

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

THALITA SIMÕES CORDEIRO

**ESTUDO TÉCNICO-ECONÔMICO DO MODELO DE TRANSMISSÃO EM HVDC
DE PARQUES EÓLICOS OFFSHORE**

CURITIBA

2025

THALITA SIMÕES CORDEIRO

**ESTUDO TÉCNICO-ECONÔMICO DO MODELO DE TRANSMISSÃO EM HVDC
DE PARQUES EÓLICOS OFFSHORE**

**Techno-Economic Study Of The HVDC Transmission Model For Offshore Wind
Farms**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
apresentado como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel(a) em Engenharia Elétrica do
curso de Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientadora: Profa. Dra. Nastasha Salame da Silva

CURITIBA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

THALITA SIMÕES CORDEIRO

**ESTUDO TÉCNICO-ECONÔMICO DA TRANSMISSÃO EM HVDC DE PARQUES
EÓLICOS OFFSHORE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
apresentado como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel(a) em Engenharia Elétrica do
curso de Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 01/dezembro/2025

Andrea Lucia Costa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal Do Paraná

Annemarlen Gehrke Castagna
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal Do Paraná

Nastasha Salame da Silva
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal Do Paraná

CURITIBA

2025

Dedico este trabalho com todo o meu coração à minha mãe, Maria Carmelita, ao meu pai, Gilson, e à minha avó, Maria Ferreira, que foram as minhas maiores fontes de inspiração e apoio. Se estou aqui hoje, é porque vocês nunca desistiram de mim. Cada palavra de conforto, cada oração e cada gesto de carinho fizeram toda a diferença na minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, que me guiou, mesmo nos momentos de incerteza e dificuldades, e me deu forças para seguir em frente.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por todo o conhecimento, estrutura e apoio oferecidos ao longo da minha trajetória acadêmica.

Aos professores e professoras que transmitiram não apenas conteúdos técnicos, mas também valores fundamentais para a formação de um bom profissional.

Em especial, expresso minha gratidão à professora Nastasha Salame da Silva, minha orientadora, pelo comprometimento e apoio em todos os momentos. Sua orientação foi essencial para que este trabalho fosse possível.

A minha família e amigos, e a todos que de alguma forma contribuíram para essa conquista, o meu mais sincero agradecimento.

Obrigada!

“Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez.” (Thomas Edison)

RESUMO

A expansão da energia eólica no mundo tem se destacado como um dos pilares da transição energética, e os parques *offshore* representam um avanço importante. Entretanto, a distância em relação à costa, a necessidade de cabos submarinos de grande extensão e os altos custos de implantação tornam a transmissão de energia um dos principais desafios para a viabilidade desses empreendimentos. Nesse contexto, este trabalho analisa comparativamente os sistemas de transmissão em corrente alternada de alta tensão (HVAC) e em corrente contínua de alta tensão (HVDC), abordando suas topologias, vantagens, limitações e custos associados. A pesquisa evidenciou que o sistema HVAC, embora consolidado, apresenta limitações técnicas, que comprometem sua aplicação em longos trechos subterrâneos. Já o sistema HVDC mostrou-se mais adequado para transmissões de longa distância e grandes blocos de potência no contexto analisado. A análise do cenário brasileiro, marcado pelo grande potencial eólico *offshore* no Nordeste e pela concentração dos principais centros consumidores no Sudeste, aliada à experiência consolidada em projetos HVDC como Itaipu e Rio Madeira, reforça a aplicabilidade dessa tecnologia para o escoamento da energia.

Palavras Chaves: Energia eólica *offshore*; Transmissão de energia; HVAC; HVDC.

ABSTRACT

The expansion of wind power worldwide has emerged as one of the pillars of the energy transition, and offshore wind farms represent a significant advance. However, the distance from the coast, the need for extensive submarine cables, and the high implementation costs make power transmission one of the main challenges to the viability of these projects. In this context, this paper comparatively analyzes high-voltage alternating current (HVAC) and high-voltage direct current (HVDC) transmission systems, addressing their topologies, advantages, limitations, and associated costs. The research revealed that the HVAC system, although well-established, has technical limitations that compromise its application over long underground distances. The HVDC system, on the other hand, proved more suitable for long-distance transmission and large power blocks within the analyzed context. The analysis of the Brazilian scenario, characterized by the significant offshore wind potential in the Northeast and the concentration of major consumer centers in the Southeast, combined with the consolidated experience in HVDC projects such as Itaipu and Rio Madeira, reinforces the applicability of this technology for energy transmission.

Keywords: Offshore wind energy; Power transmission; HVAC; HVDC

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Figura 1 - Previsão de carga 2024 - 2028 | 14 |
| Figura 2 - Moinho de vento americano | 19 |
| Figura 3 - Aerogerador por Charles F. Bush | 20 |
| Figura 4 - Marcos Históricos da Geração Eólica | 22 |
| Figura 5 - Fundações Geradores Offshore | 25 |
| Figura 6 - Partes de um aerogerador | 27 |
| Figura 7 - Potencial eólico a 200m de altura | 31 |
| Figura 8 - Parques em licenciamento ambiental | 32 |
| Figura 9 - Obras da construção da primeira linha de transmissão HVDC | 35 |
| Figura 10 - Sistema de transmissão HVDC | 37 |
| Figura 11 - Ligação monopolar e bipolar | 38 |
| Figura 12 - Topologia HVAC | 42 |
| Figura 13 - Topologia HVDC | 43 |
| Figura 14 - Topologia LFCA | 44 |
| Figura 15 - Topologia All-DC | 45 |
| Figura 16 - Linhas de transmissão no Brasil em HVDC | 46 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Gráfico 1 - Diâmetro do rotor versus potência | 24 |
| Gráfico 2 - Capacidade instalada de energia eólica offshore por país (em GW) | 28 |
| Gráfico 3 - Matriz elétrica brasileira | 29 |
| Gráfico 4 - Capacidade total instalada mundial (GW) | 30 |
| Gráfico 5 - Comparação custo vs distância de linhas CC e CA | 40 |
| Gráfico 6 - Mapa dos Parques Eólicos Onshore em Operação no Brasil | 52 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------|
| ABEEólica | Associação Brasileira de Energia Eólica |
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| CCEE | Câmara de Comercialização de Energia Elétrica |
| CSC | Capacitor Comutado por Fonte (<i>Controlled Shunt Capacitor</i>) |
| EBSA | Área Marinha Ecologicamente ou Biologicamente Significativa |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| GTO | <i>Gate Turn-Off Thyristor</i> |
| GW | GigaWatts |
| HVAC | <i>High Voltage Alternating Current</i> |
| HVDC | <i>High Voltage Direct Current</i> |
| Hz | Hertz |
| IBAMA | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis |
| IGBT | <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> |
| IGCT | <i>Integrated Gate-Commutated Thyristor</i> |
| LCC | <i>Line Commutated Converter</i> |
| LCOE | <i>Levelized Cost of Energy</i> |
| LFAC | <i>Low Frequency Alternating Current</i> |
| MMC | Conversores Modulares Multiníveis |
| MW | MegaWatts |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| VSC | <i>Voltage Source Converter</i> |
| kV | QuiloVolts |
| kW | QuiloWatts |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | Tema | 13 |
| 1.1.1 | Delimitação do Tema | 15 |
| 1.2 | Problemas e Premissas | 15 |
| 1.3 | Objetivos | 16 |
| 1.3.1 | Objetivo Geral | 16 |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos | 16 |
| 1.4 | Justificativa | 16 |
| 1.5 | Metodologia da Pesquisa | 17 |
| 1.6 | Estrutura do Trabalho | 18 |
| 2 | GERAÇÃO EÓLICA | 19 |
| 2.1 | Histórico e Surgimento da Geração Eólica | 20 |
| 2.2 | Característica de um Parque Eólico Offshore | 23 |
| 2.2.1 | Componentes principais de um aerogerador | 23 |
| 2.2.2 | Transmissão de energia Offshore | 27 |
| 2.3 | Overview Do Cenário Global De Parques Eólicos Offshore | 28 |
| 2.4 | Potencial Eólico Offshore no Brasil | 29 |
| 2.5 | Perspectiva Futura Eólica Offshore No Brasil | 32 |
| 3 | TRANSMISSÃO COM O USO DA TECNOLOGIA HVDC | 34 |
| 3.1 | Contexto Histórico | 34 |
| 3.2 | Sistema HVDC | 36 |
| 3.3 | Principais Tipos de HVDC | 37 |
| 3.3.1 | Elo CC Monopolar | 37 |
| 3.3.2 | Elo Bipolar | 38 |
| 3.3.3 | Elo CC Homopolar | 38 |
| 3.3.4 | Elo CC Multiterminal | 38 |
| 3.3.5 | Back-To-Back | 39 |
| 3.4 | Vantagens e Desvantagens | 39 |
| 4 | VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA DA TRANSMISSÃO EM HVDC DE PARQUES EÓLICOS OFFSHORE | 41 |
| 4.1 | Topologia dos Sistemas de Integração da Energia Eólica Offshore | 42 |
| 4.1.1 | Topologia HVAC | 42 |
| 4.1.2 | Topologia HVDC | 43 |
| 4.1.3 | Topologia LFAC | 44 |
| 4.1.4 | Topologia All-DC | 44 |
| 4.2 | Vantagens e desvantagens dos Sistemas de Transmissão de energia para Parques Eólicos Offshore | 47 |
| 4.2.1 | Sistema de Transmissão em HVAC | 47 |
| 4.2.2 | Sistema de Transmissão em HVDC | 48 |

| | | |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3 | Comparativo Técnico e Econômico das Tecnologias HVAC E HVDC Aplicadas a Parques Eólicos Offshore | 49 |
| 5 | CONCLUSÕES | 55 |
| 5.1 | Sugestões para Trabalhos Futuros | 57 |
| | REFERÊNCIAS | 58 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Tema

Com o avanço da crise climática e a intensificação de eventos extremos, cresce a necessidade de ampliar o debate e a adoção de fontes limpas e renováveis na matriz elétrica global. Nesse cenário o Brasil se diferencia pela predominância de fontes renováveis na matriz energética (Correia e Azevedo Jr, 2023).

Atualmente, a geração eólica vem ganhando destaque e relevância no Brasil e no mundo, atingindo 13,2% da matriz brasileira em 2023, segundo a EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Os parques eólicos instalados atualmente no Brasil são do tipo *onshore*, mas tem-se notado a necessidade de estudos para a instalação de parques *offshore* em decorrência da redução de locais potencialmente eólicos em terra e o grande potencial na costa marítima (Tavares, 2010).

Um dos maiores desafios do século XXI são as mudanças climáticas causadas pelo aquecimento global. A utilização intensa de combustíveis fósseis como fonte de energia para a industrialização teve, e ainda tem, um impacto significativo nas alterações ambientais que ocorrem em todo o planeta. Nesse cenário, considerando a importância da energia elétrica para o desenvolvimento das sociedades modernas e a atual realidade socioeconômica global, está cada vez mais em pauta o debate sobre a necessidade da transição energética (Tavares, 2010).

Nesse cenário, dentre as energias renováveis que compõem a matriz energética no Brasil e no mundo a fonte proveniente de energia eólica que tem alcançado grandes avanços em escala global, tanto pelo número de projetos já instalados ou em fase de desenvolvimento quanto pelo volume significativo de investimentos direcionados ao setor.

No contexto global, o rápido aumento da exploração de energia eólica em terra tornou-se um fato inegável, contribuindo para a saturação das opções de instalação devido à alta concentração de parques eólicos e às restrições ambientais (Vaicberg, Valiatt e Queiroz, 2021). Essa realidade, combinada com a necessidade de atingir metas cada vez mais ambiciosas de energias renováveis e com a identificação de áreas costeiras com elevado potencial eólico, tem impulsionado significativamente o interesse pela exploração de parques eólicos *offshore*. Essa

modalidade representa uma nova fronteira para a geração de energia eólica, e, apesar dos custos mais elevados de transporte, instalação e manutenção, os parques *offshore* têm se mostrado uma aposta promissora e em constante crescimento (Tavares, 2010).

Embora o sistema de transmissão HVAC (*High Voltage Alternating Current* - Corrente Alternada em Alta Tensão) ainda predomina, uma nova tendência está emergindo no mercado de energia, o sistema de transmissão HVDC (*High-Voltage Direct Current* - Corrente Contínua de Alta Tensão), acompanhando o aumento significativo da demanda por eletricidade nas últimas décadas e garantindo maior confiabilidade e estabilidade no sistema elétrico brasileiro, este crescimento da demanda é mostrado a seguir (Montibeller, 2020).

A Tabela 1 apresenta a previsão de cargas, apresentada pela EPE, para os anos de 2024 até 2028, bem como a primeira e segunda revisão do planejamento de 2023 até 2027, e uma comparação entre essas revisões e o planejamento mais recente (2024-2028). Em 2024, a previsão de carga total no país alcançou 78.447 MWmédio. A Figura 1 também mostra que as projeções indicam um crescimento da carga no Sistema Interligado Nacional (SIN) de quase 3,3% ao ano, considerando um crescimento de 2,5% do Produto Interno Bruto (PIB), até 2028 atingindo a capacidade de 89.023 MWmédio, conforme estimativas da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), da EPE e do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (Empresa de Pesquisa Energética, 2023).

Figura 1 - Previsão de carga 2024 - 2028

**Comparação das previsões do SIN
Projeção da carga de energia (MWmédio)**

| Sistema Interligado Nacional | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1ª Rev. Quadrim. PLAN 2023-2027 * [A] | 77.147 | 79.459 | 82.120 | 84.695 | - |
| 2ª Rev. Quadrim. PLAN 2023-2027 * [B] | 76.983 | 79.520 | 82.328 | 84.980 | - |
| PLAN 2024-2028 * [C] | 78.447 | 80.936 | 83.619 | 86.166 | 89.023 |
| [C] - [B] MWmed | 1.464 | 1.416 | 1.291 | 1.186 | - |
| [C] / [B] % | 1,9% | 1,8% | 1,6% | 1,4% | - |

Crescimento Médio do Período 2023-2028
PIB = 2,5% Carga = 3,3%

Fonte: EPE (2023)

Os sistemas HVDC são desenvolvidos para oferecer soluções aos desafios da transmissão a longas distâncias em HVAC, que resultam em altos custos. Para comparar esses sistemas, consideram-se as estações de conversão, as linhas de transmissão e as perdas por fenômenos, como os efeitos corona e pelicular. Um benefício adicional das linhas HVDC é o uso de torres menores, reduzindo o tamanho da faixa de servidão e o impacto ambiental, além de necessitarem de menos condutores, com menor diâmetro, mas capazes de transmitir maior potência (Montibeller, 2020).

A análise de viabilidade da transmissão em HVDC de parques eólicos *offshore* e bem como o uso de sistemas HVDC para transmissão a longas distâncias oferece soluções mais eficientes em comparação aos sistemas HVAC tradicionais, contribuindo para maior confiabilidade do sistema energético. Diante disso, este trabalho apresenta a seguir a delimitação do tema proposto, os objetivos gerais e específicos, justificativa e metodologia.

1.1.1 Delimitação do Tema

Este trabalho apresenta um estudo bibliográfico do sistema de transmissão em HVDC de parques eólicos *offshore*, apresentando o histórico do uso dessa tecnologia e as diferenças entre parques eólicos *onshore* e *offshore* e o escoamento da potência gerada nesses parques pelo sistema HVDC.

1.2 Problemas e Premissas

Este estudo bibliográfico se concentra em analisar o histórico e as diferenças entre parques eólicos *onshore* e *offshore*, destacando as potencialidades do sistema HVDC como uma solução tecnológica para os desafios atuais da transmissão de energia em parques eólicos *offshore*. O problema central reside no fato de que, embora a geração eólica *offshore* apresenta elevado potencial energético devido à maior disponibilidade e constância dos ventos, sua integração ao sistema elétrico enfrenta barreiras técnicas e econômicas, sobretudo relacionadas às longas distâncias de transmissão e às elevadas perdas associadas ao uso de sistemas HVAC convencionais.

Partindo do pressuposto de que o sistema HVDC representa uma solução mais viável para a transmissão de energia em parques eólicos *offshore*, especialmente em distâncias superiores às normalmente alcançadas pelos sistemas HVAC, considerando as vantagens da transmissão em HVDC, como menor perda de energia e maior estabilidade na transmissão de potência a longas distâncias, espera-se que essa tecnologia não só otimize o escoamento da energia gerada, mas também aumente a eficiência e a confiabilidade do sistema energético como um todo.

Diante desse contexto, surge a seguinte pergunta-problema: o sistema HVDC é de fato mais viável para a transmissão de energia em parques eólicos *offshore*, especialmente em distâncias superiores às normalmente alcançadas pelos sistemas HVAC?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo sobre a viabilidade técnico-econômica do uso do sistema HVDC para escoar a energia proveniente de parques eólicos *offshore*.

1.3.2 Objetivos Específicos

Visando alcançar o objetivo geral do presente trabalho é necessária a pesquisa e análise dos tópicos a seguir:

- Descrever o surgimento da energia eólica *offshore*;
- Pesquisar sobre o cenário global de parques eólicos *offshore*;
- Descrever o surgimento do sistema HVDC no mundo, bem como suas principais características e aplicações em instalações *offshore*;
- Analisar como o uso de sistemas HVDC em parques eólicos *offshore* podem ser viáveis economicamente.

1.4 Justificativa

Impulsionada pela necessidade de diversificar a matriz energética

proporcionando maior confiabilidade do sistema elétrico brasileiro e mundial e pela constante busca por energias renováveis evidencia a necessidade de tecnologias mais eficazes e mais viáveis tecnicamente e economicamente para a transmissão da energia gerada.

A transmissão de energia elétrica gerada por fontes renováveis, como a eólica, tem se tornado um dos grandes desafios do setor de energia, especialmente na integração de parques eólicos *offshore*.

Assim, este trabalho justifica-se pela necessidade de analisar a viabilidade técnica e econômica da integração da geração eólica *offshore* ao SIN, por meio da transmissão em HVDC, que vêm se destacando como alternativa promissora, pois oferece menor perda de energia em longas distâncias no escoamento da geração e maior flexibilidade de controle, tornando-se uma solução coerente com as exigências de expansão sustentável, confiável e economicamente viável da matriz energética brasileira.

1.5 Metodologia da Pesquisa

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi desenvolvido a partir de uma pesquisa bibliográfica de caráter comparativo, tendo como foco a viabilidade técnico-econômica da transmissão em corrente contínua aplicada a parques eólicos *offshore*, em comparação com a tecnologia em corrente alternada (HVAC).

O estudo foi estruturado em quatro etapas principais:

- 1ª Parte: Realização de uma revisão bibliográfica sobre a geração e transmissão de energia eólica em parques *onshore* e *offshore*, destacando os fundamentos técnicos e o cenário atual da energia eólica no Brasil e no mundo;
- 2ª Parte: Revisão bibliográfica sobre a tecnologia HVDC, abordando seus princípios de funcionamento, vantagens, limitações e diferenciais em relação à tecnologia HVAC;
- 3ª Parte: Análise comparativa entre as tecnologias HVDC e HVAC no escoamento da energia gerada por parques eólicos *offshore*, considerando aspectos técnicos, econômicos e operacionais;

- 4ª Parte: Avaliação da viabilidade da aplicação da transmissão HVDC para parques eólicos *offshore*, com base nos resultados obtidos, buscando identificar em quais condições essa tecnologia se apresenta como a solução mais eficiente e viável para o contexto brasileiro.

A metodologia adotada envolve uma análise qualitativa de dados e informações coletadas, complementada por interpretação da autora sobre o potencial de aplicação da tecnologia HVDC frente às condições do sistema elétrico nacional.

1.6 Estrutura do Trabalho

Este Trabalho de Conclusão de Curso será estruturado da seguinte forma para que seja possível analisar a potencialidade do sistema HVDC como uma solução tecnológica para os desafios atuais da transmissão de energia em parques eólicos *offshore*:

- Capítulo 1 - Introdução: será apresentada a estrutura geral do trabalho, o tema, os objetivos gerais e específicos e delimitação do tema abordado;
- Capítulo 2 - Histórico da geração eólica *offshore* e *onshore*: este capítulo tem como objetivo contextualizar o histórico da geração de energia eólica e sua importância na aplicabilidade no contexto mundial;
- Capítulo 3 - Transmissão com o uso da tecnologia HVDC: este capítulo contextualiza a tecnologia HVDC com suas principais características, diferenças e vantagens com o HVAC no escoamento da energia gerada por energias renováveis para conexão no SIN;
- Capítulo 4 - Aplicação do sistema HVDC em parques eólicos *offshore*: neste capítulo é apresentado sistema HVDC como solução tecnológica para os desafios da transmissão de energia gerada em parques *offshore*;
- Capítulo 5 - Conclusões: por fim este capítulo tem como objetivo explanar as considerações finais sobre os resultados e conclusões da transmissão em CC de energia eólica *offshore*;

2 GERAÇÃO EÓLICA

Este capítulo apresenta uma visão sobre a geração de energia eólica, abordando sua evolução desde os primeiros parques *onshore* até a expansão dos projetos *offshore*, que emergem como etapa mais recente e tecnologicamente avançada no setor e os principais componentes que o constituem.

Há muitos anos, a energia proveniente do vento vem sendo utilizada de diferentes formas. São exemplos dessa aplicação os barcos a vela e moinhos de vento usados no século VII, para moer grãos e bombear água. A técnica do moinho de vento foi aperfeiçoada e popularizada na Europa no século XI e, posteriormente, em meados do século XIX, nos Estados Unidos. O aperfeiçoamento do moinho americano, apresentado na Figura 2, foi o ponto de partida para o início do desenvolvimento das turbinas eólicas atuais (Costa, 2013).

Figura 2 - Moinho de vento americano



Fonte: Energês (2020)

Ao longo dos anos, o desenvolvimento da tecnologia usando a conversão da energia cinética do vento em energia elétrica possibilitou o reconhecimento do potencial dessa fonte e, assim, possibilitando o desenvolvimento contínuo de aerogeradores mais potentes e eficientes. Atualmente, o aerogerador amplamente utilizado no mercado mundial é o de três pás mais longas e aerodinâmicas, eixo horizontal e conta com avançados sistemas de controle (Costa, 2013).

2.1 Histórico e Surgimento da Geração Eólica

A adaptação dos moinhos americanos para gerar energia elétrica surgiu no fim do século XIX. A primeira turbina eólica de grande porte foi instalada em 1888, como por exemplo a mostrada na Figura 3, nos Estados Unidos, na cidade de Cleveland, Ohio, por Charles F. Bush.

Constituído por 144 pás confeccionadas em madeira e 17m de diâmetro, possuía uma torre metálica de 17m e rotativa para melhor proveito do vento (Costa, 2013).

Figura 3 - Aerogerador por Charles F. Bush



Fonte: Revista Pesquisa Fapesp (2007)

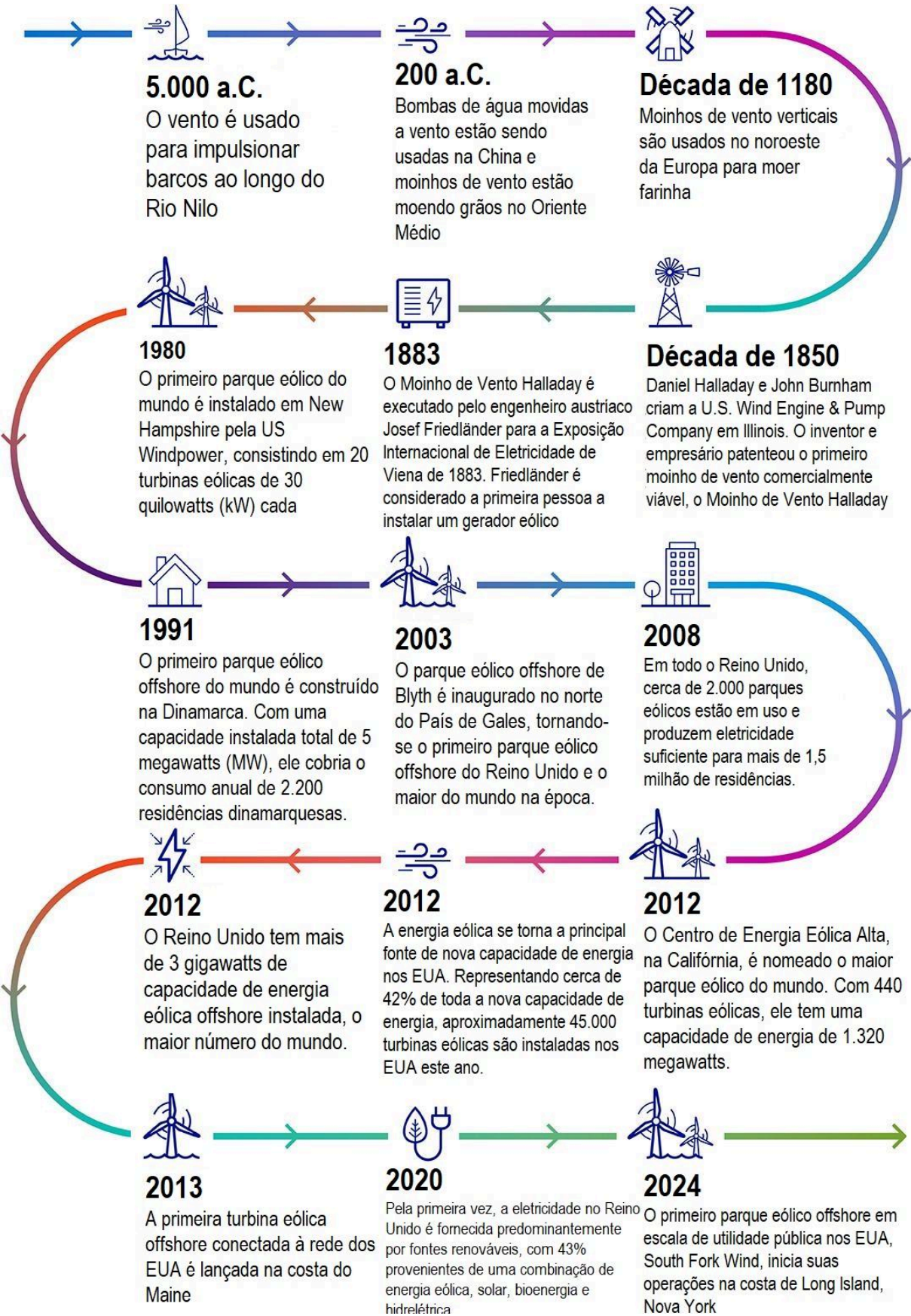
A turbina de Bush possuía 12 kW de potência em corrente contínua e abastecia baterias destinadas a alimentar 350 lâmpadas incandescentes. O aerogerador de Bush manteve-se em operação ao longo de 20 anos, até a desativação em 1908 (Energês, 2020).

Desde o aerogerador de Bush, houve importantes marcos na história da evolução da geração eólica até os dias de hoje, conforme ilustra a Figura 4. Pode-se destacar a US Windpower com a implantação do primeiro parque eólico composto por 20 aerôs de 30 kW (quilowatts) cada em New Hampshire e no Reino Unido o

parque eólico Delabole (Costa, 2013).

Nos anos 1970, em decorrência da crise do petróleo, despertou-se o interesse de diversos países, especialmente a Dinamarca, no investimento em fontes alternativas de energia para suprir suas demandas energéticas. No contexto da energia eólica *offshore* destaca-se o ano de 1991, com a inauguração do primeiro parque eólico *offshore* do mundo, instalado na Dinamarca, e com capacidade instalada total de 5 MW (megawatts). Este parque eólico *offshore* supriu a demanda de um total de 2200 famílias dinamarquesas (National grid, 2024).

Figura 4 - Marcos Históricos da Geração Eólica



Fonte: Adaptado de National grid (2024)

Com o passar das décadas e a evolução dessa fonte de energia, a geração eólica *offshore* consolidou-se como uma das mais promissoras dentre as energias renováveis da atualidade, principalmente devido a liderança da Europa na implantação e desenvolvimento dos parques marítimos, com gigantes do mercado como sueca Vattenfall, a norueguesa Equinor e a alemã Siemens, liderando todas as etapas da implantação e operação dos parques *offshore* (National grid, 2024).

2.2 Característica de um Parque Eólico Offshore

A energia eólica *offshore* é a geração de energia elétrica por meio da conversão da energia mecânica de aerogeradores instalados em áreas marítimas. Uma inovação tecnológica relativamente recente, que tem experimentado expressiva expansão nas últimas décadas, como visto principalmente na Europa, impulsionada por seu elevado potencial de aproveitamento dos recursos eólicos (Costa, 2013).

Os parques eólicos *offshore* apresentam vantagens significativas em relação às instalações *onshore*, sobretudo devido à maior intensidade dos ventos em alto mar, o que resulta em uma maior eficiência na geração de energia (Vaicberg, Valiatt, Ferreira, 2021).

Apesar de manterem princípios construtivos semelhantes aos das turbinas *onshore*, os aerogeradores para sítios *offshore* requerem adaptações estruturais mais robustas, capazes de suportar as adversidades típicas do meio marinho, como ventos intensos, fortes ondulações, corrosão salina e tempestades severas (Vaicberg, Valiatt, Ferreira, 2021).

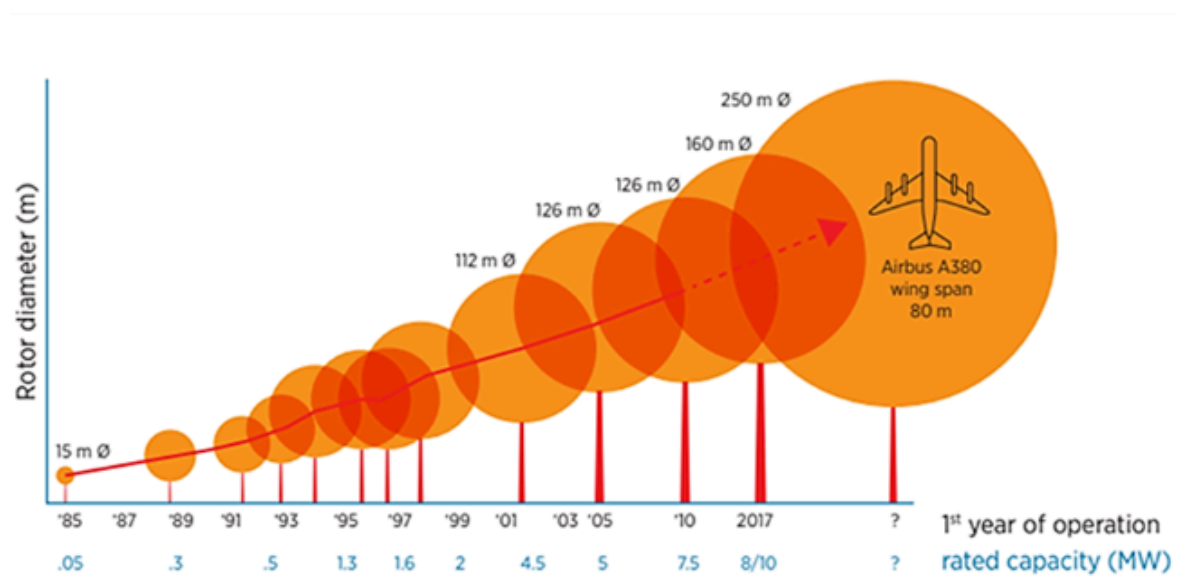
2.2.1 Componentes principais de um aerogerador

A fundação é uma das cinco partes principais de um aerogerador, a torre, a nacelle, o rotor e o conversor completam a composição da instalação. A fundação é elemento essencial na estrutura de quaisquer construção e não diferente dos aerogeradores *offshore*, sendo responsável por garantir a estabilidade do sistema frente às cargas estáticas e dinâmicas atuantes sobre a torre e também decisiva na determinação da construção do parque. A depender da profundidade, pode ser ou não economicamente viável (Correia, Azevedo, 2023).

Há uma tendência crescente na implantação de turbinas de grande porte, com potências nominais significativamente superiores às utilizadas em

empreendimentos *onshore*. Esse aumento de escala impõe exigências mais rigorosas quanto à seleção do tipo de fundação, além de demandar estruturas e soluções de engenharia mais robustas, o que caracteriza uma distinção entre os sistemas *offshore* e *onshore*. O gráfico 1 ilustra o crescimento contínuo do diâmetro dos rotores e da capacidade nominal das turbinas ao longo das últimas décadas. Para fins de comparação, destaca-se que o diâmetro das turbinas superiores à 4,5MW já supera a envergadura de um Airbus A380 (80 metros) (EPE, 2020).

Gráfico 1 - Diâmetro do rotor *versus* potência



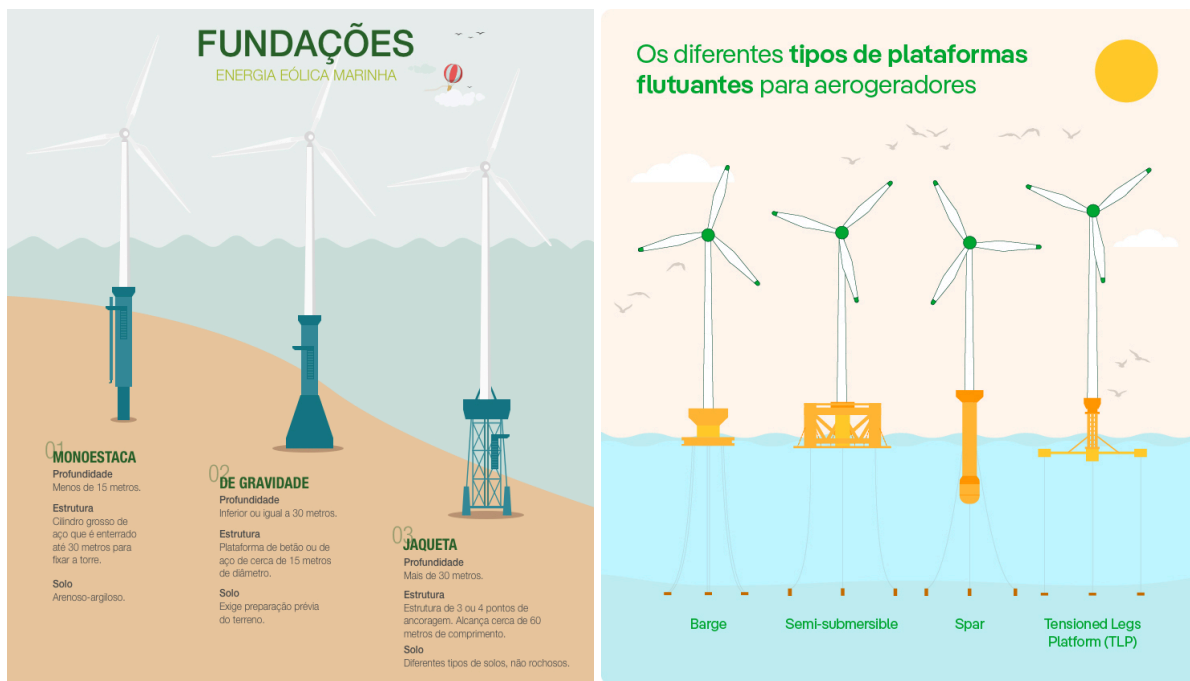
Fonte: Roadmap Eólica *Offshore* Brasil, EPE (2020)

A escolha do tipo de fundação deve considerar diversos fatores técnicos, como a profundidade da água, as ações das ondas, as características geotécnicas do solo marinho, os custos envolvidos, bem como o porte e a altura das turbinas, além da velocidade máxima dos ventos na região de instalação (Correia, Azevedo, 2023).

Atualmente, as fundações podem ser classificadas em dois grandes grupos: as fixas e as flutuantes (ou estaiadas). A Figura 5 mostra os tipos de fundações usadas em usinas eólicas *offshore*, mostradas à esquerda, especialmente do tipo monopile, continuam sendo as mais utilizadas nos parques eólicos *offshore* em todo o mundo, com aplicação predominante em áreas com profundidade de até sessenta metros. Os aerogeradores flutuantes, mostrados à direita da Figura 5, utilizam sistemas de ancoragem com estais, semelhantes aos das plataformas *offshore* de petróleo e gás, e podem ser instalados em locais com profundidade acima de 60m.

Assim, apresentam um potencial significativo de expansão da área de atuação da geração eólica, possibilitando a instalação em regiões mais afastadas da costa, onde os ventos são mais constantes e intensos (Vaicberg, Valiatt, Ferreira, 2021).

Figura 5 - Fundações Geradores Offshore



Fonte: Iberdrola (2024)

A torre é a estrutura cônica base para a sustentação do rotor e da nacela. Confeccionadas de aço ou concreto, as torres são responsáveis por conferir altura aos aerogeradores e posicioná-los na elevação ideal para a geração de energia. Em seu interior, há um elevador utilizado pelas equipes de manutenção, o que facilita o acesso à nacela e contribui para maior eficiência e segurança nas intervenções técnicas (Vaicberg, Valiatt, Ferreira, 2021).

A nacela, localizada no topo da torre, abriga os principais componentes mecânicos e eletrônicos do aerogerador, como o gerador, a caixa multiplicadora, o sistema de controle e o eixo principal. Além de ser o compartimento mais pesado da estrutura, podendo ultrapassar 72 toneladas conforme o fabricante, ela funciona como uma espécie de casulo que protege e organiza os sistemas responsáveis pela geração de energia (Vaicberg, Valiatt, Ferreira, 2021).

O rotor, também chamado de hub, é a parte responsável por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica. Consiste na composição das pás da hélice e suporte para fixação, tem a função essencial de transmitir o movimento de

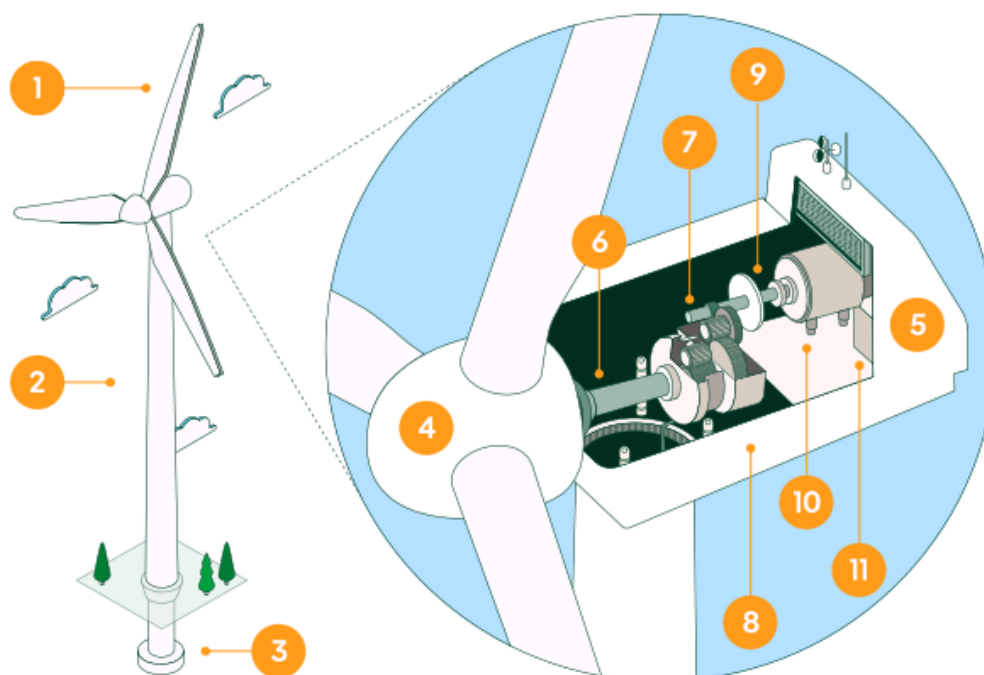
rotação do eixo das pás para o gerador, por meio de uma caixa multiplicadora sendo responsável por alinhar as pás ao ângulo de ataque ideal para maximizar a captação de energia (Vaicberg, Valiatt, Ferreira, 2021).

Os conversores são responsáveis por adequar a qualidade da energia gerada, ajustando a frequência e a tensão, para que possam ser transmitidas adequadamente à rede elétrica. Tratam-se de equipamentos volumosos e pesados, que representam custos consideráveis na construção da torre, na instalação da turbina e nas atividades de manutenção. Atualmente, pesquisas têm se concentrado no desenvolvimento de tecnologias baseadas em semicondutores e materiais magnéticos, com o objetivo de reduzir o tamanho e o peso desses componentes (Vaicberg, Valiatt, Ferreira, 2021).

A Figura 6 mostra uma representação esquemática das principais partes constituintes de um aerogerador. A estrutura externa do aerogerador é composta por elementos fundamentais: 1 e 4 partes do rotor, 2 torre, 3 fundação e 5 nacele. No interior da nacele localizam-se os sistemas eletromecânicos que compõem o aerogerador. O cubo (item 6) é o elemento que fixa as pás e transmite o movimento rotacional para o eixo principal. O eixo principal (7) conduz esse movimento até a caixa multiplicadora (8), cuja função é elevar a rotação recebida para níveis compatíveis com a operação do gerador (9), responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica (Iberdrola, 2024).

Além desses componentes, a nacele abriga o sistema de controle eletrônico (10), responsável pelo monitoramento e regulação das variáveis operacionais da turbina. O sistema de yaw (11) orienta a nacele em relação à direção do vento, assegurando o melhor desempenho aerodinâmico (Iberdrola, 2024).

Figura 6 - Partes de um aerogerador



Fonte: Iberdrola (2024)

2.2.2 Transmissão de energia *Offshore*

Com a expansão dos parques eólicos em regiões cada vez mais afastadas da costa, os custos associados à transmissão da energia gerada tornam-se mais expressivos, especialmente devido à necessidade de cabos submarinos de maior extensão. Segundo Tavares (2010), os principais sistemas utilizados para a transmissão de energia em projetos *offshore* são: HVAC, HVDC LCC (Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua com Conversores de Comutação) e HVDC VSC (Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua com Conversores de Comutação Forçada do tipo Fonte de Tensão).

Dentre essas tecnologias, o sistema HVAC permanece como o mais empregado, sobretudo em razão de sua consolidação histórica. Por ser a tecnologia mais antiga, passou por diversas melhorias ao longo do tempo, o que contribuiu para a redução de custos e para o aumento da eficiência na transmissão elétrica, especialmente em distâncias de até 50 km (Tavares, 2010).

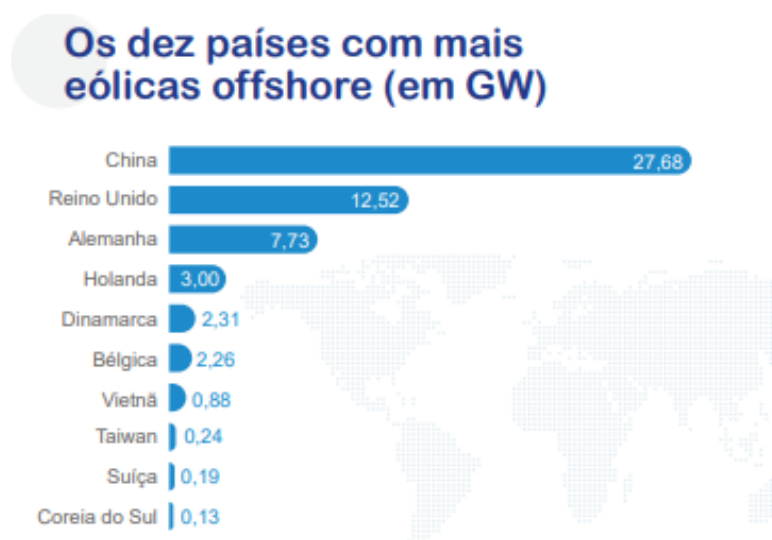
Nesse contexto, o sistema de transmissão seja em corrente contínua ou alternada exerce papel fundamental nos projetos de parques eólicos *offshore*, pois

são responsáveis por estabilizar e elevar a tensão da energia elétrica produzida, junto às subestações, viabilizando sua transmissão com maior eficiência. Além disso, funcionam como ponto de interligação entre o sistema de geração *offshore* e a malha elétrica nacional.

2.3 Overview Do Cenário Global De Parques Eólicos *Offshore*

A energia eólica *offshore* tem ganhado destaque no cenário global, com mais de 57 GW de capacidade instalada em países como China, Reino Unido, Alemanha e Holanda. A China lidera com 27,68 GW, seguida pelo Reino Unido com 12,52 GW e pela Alemanha com 7,73 GW, como mostra o Gráfico 2 (ABEEólica, 2022).

Gráfico 2 - Capacidade instalada de energia eólica *offshore* por país (em GW)



Fonte: ABEEólica (2022)

Desde 2010, a capacidade de novas instalações *offshore* vem crescendo de forma expressiva, refletindo o avanço tecnológico. A participação da energia eólica *offshore* nas novas instalações globais passou de apenas 1% em 2010 para até 10% em 2021, indicando sua crescente relevância na matriz energética mundial, segundo o Infovento *Offshore* de Setembro de 2022, Edição 01 da ABEEólica.

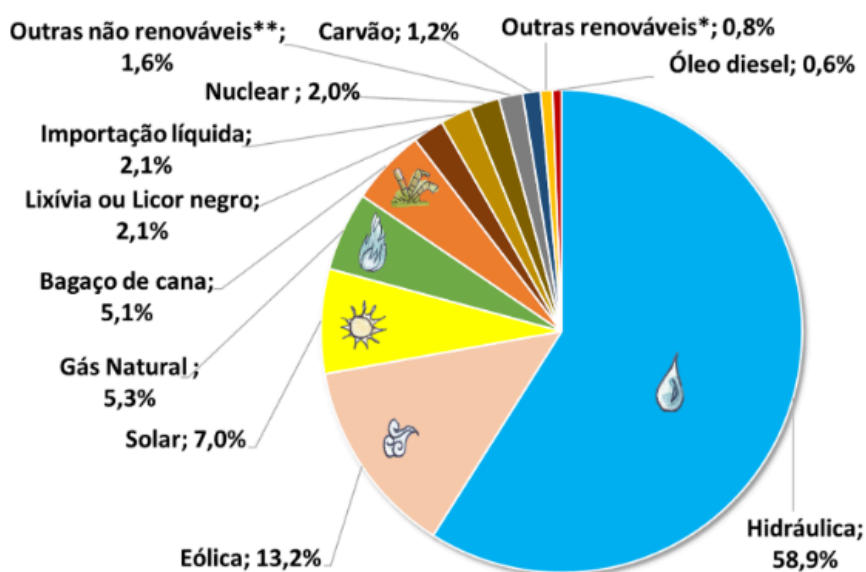
Entre os principais benefícios dessa tecnologia estão o maior fator de capacidade, em comparação com outras fontes renováveis, menor variabilidade na geração de energia e a geração de empregos: estima-se a criação de 17 postos de trabalho por MW instalado ao longo dos 25 anos de vida útil de um projeto. Além disso, a tecnologia está em processo de barateamento, com previsão de queda de

35% a 49% no custo nivelado de energia (LCOE - *Levelized Cost of Energy*) nos próximos anos. Esses fatores posicionam a eólica *offshore* como uma alternativa estratégica para a descarbonização da matriz energética global, contribuindo diretamente para o cumprimento de metas climáticas e para a segurança energética dos países (ABEEólica, 2022).

2.4 Potencial Eólico *Offshore* no Brasil

A energia eólica ocupa a segunda posição, 13,2%, entre as principais fontes energéticas no Brasil, sendo superada apenas pela energia hidrelétrica segundo a matriz elétrica da EPE de 2023, mostrada no Gráfico 3. A escolha das regiões para a instalação das turbinas eólicas não ocorre de forma aleatória, são considerados diversos fatores técnicos, como o potencial eólico *offshore* de cada local.

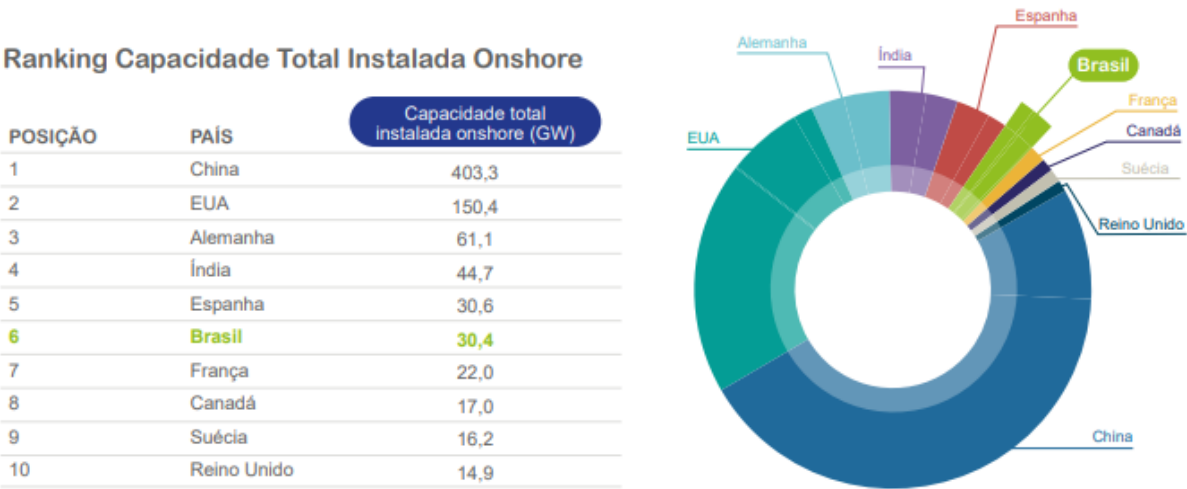
Gráfico 3 - Matriz elétrica brasileira



Fonte: EPE (2023)

De acordo com dados da ABEEólica, o país ocupa a 6ª posição no ranking mundial de capacidade instalada *onshore*, com 30,4 GW, ficando atrás de países como China (403,3 GW), Estados Unidos (150,4 GW) e Alemanha (61,1 GW), conforme mostrado no gráfico 4.

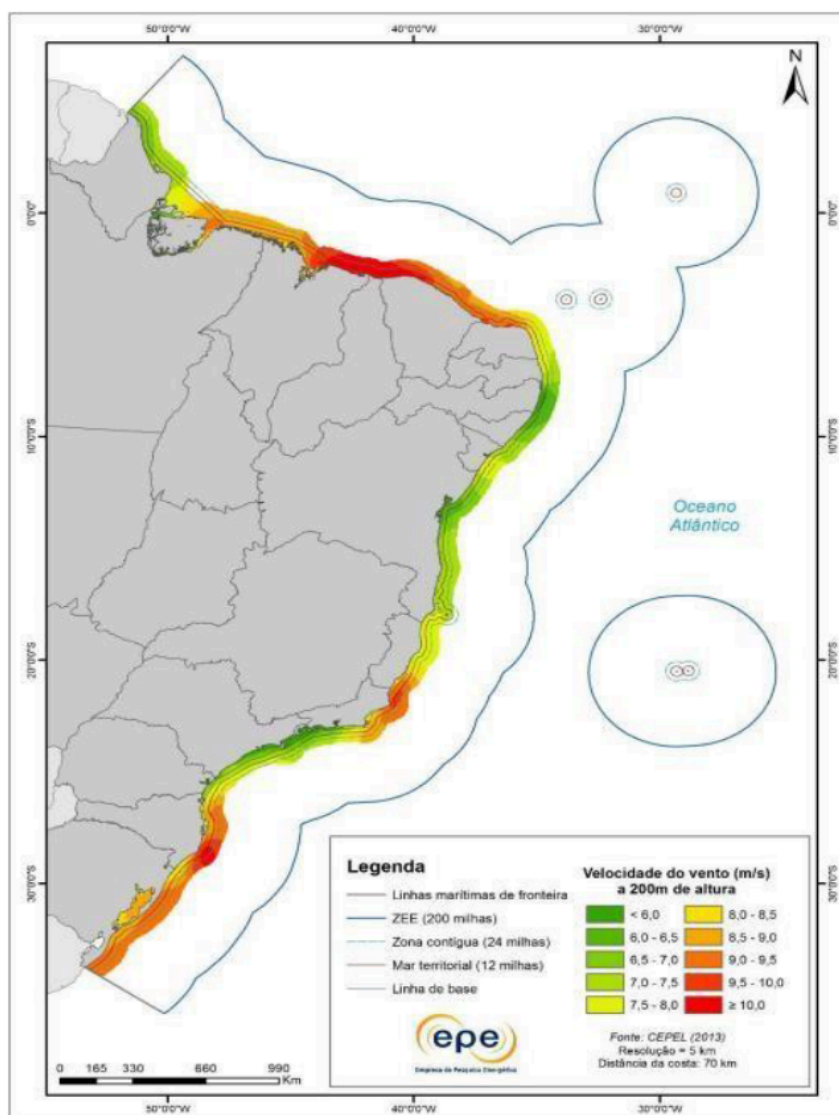
Gráfico 4 - Capacidade total instalada mundial (GW)



Fonte: ABEEólica (2023)

O Brasil apresenta elevado potencial para a expansão da energia eólica em todas as regiões costeiras do país, sobretudo nos litorais do Nordeste, do Rio de Janeiro e do Sul. Na Figura 7, está representada a velocidade do vento em cada região da costa brasileira a uma altura de 200m (EPE, 2020).

Figura 7 - Potencial eólico a 200m de altura



Fonte: Roadmap Eólica Offshore Brasil, EPE (2020)

A região Nordeste do Brasil apresenta condições ideais para a geração de energia eólica *offshore*, com velocidades médias de vento entre 7 m/s e 10 m/s em águas rasas próximas à costa. Estima-se um potencial técnico de 356 GW em uma área marinha viável de 89 mil km². Regiões próximas ao Porto do Pecém são especialmente promissoras, embora existam desafios relacionados à presença de comunidades pesqueiras e ao turismo, o que impõe a necessidade de planejamento a impactos sociais e ambientais (Roadmap Eólica Offshore Brasil, EPE, 2020).

No Sudeste, o potencial também é expressivo, estimado em 340 GW em uma área de 85 mil km², com ventos médios de 8 m/s. A presença de atividades petrolíferas em águas profundas representa tanto um desafio de instalação quanto uma oportunidade, por meio do aproveitamento de infraestrutura existente.

Adicionalmente, o tráfego marítimo intenso na região demanda estratégias específicas para evitar interferências nas rotas de navegação (Roadmap Eólica *Offshore* Brasil, EPE, 2020).

Já o Sul do país possui a maior área de leito marinho entre as regiões analisadas (165 mil km²) e o maior potencial, estimado em 660 GW, com ventos superiores a 8 m/s. A proximidade com centros industriais é um ponto favorável, mas a localização quase integral dentro de uma Área Marinha Ecologicamente ou Biologicamente Significativa (EBSA) implica em maiores exigências quanto à mitigação de impactos ambientais e à delimitação das áreas destinadas à instalação de turbinas eólicas *offshore* (Roadmap Eólica *Offshore* Brasil, EPE, 2020).

2.5 Perspectiva Futura Eólica *Offshore* No Brasil

Atualmente, não há parques eólicos *offshore* em operação em território brasileiro, mas avança na direção da implantação. O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) está analisando mais de 60 projetos de eólica *offshore*, que somam mais de 160 GW de capacidade instalada em avaliação. Esses projetos estão distribuídos ao longo da costa brasileira, apresentados na Figura 8, com destaque para o Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte.

Figura 8 - Parques em licenciamento ambiental



Fonte: ABEEólica (2022)

Em janeiro de 2022, o Governo Federal publicou o Decreto nº 10.946, que

trata da cessão de uso de espaços físicos e do aproveitamento dos recursos naturais no mar para geração de energia elétrica. Além disso, tramita no Congresso Nacional o Projeto de Lei nº 576/2021, que busca estabelecer um marco legal definitivo para o setor (ABEEólica, 2022).

Portanto, diante do panorama apresentado, evidencia-se o potencial da geração de energia eólica *offshore*, tanto no cenário internacional quanto, principalmente, no contexto brasileiro. Com a rápida e crescente evolução tecnológica e nas características do alto potencial de geração dos parques instalados em alto-mar, essa solução mostra-se promissora para a expansão da matriz energética renovável. A combinação entre maior intensidade dos ventos em áreas marítimas e os avanços em aerogeradores robustos justifica os crescentes investimentos no setor. Na sequência, é abordada a tecnologia de transmissão em HVDC, para o escoamento da energia gerada em locais remotos, como é o caso dos parques eólicos *offshore*.

3 TRANSMISSÃO COM O USO DA TECNOLOGIA HVDC

Este capítulo aborda o surgimento e a evolução dos sistemas de transmissão em HVDC, destacando as principais configurações, tecnologias e aplicações dessa solução ao longo do tempo. Inicialmente, são discutidas as motivações históricas que impulsionaram o desenvolvimento do HVDC, seguido da apresentação de seus diferentes tipos e topologias, incluindo as tecnologias baseadas em conversores a tiristores (LCC) e conversores auto comutados (VSC).

O HVDC vem se destacando como solução para a transmissão de energia elétrica a longas distâncias. Utilizando corrente contínua, esse sistema permite a redução de perdas elétricas, maior controle sobre o fluxo de potência e integração de fontes renováveis, como parques eólicos *offshore* (Santos, 2022).

Com avanços significativos em conversores eletrônicos e materiais semicondutores, o HVDC vem se tornando uma alternativa viável e estratégica frente às limitações dos sistemas tradicionais em corrente alternada, sobretudo em projetos de grande escala e interligações internacionais como nos casos de conexão do Brasil com o Paraguai (6.300 MW), Argentina (2.000 MW) e Uruguai (500 MW), através de sistemas *back-to-back* e na usina de Itaipu, cuja geração binacional em 60 Hz (Brasil) e 50 Hz (Paraguai) exigiu a implantação de duas linhas bipolares HVDC do tipo LCC ± 600 kV e capacidade de transmissão de 6.300 MW.

3.1 Contexto Histórico

O sistema HVDC iniciou no final do século XIX, em 1880, na chamada “Guerra das correntes”, travada por Thomas Edison e Nikola Tesla na ascensão da eletricidade, na qual a disputa era entre os sistemas de transmissão em corrente contínua, defendida por Edison e a corrente alternada defendida por Tesla e George Westinghouse (Energy.gov, 2013).

Thomas A. Edison defendia a transmissão em CC, apoiado por empresários como o banqueiro e financista americano J.P Morgan, que em 1900 fundou a GE, argumentando como melhor meio de transmissão e mais seguro. Do outro lado, o físico austro-húngaro Nikola Tesla, com o apoio de George Westinghouse, defendia a transmissão CA, amparado na redução das perdas devido a capacidade de variar a tensão (Energy.gov, 2013).

Apesar da adoção inicial da corrente contínua, a corrente alternada se consolidou como padrão no sistema elétrico global. No entanto, a corrente contínua retornou ao cenário da engenharia elétrica em 1954, com a implementação da primeira linha de transmissão submarina em corrente contínua do mundo, interligando a Ilha de Gotland ao continente sueco, apresentada na Figura 9. Este projeto, desenvolvido pela empresa sueca ASEA (hoje ABB), operava com válvulas de arco de mercúrio, potência de 20 MW e extensão de 96 km, sendo considerado o ponto de partida da aplicação comercial do HVDC (Cândido, 2022).

Figura 9 - Obras da construção da primeira linha de transmissão HVDC



Fonte: HITACHI (2025)

Em 1956, a GE apresentou ao mercado soluções baseadas em tiristores, o que marcou o início de uma nova era para a tecnologia HVDC. A partir da década de 1970, com os avanços nos dispositivos semicondutores, como os Tiristores Controlados por Gate (GTO), os Transistores Bipolares de Porta Isolada (IGBT) e os Tiristores Comutados por Gate (IGCT), houve significativo aumento da capacidade de transmissão, elevação da tensão e redução das perdas por efeito Joule. Tais avanços contribuíram para a viabilização técnica e econômica de projetos de grande escala (Cândido, 2022).

A primeira linha de transmissão HVDC com uso de tiristores foi implementada em 1972, entre Eel River, em Quebec, e New Brunswick, no Canadá, com capacidade de 320 MW. A partir de então, diversos projetos HVDC do tipo LCC (Line Commutated Converter) foram instalados em todo o mundo, impulsionados pela necessidade de modernização das redes de transmissão e integração de fontes geradoras distantes.

Em 1997, foi inaugurado na Suécia o primeiro projeto HVDC com conversores

do tipo VSC (*Voltage Source Converter*), operando com 3 MW de potência e tensão de 10 kV. Esse tipo de conversor, baseado em IGBTs, trouxe importantes vantagens, como a possibilidade de controle independente de potência ativa e reativa, maior compacidade das subestações conversoras e viabilidade de conexão em redes fracas ou isoladas. Desde então, o sistema HVDC, especialmente em sua configuração VSC, tem ganhado destaque na integração de fontes renováveis, como parques eólicos *offshore*.

3.2 Sistema HVDC

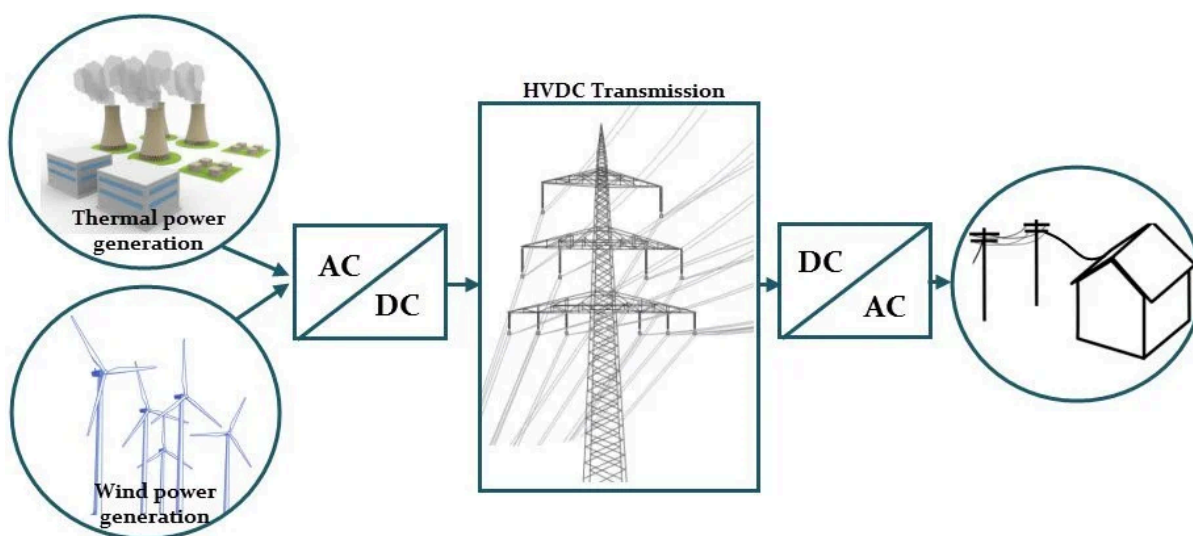
O HVDC é utilizado para transmissão de energia em longas distâncias, via linhas aéreas ou submarinas, e também em conexões onde não é permitida ou viável HVAC. Oferecem várias vantagens em comparação a corrente alternada em transmissões distantes.

Um sistema de transmissão HVDC é constituído resumidamente por quatro partes, segundo Montibeller em 2020, são elas:

- Estações de conversões, podendo ser CA-CC, CC-CA ou ainda CC-CC responsáveis por retificar e converter a corrente em contínua/alternada, os conversores são a interface do sistema CC com o sistema CA, são baseados em comutadores eletrônicos controláveis ou válvulas em configuração de ponte trifásica;
- Linhas de transmissão, podendo ser aéreas, subterrâneas ou marítimas e são projetadas e especificadas para suportar alta tensão e reduzir perdas e são responsáveis por transmitir a energia;
- Sistemas de controle monitorando e controlando a operação com a finalidade de garantir a estabilidade e confiança da rede;
- E por fim, os transformadores utilizados para variar a tensão nos pontos desejados para integrar as redes e reduzir as perdas com a elevação da tensão.

A energia gerada na unidade geradora em CA, podendo ser das mais diversas fontes, é convertida na estação retificadora por meio dos retificadores, transformadores e pontes valvuladas e transmitida ao longo da linha de transmissão em CC e então convertida novamente em CA, por meio de inversores exemplificadas na Figura 10 e a potência ao longo do sistema é mantida igual no início e no fim.

Figura 10 - Sistema de transmissão HVDC



Fonte: Electrical e Library (2024)

3.3 Principais Tipos de HVDC

No sistema HVDC existe diferentes tipos, com características específicas e atendem necessidades diversas na transmissão de energia, os principais tipos, suas características e aplicações são:

- LCC ou CSC - *Line Commutated Converter* ou *Current Sourced Converter* (HVDC por conversão de linha a linha ou conversor por fonte de corrente): são conversores que operam com a rede em CA e realizam a conversão para CC, utiliza-se tiristores SCR como dispositivos de controle e é mais eficiente em longas distâncias e interconexões entre países (Santos, 2022);
- VSC - *Voltage Source Converter* (HVDC por conversão por fonte de tensão): são conversores que podem operar de forma independente e não dependem de uma fonte AC, são utilizados os dispositivos IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) e podem operar com a transferência de energia em ambas as direções, mais utilizado em parques eólicos *offshore* e parques solares (Santos, 2022);

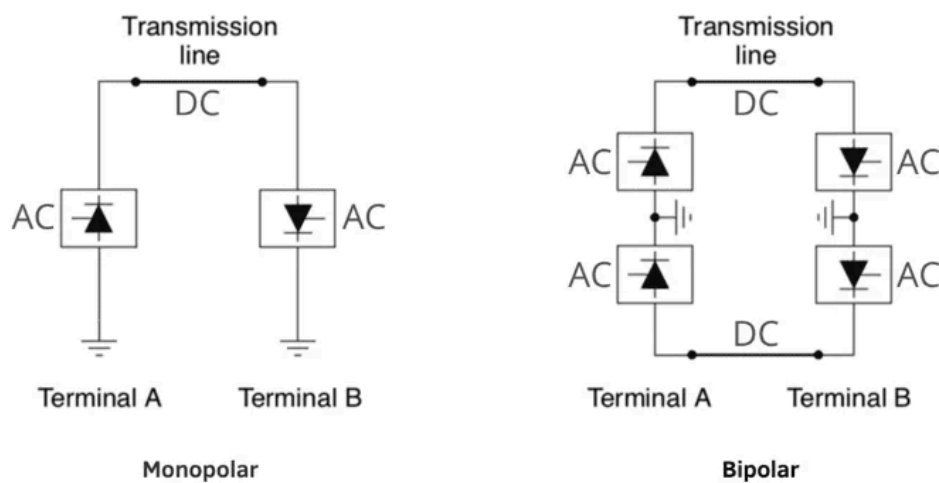
3.3.1 Elo CC Monopolar

A configuração elo CC Monopolar é constituída por apenas uma linha conectando duas estações conversoras e é via terra ou mar o caminho de retorno, com ajuda de eletrodos de aterramento, representado à esquerda da Figura 11 (Santos, 2022).

3.3.2 Elo Bipolar

A configuração elo CC Bipolar, também conhecida como bipolo (\pm) é a configuração mais utilizada em transmissão HVDC, constituído por dois condutores operando com polaridade positiva e negativa respectivamente e conta com a estrutura da torre aterrada. E essa configuração permite, em caso de falha em um dos condutores, operar na configuração Monopolar com a metade da carga, representado à direita da Figura 11 (Santos, 2022).

Figura 11 - Ligação monopolar e bipolar



Fonte: Santos (2022)

3.3.3 Elo CC Homopolar

A configuração elo CC Homopolar é operada com dois ou mais condutores em paralelo com a mesma polaridade, costuma-se ser o polo negativo, e o retorno à terra.

3.3.4 Elo CC Multiterminal

A configuração elo CC Multiterminal, como diz o nome, é operada em uma rede de transmissão com três ou mais conversores CC interligados, adequada para onde haja necessidade de transmissão de uma quantidade maior de energia

3.3.5 Back-To-Back

A configuração *Back-to-Back* é um sistema utilizado para conectar redes assíncronas onde o módulo retificador e o conversor estão próximos e não há necessidade de instalação de uma linha de transmissão.

3.4 Vantagens e Desvantagens

O sistema de transmissão HVDC oferece vantagens em relação ao sistema HVAC em linhas de longas distâncias, maiores que 600-800 Km aéreas, ou maiores de 40-70 Km submarinas, interligação de diferentes frequências e interconexões entre países como nas conexões *back-to-back*, usadas em casos que a distância é curta e não necessitam de linha de transmissão apenas das estações conversoras e retificadoras. Nesse caso, a corrente pode ser mantida alta e a tensão baixa criando uma interconexão assíncrona entre duas redes CA e maior controle de potência entre duas redes CA (Montibeller, 2020).

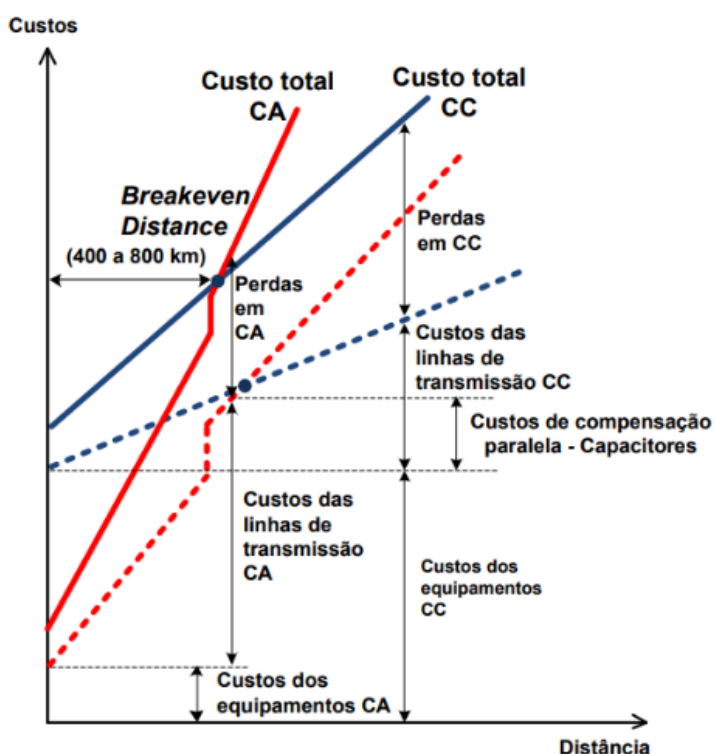
As transmissões em HVDC apresentam menos perdas, menos efeito corona e interferências radioelétricas comparados a linhas CA, e gerando uma perda em linhas de 895 Km e $\pm 450\text{kV}$ inferior a 5MW, isso em decorrência da ausência de frequência. Usadas para conexão de fontes de energia renováveis distantes como parques solares e sítios eólicos inclusive *offshore*, ponto positivo para o HVDC no Brasil visto a extensão territorial (Montibeller, 2020).

Além das vantagens do HVDC para longas distâncias e interligação de diferentes frequências, promovendo confiabilidade no sistema, essa tecnologia de corrente contínua também apresenta algumas desvantagens como o custo elevado da instalação devido a instalação das unidades conversoras das pontas (valor das válvulas tiristoras) e de filtros para filtrar a geração de harmônicos na retificação e conversão, e também apresenta como uma desvantagem a dificuldade de seccionamento que se opõe à relativa facilidade em seccionar uma linha energizada em CA (Montibeller, 2020).

O Gráfico 5 compara os custos associados à transmissão de energia em corrente alternada e corrente contínua em função da distância, destacando o ponto de equilíbrio econômico entre as duas tecnologias, conhecido como *Breakeven Distance* segundo Montibeller, que varia entre 400 e 800 km. Embora os custos

iniciais dos equipamentos para sistemas em CC sejam mais elevados, os custos das linhas e as perdas de energia ao longo da distância são significativamente menores em comparação com os sistemas CA, que demandam compensações adicionais como banco de capacitores em paralelo ao sistema. Assim, a partir de determinada distância, a transmissão em CC se torna economicamente mais vantajosa, justificando sua escolha em projetos de transmissão de longa distância, como em parques eólicos *offshore*.

Gráfico 5 - Comparação custo vs distância de linhas CC e CA



Fonte: Montibeller (2020)

O sistema HVDC vem se consolidando como alternativa para superar os desafios da transmissão em HVAC impostos pelas grandes distâncias e complexidades de transmissão da energia gerada em ambientes *offshore*. A tecnologia oferece vantagens como maior estabilidade, menores perdas e maior controle sobre o fluxo de potência. Ainda que os custos iniciais sejam mais elevados, os benefícios operacionais e econômicos justificam sua aplicação, especialmente em projetos de larga escala. O próximo capítulo apresentará como o HVDC pode ser aplicado diretamente na transmissão da energia gerada por parques eólicos *offshore*.

4 VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA DA TRANSMISSÃO EM HVDC DE PARQUES EÓLICOS *OFFSHORE*

A viabilidade da transmissão de energia em parques eólicos *offshore* constitui um dos principais desafios para a consolidação dessa modalidade no Brasil e no mundo. A distância em relação à costa, a necessidade de cabos submarinos de grande extensão e os elevados custos de instalação tornam essencial a escolha adequada da tecnologia de escoamento da energia gerada.

Nesse contexto, os sistemas de transmissão em alta tensão, tanto em corrente alternada quanto em corrente contínua, assumem papel estratégico, cada uma apresentando vantagens e limitações, devido a suas características, que devem ser analisadas de forma crítica e minuciosa em cada projeto.

Segundo Santos (2022), a utilização de fontes inesgotáveis de energia tem sido cada vez mais crescente no mundo, e a energia eólica destaca-se como uma das principais fontes renováveis, com grande potencial de geração elétrica a partir da força dos ventos. No Brasil, trata-se da fonte limpa que mais se destacou nos leilões de implantação, havendo duas possibilidades de aproveitamento: na terra ou no mar. Neste último caso, os parques eólicos apresentam como vantagem a maior velocidade dos ventos, o que potencializa a produção energética.

Na Europa já foram instalados 1.558 MW de energia eólica *offshore* apenas em 2016, totalizando uma potência acumulada de 12.631 MW, e a capacidade mundial já se aproxima de 500 GW, mas ainda permanece como um dos maiores desafios a transmissão eficiente dessa energia produzida (Santos, 2022).

Este capítulo busca examinar a viabilidade técnico-econômica da transmissão em HVDC aplicada a parques eólicos *offshore*, abordando a topologia dos sistemas de integração, as vantagens e desvantagens das principais alternativas tecnológicas e um comparativo técnico e econômico entre os sistemas HVAC e HVDC.

O objetivo é oferecer uma visão sobre a viabilidade da transmissão em corrente contínua de parques *offshore* no Brasil e no mundo, considerando aspectos como confiabilidade, perdas elétricas, custos de implantação e sustentabilidade do sistema energético.

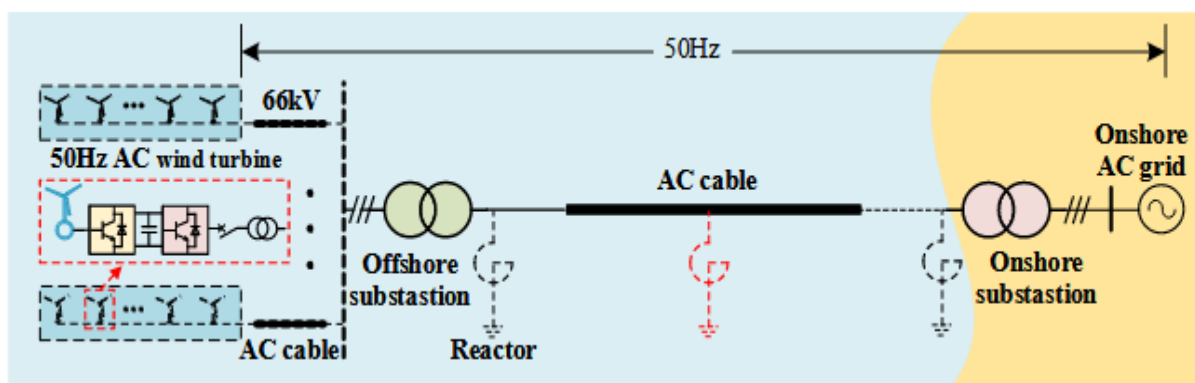
4.1 Topologia dos Sistemas de Integração da Energia Eólica Offshore

A integração da energia eólica *offshore* ao sistema elétrico pode ser realizada por diferentes configurações tecnológicas de transmissão, cuja escolha depende de fatores como a distância em relação à costa, a profundidade do mar, a capacidade instalada do parque e as condições econômicas do projeto. Na literatura, destacam-se a corrente alternada de alta tensão (HVAC), a corrente contínua de alta tensão (HVDC), a corrente alternada de baixa frequência (LFAC) e o All-DC.

4.1.1 Topologia HVAC

O sistema HVAC tem sido tradicionalmente empregado em parques localizados próximos à costa, segundo Shi, Xiang, Wen (2024). Os aerogeradores são conectados em corrente alternada por meio de cabos CA até a subestação elevadora *offshore*. Nessa subestação, a tensão é ajustada para níveis adequados de transmissão, permitindo o transporte da energia por cabos submarinos em corrente alternada até a subestação em terra. Na subestação *onshore*, a energia é integrada à rede elétrica de corrente alternada terrestre, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Topologia HVAC



Fonte: Shi, Xiang, Wen (2024).

Sua aplicação, no entanto, é limitada pela capacitância dos cabos submarinos, que gera correntes reativas crescentes com o aumento da distância de transmissão. Para viabilizar projetos de maior porte, torna-se necessário instalar equipamentos de compensação reativa em ambas as extremidades ou em trechos

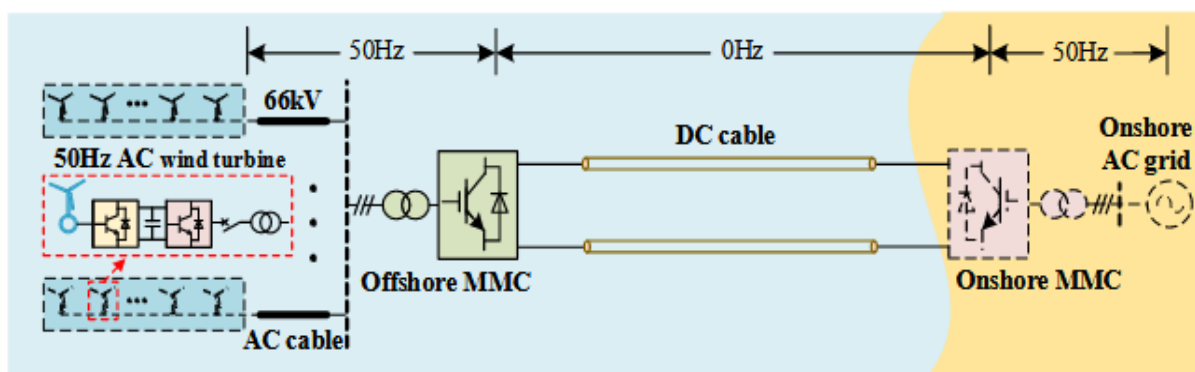
intermediários da linha, como ocorre em empreendimentos de grande escala no Reino Unido, a exemplo dos projetos Hornsea 1 e Hornsea 2 (Shi, Xiang, Wen, 2024).

4.1.2 Topologia HVDC

Já o sistema HVDC, atualmente predominante em parques instalados em águas profundas, utiliza conversores modulares multiníveis (MMC), permitindo maior capacidade de transmissão e alcance de distâncias consideravelmente maiores em comparação com a distância do HVAC.

A topologia típica do HVDC prevê que os aerogeradores geram energia em corrente alternada, que é transmitida até a subestação *offshore* por cabos CA. Nessa subestação, ocorre a conversão de corrente alternada para corrente contínua por meio de conversores modulares multiníveis (MMC). A energia em corrente contínua é então transportada por cabos submarinos até a subestação *onshore*, onde outro conversor MMC realiza a conversão inversa, de corrente contínua para corrente alternada, permitindo a integração da energia ao sistema elétrico, esse arranjo está representado na Figura 13 (Shi, Xiang, Wen, 2024).

Figura 13 - Topologia HVDC



Fonte: Shi, Xiang, Wen (2024).

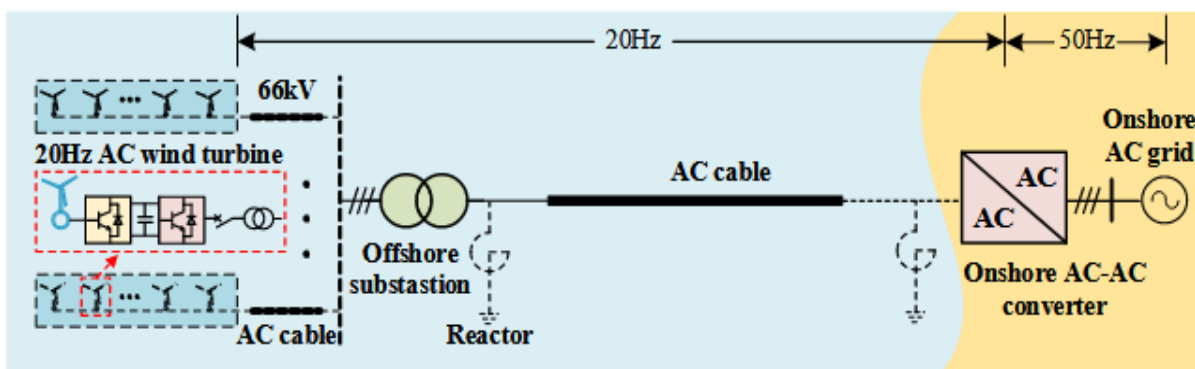
Esse modelo já está consolidado em projetos de referência internacional, como os complexos BorWin, na Alemanha, voltados à integração de grandes blocos de geração eólica *offshore* (Shi, Xiang, Wen, 2024).

4.1.3 Topologia LFAC

Outra alternativa, ainda em estágio de aplicação inicial, é o LFAC. Originalmente concebida para usinas hidrelétricas, essa solução tem despertado interesse renovado para o cenário *offshore*, uma vez que a redução da frequência de operação minimiza perdas e efeitos capacitivos nos cabos submarinos. Em 2023, um projeto de 220 kV e 300 MW entrou em operação na China, sendo considerado um marco para a demonstração da viabilidade técnica dessa abordagem (Shi, Xiang, Wen, 2024).

Os aerogeradores no sistema LFCA são conectados em corrente alternada a por meio de cabos CA até a subestação *offshore*. Nessa subestação, a frequência da corrente alternada é convertida de 50 Hz para 20 Hz, o que possibilita a redução das perdas capacitivas associadas ao transporte de energia em longas distâncias através de cabos submarinos de corrente alternada. A energia é transmitida por cabos CA em baixa frequência até a subestação em terra. Na chegada ao continente, utiliza-se um conversor AC-AC, responsável por converter a frequência de 20 Hz novamente para 50 Hz, de forma a permitir a integração da energia gerada ao sistema elétrico, como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Topologia LFCA



Fonte: Shi, Xiang, Wen (2024).

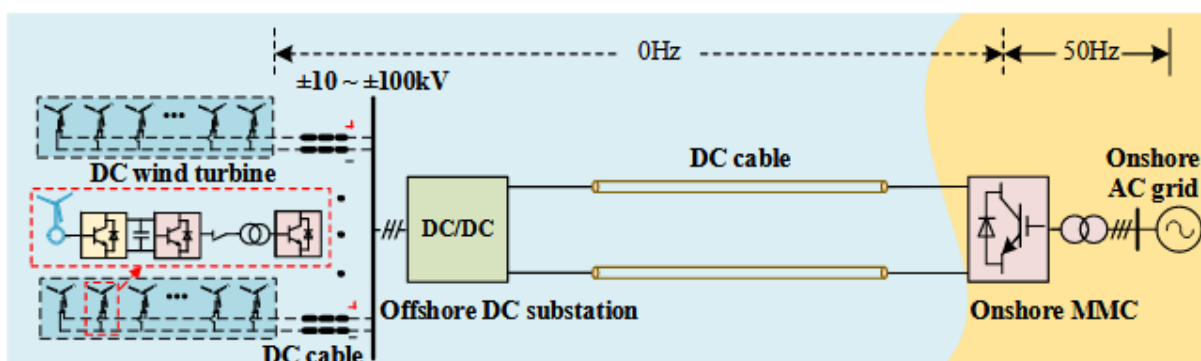
4.1.4 Topologia All-DC

Por fim, surge como proposta ainda teórica o conceito All-DC, que utiliza cabos de coleta em corrente contínua. Nesse arranjo, mostrado na Figura 15, cada turbina é equipada com um conversor capaz de gerar energia diretamente em

corrente contínua associado a um transformador de frequência intermediária, responsável por elevar a tensão ao nível do sistema coletor (Shi, Xiang, Wen, 2024).

Os cabos submarinos transmitem a energia em alta tensão contínua até a subestação *onshore*, que, equipada com um conversor modular multinível (MMC), realiza a conversão de corrente contínua para corrente alternada, possibilitando a integração da energia gerada ao sistema elétrico.

Figura 15 - Topologia All-DC



Fonte: Shi, Xiang, Wen (2024).

Embora ainda em fase de teste, esta topologia apresenta um potencial relevante para aplicação no Brasil. Considerando que a maior parte do potencial eólico *offshore* se concentra na região Nordeste, enquanto os maiores centros consumidores de energia estão localizados no Sudeste, a utilização de uma rede All-DC poderia viabilizar o escoamento direto dessa energia em corrente contínua e alta tensão ao longo de grandes distâncias.

Dessa forma, além de reduzir perdas associadas à transmissão em corrente alternada, essa configuração poderia contribuir para a integração eficiente da geração renovável às regiões de maior demanda, reforçando a segurança e a sustentabilidade do sistema elétrico nacional.

Um indicativo da viabilidade da aplicação do conceito All-DC no Brasil é a experiência já consolidada com grandes projetos de transmissão em corrente contínua no país. O sistema HVDC de Itaipu, implantado em 1984, foi pioneiro ao permitir o escoamento da energia gerada, utilizando dois bipolos de $\pm 600 \text{ kV}$ com mais de 800 km de extensão em corrente contínua de Foz do Iguaçu (PR) até a cidade de Ibiúna (SP), Figura 16.

Outro exemplo é o sistema HVDC Rio Madeira, Figura 16, que conecta as usinas de Santo Antônio e Jirau, em Rondônia, ao Sudeste, por meio de linhas de transmissão em ± 600 kV ao longo de aproximadamente 2.375 km, sendo uma das mais longas do mundo.

Figura 16 - Linhas de transmissão no Brasil em HVDC



Fonte: Cepel - Eletrobras (2018).

Ambos os projetos demonstram a eficiência e a confiabilidade das linhas em corrente contínua para o transporte de grandes blocos de energia a longas distâncias, reforçando a perspectiva de que, futuramente, uma rede All-DC *offshore* possa ser aplicada de maneira efetiva não só na integração de parques *offshore* com o SIN mas também no escoamento da geração eólica do Nordeste para os centros consumidores do Sudeste.

4.2 Vantagens e desvantagens dos Sistemas de Transmissão de energia para Parques Eólicos *Offshore*

A integração de parques eólicos *offshore* ao sistema elétrico requer soluções de transmissão de energia capazes de transportar a eletricidade gerada em alto-mar até os centros de consumo em terra firme de maneira eficiente e confiável. Neste contexto, os sistemas de transmissão, sejam em corrente alternada ou corrente contínua, desempenham papel fundamental na viabilidade técnica e econômica desses projetos. Cada tecnologia apresenta características específicas que influenciam fatores como perdas elétricas, estabilidade do sistema, flexibilidade operacional e custos de implementação. Compreender as vantagens e desvantagens associadas a cada sistema é fundamental para a tomada de decisão no planejamento e na execução para a viabilidade de projetos *offshore*.

4.2.1 Sistema de Transmissão em HVAC

A transmissão de energia elétrica proveniente de parques eólicos *offshore* por meio de sistemas em HVAC apresenta características específicas que influenciam sua aplicação em diferentes cenários.

Entre as principais vantagens desse tipo de sistema, destacam-se os custos reduzidos, uma vez que não há necessidade de conversores eletrônicos de potência nas subestações, e menores perdas elétricas para distâncias relativamente curtas, tipicamente até 50 km, entre o parque e a costa. Além disso, a tecnologia HVAC é consolidada e amplamente utilizada em parques eólicos já em operação, o que facilita sua implementação e manutenção. Outra vantagem relevante é a ausência de necessidade de uma fonte de tensão auxiliar, característica que a diferencia de sistemas HVDC (Tavares, 2010).

Por outro lado, a transmissão em HVAC apresenta limitações significativas, especialmente em relação ao comprimento dos cabos submarinos. Devido aos efeitos capacitivos inerentes aos cabos, gera-se uma quantidade considerável de potência reativa, que deve ser absorvida nas extremidades do sistema, tanto *onshore* quanto *offshore*, a fim de manter os níveis de tensão adequados (Tavares, 2010).

Essa característica limita a aplicação da tecnologia HVAC para distâncias superiores a 50 km da costa, pois as perdas elétricas aumentam de forma expressiva com o crescimento da potência gerada pelo parque eólico e do comprimento da linha de transmissão.

Dessa forma, a escolha de sistemas HVAC deve considerar o equilíbrio entre custos, distância de transmissão e potência do parque, sendo mais adequada para projetos de porte médio, próximos à costa, em que a simplicidade de implementação e o baixo custo se destacam como fatores decisivos.

4.2.2 Sistema de Transmissão em HVDC

Os sistemas de transmissão em HVDC têm se consolidado como alternativa para a interligação de parques eólicos *offshore* de grande porte, especialmente quando a distância entre o parque e a costa excede os limites práticos da tecnologia HVAC.

Entre as principais vantagens do HVDC, destacam-se a capacidade de transportar grandes quantidades de energia em longas distâncias e a possibilidade de interligação assíncrona entre redes com frequências diferentes (por exemplo, 50 Hz e 60 Hz), o que aumenta a flexibilidade do sistema. Além disso, o controle por eletrônica de potência permite gerenciar a potência ativa gerada pelo parque eólico, oferecendo maior estabilidade e eficiência operacional (Tavares, 2010).

No entanto, a tecnologia HVDC apresenta limitações relevantes. A necessidade de estações de conversão volumosas tanto *offshore* quanto *onshore*, a geração de harmônicas de corrente que exigem filtros adicionais e a maior probabilidade de falhas em função da complexidade dos componentes eletrônicos são fatores que impactam o custo e a confiabilidade do sistema. Além disso, em caso de colapso generalizado da rede, os conversores só podem operar quando ambas as extremidades AC estiverem energizadas, limitando a capacidade de reposição imediata do serviço (Tavares, 2010).

Os sistemas HVDC com conversores do tipo VSC apresentam aprimoramentos em relação ao LCC. Eles mantêm todas as vantagens do HVDC LCC e adicionam controle independente da potência ativa e reativa, permitindo

operação nos quatro quadrantes do plano P-Q. Essa tecnologia não requer fontes auxiliares de AC para a comutação e utiliza um número reduzido de filtros, o que diminui o tamanho e o custo do conversor. Adicionalmente, possibilita a função de Black start, que permite apoiar parcialmente ou totalmente o sistema em caso de falhas (Tavares, 2010).

Apesar das vantagens, a implementação de redes HVDC, especialmente em topologias multi-terminal, envolve desafios técnicos significativos. Entre eles, destacam-se a necessidade de disjuntores CC ultra rápidos e estratégias de proteção compatíveis com a rede AC, a ausência de normas regulatórias padronizadas em alguns países, a exigência de interoperabilidade entre múltiplos fornecedores e a necessidade de planejamento conjunto entre diferentes estados ou regiões (Nazir, Enslin, Hines, McCalley, Lof, Garnick, 2022)

Embora a tecnologia HVDC ofereça flexibilidade e capacidade para integração de grandes parques *offshore*, sua implementação exige planejamento detalhado e investimentos robustos em infraestrutura.

4.3 Comparativo Técnico e Econômico das Tecnologias HVAC E HVDC Aplicadas a Parques Eólicos *Offshore*

A análise da viabilidade de sistemas de transmissão para parques eólicos *offshore* deve considerar tanto aspectos técnicos quanto econômicos, uma vez que os custos associados envolvem não apenas a infraestrutura de geração, mas também as plataformas *offshore* e *onshore* e os cabos de coleta e transmissão. O impacto financeiro de cada configuração varia em função da capacidade do parque eólico e da distância até a costa, o que exige um estudo comparativo criterioso entre as diferentes alternativas tecnológicas.

No caso do sistema HVAC os custos das turbinas eólicas *offshore* convencionais (35 kV) giram em torno de 5000 CNY/kW, havendo um acréscimo estimado de cerca de 200 CNY/kW quando utilizadas turbinas de 66 kV devido ao maior preço de transformadores e disjuntores. As plataformas *offshore* e *onshore* apresentam custos proporcionais à capacidade instalada, sendo que a estrutura em terra geralmente representa metade do valor da plataforma marítima. Outro ponto relevante é a necessidade de dispositivos de compensação reativa, uma vez que a

capacitância dos cabos submarinos em CA é significativa, implicando em custos adicionais com reatores em derivação e, em alguns casos, em plataformas dedicadas (Shi, Xiang, Wen, 2024).

O sistema HVDC, apresenta custos fixos mais elevados devido às plataformas conversoras *offshore*, mas oferece ganhos de eficiência em longas distâncias. A utilização de conversores modulares multiníveis (MMC) viabiliza a transmissão de grandes blocos de energia, tornando a solução mais atrativa para projetos de elevada potência e localizados a grandes distâncias da costa (Shi, Xiang, Wen, 2024).

O sistema LFAC ocupa uma posição intermediária entre HVAC e HVDC em termos de custo. Sua topologia exige transformadores elevadores *offshore*, cabos de baixa frequência e conversores AC/AC terrestres. Embora ainda pouco difundida, essa configuração pode se tornar economicamente viável em determinadas situações, principalmente quando houver restrições regulatórias ou tecnológicas ao emprego do HVDC (Shi, Xiang, Wen, 2024).

A topologia All-DC permanece em estágio teórico, mas apresenta potencial promissor. Ele utiliza turbinas equipadas com conversores CC/CC e transformadores de frequência intermediária, o que reduz perdas na coleta e elimina problemas de ressonância. Caso venha a ser padronizado e amplamente desenvolvido, poderá competir diretamente com o HVDC em projetos de grande porte e longas distâncias (Shi, Xiang, Wen, 2024).

Uma análise de viabilidade realizada para os projetos *offshore* italianos considerou os custos fixos e variáveis da conexão elétrica, aplicados a um parque de referência de 1 GW. Para o HVAC, foram encontrados custos fixos médios de aproximadamente 130 k€/MW, com custos variáveis da ordem de 6 k€/MW/km, valores que tendem a crescer até 2030 em razão da necessidade de cabos de maior seção transversal e plataformas adicionais. Já para o HVDC, os custos fixos médios situaram-se em torno de 395 k€/MW, significativamente mais altos, porém compensados por custos variáveis muito inferiores, cerca de 1,8 k€/MW/km. Isso significa que, à medida que a distância de transmissão aumenta, o HVDC se torna mais competitivo economicamente (Lanniet al., 2023).

A aplicação desse modelo aos empreendimentos italianos em licenciamento revelou que, para distâncias inferiores a 50 km, o HVAC permanece como a opção mais viável economicamente. Entretanto, em distâncias superiores, especialmente para parques acima de 1 GW, o HVDC apresenta vantagens claras, consolidando-se como a alternativa preferencial em regiões como Sicília, Sardenha e Apúlia, onde a distância até a costa é significativa e o potencial eólico *offshore* é elevado (Lanni et al., 2023).

O Gráfico 5 apresenta a comparação entre os custos médios de cabos de em corrente alternada e em corrente contínua, em função da distância de transmissão. Para curtas distâncias, aproximadamente 50–60 km, o sistema HVAC apresenta menores custos, sendo portanto mais vantajoso economicamente. No entanto, conforme a distância aumenta, os custos do HVAC crescem de forma mais acentuada devido às perdas capacitivas dos cabos submarinos e à necessidade de compensação reativa, enquanto os custos do HVDC permanecem praticamente lineares.

O ponto de equilíbrio (*breakeven point*), indicado no gráfico 5, marca a distância a partir da qual o HVDC torna-se mais competitivo em relação ao HVAC. Assim, em projetos *offshore* localizados a maiores distâncias da costa, o sistema HVDC tende a ser a solução mais eficiente e economicamente viável para o escoamento da energia gerada.

Observa-se que o sistema HVDC apresenta melhor desempenho para a transmissão de energia em longas distâncias, especialmente quando aplicado a parques eólicos *offshore* de grande porte. Apesar do custo inicial elevado dos conversores e da complexidade técnica associada à implantação, os ganhos em eficiência, redução de perdas e estabilidade operacional tornam essa tecnologia uma solução promissora a médio e longo prazo.

Do ponto de vista técnico, o HVDC oferece maior controle de potência, elimina problemas de capacitância nos cabos submarinos e permite a interligação de sistemas não sincronizados, o que o diferencia significativamente do HVAC. Sob o aspecto econômico, embora o investimento inicial seja mais alto, a redução das perdas e a menor necessidade de compensação reativa ao longo da vida útil compensam o custo inicial, tornando o HVDC mais vantajoso a partir de

determinadas distâncias, tipicamente para linhas aéreas com extensão entre 400 e 600 km e para cabos subterrâneos ou submarinos com cerca de 50 km.

O Gráfico 6 apresenta o mapa dos parques eólicos atualmente em operação no Brasil, totalizando 1.026 parques, 29,9 GW de potência instalada e 10.434 aerogeradores, segundo dados atualizados da ANEEL em 2025.

Gráfico 6 - Mapa dos Parques Eólicos *Onshore* em Operação no Brasil



Fonte: WEBMAP, EPE (2025)

Observa-se uma forte concentração de parques eólicos nas regiões Nordeste e Sul, e essa distribuição reflete o elevado potencial eólico dessas áreas, conforme ilustrado no gráfico 6, onde predominam ventos intensos e constantes. No entanto, todas as instalações atualmente em operação estão localizadas em terra (*onshore*), próximas ao litoral, e as regiões com maior potencial eólico marítimo (*offshore*) coincidem justamente com as áreas de alta concentração de parques terrestres, reforçando a viabilidade da futura expansão para o ambiente *offshore*.

Na visão da autora, essa concentração geográfica e o distanciamento dos principais centros de carga, reforça a necessidade de sistemas de transmissão com maior capacidade e eficiência, características em que o HVDC se destaca de maneira evidente. Essa conclusão se apoia não apenas nos benefícios técnicos apresentados ao longo do capítulo, mas também no fato de que as regiões de maior potencial *offshore*, especialmente no litoral nordestino, estão localizadas a centenas de quilômetros dos polos consumidores, cenário no qual o HVAC torna-se progressivamente menos eficiente devido ao aumento das perdas e da necessidade de compensação reativa.

Além disso, observa-se que os leilões de transmissão ANEEL vêm apresentando, de forma crescente, escopos com instalações para compensação com bancos de capacitores, banco de reatores e equipamentos como o STATCOM e SVC, para viabilizar longas linhas já existentes em HVAC. Por exemplo, no leilão 04/2025, houve escopo de compensação nos lotes 2, 6 e 7, e no leilão futuro 001/2026, nos lotes 3 e 5. Essa exigência aparece especialmente em lotes localizados no Nordeste, onde longas linhas de transmissão em HVAC são responsáveis por escoar grandes blocos de energia até o Sudeste, evidenciando a limitação prática dessa tecnologia em distâncias elevadas.

Esse aumento na necessidade de compensadores confirma que, nessas condições, o HVAC demanda investimentos adicionais para manter a estabilidade e atender aos requisitos de desempenho, em contrapartida o HVDC já opera sem esses elementos e sem a necessidade de implantações, reforçando sua viabilidade para a futura conexão de parques eólicos *offshore*.

Assim, a adoção do HVDC não se configura somente como uma alternativa tecnicamente superior, mas como uma estratégia necessária para viabilizar a futura exploração do potencial eólico marítimo brasileiro.

Para concretizar essa estratégia, a implementação da tecnologia HVDC no Brasil deve seguir um caminho com projetos-piloto *offshore*, conectados ao SIN por elos HVDC de capacidade moderada, o que permitirá validar o desempenho técnico e operacional em condições reais. Em paralelo, faz-se crucial o desenvolvimento de um marco regulatório específico para a geração *offshore* e a adoção de políticas de incentivo à nacionalização de componentes-chave. Uma vez que a totalidade dos

conversores HVDC atualmente utilizados no Brasil é importada, o estímulo à produção nacional torna-se uma medida para reduzir os custos de capital (CAPEX) e aumentar a autonomia tecnológica do país.

Assim, o HVDC poderia consolidar-se como o vetor para a implantação e posterior expansão da energia eólica *offshore* no país, garantindo não apenas o aproveitamento eficiente do potencial litorâneo, mas também contribuindo de forma significativa para a modernização da matriz elétrica brasileira.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo comparativo sobre a viabilidade técnico-econômica das tecnologias HVAC e HVDC aplicadas à transmissão de energia proveniente de parques eólicos *offshore*. A pesquisa foi conduzida por meio de uma metodologia analítica e bibliográfica, estruturada em quatro etapas: levantamento conceitual sobre geração eólica, revisão das tecnologias HVAC e HVDC, análise comparativa e avaliação da viabilidade da aplicação da corrente contínua em projetos *offshore*.

A análise exploratória realizada neste trabalho demonstra que a escolha da tecnologia de transmissão para parques eólicos *offshore* não se limita a um critério único, mas sim da interação entre fatores como distância em relação à costa e potência instalada.

O sistema HVAC, embora consolidado e economicamente mais atrativo para projetos próximos à costa, apresenta limitações técnicas relevantes em maiores distâncias devido ao efeito capacitivo dos cabos submarinos e à necessidade de compensação reativa.

Já o sistema HVDC mostra-se mais eficiente em longas distâncias, com capacidade para transportar grandes blocos de energia e oferecer maior flexibilidade operacional, especialmente na configuração VSC, que agrega funcionalidades como controle independente de potência ativa e reativa e a possibilidade de black start.

Além dessas soluções já estabelecidas, alternativas emergentes como o LFAC e o conceito All-DC revelam perspectivas promissoras. O primeiro, ainda em fase inicial de aplicação, reduz perdas ao operar em frequências mais baixas, enquanto o segundo, de caráter teórico, pode se tornar competitivo no futuro ao eliminar conversões intermediárias e otimizar o processo de escoamento de energia. Embora ainda experimentais, tais perspectivas reforçam a importância da inovação tecnológica para viabilizar empreendimentos cada vez mais robustos e sustentáveis.

No contexto global, a transição energética configura-se como uma necessidade urgente e estratégica, diante da necessidade de redução de emissões e diversificação das matrizes elétricas. Nesse cenário, a energia eólica *offshore* tem papel de destaque, pois permite ampliar a exploração de recursos renováveis em

escala industrial, ainda que imponha desafios técnicos e econômicos, entre os quais a transmissão de energia se apresenta como fator central para sua viabilidade.

O Brasil apresenta um cenário particularmente favorável para a aplicação dessas tecnologias. O elevado potencial eólico *offshore* na costa do nordeste, aliado à concentração dos principais centros consumidores no sudeste, exige soluções de transmissão de alta eficiência.

A experiência já consolidada com projetos HVDC de longa distância, como a geração de energia em CC nas hidrelétricas Itaipu e Rio Madeira, demonstra que o país possui conhecimento técnico e infraestrutura capazes de viabilizar o uso em larga escala da corrente contínua, inclusive em novos arranjos como o All-DC. Essa condição estratégica reforça a possibilidade de o Brasil se destacar internacionalmente na adoção de modelos avançados de escoamento da geração renovável.

A contribuição central deste estudo está em evidenciar e discutir a tecnologia HVDC como a solução para a futura interligação de parques eólicos *offshore* no Brasil. A análise destaca que, dadas as longas distâncias entre os polos de geração no Nordeste e os centros de carga no Sudeste, o HVDC oferece não apenas maior eficiência técnica, mas também se mostra economicamente estratégico ao mitigar os custos crescentes associados à compensação exigida pelo HVAC em condições similares. Essa limitação do HVAC é corroborada pela crescente necessidade de compensadores em lotes de transmissão de longa distância nos leilões da ANEEL.

Na visão da autora, o HVDC deve ser compreendido não apenas como uma alternativa técnica, mas como um vetor de inovação, capaz de impulsionar o aproveitamento do potencial eólico brasileiro e fortalecer o papel do país na transição energética e embora o HVDC tenha investimento inicial mais alto, sua utilização tende a reduzir perdas, melhorar a confiabilidade e simplificar o controle, o que impacta positivamente o custo do ciclo de vida.

Conclui-se, portanto, que os sistemas HVAC e HVDC devem ser avaliados de forma complementar, sendo o primeiro mais adequado para empreendimentos próximos à costa e o segundo em projetos de maior distância. O futuro da integração *offshore* no Brasil depende não apenas do avanço tecnológico dessas soluções,

mas também do desenvolvimento de políticas públicas, normas técnicas e incentivos à pesquisa, para a diversificação da matriz elétrica nacional e para o fortalecimento da transição energética.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Realização de estudos quantitativos para determinar o ponto de equilíbrio (*breakeven*) entre HVAC e HVDC considerando cenários reais da costa brasileira;
- Análise técnico-econômica detalhada de projetos-piloto offshore, contemplando custos de CAPEX e OPEX;
- Viabilidade regulatória, incluindo requisitos técnicos, licenciamento e possíveis atualizações normativas para transmissão *offshore*;
- Estudo das tecnologias emergentes, como LFAC e All-DC, avaliando se podem competir com soluções consolidadas em diferentes cenários brasileiros;
- Desenvolvimento de simulações elétricas integrando redes HVAC e HVDC em paralelo, visando avaliar estabilidade, controle de potência e impacto no SIN.

Essas propostas ampliam o entendimento iniciado neste trabalho e permitem avanços na avaliação da transmissão de energia em HVDC de parques eólicos *offshore* no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **INFOVENTO OFFSHORE** | Setembro de 2022 | Edição 01. Disponível em:
https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/09/2022_09_InfoVento-Offshore-01_site.pdf. Acesso em: 02 fev. 2025.
- CANDIDO, L. R. et al. **Uma proposta topológica e operacional para a conexão em corrente contínua de parques eólicos offshore à rede CA onshore**. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/34039>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- CORREIA, L. T.; AZEVEDO JR, G. M. **A energia eólica marítima (offshore): o contexto nacional e as perspectivas futuras**. Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula, v. 6, n. 3, p. 1-25, 2023. Disponível em:
<https://revistas.icesp.br/index.php/TEC-USU/article/view/4767>. Acesso em: 02 fev. 2025.
- DA COSTA, H. M.. **Reposição de serviço em sistemas com produção eólica onshore e offshore com ligação DC**. Dissertação de Mestrado — Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013. Disponível em:
https://sigarra.up.pt/spup/pt/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=26082. Acesso em: 20 jun. 2025.
- DANTAS, L. A. V. S. **Análise de viabilidade dos modelos de transmissão CC/CA em parques eólicos offshore**. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. Disponível em:
<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/53757>. Acesso em: 25 fev. 2025.
- ELECTRICAL ELIBRARY. **Transmissão de energia elétrica em CC (HVDC)**. Disponível em:
<https://electricalibrary.com/2024/06/14/transmissao-de-energia-eletrica-em-cc-hvdc>. Acesso em: 02 fev. 2025.
- ENERGIA DE CATAVENTOS**. Disponível em:
<https://revistapesquisa.fapesp.br/energia-de-cataventos/>. Acesso em: 15 fev. 2025.
- FERREIRA, Lorena Martins. **Perspectiva da geração de energia eólica offshore no Brasil**. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26840>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- IBERDROLA. **A energia eólica offshore flutuante: um marco para impulsionar as energias renováveis através da inovação**. Disponível em:
<https://www.iberdrola.com/inovacao/eolica-flutante-offshore>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- IBERDROLA. **Como os aerogeradores se sustentam no mar?** Disponível em:
<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/fundacoes-aerogeradores>. Acesso em: 10 abr. 2025.

IBERDROLA. **História da energia eólica: desde suas origens até a sustentabilidade moderna.** Disponível em:

<https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/energia-eolica-onshore/historia#:~:text=A%20primeira%20turbina%20e%C3%B3lica%20foi,gerar%20eletricidade%20em%20grande%20escala>. Acesso em: 10 abr. 2025.

LANNI, F. et al. **Feasibility of HVDC connection for offshore wind farms in Italy.**

Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10179080>. Acesso em: 19 ago. 2025.

MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 02 fev. 2025.

MONTIBELLER, B. et al. **HVDC-High Voltage Direct Current: estudos e simulações iniciais.**

In: Seminário de Iniciação Científica e Seminário Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão (SIEPE), 2020, p. e25312-e25312. Disponível em:

https://www.researchgate.net/profile/Jean-Prigol/publication/344319771_HVDC_High_Voltage_Direct_Current_Estudos_e_Simulacoes_Iniciais/links/5f6735c0299bf1b53ee4482c/HVDC-High-Voltage-Direct-Current-Estudos-e-Simulacoes-Iniciais.pdf.

Acesso em: 19 ago. 2025.

NAZIR, M. et al. **Multi-terminal HVDC grid topology for large scale integration of offshore wind on the US Atlantic Coast.** Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9990011/>. Acesso em: 19 ago. 2025.

PEREIRA, B. G.; S., Wanberton G.. **Avaliação bibliométrica do setor eólico offshore.** Disponível em:

https://peteletricaufu.com.br/static/ceel/artigos/artigo_751.pdf. Acesso em: 20 ago. 2025.

PLANO DE OPERAÇÃO ENERGÉTICA. **Previsões de carga para o planejamento anual da operação energética PLAN 2024-2028.** Disponível em:

https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-305/topico-690/Apresenta%C3%A7%C3%A3o_Carga%20PLAN%2024-28.pdf. Acesso em: 02 dez. 2024.

ROADMAP EÓLICA OFFSHORE BRASIL. EPE, 2020. Roadmap eólica offshore Brasil. Disponível em:

<https://storymaps.arcgis.com/stories/85011a3a5b5e4208abccf546cdd0de2f>. Acesso em: 02 dez. 2024.

SHI et al.. **Economic analysis of large-scale offshore wind power integration schemes.**

Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10723053>

. Acesso em: 02 set. 2025.

SANTOS, E. C. d.; SARTORI, R. V.. **High Voltage Direct Current (HVDC)**

multi-terminal ligados a parques eólicos offshore. Artigo Científico — Revista

Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, ano 07, ed. 06, v. 08, p. 147-158, jun. 2022. Disponível em:

<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/high-voltage-direct-current>.

DOI:10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/high-voltage-direc
Acesso em: 02 set. 2025.

TAVARES, Bruno José Lopes et al. **Parques eólicos offshore: estudo de soluções de interligação do tipo HVAC e HVDC**. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade do Porto, Porto, 2010. Disponível em:
<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/63281/1/000147393.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2025.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **War of currents: AC vs. DC power**. Disponível em: <https://www.energy.gov/articles/war-currents-ac-vs-dc-power>. Acesso em: 14 fev. 2025.

THE NATIONAL GRID. **The history of wind energy**. Disponível em:
<https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/history-wind-energy>. Acesso em: 14 fev. 2025.

VAICBERG, H.; VALIATT, G.; FERREIRA, M.. **Energia eólica offshore: um overview do cenário global e o contexto brasileiro**. Revista de Direito e Negócios Internacionais da Maritime Law Academy — International Law And Business Review, v. 1, n. 1, p. 114-143, 2021. Disponível em:
<https://mlawreview.emnuvens.com.br/mlaw/article/view/6>. Acesso em: 02 abr. 2025.

LEILÃO DE TRANSMISSÃO ANEEL Nº 004/2025. Disponível em:
https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_liferay/editais_transmissao/edital_transmissao.cfm. Acesso em: 17 nov. 2025.

LEILÃO DE TRANSMISSÃO ANEEL Nº 001/2026. Disponível em:
https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_liferay/editais_transmissao/edital_transmissao.cfm. Acesso em: 17 nov. 2025.