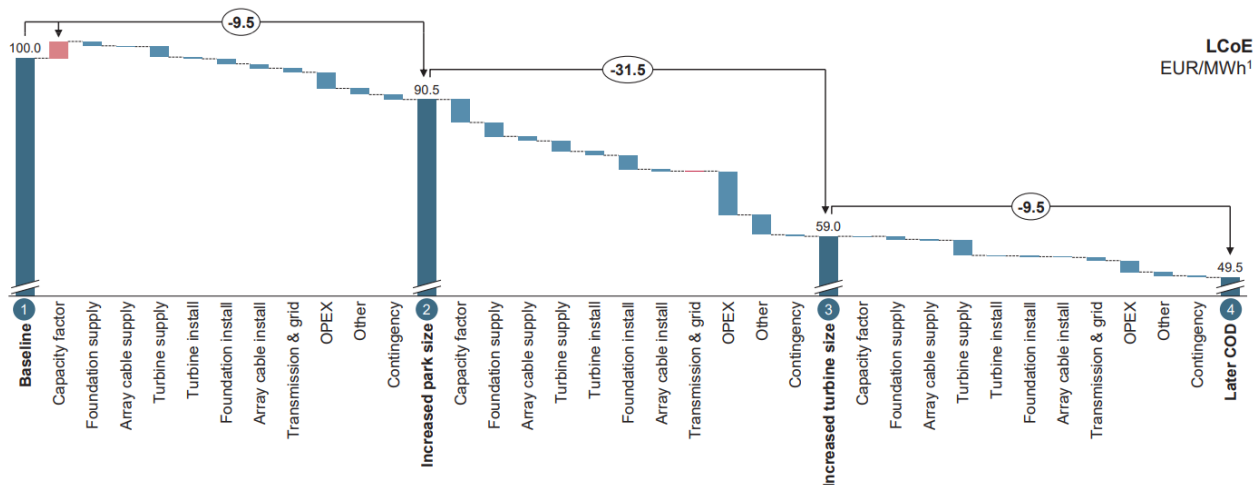
Altura da turbina (m)	-	110 (hub)	197	187	115 (hub)	-	260	-	-	264 (hub)	152 (hub)
Diâmetro do rotor (m)	167	175	174	164	185	200	220	222	236	242	252
Área de varredura do rotor (m²)	21900	24053	23779	21124	-	31400	38000	39000	43742	-	50000

Fonte: Adaptado de Bauer; Matysik (2020); Gaertner et al. (2020); GE Renewable Energy (2020); MHI Vestas Offshore Wind (2018); Renewables BIZ (2020); Siemens Gamesa Renewable Energy (2020a, 2020b); Vestas (2021); China Three Gorges Corporation (2023); Mingyang (2023).

De acordo com análises da Rystad Energy (2023), comparando essas tecnologias em termos de custos, a ação de utilizar turbinas de 14 MW ao invés de turbinas de 10 MW implica que o número de unidades necessárias para um projeto de 1 GW reduz em 28 unidades, ou seja, de 100 para 72. No geral, a análise evidencia que usar as maiores turbinas para um novo parque eólico de 1 GW oferece uma economia de custos de quase US\$100 milhões em comparação com a instalação das turbinas de 10 MW. As fundações são os principais componentes que oferecem oportunidades de redução de custos, estimando-se que uma fundação normalmente custa entre US\$3 milhões e US\$4 milhões, com variações relacionadas principalmente ao tipo de fundação e à profundidade da água. Em uma mudança de 10 MW para 14 MW, essa economia de custos pode ultrapassar US\$100 milhões para o desenvolvedor. Nesse sentido o desenvolvimento tecnológico da turbina, do BoP e da cadeia de suporte são fatores essenciais para a redução de custos no setor eólico *offshore*.

Um estudo feito por Jensen (2022), ilustrado na Figura 2.4, demonstra o potencial de redução no LCOE em relação ao aumento do projeto, aumento da turbina e otimização de desempenho em operações. O estudo aponta como o aumento do tamanho dos projetos pode reduzir o LCOE 9,5 EUR/MWh devido a economia de escala ganho pela redução de custos fixos e do OPEX/MWh. Além disso, com o aumento da turbina é possível reduzir em 31,5 EUR/MWh com a redução do CAPEX/MWh e maior capacidade de geração devido a melhor recurso de vento. As atividades de operação também possuem potencial de redução de LCOE, com uma redução de 9,5 EUR/MWh com a diminuição do custo de fornecimento, otimização de técnicas (que reduzem tempo de trabalho e aumentam disponibilidade da turbina) e redução do OPEX. Ao analisar o estudo observamos que a redução de custos pode ser obtida com economia de escala e otimização de técnicas de instalação e de operação.

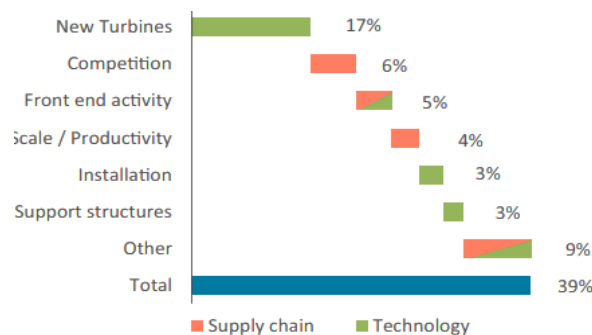
Figura 2.4: Potencial de redução de custos causados pela maior escala do projeto, aumento de turbina e otimização em O&M



Fonte: Jensen (2022).

Segundo o TCE (2012), os custos da energia eólica *offshore* são influenciados não somente por avanços da tecnologia e otimização de atividades, representados pelo aumento da turbina, economia de escalas e otimização de atividades, mas também por fatores da cadeia de suprimentos, conforme a Figura 2.5, sendo eles: 1) maior competitividade entre mercados fornecedores (turbinas, estruturas de suporte e instalação), com a inserção de novas empresas no setor (Ex: inserção de fabricantes de turbinas chinesas como Mingyang, Dongfang e Goldwind; 2) maior colaboração de *stakeholders* da cadeia de valor no início do desenvolvimento do projeto, com otimização de *layout* do parque eólico e pesquisas de *site* mais extensas; e 3) produção em massa de componentes, como estruturas de suporte, auxiliando na produtividade e redução do custo dos componentes.

Figura 2.5: Potencial de redução de custos no setor eólico *offshore* por fator



Fonte: TCE (2012).

Alguns outros aspectos também são facilitadores para este fim, como o ganho de aprendizado (*learn-by-doing*), custos de financiamento e sinergias com outros setores (JENNINGS et al., 2020; PENNOCK et al., 2022). O ganho de aprendizado refere-se ao *know-how* adquirido pelos profissionais ao realizar as atividades do novo setor, que possibilita melhores serviços e tomadas de decisão baseadas em situações já vivenciadas e evita erros e retrabalhos, consequentemente reduzindo custos no processo (JENNINGS et al., 2020; PENNOCK et al., 2022).

Os custos de financiamento estão relacionados aos custos de capitais que reduziram significativamente devido ao ganho de escala e confiança que a indústria ganhou a cada geração de turbinas associado a instalação e operação reduzindo riscos associados a tecnologia (JENNINGS et al., 2020).

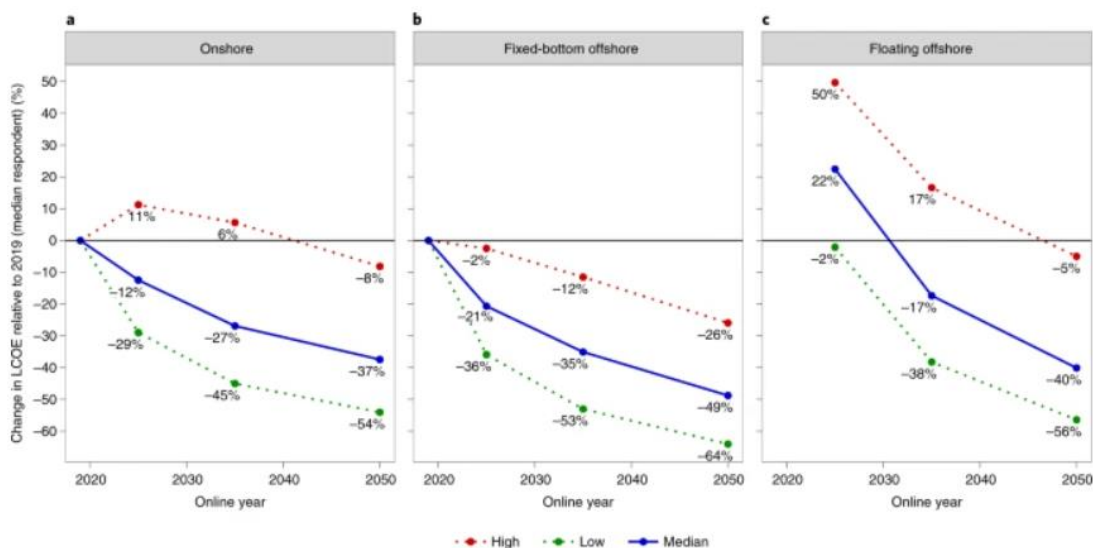
A sinergia com outros setores permite ganhos de aprendizado e inovações de conhecimento e experiência que são trazidos de outros setores, permitindo que boas práticas sejam utilizadas e haja uma redução de erros já anteriormente cometidos, consequentemente reduzindo custos agregados a atividade (PENNOCK et al., 2022).

2.3 Evolução dos custos no setor eólico offshore

O LCOE da fonte eólica *offshore* vem reduzindo e se tornando competitivo em alguns mercados europeus (Reino Unido, Alemanha, Holanda), e a previsão é que outros mercados em todo o mundo também se tornem competitivos até 2030. Em termos numéricos, o LCOE eólico *offshore* cairia de uma média de US\$ 0,13/kWh em 2018 para uma média entre US\$ 0,05 e 0,09/kWh em 2030 e US\$ 0,03 a 0,07/kWh até 2050 (RYSTAD ENERGY, 2023).

Para ilustrar a redução de custos em termos quantitativos, o estudo de Wiser et al. (2021) apresenta a expectativa de redução do LCOE na tecnologia *offshore* tanto fixa como flutuante quando comparada com a tecnologia *onshore* de acordo com diferentes cenários. O cenário de baixo custo reflete um cenário otimista com o que pode ser possível com pesquisa, desenvolvimento e implantação aprimorados. Espera-se que, nesse cenário haja uma redução de 38 a 53% no LCOE até 2035 e de 54 a 64% até 2050, conforme ilustra a Figura 2.6 (WISER et al., 2021).

Figura 2.6: Panorama de redução do LCOE nas tecnologias eólicas

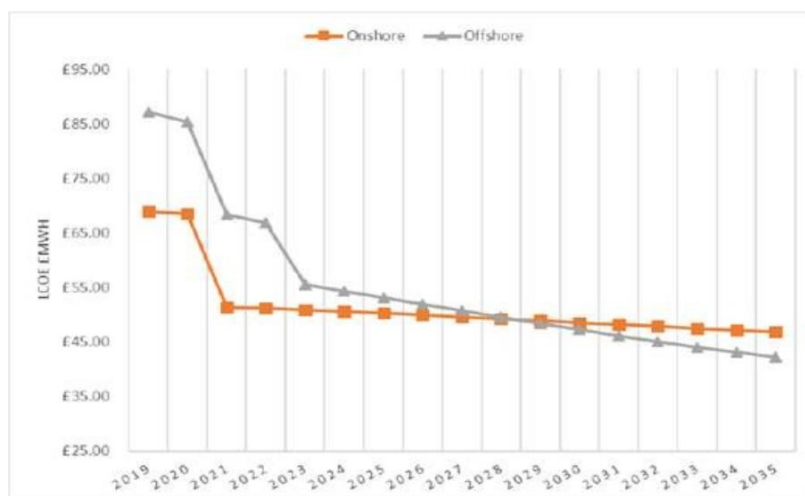


Fonte: WISER et al. (2021).

É possível observar que a energia eólica *offshore* fixa possui expectativa de redução de custos maior que a energia eólica *onshore*, chegando a se tornar mais viável, com menor LCOE. Corroborando

com esse estudo, um estudo feito pela Cornwall Insight (2019), mostra que o LCOE da energia eólica *offshore* pode cair abaixo da energia eólica terrestre até 2028, conforme mostra a Figura 2.7.

Figura 2.7: Comparação de LCOE entre tecnologia eólica *onshore* e *offshore*



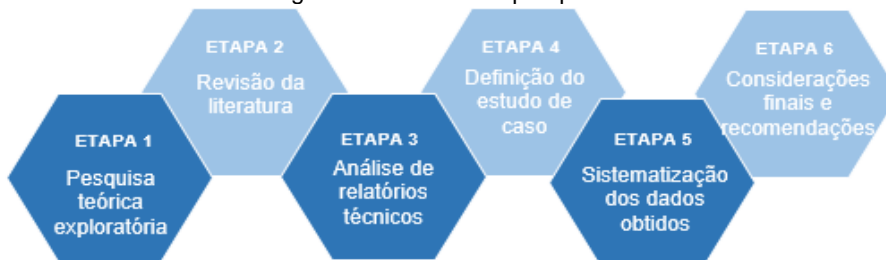
Fonte: Cornwall Insight (2019).

3. MÉTODO DA PESQUISA

Segundo Marconi e Lakatos (2003), uma pesquisa deve ser classificada quanto ao gênero, objetivo, abordagem e método. Em relação ao objetivo, classifica-se a pesquisa como exploratória pela finalidade de desenvolver, esclarecer e introduzir novos conceitos (GIL, 2008). Além disso, a abordagem do artigo é categorizada como qualitativa-quantitativa, sendo qualitativa pela busca dos fatores e direcionadores, e quantitativa pela utilização de gráficos e comparações numéricas ao longo dos anos.

Os métodos utilizados para a estruturação da pesquisa foram a revisão sistemática da literatura e o estudo de caso. Foi realizada uma revisão da literatura acerca da temática abordada, a fim de verificar o estado da arte relacionado a custos da energia eólica *offshore* e suas prospecções futuras, incluindo a análise de relatórios técnicos relevantes nessa temática. Em seguida, realizou-se o estudo de caso, focando no cenário da evolução do custo da energia eólica *offshore* no Reino Unido por intermédio de uma análise documental para, em seguida, sistematizar os dados obtidos. Por fim, a última etapa descreve as considerações finais da pesquisa, as dificuldades encontradas ao longo da construção do estudo e as principais recomendações para trabalhos futuros. O procedimento metodológico utilizado pode ser visualizado na Figura 3.1.

Figura 3.1: Método da pesquisa



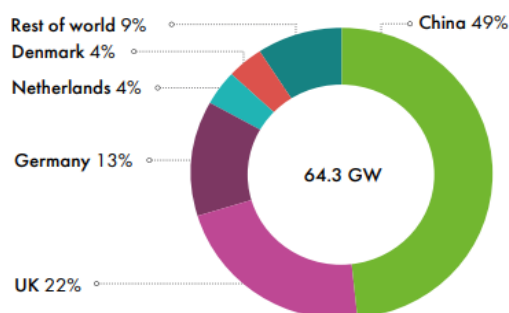
Fonte: Autoria própria (2023).

4. ESTUDO DE CASO

4.1. Contexto do país

O Reino Unido é o segundo maior mercado no *ranking* de capacidade instalada no mundo, com 14 GW em usinas já instaladas, conforme mostra a Figura 4.1, enquadrando-se atrás apenas da China, que vem experienciando significativo crescimento e investimentos no setor (GWEC, 2023).

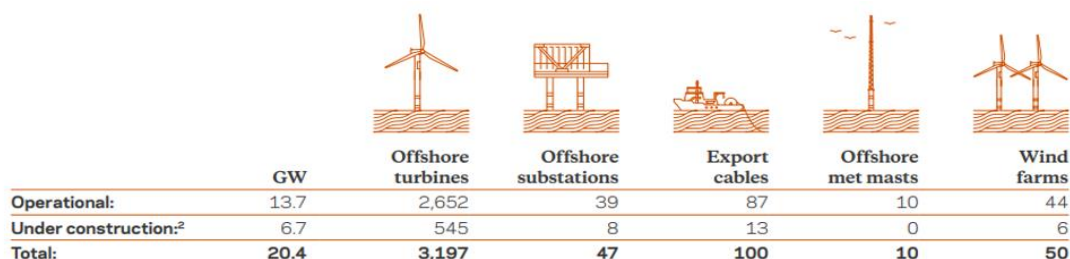
Figura 4.1: Distribuição de capacidade instalada total por país em 2023



Fonte: GWEC (2023).

Com 50 usinas eólicas *offshore* em operação e em processo de construção, o país é um dos líderes de mercado mundial no setor, totalizando uma capacidade total de 20,3 GW (UK GOVERNMENT, 2022). A Figura 4.2 ilustra a quantidade de ativos que o país possui, incluindo turbinas, parques, subestações, cabos e estações meteorológicas.

Figura 4.2: Ativos do setor eólico *offshore* no Reino Unido em 2022



Fonte: UK GOVERNMENT (2022).

Assim como outros países da Europa, possui metas ambiciosas de desenvolvimento eólico *offshore* e descarbonização, com 50 GW de instalação em eólica *offshore* até 2030, sendo 5GW de projetos flutuantes. Como forma de promover o setor e atingir as metas estabelecidas pelo país, ainda em 2022, o governo anunciou a realização de leilões CfD anuais de 2023 em diante para aumentar a escalabilidade de fornecimento renovável do país (GWEC, 2022).

Em 2011, o governo do Reino Unido criou o *Offshore Wind Reduction Task Force*, com o objetivo de áreas que deveriam ser visadas pela indústria para desenvolvimento em prol da redução de custos no setor. O relatório gerado pelo trabalho, em 2012, estimou que o custo da energia poderia chegar a £100/MWh até 2020, se vários obstáculos técnicos e financeiros pudessem ser superados entre aspectos

de cadeia de suprimentos, inovação, estratégias de contratação, planejamento e consentimento, transmissão e financiamento (UK GOVERNMENT, 2023).

A redução de custos no setor é um aspecto constantemente abordado pelo país. Contado com uma alta capacidade de P&D, com centros de referência, como a ORE Catapult, o Reino Unido conta com estudos em inovação em áreas de turbinas, subestruturas (incluindo flutuantes), infraestrutura elétrica e operações e manutenção (UK GOVERNMENT, 2020).

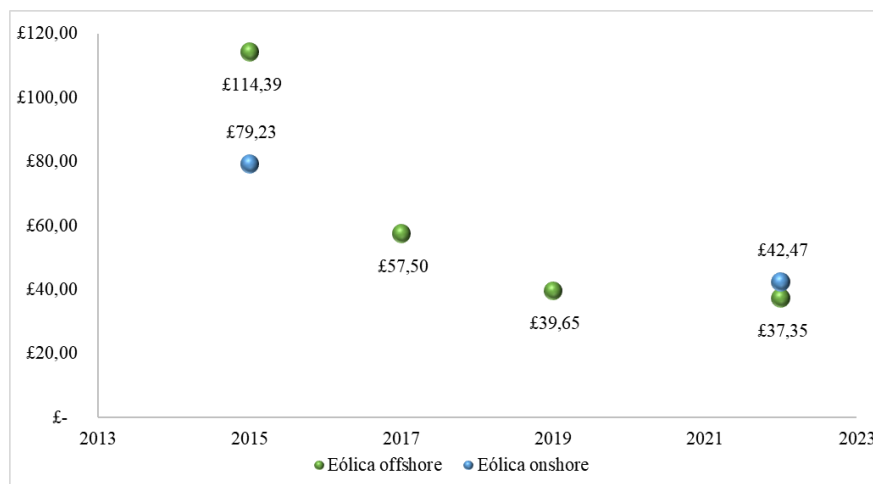
Outro aspecto importante nesse contexto é a maturidade da cadeia de suprimentos no setor. As empresas do Reino Unido são líderes mundiais em serviços importantes, como projeto, construção e operação de parques eólicos *offshore*. Além disso, existem instalações de fabricação em todo o Reino Unido, fornecendo uma variedade de produtos *offshore*, como pás, cabos, torres, componentes de turbinas eólicas e de nacelles (ORE CATAPULT, 2022). Com uma cadeia de suprimentos madura de serviços e produtos, o país consegue efetivamente redução de custos vinculada a logística, qualidade, inovação e capacitação.

4.2. Evolução de custos

Como parte da reforma no mercado de eletricidade (EMR), em 2010, foi criado um novo mecanismo de apoio: o *Contracts for Difference* (CfD), para substituição do *Renewable Obligation* (RO) (YOSHIOKA, 2020). O mecanismo passou a ser fornecido a partir de 2015 para garantir o investimento necessário por meio do fornecimento de receitas estáveis de longo prazo para projetos eólicos *offshore*, dando certeza sobre os retornos para os investidores ao garantir que os geradores recebem um preço fixo pré-pago pela eletricidade de baixo carbono que produzem durante a vigência do contrato.

Conforme o mecanismo de CfD, a primeira rodada de leilão teve resultados em 2015, seguida pela segunda em 2017, terceira em 2019 e quarta em 2022. Analisando os custos de contratação das fontes eólica *onshore* e *offshore* ao longo desse período, torna-se possível observar a crescente redução dos custos na eólica *offshore*, tornando-se mais barata que a eólica *onshore* (UK GOVERNMENT, 2022). A Figura 4.3 ilustra essa evolução de valores. É importante ressaltar que na segunda e terceira rodadas do leilão de CfD não houve ganhadores de benefícios de eólica *onshore*.

Figura 4.3: Valores aprovados (MWh) de energia eólica *onshore* e *offshore* nos leilões de CfD



Fonte: Autoria própria (2023) com base em UK GOVERNMENT (2022).

Em 2022, a energia eólica *offshore* atingiu um valor de £37,35 MWh se tornando mais barata quando comparada a energia eólica *onshore* contratada, no mesmo leilão, a um valor de £42,47 MWh. Nesse sentido, a expectativa que a eólica *offshore* igualaria seus custos com a *onshore* em 2028 foi antecipada, demonstrando o potencial dessa tecnologia.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A energia eólica *offshore* tem apresentado um notável progresso na redução de custos nos últimos anos. Devido à construção e operação de usinas eólicas no mar, um dos desafios enfrentados por essa indústria era o alto custo associado. No entanto, ao longo dos últimos anos, avanços tecnológicos e estratégias inovadoras têm permitido uma redução nos custos da energia eólica *offshore*, tornando-a cada vez mais competitiva apesar do aumento dos custos de matéria-prima enfrentados pela cadeia.

Em resposta ao objetivo do artigo, foram identificados alguns fatores que têm contribuído para a significativa redução de custos na indústria eólica *offshore*, dentre eles: 1) o ganho de aprendizado (*learn-by-doing*) na cadeia de valor; 2) custos de financiamento; 3) desenvolvimento tecnológico da turbina, do BoP e da cadeia de suporte; 4) economia de escala; 5) sinergias com outros setores econômicos; 6) maior colaboração com os stakeholders no detalhamento do projeto; 7) maior concorrência na cadeia de valor; 8) otimização na construção de parques eólicos; 9) produção em massa de alguns componentes (estrutura de suporte e outros); 10) otimização de atividades de O&M.

Conforme o estudo de caso do Reino Unido, observaram-se fatores que foram cruciais para o desenvolvimento do setor e na redução dos custos dos projetos no país, como o estabelecimento de uma cadeia de suprimentos madura; a pesquisa e desenvolvimento, com a cooperação entre instituições públicas e privadas; a adoção do mecanismo de CfD; e a criação de um grupo de trabalho de estudos para a redução de custos nesse setor. Ao observar os valores aprovados nos leilões de CfD, identifica-se o potencial dessa fonte ao atingir, em 2022, valores inferiores a demais fontes fósseis e renováveis, como eólica *onshore* e solar, superando as expectativas do mercado, que previam que ocorresse apenas em 2028.

Esses avanços tornam a energia eólica *offshore* cada vez mais competitiva em comparação com outras fontes de energia, contribuindo para a expansão dessa indústria e impulsionando a transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (Brasil). **Infovento 2023**. São Paulo: ABEEólica, 2023.

BAUER, L.; MATYSIK, S. **Goldwind GW 175/8000**. Disponível em: <<https://en.wind-turbine-models.com/turbines/2236-goldwind-gw-175-8000>>. Acesso em: 25 de junho de 2023.

BVG ASSOCIATES. **Approaches to cost-reduction in offshore wind**: A report for the Committee on Climate Change, 2022.

CASTRO-SANTOS, L. et al. Economic feasibility of floating offshore wind farms. **Energy**, v. 112, p. 868–882, 2016.

CHINA THREE GORGES CORPORATION. **The world's first 16MW offshore wind turbine has been hoisted at Fujian Offshore Wind Farm**, 2023. Disponível em:

<<https://www.ctg.com.cn/sxjt/xwzx55/zhxw23/1434757/index.html>>. Acesso em: 25 de junho de 2023.

EPE. **Roadmap Eólica Offshore Brasil**. Perspectivas para a energia eólica marítima. 2020.

GAERTNER, E. et al. **IEA Wind TCP Task 37: Definition of the IEA 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine**. 2020.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5a edição ed. São Paulo: Atlas, v. 264, 2008.

GE RENEWABLE ENERGY. **Haliade-X 12 MW offshore wind turbine platform**. Disponível em: <<https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>>. Acesso em: 25 de junho de 2023.

GWEC. **Global Offshore Wind: Annual Market Report 2020**, 2020.

GWEC, **Global Offshore Wind Report 2022**, 2022.

GWEC, **Global Offshore Wind Report 2023**, 2023.

IEA. **Offshore Wind Outlook 2019: World Energy Outlook Special Report**, 2019.

INSIGHT, Cornwall. **Offshore wind could beat onshore wind on cost, but planning restrictions are key**. 2019. Disponível em: <https://www.cornwall-insight.com/press-centre/press-releases/offshore-wind-could-beat-onshore-wind-on-cost-but-planning-restrictions-are-key>. Acesso em: 19 fev. 2020.

IRENA. **Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation paper)**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.

JENNINGS, T.; TIPPER, H. A.; DAGLISH, J.; GRUBB, M.; DRUMMOND, P. **Policy, innovation and cost reduction in UK offshore wind**. UCL, CARBON TRUST. 2020.

JENSEN, M. K. **LCOE: Update of recent trends (Offshore)**. 2022. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/wind/assets/pdfs/engineering-wkshp2022-1-1-jensen.pdf>>. Acesso em: 06 de julho de 2023.

MARCONI, M.; LAKATOS, E. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed., 2003.

MHI VESTAS OFFSHORE WIND. **The V174-9.5 MWTM Turbine**. Disponível em: <<https://mhivestasoffshore.com/innovations/>>. Acesso em: 26 de jun. 2023.

MINGYANG. Leading innovation: MingYang Smart Energy launches MySE 16.0-242, the world's largest offshore Hybrid Drive wind turbine. Disponível em: <<http://www.myse.com.cn/en/jtxw/info.aspx?itemid=825>>. Acesso em: 26 de jun. 2023.

NAKABAYASHI, R. K. **Instituto De Energia E Ambiente Programa De Pós-Graduação Em Energia Rennyo Kunizo Nakabayashi Microgeração Fotovoltaica No Brasil: Condições Atuais E Perspectivas Futuras**. 2014.

ORE CATAPULT, **Floating Offshore Wind: Cost reduction pathways to subsidy free**, 2021.

ORE CATAPULT. **Three ways the UK offshore wind supply chain boosts the economy**. Disponível em: <<https://ore.catapult.org.uk/blog/3-ways-the-uk-offshore-wind-supply-chain-boosts-the-economy/>>.

Acesso em: 26 de jun. 2023.

PENNOCK, S.; GARCIA-TERUEL, A.; NOBLE, D. R.; ROBERTS, O. DE ANDRES, A.; COCHRANE, C.; JEFFREY, H. Deriving Current Cost Requirements from Future Targets: Case Studies for Emerging Offshore Renewable Energy Technologies. **Energies** 2022, 15, 1732.

RENEWS BIZ. **Dongfang 10MW giant powers Chinese grid**. Disponível em:

<<https://renews.biz/61642/dongfang-10mw-giant-powers-chinese-grid/>>. Acesso em: 26 de jun. 2023.

RYSTAD ENERGY. **Size matters in offshore wind**: Why costlier 14 MW turbines actually reduce the large-scale farm bill. Disponível em: <<https://w3.windfair.net/wind-energy/pr/35555-rystad-energy-size-turbine-wind-turbine-wind-farm-commercially-offshore-manufacturer-savings-costs-investments-cabling-segment>>. Acesso em: 26 de jun. 2023.

SIEMENS GAMESA RENEWABLE ENERGY. **SG 14-222 DD Offshore Wind Turbine**. Disponível em:

<<https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/offshore/wind-turbine-sg-14-222-dd>>.

Acesso em: 25 de junho de 2023.

STEHLY, T.; DUFFY, P. 2020 **Cost of Wind Energy Review**, NREL, 2021. NREL/TP-5000-81209.

Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/81209.pdf>>. Acesso em: 26 de jun. 2023.

TCE, **Offshore Wind Report 2022**. Disponível em: <https://www.thecrownestate.co.uk/media/4378/final-published_11720_owoperationalreport_2022_tp_250423.pdf>. Acesso em: 29 de jun. de 2023.

TCE, **Offshore Wind Cost Reduction Pathways Study**, 2012.

UK GOVERNMENT, **Contracts for Difference**, 2022 Disponível em:

<<https://www.gov.uk/government/publications/contracts-for-difference>>. Acesso em: 27 de jun. de 2023.

UK GOVERNMENT, **Offshore Wind Cost Reduction Task Force**. Disponível em:

<<https://www.gov.uk/government/groups/offshore-wind-cost-reduction-task-force>>. Acesso em: 27 de jun. de 2023.

UK GOVERNMENT, **Offshore Wind Sector Deal** Disponível em:

<<https://www.gov.uk/government/publications/offshore-wind-sector-deal/offshore-wind-sector-deal>>.

Acesso em: 27 de jun. de 2023.

VAN DER ZWAAN, B.; RIVERA-TINOCO, R.; LENSINK, S.; VAN DEN OOSTERKAMP, P. Cost reductions for offshore wind power: Exploring the balance between scaling, learning and R&D. **Renewable Energy**, v. 41, p. 389-393, 2012.

VESTAS. V236-15.0 **MWTM at a glance**. Disponível em: <https://www.vestas.com/en/products/offshore-platforms/v236_15_mw#!technical-specifications>. Acesso em: 27 de jun. de 2023.

WISER, R.; RAND, J.; SEEL, J.; VEITER, P.; BAKER, E.; LANTZ, E.; GILMAN, P. Expert elicitation survey predicts 37% to 49% declines in wind energy costs by 2050. **Nature Energy**, v. 6, p. 555-565, 2021.

YOSHIOKA, N. The UK's Approach to Climate Change as Seen in Offshore Wind Power Generation. OPRI Perspectives, n.5, 2020.