

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FELIPE AUGUSTO VASCONCELOS ORTIZ

ESTRATÉGIAS E DESAFIOS DE PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS NA  
GERAÇÃO EÓLICA OFFSHORE

São Paulo

2023

FELIPE AUGUSTO VASCONCELOS ORTIZ

ESTRATÉGIAS E DESAFIOS DE CONTROLE E PROTEÇÃO DE SISTEMAS  
ELÉTRICOS NA GERAÇÃO EÓLICA OFFSHORE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética, área de Energia Eólica, da UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, como requisito parcial para a Obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Orientador: Demetrio Cornilios Zachariadis

São Paulo

2023



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus professores que me propiciaram a base fundamental do meu conhecimento. Também não poderia de expressar o meu agradecimento aos meus pais pelo apoio e incentivo ao longo dos meus estudos.

"A persistência é o caminho do êxito." - Charlie Chaplin

## RESUMO

Apesar dos objetivos ambiciosos estabelecidos para a expansão da geração eólica offshore, a concretização da transição energética tem enfrentado desafios significativos, com países, governos e agências buscando implementá-la com a urgência necessária. A complexidade intrínseca à infraestrutura da geração eólica offshore demanda profissionais altamente especializados, robusta tecnologia e enfrenta as adversidades do ambiente marinho, introduzindo desafios marcantes na área de proteção elétrica.

Este trabalho propõe uma exploração dos desafios relacionados ao controle e proteção de sistemas elétricos na geração eólica offshore, além de abordar estratégias para mitigar esses obstáculos, visando assegurar a eficiência e confiabilidade desses sistemas. A elaboração deste estudo baseou-se em uma revisão aprofundada de livros, artigos e pesquisas pertinentes ao tema.

Considerando a natureza crítica da geração offshore, que inclui desafios como a dificuldade de acesso e manutenção nos parques, condições ambientais adversas e complexidades elétricas do sistema, é concluí-se que o sistema exiba um alto grau de robustez e confiabilidade. Para superar os desafios técnicos mencionados, é necessário investir em colaboração entre especialistas, fabricantes e pesquisadores, direcionando a atenção adequada à proteção e ao controle, a fim de realizar o potencial total dessa forma de geração energética.

**Palavras-chave:** Energia eólica offshore; Geração; Controle e Proteção de sistemas elétricos.

## **ABSTRACT**

Despite the ambitious objectives established for the expansion of offshore wind generation, the implementation of the energy transition has faced significant challenges, with countries, governments and agencies seeking to implement it with the necessary urgency. The intrinsic complexity of the offshore wind generation infrastructure demands highly specialized professionals, and robust technology and faces the adversities of the marine environment, introducing significant challenges in the area of electrical protection.

This work proposes an exploration of the challenges related to the control and protection of electrical systems in offshore wind generation, in addition to addressing strategies to mitigate these obstacles, aiming to ensure the efficiency and reliability of these systems. The preparation of this study was based on an in-depth review of books, articles and research relevant to the topic.

Considering the critical nature of offshore generation, which includes challenges such as difficult access and maintenance in parks, adverse environmental conditions and electrical complexities of the system, it is concluded that the system exhibits a high degree of robustness and reliability. To overcome the aforementioned technical challenges, it is necessary to invest in collaboration between experts, manufacturers and researchers, directing adequate attention to protection and control, to realize the full potential of this form of energy generation.

**Keywords:** Offshore wind energy; Generation; Protection and Control of electrical systems.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 — Potencial eólico offshore próximo e distante da costa na Europa, leste da Ásia e América do Norte.....                  | 14 |
| Figura 1.2 — Comparação da intermitência da geração eólica offshore, onshore e fotovoltaica .....                                    | 15 |
| Figura 1.3 — Total de instalações de geração eólica em 2022.....                                                                     | 17 |
| Figura 2.1 — Forças nas pás .....                                                                                                    | 20 |
| Figura 2.2 — Componentes gerais de uma turbina eólica .....                                                                          | 21 |
| Figura 2.3 — Curva de potência de uma turbina eólica .....                                                                           | 22 |
| Figura 2.4 — Esquema de controle de velocidade tipo A.....                                                                           | 26 |
| Figura 2.5 — Esquema de controle de velocidade tipo B.....                                                                           | 28 |
| Figura 2.6 — Esquema de controle de velocidade tipo C .....                                                                          | 29 |
| Figura 2.7 — Esquema de controle de velocidade tipo D .....                                                                          | 30 |
| Figura 2.8 — Conversor de fonte de tensão back-to-back de dois níveis para turbinas eólicas (2L BTB).....                            | 32 |
| Figura 2.9 — Conversor back-to-back com fixação de ponto neutro de três níveis para turbinas eólicas (3L-NPC BTB). .....             | 34 |
| Figura 2.10 — Conversor back-to-back ponte H de três níveis para turbinas eólicas (3L-HB BTB).....                                   | 35 |
| Figura 2.11 — Conversor back-to-back ponte H de cinco níveis para turbinas eólicas (5L-HB BTB).....                                  | 35 |
| Figura 2.13 — Conversor de ponto neutro de três níveis e ponte H de cinco níveis para turbinas eólicas. (3L-NPC + 5L-HB) .....       | 37 |
| Figura 2.14 — Conversor ponte H em cascata back-to-back para turbinas eólicas com transformador de média frequência (CHB-MFT). ..... | 38 |
| Figura 2.15 — Turbina eólica com conversor de potência completo e gerador de ímã permanente. ....                                    | 38 |
| Figura 3.1 — Esquema de conexão de um parque eólico offshore.....                                                                    | 40 |
| Figura 3.2 — Subsistemas da geração eólica offshore .....                                                                            | 41 |
| Figura 3.3 — Esquema de uma subestação offshore .....                                                                                | 42 |
| Figura 3.4 — Subestação offshore Wikingier.....                                                                                      | 43 |
| Figura 3.5 — Possíveis arranjo dos parques eólicos offshore.....                                                                     | 44 |
| Figura 3.6 — Custo de implementação da linha de transmissão por tipo e distância da costa.....                                       | 46 |
| Figura 3.7 — Escolha do tipo de transmissão com base na distância e potência da geração eólica offshore .....                        | 47 |
| Figura 3.8 — Estrutura de transmissão HVAC .....                                                                                     | 48 |
| Figura 4.1 — Zonas de proteção de um parque eólico .....                                                                             | 58 |
| Figura 4.2 — Proteção de crowbar.....                                                                                                | 64 |
| Figura 4.3 — Sistema de proteção do rotor chopper para unidades DFIG .....                                                           | 65 |

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| Figura 6.1 — Localização do parque eólico Trianel Borkum ..... | 70 |
| Figura 6.2 — Parque eólico Trianel Borkum II.....              | 71 |
| Figura 6.3 — Subestação offshore DolWin Alpha .....            | 72 |
| Figura 6.4 — Subestação Dörpen West.....                       | 73 |
| Figura 6.5 — Sistema de transmissão DolWin1 .....              | 74 |
| Figura 6.6 — Modelo de conexão do DolWin1 .....                | 75 |
| Figura 6.7 — Corte de um cabo submarino.....                   | 77 |
| Figura 6.8 — Corte real de um cabo para geração offshore ..... | 77 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 — Arquitetura das turbinas eólicas.....               | 25 |
| Tabela 2 — Tabela comparativa de conversores de potência ..... | 30 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|            |                                                               |
|------------|---------------------------------------------------------------|
| ABEEólica  | Associação Brasileira de Energia Eólica                       |
| CA         | Corrente Alternada                                            |
| CC         | Corrente Contínua                                             |
| DFIG       | Double-Fed Induction Generator                                |
| EPE        | Empresa de Pesquisa Energética                                |
| FRC        | Fully-Rated Converter                                         |
| GWEC       | Global Energy Wind Council                                    |
| HVAC       | High-Voltage Alternating Current                              |
| HVDC       | High-Voltage Direct Current                                   |
| IBAMA      | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais |
| Renováveis |                                                               |
| IEC        | International Electrotechnical Commission                     |
| IED        | Intelligent Electronic Device                                 |
| IEEE       | Institute of Electrical and Electronics Engineers             |
| IGBT       | Insulated-Gate Bipolar Transistor                             |
| LCV        | Line Commutated Converter                                     |
| MOSFET     | Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor             |
| PRODIST    | Regras e Procedimentos de Distribuição                        |
| PWM        | Pulse-Width Modulation                                        |
| SCADA      | Sistema de Supervisão e Controle de Automação                 |
| STATCOM    | STATic synchronous COMpensator                                |
| SVC        | Static VAR Compensation                                       |
| VSC        | Voltage Source Converter                                      |
| XLPE       | Cross-linked polyethylene                                     |
| B2B        | Back-to-back                                                  |

## SUMÁRIO

|           |                                                                                                                                                              |    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1         | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                                                                                                            | 13 |
| 2         | <b>ESTADO DA ARTE</b>                                                                                                                                        | 19 |
| 2.1       | CONVERSÃO DA ENERGIA EÓLICA                                                                                                                                  | 19 |
| 2.1.1     | <b>Aerodinâmica de uma turbina eólica</b>                                                                                                                    | 19 |
| 2.1.2     | <b>Transformação da energia mecânica em elétrica</b>                                                                                                         | 21 |
| 2.2       | CONTROLE DE TURBINAS EÓLICAS                                                                                                                                 | 22 |
| 2.2.1     | <b>Topologia de controle de potência das turbinas eólicas</b>                                                                                                | 22 |
| 2.2.1.1   | Controle de estol                                                                                                                                            | 23 |
| 2.2.1.2   | Controle de passo                                                                                                                                            | 23 |
| 2.2.1.3   | Controle ativo de estol                                                                                                                                      | 24 |
| 2.2.2     | <b>Topologia de controle de velocidade de turbinas eólicas</b>                                                                                               | 24 |
| 2.2.2.1   | Turbinas eólicas de velocidade fixa                                                                                                                          | 25 |
| 2.2.2.1.1 | <i>Tipo A: Velocidade Fixa</i>                                                                                                                               | 25 |
| 2.2.2.2   | Turbinas eólicas de velocidade variável                                                                                                                      | 26 |
| 2.2.2.2.1 | <i>Tipo B: Resistência do Rotor Variável</i>                                                                                                                 | 27 |
| 2.2.2.2.2 | <i>Tipo C: DFIG</i>                                                                                                                                          | 28 |
| 2.2.2.2.3 | <i>Tipo D: FRC</i>                                                                                                                                           | 29 |
| 2.3       | CONVERSORES DE POTÊNCIA DAS TURBINAS EÓLICAS                                                                                                                 | 30 |
| 2.3.1     | <b>Conversor de potência de dois níveis (2L-PWM-VSC)</b>                                                                                                     | 31 |
| 2.3.2     | <b>Conversor de potência multinível</b>                                                                                                                      | 33 |
| 2.3.2.1   | Topologia back-to-back fixada com diodo de ponto neutro de três níveis (3L NPC-BTB)                                                                          | 33 |
| 2.3.2.2   | Topologia back-to-back de ponte H de três níveis (3L HB-BTB)                                                                                                 | 34 |
| 2.3.2.3   | Topologia back-to-back de ponte H de cinco níveis (5L HB-BTB)                                                                                                | 35 |
| 2.3.2.4   | Topologia fixada com diodo de ponto neutro de três níveis para o lado do gerador e topologia de ponte H de cinco níveis para o lado da rede (3L NPC + 5L HB) | 36 |
| 2.3.2.5   | Conversor back-to-back em ponte H em cascata com transformadores de média frequência (CHB-MFT)                                                               | 37 |
| 2.3.2.5.1 | <i>Conversor de potência unidirecional</i>                                                                                                                   | 38 |
| 3         | <b>SISTEMA ELÉTRICO DA GERAÇÃO EÓLICA OFFSHORE</b>                                                                                                           | 39 |
| 3.1       | VISÃO GERAL                                                                                                                                                  | 39 |
| 3.2       | SUBESTAÇÃO OFFSHORE                                                                                                                                          | 41 |
| 3.3       | ARQUITETURA DAS FAZENDAS EÓLICAS OFFSHORE                                                                                                                    | 44 |
| 3.3.1     | <b>Radial</b>                                                                                                                                                | 44 |
| 3.3.2     | <b>Anel unilateral</b>                                                                                                                                       | 45 |
| 3.3.3     | <b>Anel bilateral</b>                                                                                                                                        | 45 |
| 3.3.4     | <b>Estrela</b>                                                                                                                                               | 45 |
| 3.4       | TRANSMISSÃO E CONEXÃO COM A REDE                                                                                                                             | 46 |

|         |                                                                      |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4.1   | <b>Transmissão HVAC</b> .....                                        | 47 |
| 3.4.2   | <b>Transmissão HVDC</b> .....                                        | 48 |
| 3.4.2.1 | Conversor comutado em linha.....                                     | 49 |
| 3.4.2.2 | Conversor de fonte de tensão .....                                   | 49 |
| 3.5     | <b>IMPACTOS DA GERAÇÃO EÓLICA OFFSHORE NO SISTEMA ELÉTRICO</b> ..... | 50 |
| 3.5.1   | <b>Regulação de frequência</b> .....                                 | 50 |
| 3.5.2   | <b>Regulação de carga</b> .....                                      | 51 |
| 3.5.3   | <b>Regulação de tensão</b> .....                                     | 51 |
| 3.5.4   | <b>Qualidade de energia</b> .....                                    | 52 |
| 3.5.4.1 | Flutuação de tensão (Flicker) .....                                  | 53 |
| 3.5.4.2 | Desvio de tensão.....                                                | 54 |
| 3.5.4.3 | Harmônicos .....                                                     | 54 |
| 4       | <b>PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS OFFSHORE</b> .....                 | 56 |
| 4.1     | ZONAS DE PROTEÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO .....                          | 56 |
| 4.2     | DESAFIO DE PROTEÇÃO DOS PARQUES EÓLICOS.....                         | 59 |
| 4.3     | PROTEÇÃO NA ÁREA DOS GERADORES .....                                 | 60 |
| 4.3.1   | <b>Geradores</b> .....                                               | 60 |
| 4.3.2   | <b>Proteção para eletrônica de potência na aplicação DFIG</b> .....  | 62 |
| 4.3.2.1 | Proteção de rotor.....                                               | 62 |
| 4.3.3   | <b>Transformadores</b> .....                                         | 65 |
| 4.3.4   | <b>Proteção diferencial dos transformadores</b> .....                | 65 |
| 4.4     | COORDENAÇÃO DE ALIMENTADORES .....                                   | 66 |
| 4.5     | PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO .....                              | 67 |
| 4.6     | PROTEÇÃO DE FILTROS E BANCOS DE CAPACITORES .....                    | 68 |
| 4.7     | PROTEÇÃO NA REGIÃO DE INTERCONEXÃO COM A CONCESSIONÁRIA.....         | 69 |
| 5       | <b>ESTUDOS DE CASO</b> .....                                         | 70 |
| 5.1     | CASO - PARQUE EÓLICO TRIANEL BORKUM.....                             | 70 |
| 5.1.1   | <b>Sistema de transmissão do parque eólico</b> .....                 | 73 |
| 5.1.1.1 | Cabos .....                                                          | 76 |
| 5.1.1.2 | Conversores .....                                                    | 78 |
| 5.1.2   | <b>Principais desafios</b> .....                                     | 80 |
| 6       | <b>CONCLUSÃO</b> .....                                               | 82 |
|         | <b>REFERÊNCIAS</b> .....                                             | 84 |

## 1 INTRODUÇÃO

A geração eólica offshore refere-se à produção de eletricidade por meio de parques eólicos instalados em corpos d'água. Essa modalidade de geração abrange áreas costeiras, como lagos e fiordes, bem como regiões de águas mais profundas. Geralmente, a geração offshore está associada à localização no mar. Neste trabalho, concentraremos nossa atenção na geração eólica offshore em alto mar, que representa a maioria dos projetos offshore.

Normalmente, os ventos em alto mar são mais fortes, constantes e estáveis quando comparados aos ventos em terra (*onshore*), consequentemente, são mais eficientes na geração de eletricidade. Teoricamente, um aumento de 10% na velocidade do vento, resulta em um aumento de 30% na produção de energia (Ackermann, 2012). Os parques eólicos *offshore* ocupam menos espaço terrestre, sendo necessário apenas espaço para uma subestação costeira. Portanto, têm um impacto menor sobre as pessoas e a paisagem em comparação com a geração *onshore* e outras fontes de energia, como a solar. Abaixo, temos uma figura que ilustra o potencial eólico *offshore* próximo (<60 Km) e de longe da costa (60 - 300 Km) em três regiões do mundo: Europa, leste da Ásia e América do Norte. Observa-se que o potencial distante da costa é superior ao potencial próximo em todas as regiões mencionadas.

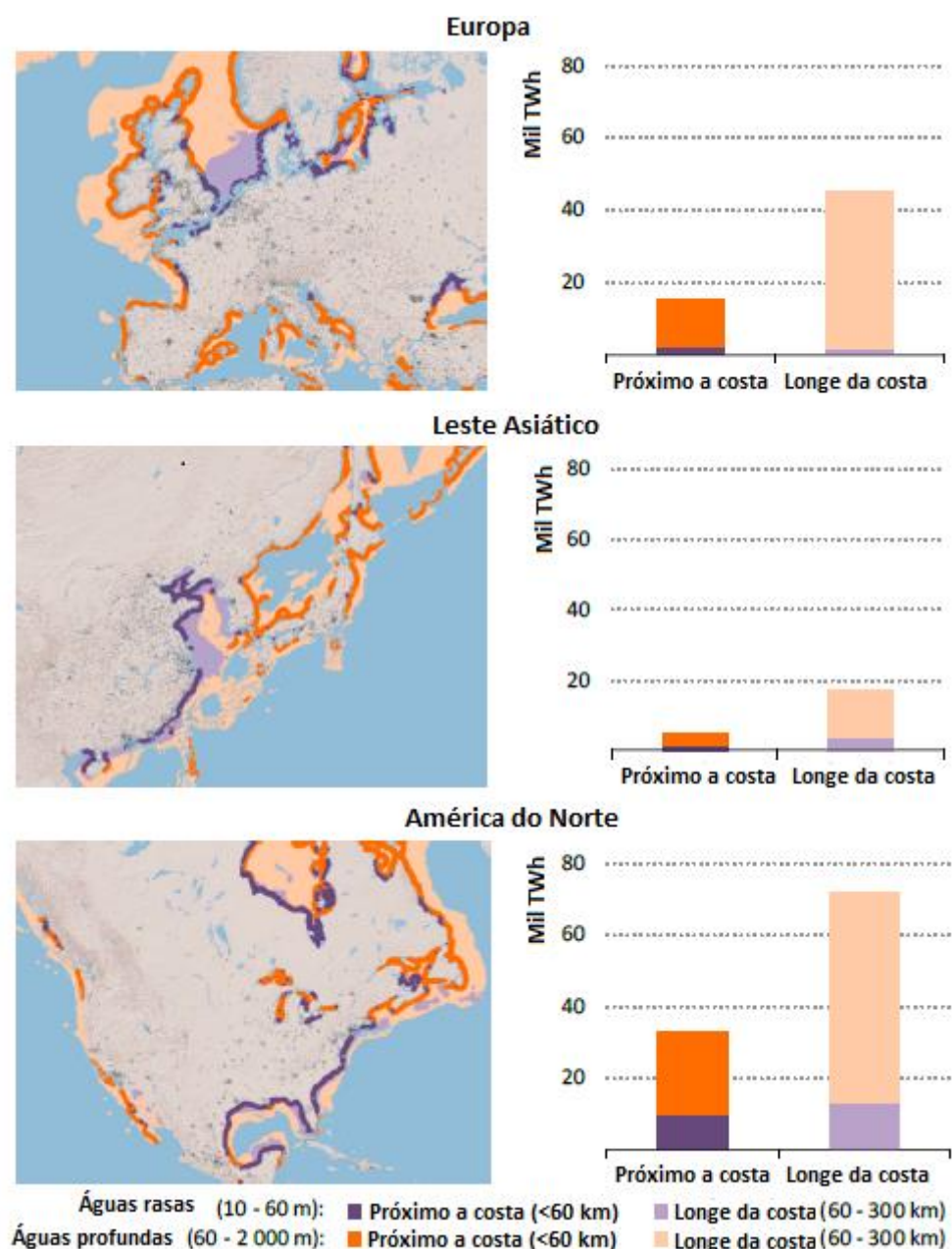


Figura 1.1 — Potencial eólico offshore próximo e distante da costa na Europa, leste da Ásia e América do Norte

Fonte: Offshore Wind Outlook (2019).

A menor intermitência da produção de eólica *offshore* comparado a fotovoltaica e até mesmo a *onshore*, a depender da região, aumenta a segurança no fornecimento de energia elétrica. Essa variação se dá por conta da variação da velocidade do vento. A energia eólica *offshore* geralmente flutua dentro de uma faixa mais estreita, com variações de até 20% por hora, enquanto a energia solar fotovoltaica pode variar até

40%. Na Figura 2, temos um exemplo da variação em diferentes países. Essa alta capacidade e menor variabilidade tornam a energia eólica offshore comparável às tecnologias de carga base, criando uma categoria própria - a tecnologia de carga base variável.

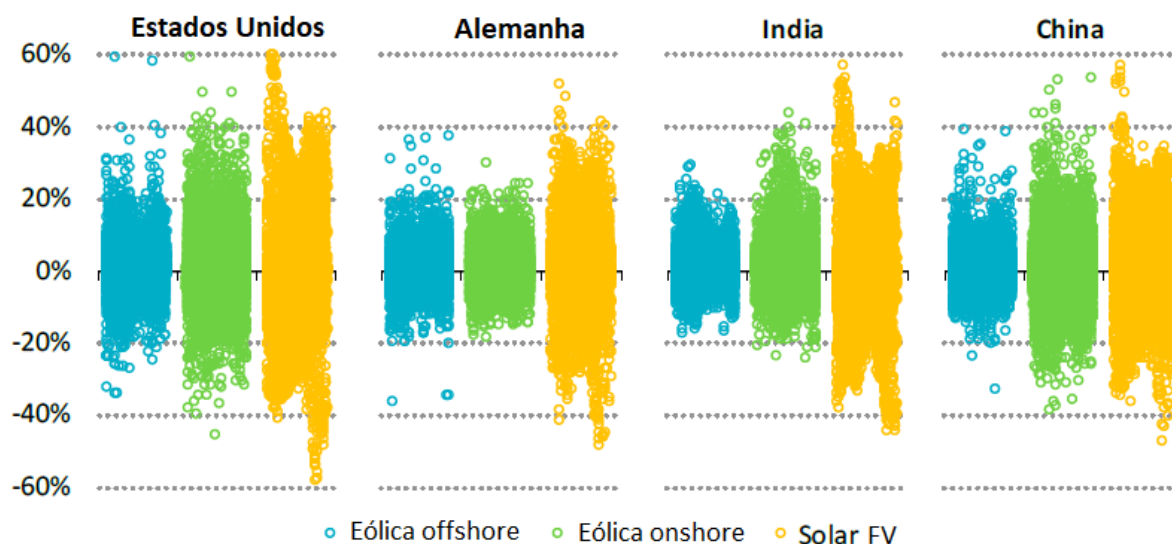


Figura 1.2 — Comparação da intermitência da geração eólica offshore, onshore e fotovoltaica

Fonte: Offshore Wind Outlook (2019).

Os novos projetos de energia eólica offshore estão alcançando fatores de capacidade na faixa de 40-50%. Isso se deve ao uso de turbinas maiores e avanços tecnológicos que permitem aproveitar ao máximo a energia eólica disponível. Essa capacidade coloca a energia eólica offshore em pé de igualdade com as usinas a gás e carvão em algumas regiões, embora não esteja disponível o tempo todo. Além disso, a energia eólica offshore supera a capacidade da energia eólica terrestre e é aproximadamente o dobro da capacidade da energia solar fotovoltaica.

Em alguns países com alto potencial eólico, estão experimentando um forte crescimento da geração eólica, como é o caso do Brasil. Esta fonte de geração é responsável por 25,6 GW da capacidade de potência instalada, sendo que a parcela onshore corresponde sua totalidade. No entanto, existem altas expectativas para o desenvolvimento da geração offshore. O Brasil conta com cerca de 7.491 Km de litoral e alto potencial eólico, segundo o EPE, o potencial brasileiro de geração eólica em alto-mar corresponde a 700 GW. O Brasil vem recebendo diversas propostas de projetos eólicos offshore, superior a 170 GW, mais que a atual capacidade instalada

onshore e praticamente toda a matriz de eletricidade brasileira. Estas propostas estão sendo analisadas pelo IBAMA, segundo estimativa da ABEEólica, a expectativa é que o primeiro projeto offshore do Brasil esteja operacional em 2030.

Nos países europeus e na China, a geração offshore já é uma realidade. Hoje, é um negócio multibilionário, com cadeias de suprimentos desenvolvidas nos principais mercados que abrangem desenvolvimento, construção e instalação de projetos, operação e manutenção e atividades de descomissionamento. A indústria eólica offshore atraiu uma parcela crescente de investimento em energia eólica e renovável nos últimos anos, chegando a US\$ 20 bilhões em 2018, contra menos de US\$ 8 bilhões em 2010. O investimento em energia eólica offshore em 2018 representou quase um quarto do investimento global no setor eólico e 6% de todo o investimento em energia renovável. O investimento foi particularmente pronunciado na União Europeia, onde a energia eólica offshore representou cerca de metade do investimento total em energia eólica em 2018 e um quarto do investimento total em energia renovável (IEA, 2019a).

Em 2022, a capacidade total mundial de energia eólica offshore era de 64,3 gigawatts (GW). A China (49%), o Reino Unido (22%) e a Alemanha (13%) respondem por mais de 75% da capacidade instalada global, como pode ser visto na figura abaixo. O Hornsea Project One de 1,2 GW, no Reino Unido, era o maior parque eólico offshore do mundo. Outros projetos em fase de planejamento incluem o Dogger Bank, no Reino Unido, com 4,8 GW, e o Greater Changhua, em Taiwan, com 2,4 GW.

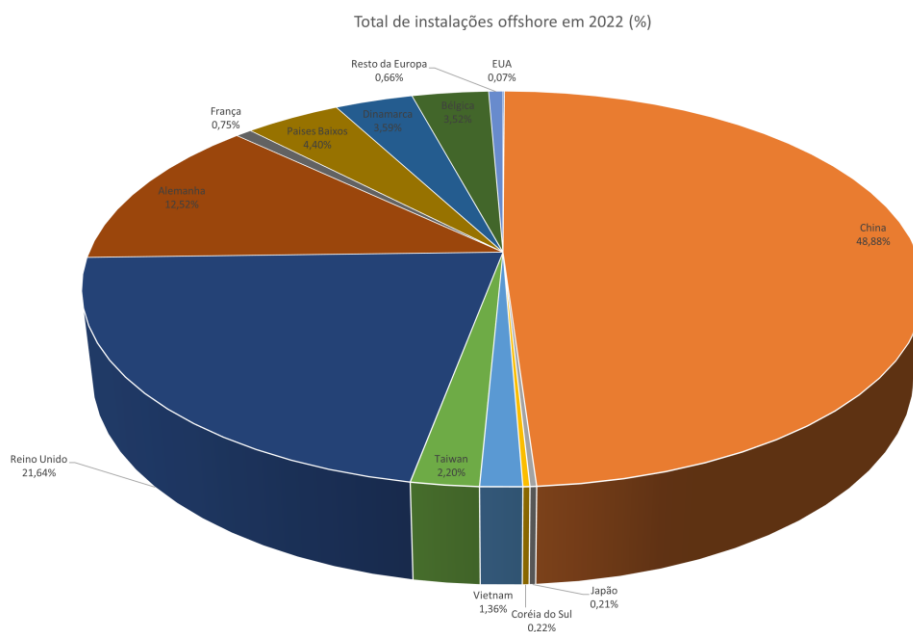


Figura 1.3 — Total de instalações de geração eólica em 2022

Fonte: Global Wind Energy Council (2023).

A geração offshore é relativamente nova, sendo que, as primeiras turbinas foram instaladas no litoral dinamarquês em 1991. Desde então, os fornecedores de equipamentos têm focado em pesquisa e desenvolvimento de turbinas maiores e com melhor performance e melhorado o sistema de geração como um todo, sistema elétrico, cabos, estrutura...

Apesar do estabelecimento de objetivos ambiciosos para geração eólica offshore, países, governos e agências estão lutando para tornar em realidade na velocidade necessária a transição energética. A geração eólica offshore é uma infraestrutura complexa, requer profissionais extremamente técnicos e bem capacitados, além de tecnologia robusta. A natureza inóspita do ambiente marinho e as complexidades associadas aos sistemas elétricos em plataformas offshore introduzem desafios significativos em termos de proteção elétrica. O presente trabalho tem por objetivo, explorar os desafios da proteção de sistemas elétricos na geração eólica offshore, bem como as estratégias para mitigar esses desafios e garantir a eficiência e a confiabilidade desses sistemas.

De maneira macro, encontramos alguns desafios específicos da proteção elétrica offshore.

- a. Coordenação das Proteções: Diferentemente da geração convencional, na geração eólica de grande porte, é comum ver uma grande quantidade de aerogeradores em paralelo. Para assegurar a confiabilidade e a proteção elétrica do sistema, é de suma importância a coordenação adequada, de forma a minimizar as interrupções na geração e assegurar a qualidade da operação do sistema.
- b. Transmissão de energia: a transmissão de energia elétrica da geração offshore é realizada através de cabos submarinos. Eles podem trabalhar em corrente alternada ou HVDC, a escolha dependerá de alguns fatores, como distância e nível de tensão. Esses cabos estão sujeitos a danos submarinos, causado por navios ou turbulência oceânica. A detecção de faltas é essencial para interromper a falha e isolar a seção afetada, para isso é necessário o monitoramento contínuo e uso de relés digitais com algoritmos avançados para execução desta tarefa.
- c. Proteção de Geradores e Conversores: Como em qualquer geração que faz o uso de máquinas eletromecânicas, é primordial o sistema de proteção para os geradores. Os geradores correspondem ao coração do sistema, garantir a estabilidade e a segurança destas máquinas, é assegurar a entrega do seu produto final, a energia elétrica. A geração eólica conta com uma particularidade que são os conversores. Por questões de controle, é necessário retificar a energia elétrica e esta variável deve ser levada em consideração na hora do estudo.

A metodologia empregada nesta monografia consistirá na explanação dos conceitos fundamentais dos aerogeradores, essenciais para a compreensão do tema. Posteriormente, serão levantadas informações relevantes sobre o sistema elétrico de potência, a fim de analisar e compreender a proteção do sistema elétrico de potência na geração eólica offshore. Por fim, será apresentado um estudo de caso real, destacando os principais pontos e desafios das soluções implementadas.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 CONVERSÃO DA ENERGIA EÓLICA

As turbinas eólicas ou aerogeradores convertem a energia mecânica proveniente do deslocamento do ar em energia elétrica. O vento movimenta as pás e seu eixo está conectado a uma caixa multiplicadora. Definimos a velocidade do vento como uma função da massa específica do ar, área de captação e velocidade do vento ao cubo. A velocidade do vento vista na Equação (2.1), se refere ao vento livre, ou seja, sem interferência da turbina eólica.

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (2.1)$$

Sendo que:

- $P_{mec}$  = potência mecânica.
- $\rho$  = massa específica do ar.
- $V$  = velocidade do vento.
- $C_p$  = coeficiente aerodinâmico.

#### 2.1.1 Aerodinâmica de uma turbina eólica

Para entender o funcionamento das turbinas é necessário compreender que as turbinas podem ser movimentadas por duas principais forças: sustentação e arrasto. A força de sustentação é perpendicular a direção do vento, ela é gerada a partir da diferença de pressão entre a superfície de cima e de baixo das pás. A força de arrasto é paralela à direção do vento, é consequência da resistência do ar ao movimento do objeto.

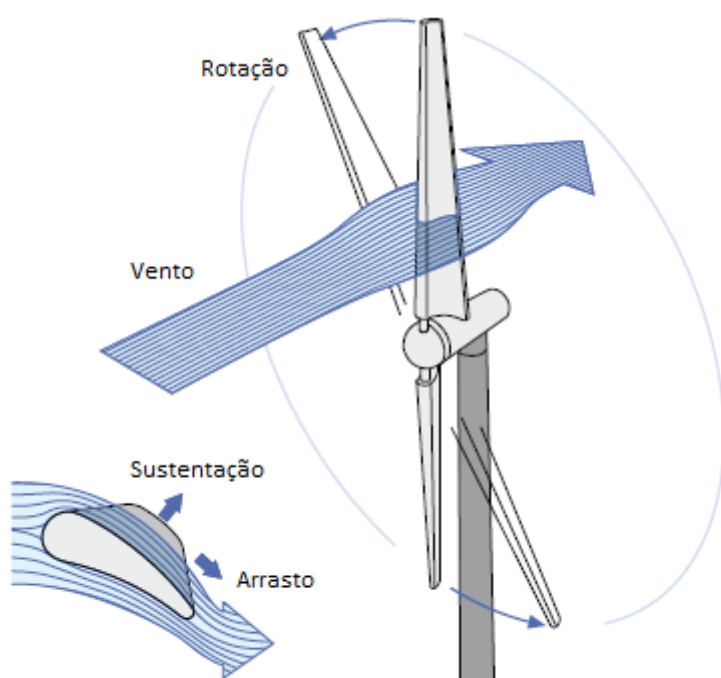


Figura 2.1 — Forças nas pás

Fonte: ABB (2011).

O controle da velocidade das turbinas é feito através da variação do ângulo de ataque, que corresponde à inclinação da pá em relação à direção do vento. Este ajuste é realizado de forma automática por um controlador de velocidade.

O aerogerador requer uma velocidade mínima do vento para seu funcionamento, conhecido também como velocidade de corte. Este valor varia entre 3 a 5 m/s e a capacidade nominal da máquina está a uma velocidade do vento de 12 a 14 m/s. Em altas velocidades, normalmente superiores a 25 m/s, a turbina é bloqueada por questões de segurança. Automaticamente o ângulo de ataque é ajustado para reduzir a velocidade a ponto de o sistema de freios travar a turbina.

Os aerogeradores possuem três componentes básicos, o rotor com as pás, a gôndola, também conhecido como nacelle, e a torre (Wenzel, 2007). Na nacelle estão os principais componentes, como mancais, eixo, dispositivo de giro, sistema de freio, caixa multiplicadora, gerador elétrico, transformador, painel de conversor de potência, controle e proteção, entre outros (Wenzel, 2007).

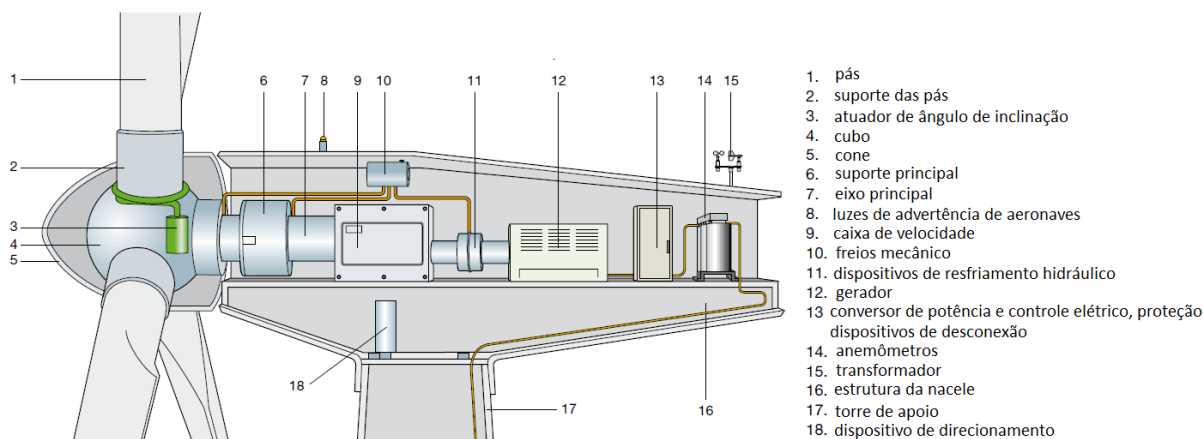


Figura 2.2 — Componentes gerais de uma turbina eólica

Fonte: ABB (2011).

### 2.1.2 Transformação da energia mecânica em elétrica

Para determinarmos a potência elétrica de uma turbina eólica, deve se considerar a eficiência do sistema de transmissão eletromecânico ( $\eta_{mec}$ ) na Equação (2.2).

Portanto:

$$P_{ele} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \eta_{mec} C_p \quad (2.2)$$

Sendo que:

- $P_{ele}$  = potência elétrica.
- $\eta_{mec}$  = rendimento mecânico.
- $\rho$  = massa específica do ar.
- $V$  = velocidade do vento.
- $C_p$  = coeficiente aerodinâmico.

Na prática, a potência elétrica gerada por uma turbina é indicada por sua curva de potência ou curva de desempenho em função da velocidade do vento livre. A potência de uma turbina eólica é levantada através de testes de operação segundo a IEC 61400-12. O resultado é uma curva e nela é ilustrada três características do vento (Moreira, 2021):

- Velocidade *cut-in*: velocidade do vento em que a turbina começa a gerar eletricidade.
- Velocidade nominal: velocidade do vento no qual a turbina atinge sua potência nominal.
- Velocidade *cut-out*: velocidade limite do vento. Esse limite serve para manter a integridade do gerador e dos componentes mecânicos da turbina.

A Fig. 2 ilustra a curva de potência de elétrica de uma turbina de 1.500 kW. Na figura, também é indicado a velocidade de *cut-in*, nominal e *cut-out* do vento.

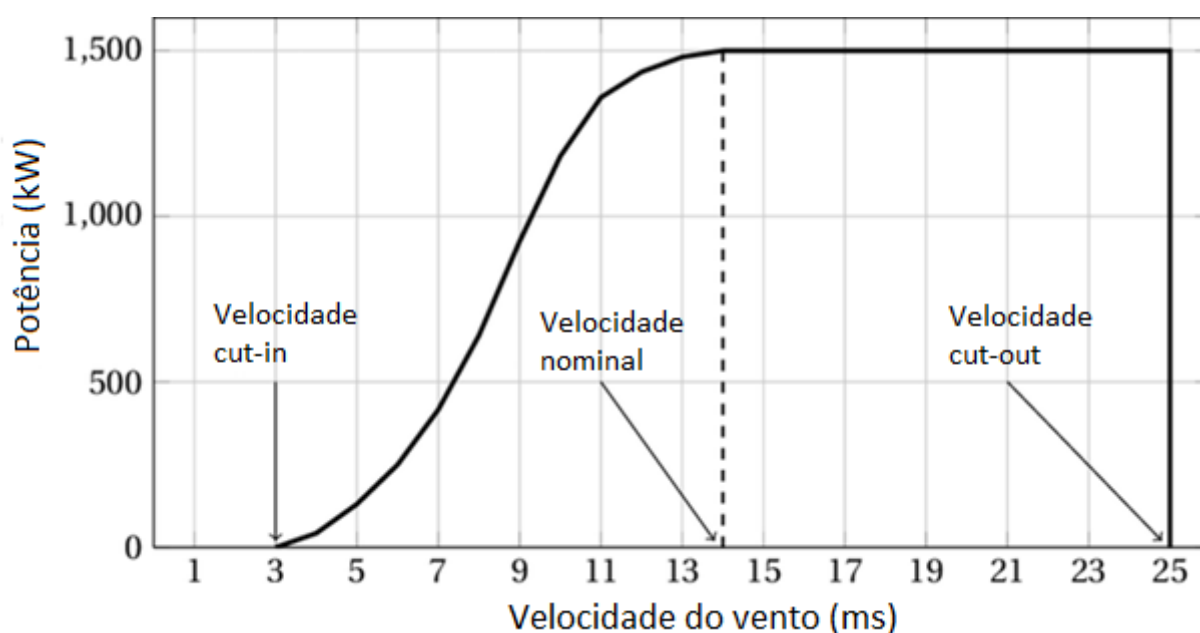


Figura 2.3 — Curva de potência de uma turbina eólica

Fonte: Hamon (2012).

## 2.2 CONTROLE DE TURBINAS EÓLICAS

As turbinas eólicas combinam conceitos de eletromecânica e eletrônica de potência. Cada uma possui uma topologia específica de controle de velocidade e potência.

### 2.2.1 Topologia de controle de potência das turbinas eólicas

Todas as turbinas eólicas são projetadas com algum tipo de controle de potência. Existem diferentes maneiras de controlar as forças aerodinâmicas no rotor da turbina e, assim, limitar a potência em ventos muito altos para evitar danos à turbina eólica. Podemos dividir o controle de potência das turbinas eólicas em três tipos: estol, passo e estol ativo.

#### 2.2.1.1 Controle de estol

O método de controle mais simples, robusto e barato é o controle de estol, onde as lâminas são aparafusadas no cubo em um ângulo fixo (Ackermann, 2012). O projeto aerodinâmico do rotor faz com que o rotor perca velocidade no momento em que a velocidade do vento excede um determinado nível, ou seja, quando a turbina atinja sua potência nominal. O resultado do fenômeno estol, é a perda da força de sustentação e o aumento da força de arrasto na pá, consequentemente diminui-se o torque da turbina (Moreira, 2021). Algumas desvantagens do método são menor eficiência em baixas velocidades de vento, maiores desgastes das pás e dos componentes mecânicos. Do ponto de vista elétrico, o controle de estol pode induzir flutuações na geração elétrica, durante condições de ventos variáveis, consequentemente, impacta na qualidade de energia elétrica na conexão à rede, gerando desafios de estabilidade ao sistema.

#### 2.2.1.2 Controle de passo

As turbinas projetadas para controle de passo, também conhecido como controle de *pitch*, possuem um dispositivo mecânico que permite o ajuste do ângulo de passo. As pás são rotacionadas longitudinalmente em torno de seus eixos, de forma a reduzir o ângulo de ataque e aumento do ângulo de passo, consequentemente, a potência também é reduzida (Moreira, 2021). Este tipo de controle permite posicionar a turbina de uma forma a evitar sobrecarga, por consequência de vento forte. Outra vantagem deste tipo de controle, é a ampla faixa de captura de vento, o que torna mais eficiente com relação ao controle de estol. que é geralmente, as vantagens desse tipo de controle são bom controle de potência, partida assistida e parada de emergência. Do ponto de vista elétrico, um controle de

potência mecânica mais eficiente, garante maior estabilidade a geração e ao sistema elétrico. Algumas desvantagens são a complexidade extra decorrente do mecanismo de passo e as maiores flutuações de potência em altas velocidades de vento. A potência instantânea, por causa das rajadas e da velocidade limitada do mecanismo de arremesso, flutuará em torno do valor médio nominal da potência (Ackermann, 2012).

#### 2.2.1.3 Controle ativo de estol

A terceira estratégia de controle possível é o controle ativo de estol. Como o nome indica, a estola da lâmina é ativamente controlada pelo arremesso das lâminas. Em baixas velocidades de vento, as pás são inclinadas de forma semelhante a uma turbina eólica controlada por passo, para alcançar a máxima eficiência. Em altas velocidades de vento, as pás entram em um estábulo mais profundo, sendo levemente inclinadas na direção oposta à de uma turbina controlada por passo. A turbina eólica de parada ativa atinge uma potência limitada mais suave, sem altas flutuações de potência, como no caso das turbinas eólicas controladas por passo. Este tipo de controle tem a vantagem de poder compensar variações na densidade do ar. A combinação com o mecanismo de passo facilita a realização de paradas de emergência e a partida da turbina eólica.

### 2.2.2 Topologia de controle de velocidade de turbinas eólicas

As turbinas eólicas também são classificadas de acordo com o controle de velocidade, que pode ser dividido em dois grandes tipos: velocidade fixa e variável.

A Tabela 1 indica um resumo dos diferentes tipos de configurações de turbinas eólicas, tendo em conta ambos os critérios (controle da velocidade e controle da potência).

Tabela 1 — Arquitetura das turbinas eólicas

| Controle de velocidade |        | Controle de potência |         |             |
|------------------------|--------|----------------------|---------|-------------|
|                        |        | Estol                | Passo   | Estol ativo |
| Velocidade fixa        | Tipo A | Tipo A0              | Tipo A1 | Tipo A2     |
| Velocidade variável    | Tipo B | Tipo B0              | Tipo B1 | Tipo B2     |
|                        | Tipo C | Tipo C0              | Tipo C1 | Tipo C2     |
|                        | Tipo D | Tipo D0              | Tipo D1 | Tipo D2     |

Fonte: Ackermann (2012).

#### 2.2.2.1 Turbinas eólicas de velocidade fixa

Inicialmente as turbinas eólicas eram projetadas para trabalharem a uma velocidade fixa.

Tipicamente nessas turbinas os geradores são conectados diretamente à rede elétrica. Além disso, incorporam sistemas de partida suave e bancos de capacitores para reduzir a necessidade de energia reativa. Elas eram projetadas para atingir a máxima eficiência em uma faixa específica de velocidade do vento.

As turbinas eólicas de velocidade fixa apresentavam vantagens notáveis, como simplicidade de projeto, robustez, confiabilidade e histórico comprovado de desempenho. Além disso, suas peças elétricas eram economicamente acessíveis. No entanto, enfrentavam desafios, como o consumo não controlado de energia reativa, estresses mecânicos e limitações no controle da qualidade da energia gerada. Devido à operação em velocidade fixa, qualquer variação na velocidade do vento era refletida como flutuações no torque mecânico e, conseqüentemente, como oscilações na saída de energia elétrica para a rede. Em sistemas elétricos menos robustos, essas flutuações de energia também poderiam resultar em variações significativas na tensão elétrica, acarretando perdas substanciais na transmissão de energia (Ackermann, 2012).

##### 2.2.2.1.1 Tipo A: Velocidade Fixa

Nesta topologia, é empregado um gerador de indução trifásico gaiola de esquilo conectado diretamente a rede por meio de um transformador elevador, conforme apresentado na Figura 2.4. A energia reativa é absorvida por um banco de capacitores, de forma a elevar o fator de potência e reduzir as perdas eletromagnéticas do gerador. Também é instalado uma *soft-starter* limitar a corrente de partida do gerador. A velocidade da turbina é mantida através da variação do ângulo de ataque das pás. Flutuações do vento são convertidas em flutuações mecânicas e posteriormente em flutuações de energia elétrica. Estes podem causar flutuações de tensão na rede elétrica. Os sistemas de velocidade fixa têm a vantagem da simplicidade e do baixo custo, no entanto, as principais desvantagens deste conceito incluem a incapacidade de suportar o controle de velocidade, a exigência de uma rede rígida (tensão e frequência fixas) e a necessidade de uma estrutura mecânica robusta para suportar o elevado estresse mecânico causado pelas rajadas de vento.

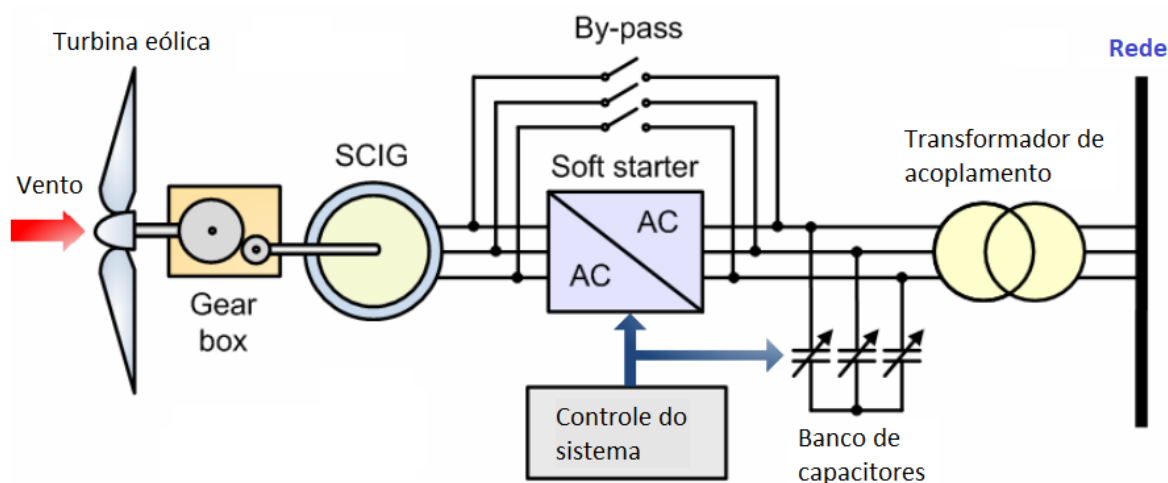


Figura 2.4 — Esquema de controle de velocidade tipo A

Fonte: Molina e Mercado (2011).

#### 2.2.2.2 Turbinas eólicas de velocidade variável

As turbinas eólicas de velocidade variável tornaram-se o tipo dominante entre as turbinas eólicas instaladas.

As turbinas eólicas de velocidade variável são projetadas para alcançar a máxima eficiência aerodinâmica em uma ampla gama de velocidades do vento. Com uma operação de velocidade variável tornou-se possível adaptar continuamente (acelerar ou desacelerar) a velocidade de rotação  $\omega$  da turbina eólica à velocidade do vento  $v$ . Ao contrário de um sistema de velocidade fixa, um sistema de velocidade variável mantém o torque do gerador bastante constante e as variações de vento são absorvidas por mudanças na velocidade do gerador.

O sistema elétrico de uma turbina eólica de velocidade variável é mais complicado do que o de uma turbina eólica de velocidade fixa. É normalmente equipado com um gerador de indução ou síncrono e conectado à rede através de um conversor de energia. O conversor de energia controla a velocidade do gerador, ou seja, as flutuações de potência causadas pelas variações do vento são absorvidas principalmente por mudanças na velocidade do gerador do rotor e, conseqüentemente, na velocidade do rotor do aerogerador (Ackermann, 2012).

A principal vantagem das turbinas eólicas de velocidade variável, é a capacidade de acompanhar a potência máxima para a velocidade do vento predominante e a possibilidade de reduzir cargas na estrutura mecânica amortecendo, até certo ponto, os picos de torque gerados por rajadas de vento intermitentes (Anaya-Lara *et al.*, 2014). No entanto, os custos desse tipo de turbina são maiores por conta da complexidade da eletrônica de potência. Outra desvantagem, são as perdas por aquecimento nos conversores.

#### 2.2.2.2.1 Tipo B: Resistência do Rotor Variável

Neste tipo, é usado um gerador com rotor bobinado e a potência do gerador é controlada através de uma resistência variável acoplada ao rotor deste gerador conforme ilustrado na Figura 2.5. A faixa de controle de velocidade varia conforme o tamanho da resistência variável do rotor e geralmente atinge até 10% acima da velocidade síncrona. A energia proveniente da unidade de conversão de energia externa é despejada como perda de calor. Assim como no tipo A, o gerador é conectado diretamente a rede elétrica. Um banco de capacitores é instalado para realizar a compensação da energia reativa da máquina e uma soft-starter para suavizar a partida.

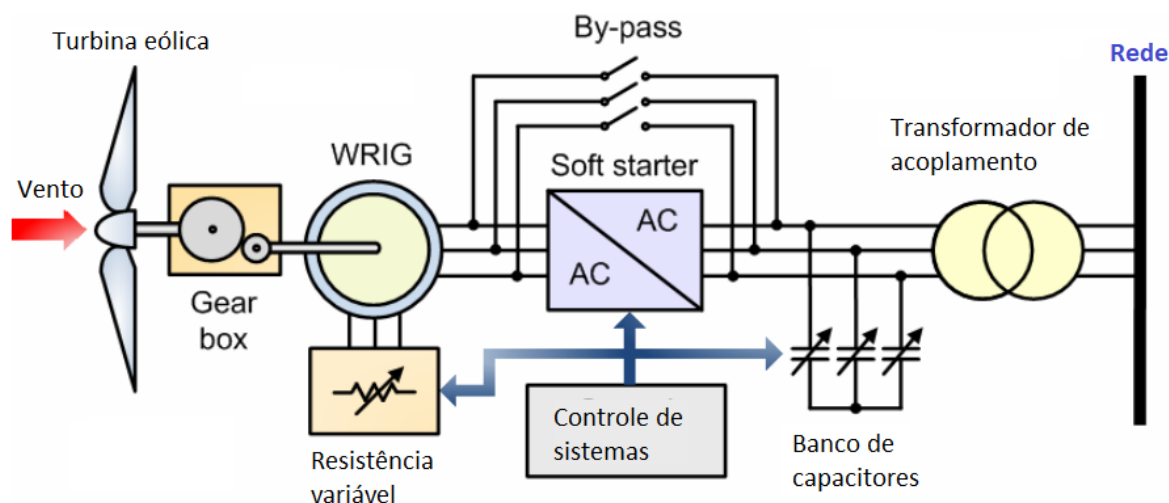


Figura 2.5 — Esquema de controle de velocidade tipo B

Fonte: Molina e Mercado (2011).

#### 2.2.2.2.2 Tipo C: DFIG

O gerador de indução duplamente alimentado, em inglês *Double-Fed Induction Generator* (DFIG), corresponde a uma turbina eólica controlada por velocidade variável com um gerador assíncrono com rotor bobinado e um conversor de energia em escala parcial no circuito do rotor, o esquema pode ser visto na Figura 2.6. O uso de conversores eletrônicos de potência permite que as turbinas eólicas operem em velocidade variável, e assim permite fornecer uma captura de energia mais eficaz do que as contrapartes de velocidade fixa. Conforme mostrado na Figura 9, o estator do rotor está diretamente conectado à rede elétrica, enquanto um conversor de potência controla a frequência do rotor e consequentemente a velocidade do rotor. Para não perder a potência dissipada em forma de calor no resistor adicional, esta potência pode ser colocada na rede na frequência nominal interpondo um conversor eletrônico de potência entre o rotor do gerador e a rede. Este dispositivo converte a potência alternada excedente no rotor primeiro em potência direta através de um retificador controlado e depois a reconverte em corrente alternada na frequência nominal através de um inversor (ABB, 2011). Além disso, este conversor permite controlar a compensação de potência reativa, descartando a necessidade de um banco de capacitores.

Esta tecnologia tem sido dominante para máquinas de velocidade variável acima de 1,5 MW (Anaya-Lara *et al.*, 2014). O DFIG usa da própria energia transformada no estator para controlar o gerador, desta forma reduz-se perdas e se torna mais eficiente que a topologia de resistência variável do rotor. Além disso, outras vantagens significativas do uso de sistemas de velocidade variável incluem uma diminuição nas perdas mecânicas, menos susceptibilidade a variações do vento, economia, controle simples de inclinação, melhor qualidade de energia e eficiência do sistema, ruído acústico reduzido e capacidade de operação em ilha (Molina; Mercado, 2011). Todavia, suas principais desvantagens são o uso de anéis coletores, que necessitam de escovas e manutenção, e os complexos esquemas de proteção em caso de falhas na rede (Molina; Mercado, 2011).

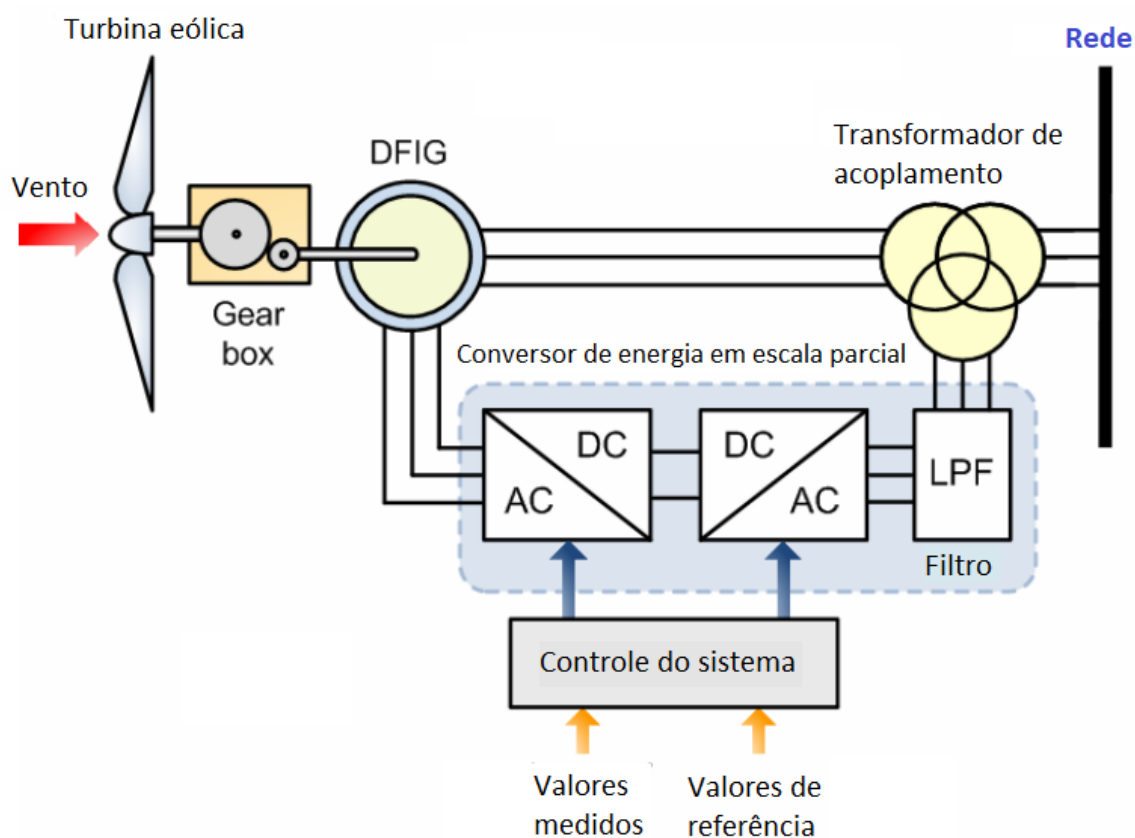


Figura 2.6 — Esquema de controle de velocidade tipo C

Fonte: Molina e Mercado (2011).

#### 2.2.2.2.3 Tipo D: FRC

Esta configuração corresponde a um gerador síncrono conectado à rede elétrica através de um conversor de potência em escala real, conforme ilustrado na Figura 2.7. Este conversor de potência também permite controlar partida e a compensação de potência reativa gerada localmente. Semelhante a tipologia DFIG, o conversor é de quatro quadrantes baseado em IGBTs. Alguns sistemas de turbinas eólicas de velocidade totalmente variável não possuem caixa de engrenagens e usam um gerador multipolar de acionamento direto.

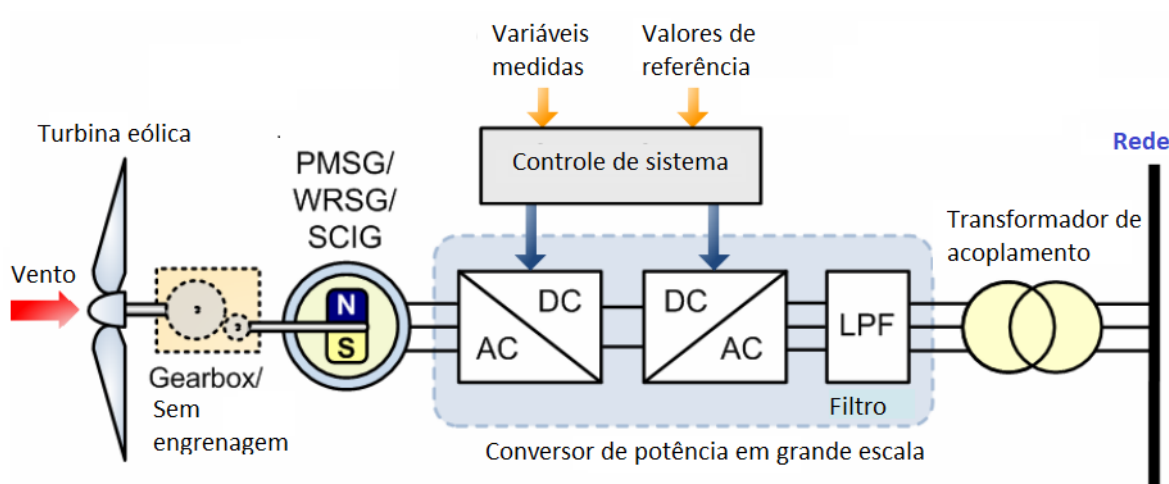


Figura 2.7 — Esquema de controle de velocidade tipo D

Fonte: Molina e Mercado (2011).

## 2.3 CONVERSORES DE POTÊNCIA DAS TURBINAS EÓLICAS

Atualmente o tipo de controle de velocidade mais utilizado na indústria eólica são os tipos C e D. Os conversores de potência desempenham um papel importante na geração eólica, e existem diversos tipos destes equipamentos que serão mostrados na seção seguinte. Abaixo temos uma tabela com os conversores da tabela abaixo.

Tabela 2 — Tabela comparativa de conversores de potência

| Configuração              | 2L BTB | 3L NPC-BTB | 3L HB-BTB | 5L HB-BTB | 3L NPC-BTB + 5L HB-BTB | CHB-MFT |
|---------------------------|--------|------------|-----------|-----------|------------------------|---------|
| Níveis de saída de tensão | 2      | 3          | 3         | 5         | 3/5                    | 2N+1    |

| Configuração             | 2L<br>BTB | 3L NPC-<br>BTB | 3L HB-<br>BTB | 5L HB-<br>BTB | 3L NPC-BTB +<br>5L HB-BTB | CHB-<br>MFT |
|--------------------------|-----------|----------------|---------------|---------------|---------------------------|-------------|
| Número de IGBTs          | 1 pu      | 2 pu           | 2 pu          | 4 pu          | 3 pu                      | 4 N pu      |
| Número de diodos         | 1 pu      | 3 pu           | 2 pu          | 6 pu          | 4,5 pu                    | 4N pu       |
| Tensão máxima de saída   | 1 pu      | 2 pu           | 2 pu          | 4 pu          | 2/4 pu                    | 2N pu       |
| Tolerância de falta      | Não       | Não            | Limitado      | Limitado      | Não                       | Sim         |
| Tamanho do filtro        | +++       | ++             | ++            | +             | ++/+                      | 0           |
| Tamanho do transformador | +++       | +++            | +++           | +++           | +++                       | +           |

Fonte: Blaabjerg *et al.*

### 2.3.1 Conversor de potência de dois níveis (2L-PWM-VSC)

O termo "2L" refere-se a dois níveis do conversor e descreve a topologia básica. Este tipo de conversor possui dois estados de tensão de saída, geralmente tensão positiva e negativa em barramento de corrente contínua. Já o segundo termo, o PWM, refere-se ao tipo de controle de potência. E o VSC, ao tipo de comutação de tensão. Portanto, este tipo de conversor possui dois níveis com modulação por largura de pulso (PWM) para sistemas VSCs.

Este conversor é o mais utilizado. Sua estrutura é relativamente mais simples e possui menos componentes. Geralmente, são configurados como estrutura back-to-back, para facilitar na conexão com o gerador e a rede com o transformador a montante conforme a Figura 2.8.

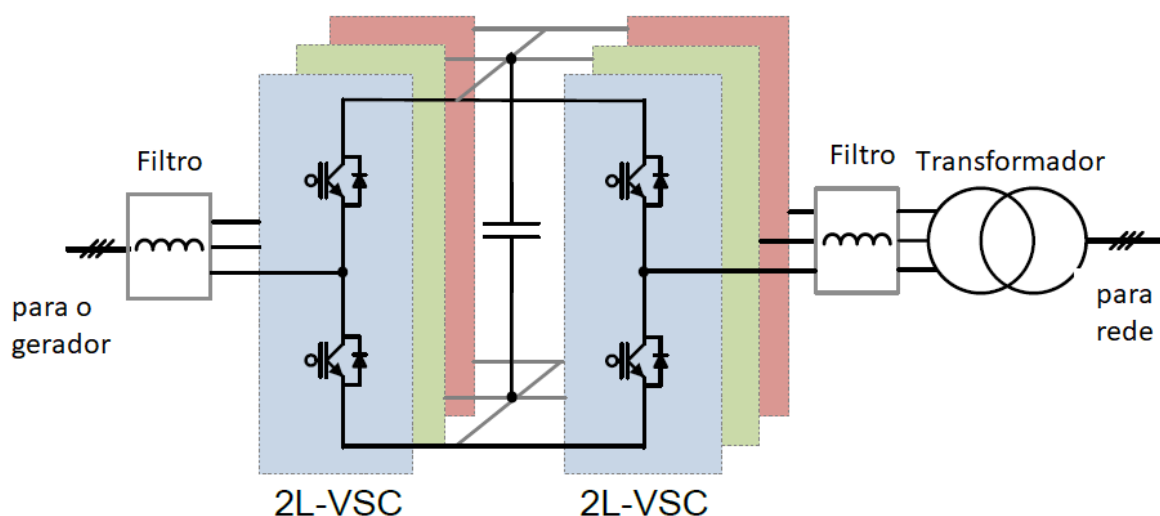


Figura 2.8 — Conversor de fonte de tensão back-to-back de dois níveis para turbinas eólicas (2L BTB).

Fonte: Blaabjerg *et al.*

Este conversor funciona da seguinte maneira, a tensão de referência, no caso da rede, é comparada com a tensão em CC do barramento. Com base na comparação, o conversor gera um sinal PWM para regular a tensão de saída com a menor diferença possível.

A comutação é feita através transistores IGBTs ou MOSFETs de acordo com o sinal PWM.

No entanto, na eletrônica de potência, os conversores de potência são grandes produtores de harmônicas, e isso é prejudicial para o sistema elétrico. Para atenuar as harmônicas, é utilizado filtro LC (indutor-capacitor) para garantir um funcionamento mais eficiente e estável para do sistema elétrico.

Uma grande desvantagem do 2L-PWM-VSC, é o aumento de perdas de comutação e diminuição da eficiência em maiores níveis de tensão e potência. Para redução dessas perdas deste conversor, pode ser necessário aplicar outro conversor em série ou paralelo para alcançar a tensão e a potência desejada. Este tipo de solução aumenta a dificuldade de engenharia neste sistema.

Outra desvantagem deste conversor, é a introdução de picos de tensão para o gerador e transformador. Por isso, faz-se necessário filtros para correção do gradiente de tensão.

### 2.3.2 Conversor de potência multinível

O conversor de potência multinível é uma alternativa ao conversor de potência de dois níveis, para alcançar desempenho aceitável de potência e tensão. Os conversores multiníveis são usados principalmente para turbinas de velocidade variável de 3 a 10 MW.

Existem cinco tipologia de conversores multinível, são elas:

- back-to-back fixada com diodo de ponto neutro de três níveis (3L NPC-BTB)
- back-to-back de ponte H de três níveis (3L HB-BTB)
- back-to-back de ponte H de cinco níveis (5L HB-BTB)
- Topologia fixada com diodo de ponto neutro de três níveis para o lado do gerador e topologia de ponte H de cinco níveis para o lado da rede (3L NPC + 5L HB)
- back-to-back em ponte H em cascata com transformadores de média frequência (CHB-MFT)

#### 2.3.2.1 Topologia back-to-back fixada com diodo de ponto neutro de três níveis (3L NPC-BTB)

O termo "3L" refere-se aos três níveis do conversor e descreve a topologia básica. Este tipo de conversor possui três estados de tensão de saída: negativa, positiva e ponto neutro (0 V). Já o segundo termo, o NPC, refere-se a topologia do conversor de três níveis tipo de controle de potência. E o BTB, indica que este conversor pode operar como back-to-back. Isso significa que o conversor pode ser conectado em série e permite o controle bidirecional de energia.

Este conversor é um dos mais comercializados. Sua estrutura é semelhante ao 2L-PWM-VSC. Na figura abaixo, podemos verificar um esquema simplificado de suas conexões.

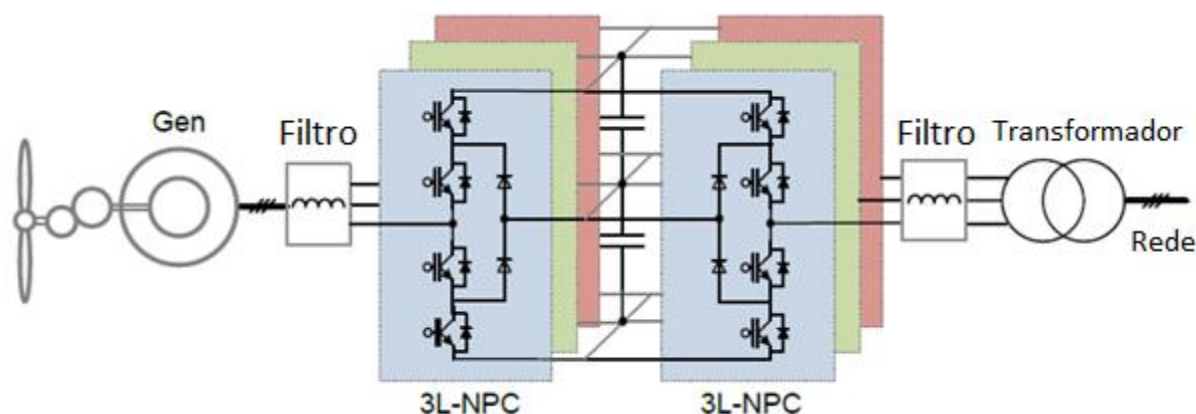


Figura 2.9 — Conversor back-to-back com fixação de ponto neutro de três níveis para turbinas eólicas (3L-NPC BTB).

Fonte: Blaabjerg *et al.*

Este conversor envolve a comutação dos transistores semicondutores (geralmente MOSFETs ou IGBTs) em diferentes estados para criar níveis de tensão de saída intermediários. Esses níveis intermediários permitem controlar a tensão na saída com maior precisão e reduzir as perdas de comutação em comparação com conversores tradicionais de dois níveis.

Este conversor é ideal para aplicações de alta potência e que exigem perdas mínimas. Diferentemente do 2L-PWM-VSC, o 3L NPC-BTB está menos sujeito a variações de tensão, consequentemente os filtros conectados em série com o conversor serão menores.

### 2.3.2.2 Topologia back-to-back de ponte H de três níveis (3L HB-BTB)

A solução 3L HB-BTB é composta por dois conversores *half-bridge*. É semelhante ao conversor 3L NPC-BTB, possui três níveis de tensão (positivo, negativo e neutro) sua estrutura é *back-to-back* e ideal para aplicações que requerem de baixas perdas.

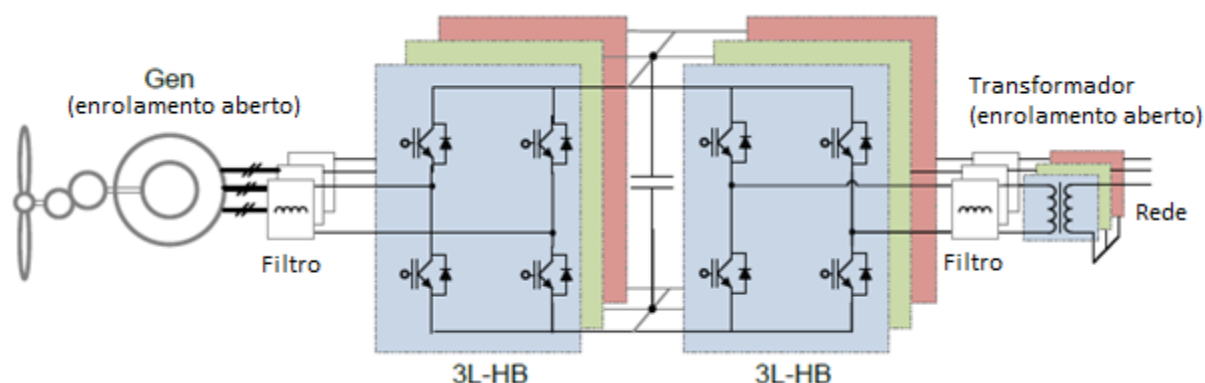


Figura 2.10 — Conversor back-to-back ponte H de três níveis para turbinas eólicas (3L-HB BTB).

Fonte: Blaabjerg *et al.*.

Nessa solução é necessário um conversor por fase, conforme Figura 2.10. A principal vantagem da operação isolada por fase, é a maior capacidade de tolerância a falhas. No entanto, sua estrutura exige maior espaço e é mais pesado. Além disso, deve-se considerar custos extras com transformadores, cabos e outros equipamentos.

### 2.3.2.3 Topologia back-to-back de ponte H de cinco níveis (5L HB-BTB)

O conversor 5L HB-BTB é uma extensão do 3L HB-BTB. É composto por dois conversores *half-bridge* que fazem uso de braços de comutação 3L-NPC, como mostrado na Figura 2.11 (Blaabjerg *et al.*).

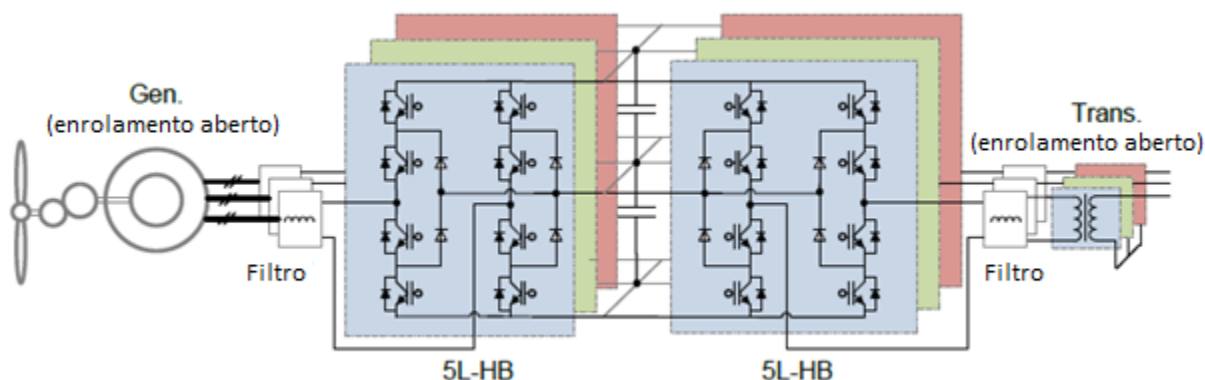


Figura 2.11 — Conversor back-to-back ponte H de cinco níveis para turbinas eólicas (5L-HB BTB).

Fonte: Blaabjerg *et al.*.

Com o 5L HB-BTB é possível alcançar 5 níveis de tensão: tensão negativa mais baixa, tensão negativa intermediária, ponto neutro (0V), tensão positiva intermediária e tensão positiva mais alta. Esses 5 níveis permitem maior precisão no controle de tensão de saída.

Apesar da maior precisão comparado com o conversor 3L HB-BTB, o maior número de dispositivos de comutação reduz a confiabilidade do conversor 5L HB-BTB.

#### 2.3.2.4 Topologia fixada com diodo de ponto neutro de três níveis para o lado do gerador e topologia de ponte H de cinco níveis para o lado da rede (3L NPC + 5L HB)

Geralmente, os requisitos de qualidade de saída do lado da rede são muito mais rigorosos do que os do lado do gerador. Para adaptar esse requisito assimétrico para conversores de energia eólica, essa configuração "composta" emprega a topologia 3L-NPC no lado do gerador e a topologia 5L-HB no lado da rede para alcançar um desempenho assimétrico, como mostrado na Figura 2.13.

No lado do gerador, esta configuração tem um desempenho semelhante à solução BTB de 3 NPCs. Enquanto no lado do grid, ele compartilha o mesmo desempenho do 5L-HB BTB (Blaabjerg *et al.*). Os níveis de tensão e amplitude do lado da rede são maiores do que os do lado do gerador. Nota-se que uma estrutura de enrolamento aberto no gerador é evitada, e o comprimento do cabo no lado do gerador é reduzido à metade, mas a capacidade potencial tolerante a falhas também é eliminada (Blaabjerg *et al.*). Ele tem menos dispositivos de comutação em comparação com 5L-HB BTB, mas a distribuição de perda desigual nos dispositivos de comutação ainda existe (Blaabjerg *et al.*).

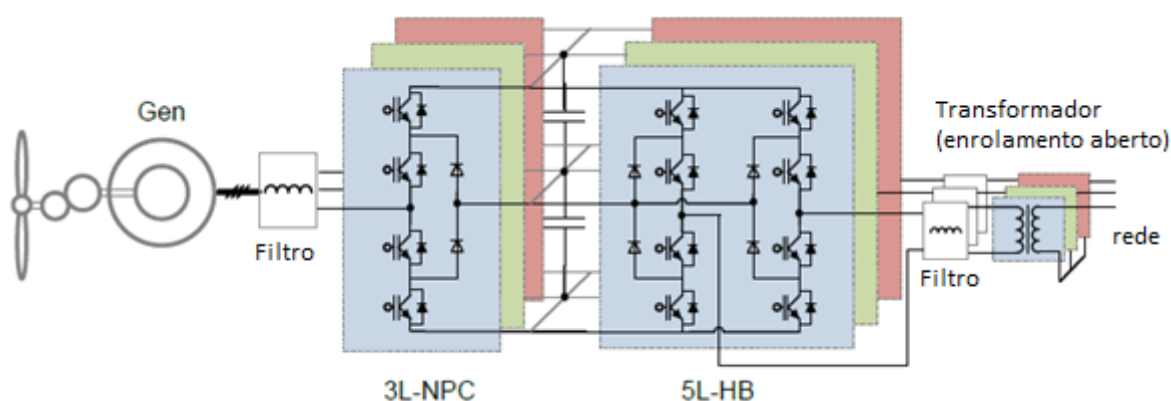


Figura 2.13 — Conversor de ponto neutro de três níveis e ponte H de cinco níveis para turbinas eólicas. (3L-NPC + 5L-HB)

Fonte: Blaabjerg *et al.*

#### 2.3.2.5 Conversor back-to-back em ponte H em cascata com transformadores de média frequência (CHB-MFT)

Até agora, uma das topologias multinível de células conversoras em cascata mais comercializadas é o conversor Cascaded H-Bridge (CHB). Esta característica pode envolver um complexo transformador multipulso do lado do gerador, resultando em maior peso e volume (Blaabjerg *et al.*). Podemos ver o esquema deste conversor na Figura 2.13.

Os conversores DC/DC com transformadores de média frequência (MFT) operam em vários kHz a dezenas de kHz, o tamanho do transformador é assim reduzido (Blaabjerg *et al.*). Devido à estrutura em cascata, essa configuração pode ser conectada diretamente à rede elétrica de transmissão (10 kV-20 kV) com alta qualidade de tensão de saída, design sem filtro e capacidade de redundância (Blaabjerg *et al.*).

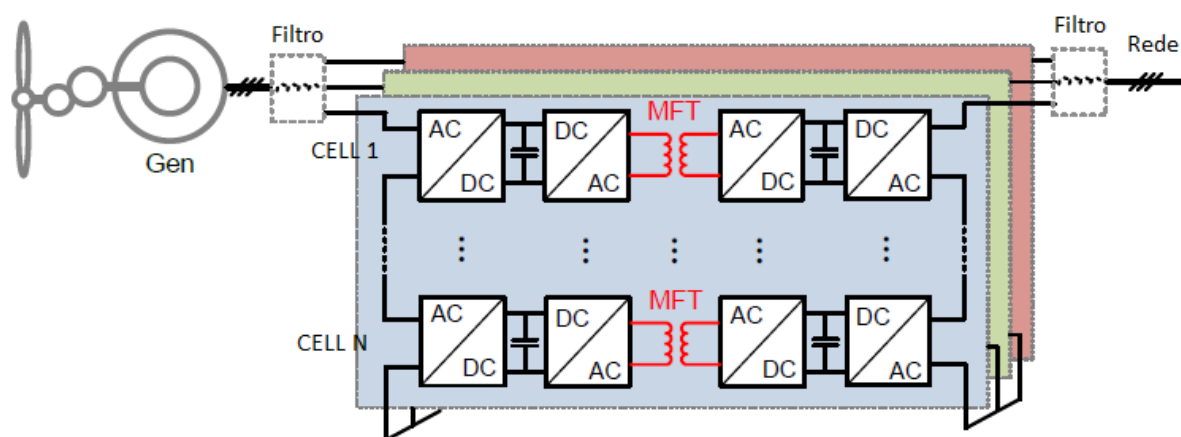


Figura 2.14 — Conversor ponte H em cascata back-to-back para turbinas eólicas com transformador de média frequência (CHB-MFT).

Fonte: Blaabjerg *et al.*

No entanto, a grande quantidade de semicondutores de potência, bem como componentes auxiliares, poderia reduzir em grande parte a confiabilidade deste conversor e aumentar o custo (Blaabjerg *et al.*).

#### 2.3.2.5.1 Conversor de potência unidirecional

Estes conversores são utilizados em aplicações FRC, conectados diretamente a rede, conforme Figura 2.15.

Um simples retificador de diodo pode ser aplicado como o conversor do lado do gerador para obter uma solução econômica. Para o conversor do lado da grade, algumas das topologias de quatro quadrantes apresentadas anteriormente, que oferecerão todos os recursos de suporte de grade, podem ser usadas diretamente.

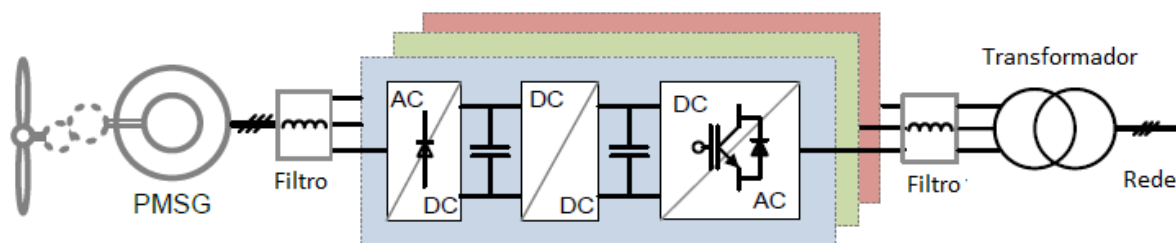


Figura 2.15 — Turbina eólica com conversor de potência completo e gerador de ímã permanente.

Fonte: Blaabjerg *et al.*

### 3 SISTEMA ELÉTRICO DA GERAÇÃO EÓLICA OFFSHORE

#### 3.1 VISÃO GERAL

O sistema elétrico de um parque eólico offshore e sua conexão com o sistema elétrico principal impõem novos desafios.

Os parques eólicos offshore tendem a ser maiores, e a distância entre as turbinas eólicas é geralmente maior do que a dos parques eólicos onshore por causa do maior efeito de arrasto, em inglês wake effect. Este fenômeno ocorre quando as turbinas eólicas interagem com o vento entre si. A distância até a costa ou a próxima estação de transformação (offshore) é muitas vezes significativamente maior do que para parques eólicos onshore. Para grandes parques eólicos offshore com uma rede AC, níveis de tensão mais altos certamente serão úteis para minimizar as perdas de energia, mas níveis de tensão mais altos podem resultar em transformadores maiores e custos mais altos para esses transformadores. Os transformadores serão colocados na nacela, na torre, ou em um contêiner ao lado da turbina eólica, portanto, o tamanho do transformador pode se tornar um problema. Além disso, o custo e o tamanho do quadro de distribuição também aumentarão com os níveis de tensão.

Abaixo temos uma figura que ilustra um esquema de um parque eólico offshore.

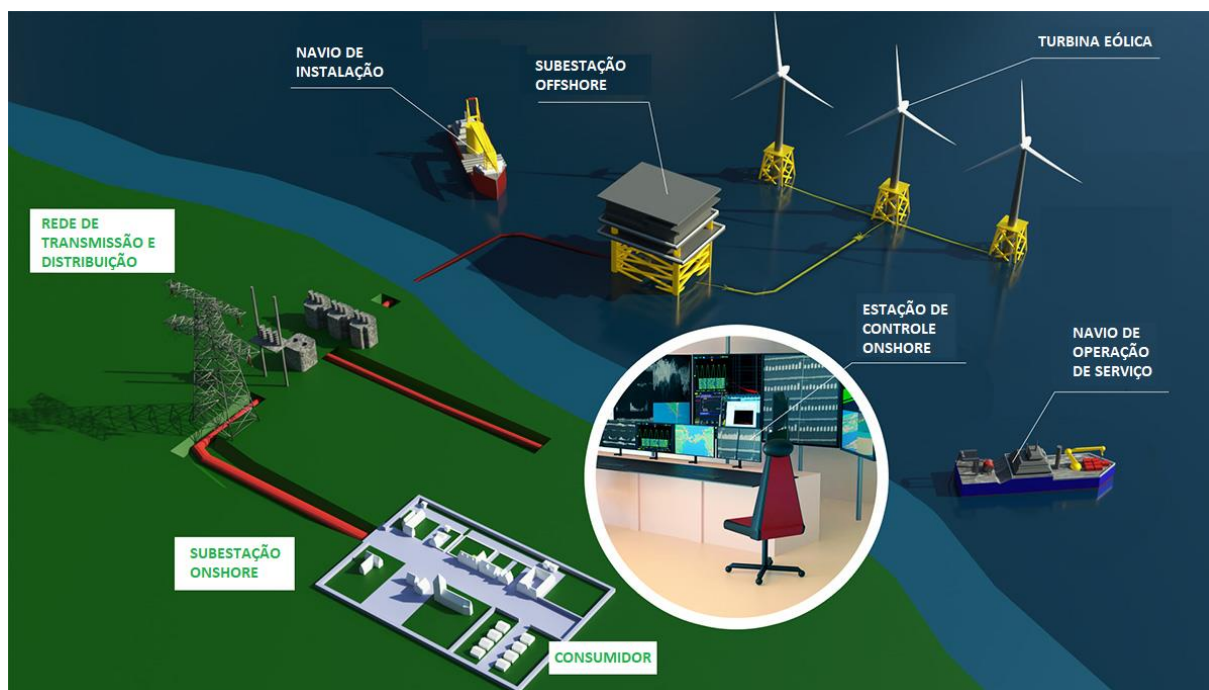


Figura 3.1 — Esquema de conexão de um parque eólico offshore

Fonte: <https://www.zenitel.com/news/offshore-wind-huge-potential-both-energy-and-maritime-operators>. Acesso em: 2 de novembro de 2023.

Podemos dividir a geração eólica offshore em dois subsistemas: nível da turbina e nível do parque eólico (Anaya-Lara *et al.*, 2014). No nível da turbina, é realizado a transformação da energia do vento na energia elétrica. Nesse sistema, estão os equipamentos mecânicos, elétricos e de controle responsáveis por essa transformação. Já o nível do parque eólico, abrange tanto o sistema de geração quanto de transmissão.

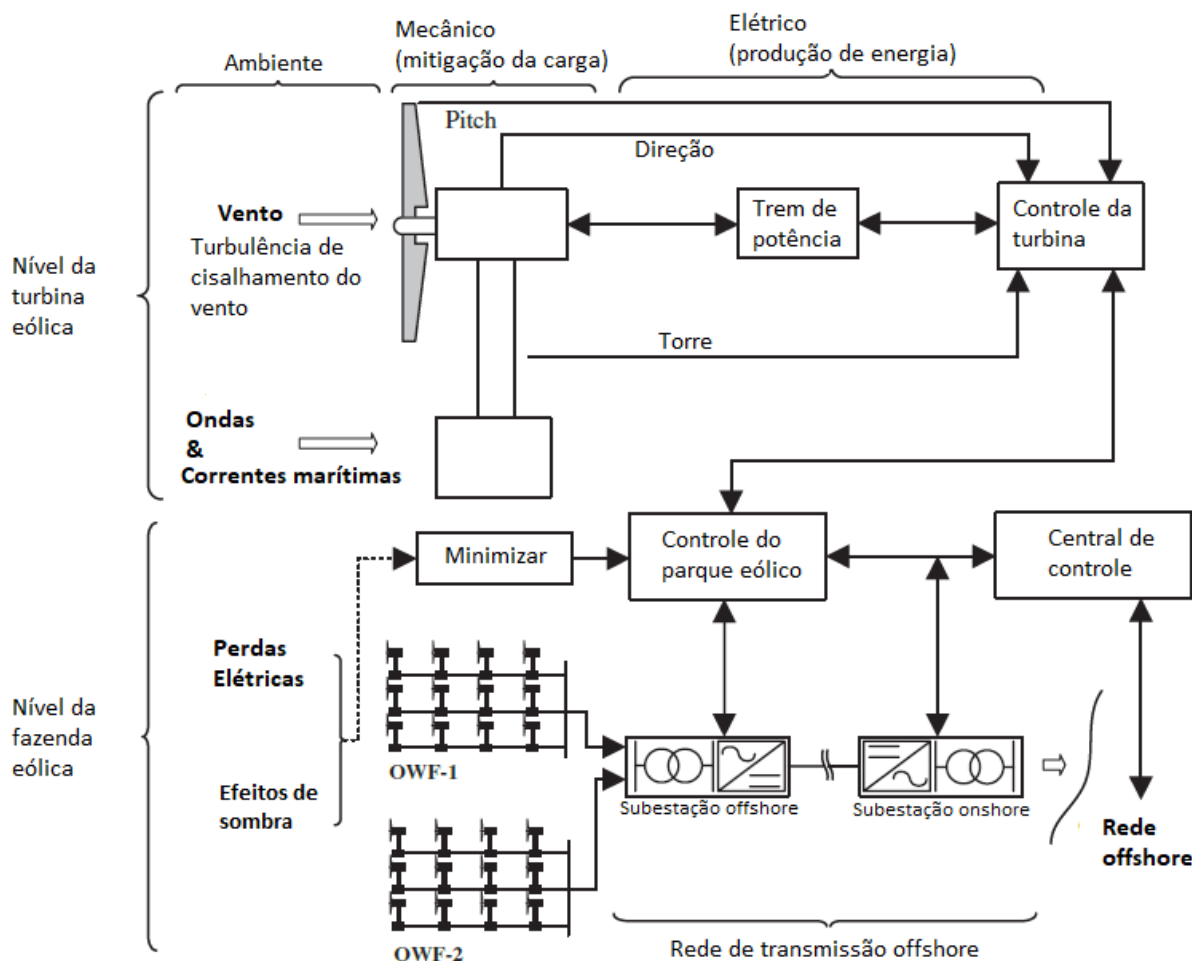


Figura 3.2 — Subsistemas da geração eólica offshore

Fonte: Anaya-lara *et al.* (2014).

### 3.2 SUBESTAÇÃO OFFSHORE

As subestações offshore desempenham um papel crucial na infraestrutura de geração de energia eólica offshore, sendo empregadas para elevar a tensão antes que a eletricidade seja transmitida para a rede terrestre (onshore). O principal propósito dessas subestações é otimizar o processo de transmissão de energia, visando a eficiência e a minimização de perdas elétricas ao longo dos cabos submarinos. As principais funções de uma subestação offshore são: coleta e agrupamento das fontes geradoras, elevação da tensão, conversão de corrente, controle e monitoramento e conexão a subestação onshore. Abaixo temos duas figuras: um esquema de subestação offshore e a subestação Wikinger com capacidade instalada de 350 MW, localizado no mar Báltico da Alemanha.

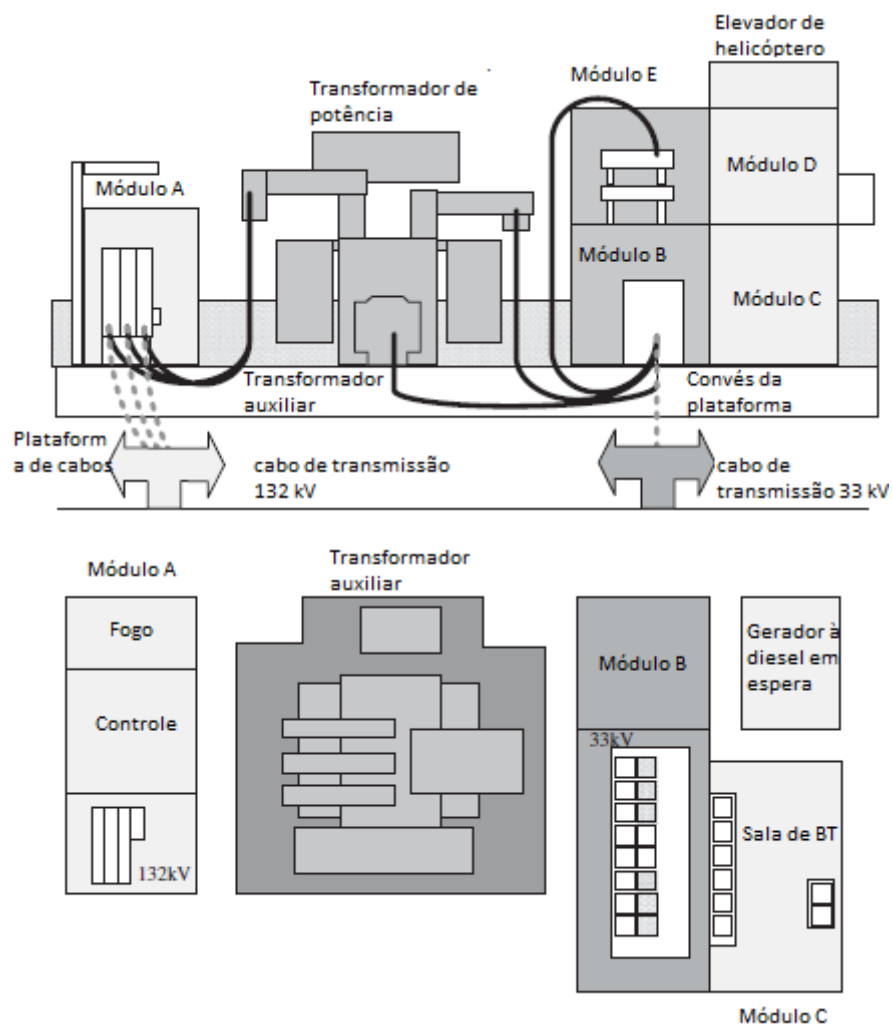


Figura 3.3 — Esquema de uma subestação offshore

Fonte: Anaya-lara *et al.* (2014).

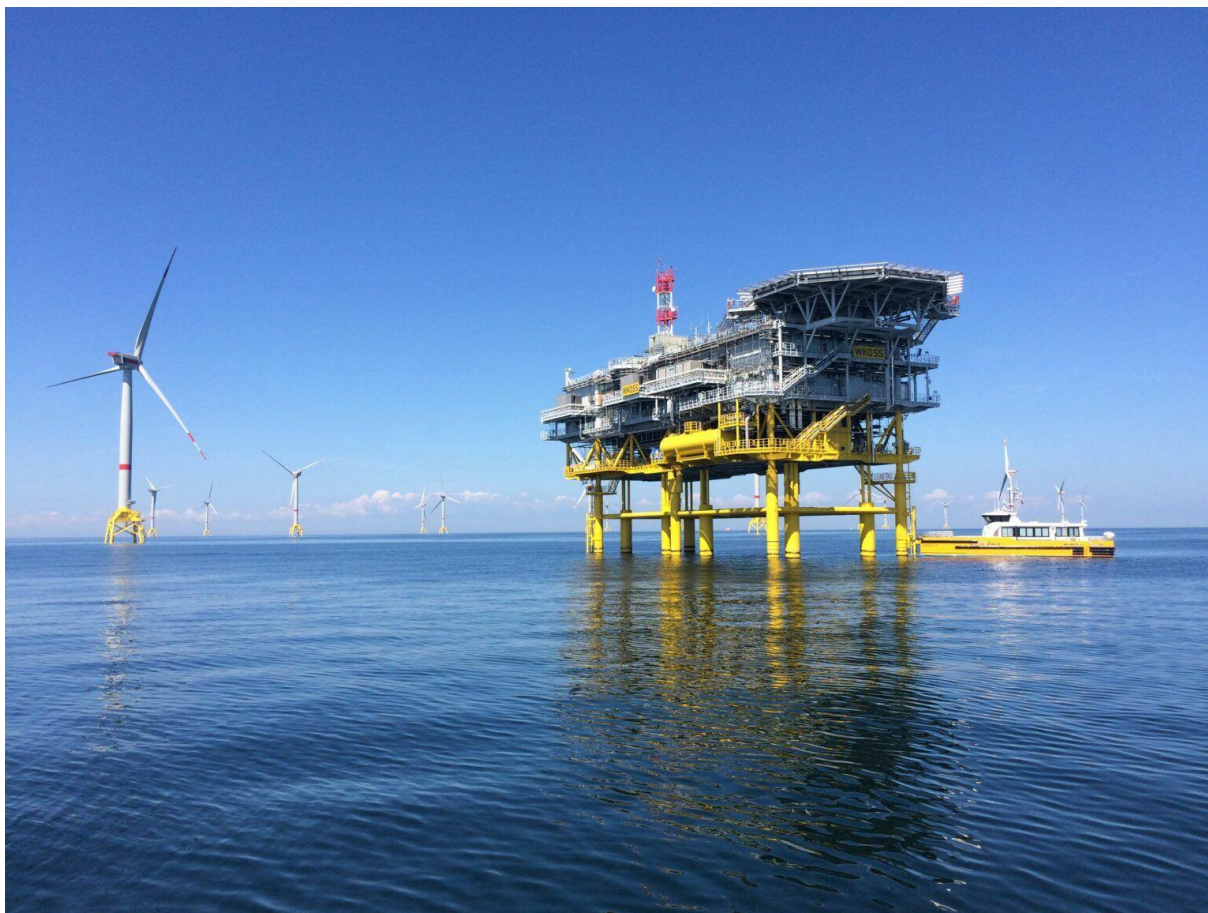


Figura 3.4 — Subestação offshore Wikinger

Fonte: <https://www.offshorewind.biz/2021/05/18/iberdrola-reveals-baltic-eagle-offshore-substation-team/>. Acesso em: 2 de novembro de 2023.

Normalmente, uma subestação offshore pode suportar até 500 MW de produção do parque eólico (Anaya-Lara *et al.*, 2014). Com o aumento do tamanho dos parques eólicos, o tamanho dessas subestações também pode aumentar.

Os principais componentes relacionados aos sistemas elétricos são os seguintes (Anaya-Lara *et al.*, 2014):

- Transformador para elevação de tensão.
- O gerador diesel reserva de back-up para alimentar o sistema auxiliar em caso de interrupção de energia com cabo de exportação.
- Painel de distribuição de alimentadores.
- Conversores em caso de transmissão em corrente contínua.

- Compensadores de energia reativa

A subestação offshore é conectada a uma subestação onshore através das linhas de transmissão. O papel dessa subestação onshore, é conectar a geração offshore ao sistema elétrico. Além da conexão essa subestação pode ser responsável pela conversão de corrente contínua para alternada e transformação da tensão para o nível do sistema elétrico local.

### 3.3 ARQUITETURA DAS FAZENDAS EÓLICAS OFFSHORE

Os parques eólicos offshore, possuem alguns arranjos para coletar a energia dos aerogeradores. A decisão da arquitetura desse sistema é baseada em custos, nível de redundância e outras questões técnicas de acordo com a aplicação, como controle e características do ambiente.

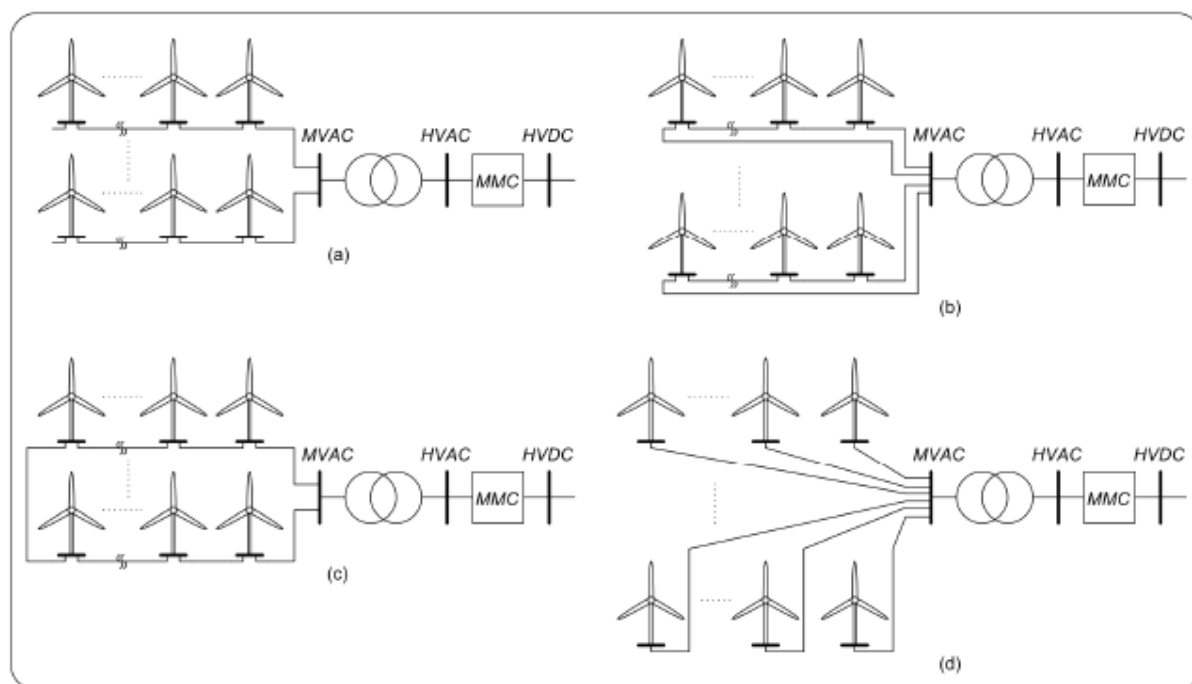


Figura 3.5 — Possíveis arranjo dos parques eólicos offshore

Fonte: Martinez-rodrigo *et al.* (2017).

#### 3.3.1 Radial

A disposição mais simples de um sistema coletor de parque eólico é um projeto radial, no qual várias turbinas eólicas são conectadas a um único alimentador de cabos dentro de uma linha. O número máximo de turbinas eólicas em cada alimentador de linha é determinado pela capacidade dos geradores e pela classificação máxima do cabo submarino na linha. Este projeto oferece os benefícios de ser simples de controlar e também barato, porque o comprimento total do cabo é menor, com o afunilamento da capacidade do cabo longe do hub sendo possível. A principal desvantagem deste projeto é sua baixa confiabilidade, pois no caso de uma falha no cabo ou no painel de distribuição na extremidade do cubo da corda radial, ele tem o potencial de impedir que todas as turbinas a jusante exportem energia.

### **3.3.2 Anel unilateral**

Com alguns cabeamentos adicionais, os layouts anelados podem resolver alguns dos problemas de segurança de fornecimento do projeto radial, incorporando um caminho redundante para o fluxo de energia com um barramento em paralelo. A segurança adicional vem às custas de cabos mais longos para um determinado número de turbinas eólicas e requisitos de classificação de cabos mais altos em todo o circuito de corda. Um projeto de anel de face única, requer um cabo adicional da última turbina eólica para o cubo. Este cabo deve ser capaz de lidar com o fluxo de potência total da linha em caso de falha no link primário para a extremidade do cubo.

### **3.3.3 Anel bilateral**

Nesta configuração, a última turbina eólica em uma corda é interconectada à última turbina eólica na próxima. Se a potência total de saída das turbinas eólicas em uma das cordas fosse fornecida através da outra corda, então o cabo na extremidade do cubo desta última precisa ser dimensionado para a potência de saída do dobro do número de turbinas eólicas.

### **3.3.4 Estrela**

Nesta configuração, uma das turbinas será adotada como a central e a partir dela serão distribuídos os cabos para cada turbina central.

### 3.4 TRANSMISSÃO E CONEXÃO COM A REDE

A rede de transmissão offshore é usada para transferir energia do parque eólico para a rede elétrica localizada em terra. A maioria dos parques eólicos operacionais está conectada através de redes de corrente alternada de alta tensão (HVAC) com frequências de 50 Hz ou 60 Hz, no entanto, a corrente contínua de alta tensão (HVDC) pode ser mais econômica e ter menores perdas elétricas em distâncias mais longas. Há uma tendência das fazendas eólicas offshore de afastarem cada vez mais da costa (Offshore Wind Outlook, 2019). É necessário o desenvolvimento e aprimoramento das tecnologias existente para acompanhar essa tendência de afastamento.

Abaixo, temos duas figuras que facilitam no entendimento da tomada de decisão do tipo da linha de transmissão a ser adotada na geração eólica offshore. A Figura 3.6, compara o custo de implementação da linha de transmissão HVAC e e HVDC pela distância. Já na Figura 3.7, visualizamos a escolha do tipo da linha de transmissão, forma da onda e conversor a ser adotado, com base na potência e a distância da geração a costa.

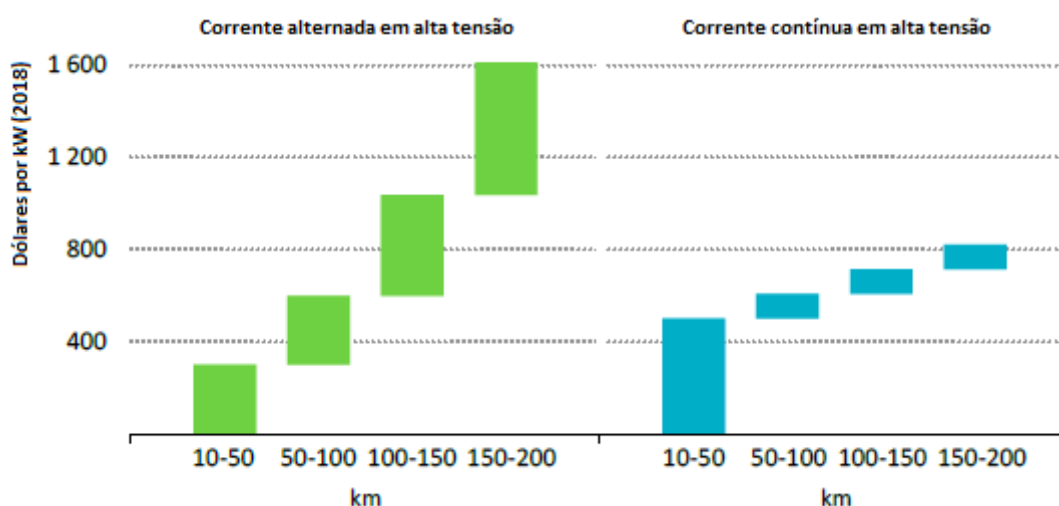


Figura 3.6 — Custo de implementação da linha de transmissão por tipo e distância da costa

Fonte: Offshore Wind Outlook (2019).

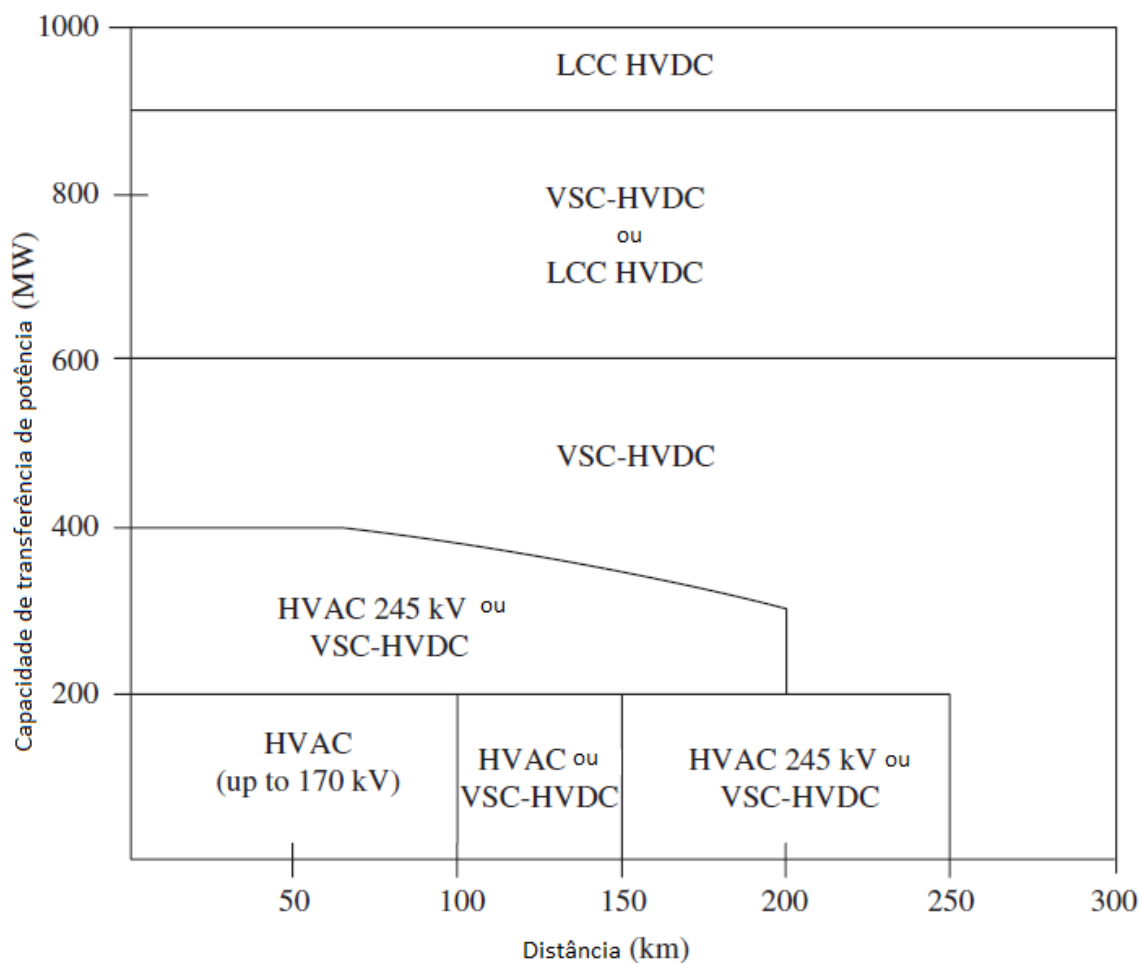


Figura 3.7 — Escolha do tipo de transmissão com base na distância e potência da geração eólica offshore

Fonte: Anaya-lara *et al.* (2014).

A responsabilidade pelo projeto, instalação e manutenção de ativos de transmissão offshore é definida por regulamento e pode ser do operador do sistema de transmissão, do governo ou do desenvolvedor do projeto.

### 3.4.1 Transmissão HVAC

Um sistema de transmissão HVAC consiste nos seguintes componentes principais: um ponto de conexão entre as turbinas eólicas, a depender do projeto uma subestação elevatória offshore; e a própria transmissão, cabos submersos com

isolamento de polietileno de três núcleos (XLPE). Dependendo da distância das turbinas, pode ser necessário a compensação de energia nas extremidades do cabo.

Quando as distâncias aumentam, as perdas nos cabos também aumentam, e se a distância for grande as perdas são consideráveis. Para compensar essas perdas aumenta-se o nível de tensão de transmissão, no entanto, os custos e tamanho dos equipamentos também serão maiores.

A estrutura do sistema elétrico eólico offshore conectado em HVAC é composta por: um grupo de turbinas eólica, ponto de conexão AC em média tensão, subestação offshore, linha de transmissão AC e subestação onshore (Niu *et al.*, 2021). A estrutura da transmissão HVAC pode ser visualizada na figura abaixo.

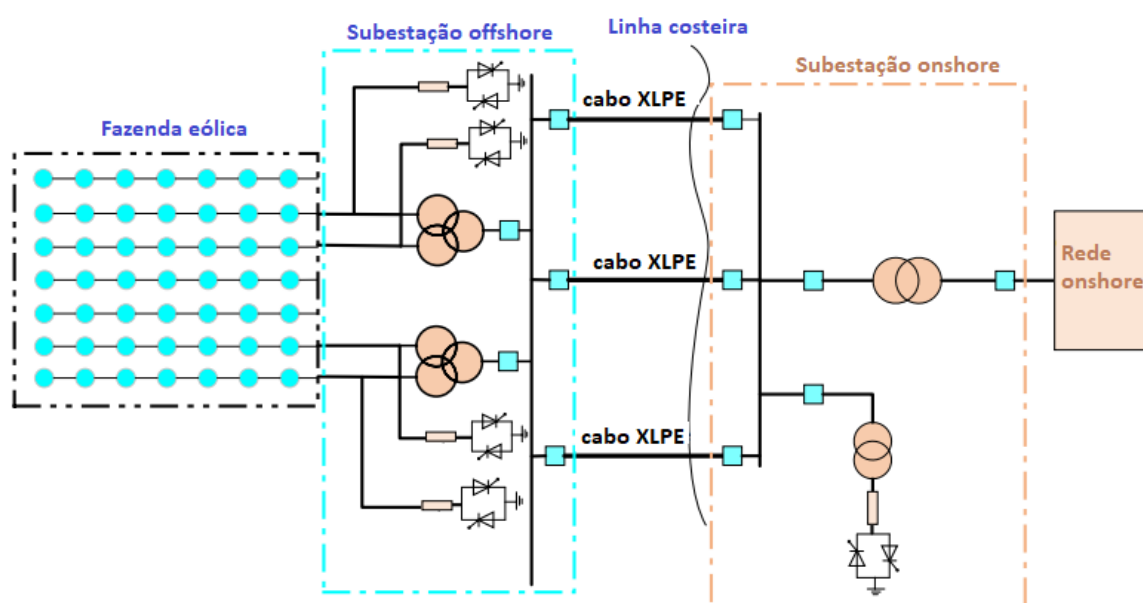


Figura 3.8 — Estrutura de transmissão HVAC

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

### 3.4.2 Transmissão HVDC

O sistema de transmissão HVDC é baseada em corrente contínua de alta tensão. Os componentes da fazenda eólica neste sistema são similares ao HVAC, no entanto, na estação offshore, existem conversores capazes de converter a tensão para contínua. Além disso, também existem conversores na subestação em terra, no entanto, fazem o papel inverso, convertem tensão contínua em alternada.

A principal vantagem da transmissão HVDC quando comparado ao HVAC, é o custo menor da instalação a depender da distância e da potência entregue. Outra grande vantagem, é a redução do número de cabos.

Existem dois tipos na transmissão HVDC: conversor comutado em linha (LCC) e conversor de fonte de tensão (VSC).

#### 3.4.2.1 Conversor comutado em linha

Neste tipo, os conversores utilizados são baseados em tiristores capazes de controlar a tensão e o fluxo de potência do sistema. Esses dispositivos são bidirecionais.

"A eficiência total de conversão de CA para CC e de volta para CA usando os dois conversores (offshore e onshore) está na faixa de 97-98% e depende dos detalhes de projeto das estações conversoras (Ackermann, 2012). Um projeto de sistema com 98% de eficiência terá custos de investimento mais altos em comparação com um projeto com menor eficiência (Ackermann, 2012). Assim, a principal vantagem desta solução são as baixas perdas (ou seja, 2-3% para uma transmissão de 500MW ao longo de 100 km, incluindo as perdas em ambos os conversores, mas excluindo a consideração dos requisitos para o serviço auxiliar na estação conversora offshore) (Ackermann, 2012).

A transmissão HVDC baseada em conversor comutado em linha é ideal para longas distâncias. Um dos desafios deste tipo conversor, são os sistemas de controle a serem adotados para garantir a estabilidade e a qualidade de energia entregue.

#### 3.4.2.2 Conversor de fonte de tensão

Os VSCs usam elementos semicondutores IGBT com uma frequência de comutação de aproximadamente 2 kHz (Ackermann, 2012). Este projeto resulta em perdas conversoras comparativamente altas de até 2% por estação conversora. Atualmente, as pesquisas se concentram em como reduzir essas perdas. A vantagem da alta frequência de comutação são os baixos níveis harmônicos e, portanto, uma necessidade reduzida de filtros (Ackermann, 2012). Além disso, a classificação por conversor é atualmente limitada de 300 a 350 MW. Assim, se for transferida mais

potência do que 300 MW, o número de estações conversoras tem de ser aumentado (Ackermann, 2012).

A transmissão HVDC baseada em conversor de fonte de tensão é ideal para distâncias menores. Um dos desafios deste tipo conversor é a redução de perdas e o aumento da faixa de potência de operação.

### 3.5 IMPACTOS DA GERAÇÃO EÓLICA OFFSHORE NO SISTEMA ELÉTRICO

A integração energia eólica offshore representa um desafio complexo para os sistemas de potência, sendo um tema de grande interesse e pesquisa no campo da engenharia elétrica e energia sustentável. Essa integração traz consigo uma série de considerações que vão além da simples geração de energia limpa. Algumas das principais questões relacionadas incluem: integração ao sistema elétrico, estabilidade e segurança do sistema e qualidade da energia elétrica.

#### 3.5.1 Regulação de frequência

A saída de energia eólica tem aleatoriedade, intermitência e flutuação, e prever a saída de energia eólica é mais difícil do que a geração convencional (usinas térmicas e hidrelétricas) (Niu *et al.*, 2021). De acordo com os dados de operação de energia eólica existentes, a taxa síncrona e a flutuação de energia offshore é maior comparado a terra (Niu *et al.*, 2021). A natureza intermitente da geração eólica offshore que caracterizam esse perfil de carga particular, é consequência direta da característica dos ventos em mar aberto. Em geral esse tipo de geração está sujeito à disponibilidade constante dos ventos e de alta velocidade. Essa consistência permite um fornecimento de eletricidade mais constante e com menor variações ao longo do tempo. No entanto, apesar desta estabilidade, a geração eólica offshore está sujeita a flutuações mais acentuada em comparação a terrestre. Isso se deve a influência de fatores climáticos oceânicos.

Em geral, a energia eólica offshore em grande escala é conectada à rede elétrica fraca do terminal, o que enfraquece a capacidade de regulação de frequência primária da rede elétrica (Niu *et al.*, 2021). As grandes distâncias de transmissão, a resistência dos cabos submarinos e a capacidade limitada de interconexão dificultam

a rápida resposta às flutuações na geração eólica. Faltas em uma extensa área, torna-se ainda mais evidente as flutuações de frequência no sistema. A falta de redundância pode contribuir pelo agravamento da situação, uma vez que a capacidade de recuperação do sistema é limitada. Além disso, a característica incontável de potência gerado pelas turbinas eólicas, dificultam a regulação de frequência do sistema elétrico. Ainda é necessário fontes convencionais, como geração térmica e hidráulica, para manter a estabilidade de frequência (Niu *et al.*, 2021).

### **3.5.2 Regulação de carga**

A regulação de carga é uma das principais contradições que restringem a integração em larga escala da energia eólica na China. De acordo com os dados de operação de energia eólica existentes, a energia eólica na maioria das áreas tem características óbvias de regulação anti-pico. A integração de energia eólica offshore em grande escala levará ao aumento da diferença de pico de vale na rede elétrica. Com o aumento da capacidade instalada de energia eólica offshore, a aleatoriedade e a volatilidade da produção de energia eólica exigem objetivamente que a rede elétrica reserve a capacidade de corte de pico de outras fontes de energia, o que também traz grandes desafios para o despacho da rede elétrica, controle da operação e arranjo de modos.

À medida que a capacidade instalada de energia eólica offshore cresce, a natureza inerentemente aleatória e volátil da geração eólica exige, de forma objetiva, que a rede elétrica reserve uma capacidade de geração adicional proveniente de outras fontes de energia para cobrir os momentos de baixa geração eólica. Esse requisito impõe desafios substanciais nas áreas de planejamento e operação da rede elétrica, bem como no arranjo de modos de geração de energia.

### **3.5.3 Regulação de tensão**

À medida que a capacidade instalada de geração eólica continua a crescer, o impacto de sua produção instável na rede elétrica também aumenta progressivamente. Durante períodos de alta geração de energia eólica, ocorrem desafios adicionais relacionados à regulação da tensão na rede.

Nesses momentos, a elevada produção eólica está associada a um aumento na perda de energia reativa ao longo das linhas de transmissão, ao mesmo tempo em que a demanda por energia reativa no parque eólico se intensifica. Isso pode criar um desequilíbrio entre a oferta e a demanda de energia reativa na rede elétrica. A energia reativa é essencial para manter a estabilidade da tensão, e sua escassez pode prejudicar a qualidade do fornecimento de energia e afetar a segurança da rede elétrica.

Os efeitos desse desequilíbrio incluem a diminuição da tensão em locais mais distantes da rede, prejudicando a qualidade do serviço elétrico prestado aos usuários finais. Além disso, a falta de energia reativa pode sobrecarregar equipamentos elétricos e causar perdas de eficiência no sistema.

Para lidar com esses desafios, são necessárias soluções de regulação de tensão eficazes, como a instalação de compensadores síncronos, capacitores ou reatores, bem como a implementação de sistemas de controle avançados. Além disso, a integração de sistemas de armazenamento de energia e o uso de conversores de eletrônica de potência podem contribuir para a estabilidade do sistema e para a melhoria da qualidade do fornecimento de energia durante períodos de alta produção eólica.

#### **3.5.4 Qualidade de energia**

A pesquisa atualmente concentra-se na análise e melhoria da qualidade da energia após a integração à rede, um aspecto crítico para viabilizar a expansão da geração de energia eólica offshore em larga escala. A qualidade da energia refere-se à estabilidade e confiabilidade do fornecimento elétrico proveniente desses parques eólicos localizados no mar. Garantir a consistência e a segurança desse suprimento é essencial para a integração eficaz dessa fonte de energia limpa no sistema elétrico global, permitindo a maximização do seu potencial eólico offshore e o cumprimento de metas de sustentabilidade e redução de emissões de carbono. Portanto, a pesquisa desempenha um papel fundamental no avanço tecnológico e na mitigação de desafios associados à energia eólica offshore, contribuindo para uma transição mais sustentável e eficiente no setor energético.

### 3.5.4.1 Flutuação de tensão (Flicker)

Durante a operação contínua de parques eólicos offshore, diversos fatores influenciam a geração de energia. Entre esses fatores, destaca-se o a variabilidade na velocidade do vento offshore. Essas variações resultam em flutuações na potência de saída das turbinas eólicas offshore, e a faixa de frequência de cintilação de tensão, também conhecido como efeito Flicker, ou simplesmente flutuação de tensão, é um indicador crucial desse fenômeno. A cintilação de tensão ocorre tanto no lado da turbina eólica quanto no ponto de conexão da rede, e, em casos extremos, pode até ser percebida pelos consumidores.

Para quantificar a cintilação de tensão gerada quando várias turbinas eólicas estão em operação contínua, utilizamos as fórmulas representadas abaixo, de acordo com o módulo 8 da PRODIST:

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}} \quad (3.1)$$

Sendo que:

- $P_{st}$ : Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração.
- $P_i$  ( $i = 0,1; 1; 3; 10; 50$ ) corresponde ao nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado durante  $i$  % do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, de acordo com o procedimento estabelecido nas Normas IEC (International Electrotechnical Commission): IEC 61000-4-15. Flickermeter – Functional and Design Specifications.

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{st_i})^3} \quad (3.2)$$

Sendo que:

- $P_{lt}$ : Severidade de Flutuação de Tensão de Longa Duração.
- $P_{st}$ : representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 (dez) minutos. Da mesma forma, a  $P_{lt}$  representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa

associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 2 (duas) horas.

Essas fórmulas permitem calcular a cintilação total considerando as contribuições individuais de cada turbina eólica em um parque offshore. A compreensão da cintilação de tensão é fundamental para avaliar a estabilidade do sistema elétrico e garantir a qualidade da energia entregue ao sistema elétrico.

#### 3.5.4.2 Desvio de tensão

No contexto da operação habitual de um sistema de energia, as tensões em cada nó do sistema podem variar, levando a um fenômeno conhecido como "desvio de tensão". O desvio de tensão ocorre quando a tensão real em um ponto da rede se afasta da tensão nominal esperada. No caso dos parques eólicos offshore, é imperativo que o desvio de tensão não exceda 10% da tensão nominal para manter a estabilidade e a confiabilidade do sistema elétrico.

$$\Delta U = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (3.3)$$

Sendo que:

- $U$  = tensão medida.
- $U_N$  = tensão nominal do sistema.

Assegurar que o desvio de tensão esteja dentro dos limites aceitáveis é de suma importância para evitar flutuações excessivas na tensão elétrica e, por conseguinte, garantir a qualidade da energia. Quando o desvio de tensão é mantido abaixo do limite de 10%, consideramos que está operando dentro dos padrões desejados.

#### 3.5.4.3 Harmônicos

No contexto de sistemas de potência, a presença de dispositivos não lineares, como equipamentos eletrônicos de potência, dá origem à geração de harmônicos. Em

turbinas eólicas de indução duplamente alimentadas, os harmônicos gerados pelo gerador em si geralmente podem ser negligenciados, pois a fonte dominante de harmônicos reside nos equipamentos eletrônicos de potência associados. Esses dispositivos eletrônicos de potência são essenciais para o funcionamento dos conversores que conectam as turbinas eólicas à rede elétrica.

Uma característica importante a ser destacada é que, em parques eólicos offshore, esses conversores operam continuamente, o que significa que o sistema está constantemente sujeito a problemas de distorção harmônica. A medição da taxa de distorção harmônica de tensão é uma abordagem para avaliar o grau de distorção nas formas de onda de tensão no sistema. Essa métrica é representada pela porcentagem da razão entre o valor RMS de cada componente de tensão harmônica e o valor RMS da tensão fundamental.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (3.4)$$

Sendo que:

- $h$  = todas as ordens harmônicas da segunda até a máxima.
- $h_{\max}$  = ordem de harmônica máxima.
- $V_h$  = tensão harmônica de ordem  $h$ .
- $V_1$  = tensão fundamental medida.

Os harmônicos representam uma série de componentes de frequência não sinusoidais que se sobrepõem às formas de onda elétrica fundamentais nas redes elétricas. Na geração eólica offshore, bem como em sistemas elétricos de potência em geral, os harmônicos podem ter diversas consequências negativas, dentre elas são: sobreaquecimento de cabos e equipamentos, redução da eficiência do sistema, interferência eletromagnética.

Para mitigar os efeitos negativos dos harmônicos na geração eólica offshore e no sistema elétrico de potência, é crucial implementar medidas de controle e filtragem de harmônicos, bem como aderir aos padrões de qualidade de energia estabelecidos. Isso pode incluir o uso de filtros ativos e passivos, projeto adequado de sistemas de energia, e monitoramento contínuo da qualidade da energia.

## 4 PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS OFFSHORE

O objetivo do sistema de proteção elétrico de um parque eólico, seja offshore ou não, é proteger as turbinas eólicas, os equipamentos elétricos, eletrônicos e alimentadores de distúrbios na rede elétrica ou de fenômenos eletromecânicos que possam danificar os equipamentos. Além de danos a componentes da instalação, essas ocorrências também podem representar um perigo aos trabalhadores. A proteção deve ser feita de forma seletiva e coordenada, afim de isolar a falta de maneira eficaz, reduzir ao máximo os impactos do distúrbio e garantir que não sejam feitas interrupções desnecessárias para maximizar a operação do parque eólico.

A análise de proteção do parque deve se levar em consideração as características elétricas e mecânicas do sistema, além dos requisitos da concessionária de energia elétrica local. A partir dos dados levantados, são realizadas simulações de faltas e outros distúrbios em softwares para determinar os ajustes nos relés de proteção e dispositivos de controle. Os esquemas de proteção são baseados nas medições de variáveis como corrente, tensão e velocidade do rotor. Nos estudos elétricos, o tempo é fundamental, deve-se levar em consideração o tempo de atuação dos relés, disjuntores.

Além de critérios para detectar se a turbina eólica deve ser desconectada, o sistema de proteção também inclui critérios para determinar se a turbina eólica pode ser reconectada, bem como uma estratégia de reconexão.

### 4.1 ZONAS DE PROTEÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO

A tensão de saída típica do gerador de uma turbina eólica varia entre 575 e 690 V, com uma frequência de 60 Hz, de acordo com as normas de distribuição elétrica convencionais. Para efetivamente integrar a energia gerada pelas turbinas na rede elétrica, é necessária uma etapa de elevação de tensão. Isso é alcançado por meio de um transformador elevador, que normalmente é uma unidade imersa em óleo, localizada na base da turbina eólica. Em algumas instalações, o transformador elevador pode ser montado na nacela da turbina, o que requer atenção especial para minimizar os efeitos harmônicos.

O sistema coletor, responsável por consolidar a energia gerada pelas turbinas eólicas, geralmente consiste em uma subestação de distribuição de 34,5 kV que coleta a saída dos geradores distribuídos por meio de alimentadores de entrada. Para otimizar o desempenho e a qualidade da energia entregue à rede, é comum a inclusão de unidades de compensação de potência reativa, que empregam bancos de capacitores comutados. Essas unidades desempenham um papel crucial na estabilização da tensão e na melhoria do fator de potência do sistema, garantindo uma operação eficiente.

Por fim, a energia coletada no sistema coletor é transferida para o lado da concessionária por meio de um transformador elevador de interconexão. Esse transformador é responsável por elevar ainda mais a tensão para níveis adequados à rede de distribuição ou ao sistema de alta tensão, permitindo a entrega eficiente da energia gerada pelo parque eólico. Essa integração harmoniosa com a infraestrutura elétrica existente é fundamental para garantir a confiabilidade e a eficiência da geração de energia eólica em larga escala.

Em resumo, os parques eólicos modernos são caracterizados por um grande número de turbinas eólicas com geradores de alta capacidade, transformadores elevadores, sistemas de coleta sofisticados e unidades de compensação de potência reativa. Esses componentes trabalham em conjunto para garantir a geração de energia eólica de forma eficiente e confiável, contribuindo significativamente para o suprimento de energia elétrica sustentável em todo o mundo. Na Figura 4.1, podemos visualizar os esquemas de proteção em um parque eólico offshore.

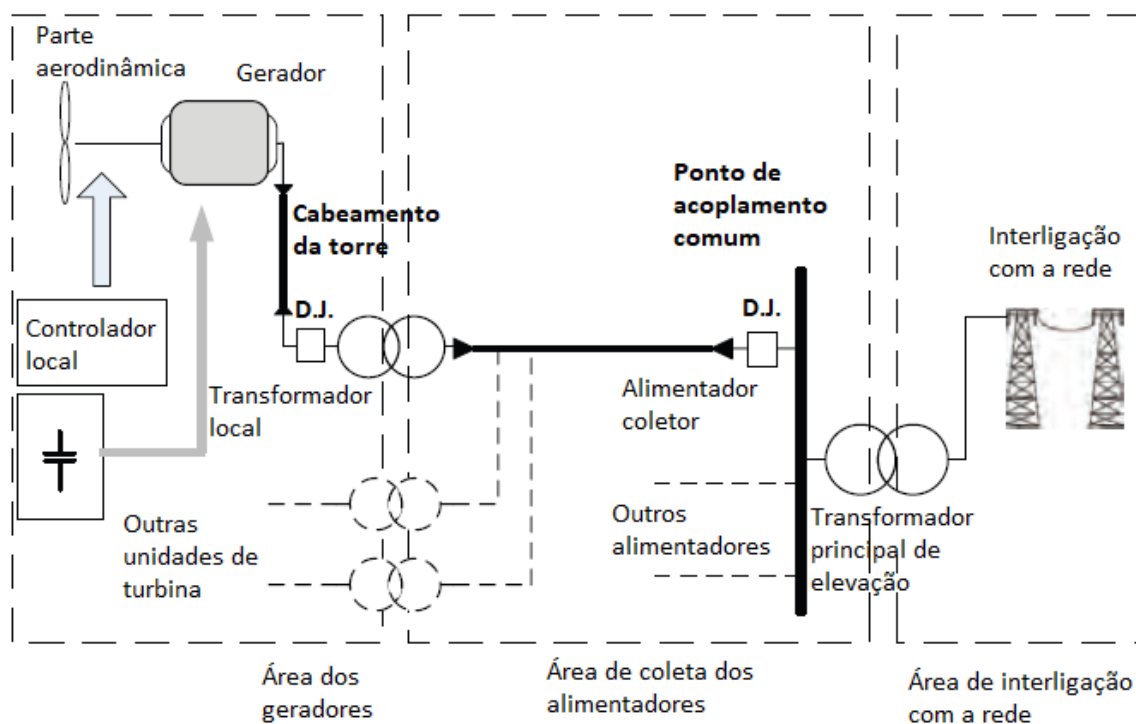


Figura 4.1 — Zonas de proteção de um parque eólico

Fonte: Kawady, Taalab e Mansour (2010).

O sistema de proteção de parques eólicos é uma estrutura complexa que desempenha um papel crucial na garantia da operação segura e eficiente dessas instalações de geração de energia sustentável. Para isso, é geralmente subdividido em várias zonas de proteção, cada uma com suas responsabilidades específicas, e é apoiado por tecnologias avançadas de monitoramento e controle.

No que diz respeito à área de utilidade, a estratégia de proteção adotada depende do nível de tensão e da topologia da rede considerada. Diversas funções de proteção, como esquemas de viagem de transferência direta, relés diferenciais de linha, proteção de piloto, retransmissão de distância de zona, proteção de sobre/sob tensão, proteção de sobre/sob frequência, proteção contra falha de disjuntor, verificação síncrona e proteção de sobrecorrente de backup, podem ser empregadas conforme a necessidade e as especificações do projeto.

Para viabilizar todas essas operações e garantir a integridade do sistema, a comunicação desempenha um papel central. Os dados de controle de cada gerador eólico são agora transmitidos por meio de cabos ópticos e distribuídos para as

subestações, onde são utilizados para monitoramento e controle gerais. Um sistema de supervisão e controle de automação (SCADA) dedicado é essencial para coordenar e operar efetivamente o parque eólico como um todo, fornecendo um sistema integrado de monitoramento e proteção. Essa infraestrutura garante que qualquer anomalia seja identificada e tratada em tempo real, contribuindo para a confiabilidade e eficiência do parque eólico.

#### 4.2 DESAFIO DE PROTEÇÃO DOS PARQUES EÓLICOS

As funções de proteção dedicadas dentro das usinas eólicas oferecem uma gama de vantagens cruciais, que incluem não apenas prevenir potenciais danos localizados resultantes de falhas, mas também minimizar os efeitos adversos dessas condições anormais na rede mais ampla. Essas funções aumentam significativamente a confiabilidade e a confiabilidade de toda a rede elétrica, contribuindo para melhorar o desempenho geral da rede.

Um dos principais objetivos das funções de proteção dedicadas é proteger os componentes e subsistemas individuais das usinas eólicas. Ao fazer isso, eles evitam danos ao equipamento, como falhas em transformadores e geradores, e garantem que as próprias turbinas permaneçam operacionais mesmo na presença de condições de falha. Isso é particularmente importante dada a localização complexa e muitas vezes remota dos parques eólicos, onde intervenções rápidas no local podem ser desafiadoras.

Além disso, as funções de proteção também desempenham um papel fundamental na manutenção da estabilidade da rede elétrica. Eles detectam e isolam rapidamente falhas dentro da usina eólica, evitando falhas em cascata que poderiam interromper o fornecimento de energia para uma área mais ampla. Ao limitar o impacto de distúrbios, esses mecanismos de proteção ajudam a mitigar as interrupções de energia e reduzir o tempo de inatividade, que é de suma importância na sociedade atual dependente de eletricidade.

Apesar da inegável importância da proteção elétrica nas usinas eólicas, é um tanto surpreendente que ela não tenha recebido o nível de atenção que merece nos últimos anos. Parte da razão está na perspectiva econômica. A indústria de energia eólica tem estado sob pressão contínua para reduzir custos para se manter

competitiva. Esse ambiente consciente dos custos muitas vezes leva os projetistas de parques eólicos a priorizar fatores econômicos em detrimento de medidas de proteção abrangentes. No entanto, é crucial reconhecer que investir em sistemas de proteção robustos pode trazer benefícios a longo prazo, evitando danos dispendiosos ao equipamento e interrupções na rede.

Além disso, os avanços tecnológicos ampliaram as capacidades dos sistemas de proteção para usinas eólicas. Os modernos relés de proteção e soluções de monitoramento oferecem sensibilidade aprimorada, detecção rápida de falhas e recursos avançados de comunicação. Esses avanços capacitam os operadores a tomar decisões informadas, diagnosticar remotamente problemas e realizar manutenção preditiva, aumentando assim a eficiência geral e a relação custo-benefício das operações de energia eólica.

#### 4.3 PROTEÇÃO NA ÁREA DOS GERADORES

Na área dos geradores, temos os geradores que são o coração do parque eólico e transformadores elevadores que são responsáveis por aumentar o nível de tensão. Uma falha pode provocar graves consequências ao sistema elétrico se não houver um sistema capaz de identificar o problema corretamente e isolar a máquina em milésimos de segundo. Além das consequências operacionais, essas falhas podem levar a danos irreversíveis aos equipamentos, impossibilitando reparo.

##### 4.3.1 Geradores

A primeira camada de proteção concentra-se na proteção dos geradores. Esta tarefa crítica é realizada principalmente pelo sistema de controle do gerador, que abrange várias funções de proteção essenciais, como detecção de sub/sobre tensão, sub/sobre frequência e monitoramento da temperatura do enrolamento do gerador por meio de sensores de resistência térmica (RTDs). No entanto, é importante ressaltar que o sistema de controle do gerador não desempenha um papel direto nas operações de interconexão dos parques eólicos ou nas áreas de utilidade.

Devido sua extrema importância ao sistema elétrico, deve-se considerar um grande número de possíveis falhas para maximizar a segurança. O sistema deve evitar a ocorrência de falhas por meio de um controle e monitoramento apropriado, e no caso de uma eventual falha deve-se minimizar os danos.

A origem da falha no gerador pode ser interna ou externa.

Origem interna:

- Curto-circuito no estator.
- Curto-circuito no rotor.
- Curto-circuito nos terminais.
- Sobrecarga.

Origem externa:

- Curto-circuito no conversor.
- Curto-circuito no alimentador.
- Sobrecarga.
- Sobrevelocidade das pás.
- Perda de sincronismo.
- Perda de excitação.
- Sobreaquecimento.
- Vibração excessiva do mancal.
- Falha nas linhas de transmissão.
- Sobretensão oriunda de uma descarga atmosférica ou uma falha no sistema elétrico.
- Desequilíbrio de fases.
- Sub/sobrefrequência da rede.

O nível de redundância da proteção pode ser baseado no critério N-1, ou seja, no caso de uma falha de um dispositivo ou sistema de proteção outro irá proteger. A redundância também pode ser feita com base em uma avaliação entre o risco e o investimento da zona de proteção.

A proteção do transformador elevador do gerador, que muitas vezes está localizado na nacele, é essencial para evitar falhas catastróficas. Nesse sentido,

fusíveis primários e disjuntores equipados com relés de sobrecorrente de fase e temporização de terra dedicados são utilizados para garantir a integridade do transformador.

#### **4.3.2 Proteção para eletrônica de potência na aplicação DFIG**

##### **4.3.2.1 Proteção de rotor**

A proteção de crowbar é um componente crítico em sistemas de conversão de energia, desempenhando um papel fundamental na proteção de dispositivos eletrônicos de potência e na manutenção da estabilidade do sistema elétrico, especialmente em turbinas eólicas de dupla alimentação (DFIG). Essa resposta rápida é projetada para limitar as correntes de falha e prevenir danos aos componentes eletrônicos de potência.

A operação da proteção de crowbar ocorre em várias etapas, e suas especificidades técnicas são essenciais para seu funcionamento eficaz. Inicialmente, a ativação da proteção de crowbar ocorre quando é detectada uma falha ou distúrbio na rede elétrica, como quedas de tensão abaixo de níveis seguros, sobretensões, sobrecorrentes ou outros eventos anômalos. Uma vez acionada, o crowbar estabelece um curto-circuito nos enrolamentos do rotor da turbina eólica, usando componentes eletrônicos, como tiristores. Este curto-circuito é direcionado para um conjunto de resistores projetados especificamente para reduzir rapidamente as correntes transitórias a um nível seguro.

Simultaneamente, o conversor B2B ou outro dispositivo de conversão é desconectado do circuito, impedindo que as correntes de falha alcancem e danifiquem os dispositivos eletrônicos de potência. Essa desconexão é crucial para evitar que os componentes eletrônicos sejam sobrecarregados e prejudicados durante uma falha na rede elétrica.

Dois principais tipos de proteção de crowbar são mencionados nos textos, cada um com suas características técnicas distintas:

**Crowbar Passivo:** Geralmente, um crowbar passivo é composto por uma ponte de diodos que retifica as correntes de fase do rotor e um tiristor em série com um resistor. A ativação do tiristor ocorre quando a tensão do link DC ou a corrente do rotor

atinge valores críticos. Isso resulta na conexão do rotor ao crowbar, protegendo efetivamente os dispositivos de conversão. Esse tipo de proteção é menos controlável, mas é uma opção eficaz e robusta.

**Crowbar Ativo:** O crowbar ativo é controlado por interruptores semicondutores, como IGBTs, proporcionando uma resposta mais precisa e imediata a sobrecorrentes ou sobretensões. Além disso, a proteção de crowbar ativo pode ser desativada assim que as condições críticas forem normalizadas. Durante sua operação, ele monitora constantemente a tensão do resistor do crowbar e a tensão do elo DC. Quando ambas as tensões atingem níveis seguros, o crowbar é desligado. Essa capacidade de controle fino torna o crowbar ativo uma escolha valiosa em sistemas que requerem respostas altamente adaptáveis a distúrbios na rede elétrica.

A proteção de crowbar desempenha um papel indispensável na garantia da operação segura e confiável de turbinas eólicas DFIG. Além de proteger dispositivos eletrônicos de potência, ela permite que o sistema elétrico lide eficazmente com distúrbios na rede elétrica, contribuindo para a integração bem-sucedida de energia eólica nas redes elétricas convencionais. A escolha entre um crowbar passivo e ativo depende das necessidades específicas do sistema e dos requisitos de controle de proteção, equilibrando eficácia e complexidade. O esquema dessa proteção pode ser visto na Figura 4.2.

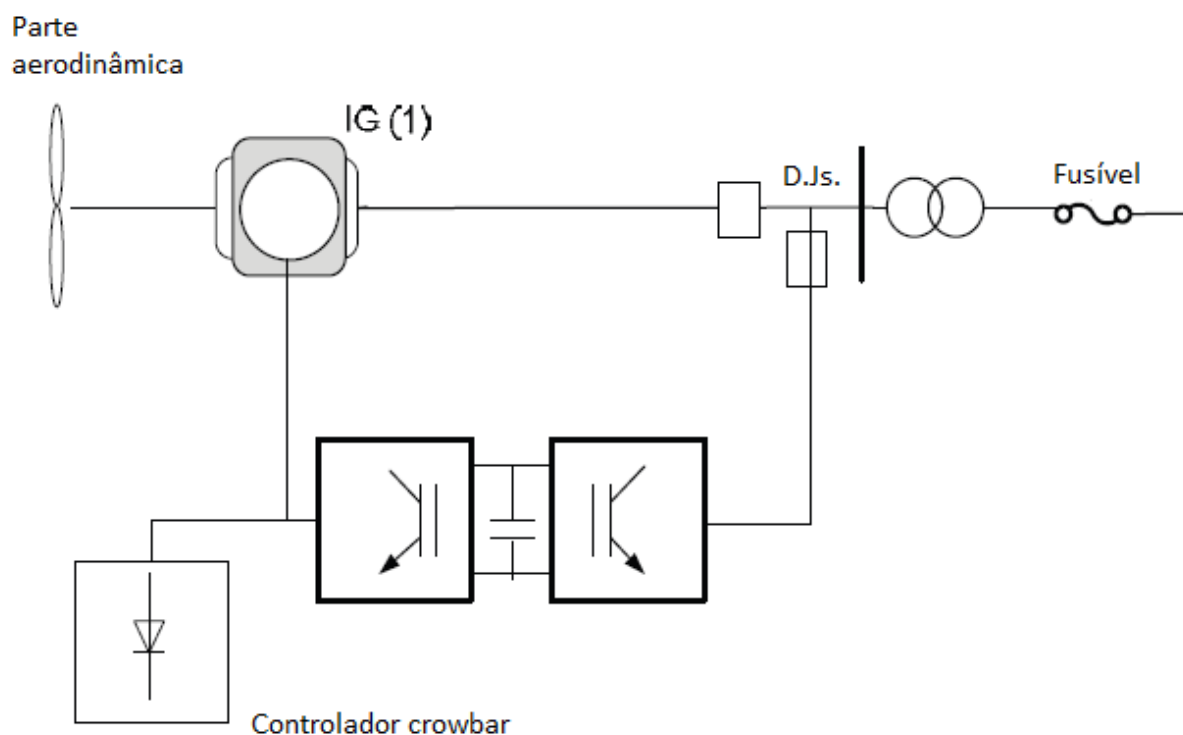


Figura 4.2 — Proteção de crowbar

Fonte: Kawady, Taalab e Mansour (2010).

Quando o crowbar é fechado, o gerador perde a controlabilidade, uma vez que o rotor da máquina é curto circuitada através dos resistores do crowbar e a máquina é bloqueada (Kawady; Taalab; Mansour, 2010). A proteção é acionada quando a tensão CC sobe acima de um limite pré-definido (Anaya-Lara *et al.*, 2014). Sob esta condição, o IGBT do chopper CC é ligado e o resistor de frenagem é conectado em paralelo com o circuito CC (Anaya-Lara *et al.*, 2014). A energia do curto CC é dissipada no resistor de frenagem, e, consequentemente, o nível de tensão CC será reduzido (Anaya-Lara *et al.*, 2014). O esquema dessa proteção pode ser visto na Figura 4.3.

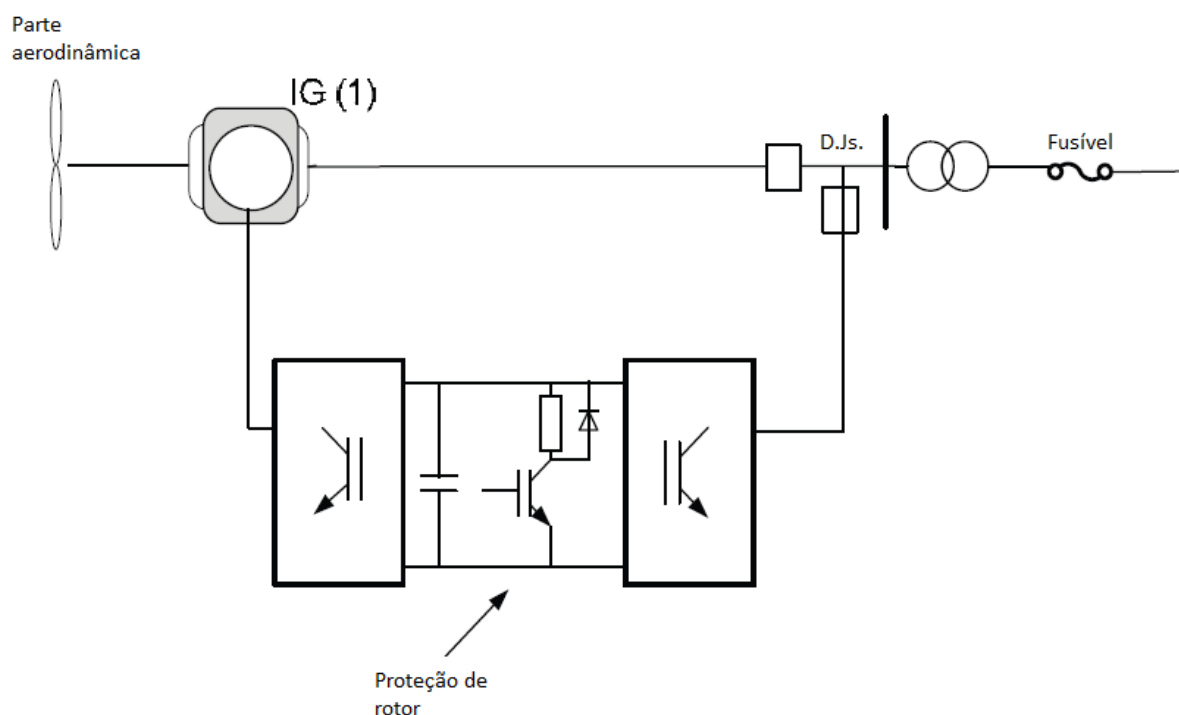


Figura 4.3 — Sistema de proteção do rotor chopper para unidades DFIG

Fonte: Kawady, Taalab e Mansour (2010).

### 4.3.3 Transformadores

O transformador de potência principal é, provavelmente, o componente mais custoso na subestação do coletor (PSRC Working Group C25,2021). O elevado custo de reparo ou substituição e a possibilidade de falha violenta ou incêndio envolvendo equipamentos adjacentes tornam a limitação de danos um objetivo primordial (PSRC Working Group C25,2021). Por isso é necessário realizar os estudos considerando cuidadosamente as características necessárias para proteção dos transformadores (PSRC Working Group C25,2021).

Existem diversas maneiras de proteger os transformadores de potência principais, oferecendo diferentes níveis de sensibilidade, velocidade e seletividade. O esquema de proteção combina aspectos técnicos e econômicos.

### 4.3.4 Proteção diferencial dos transformadores

Para proteção de transformadores, são amplamente utilizados esquemas de proteção diferencial. Esse tipo de proteção oferece maior sensibilidade e rapidez na detecção de uma falta comparada a uma detecção convencional de sobrecorrente. Essa proteção além de ser utilizado em transformadores, pode ser aplicado nos barramentos dos coletores, com o mesmo objetivo: proteção mais sensível e rápida, além de ser mais abrangente. Além do mais, a proteção diferencial permite uma precisão maior na localização da falta.

Nos relés modernos microprocessados, utilizam-se parâmetros de restrição e bloqueio harmônico para tornar o esquema mais seguro durante a energização do transformador (PSRC Working Group C25,2021). As configurações de bloqueio e alarme harmônico podem exigir uma análise mais aprofundada em usinas eólicas devido a fontes adicionais de harmônicos, como geração baseada em inversores (turbinas do Tipo 4), bancos de capacitores para suporte de VAR, bancos de capacitores com reatores de corrente limitadora (filtros harmônicos) e STATCOMs para suporte dinâmico do regulador de tensão automático. Correntes harmônicas podem causar superaquecimento e perdas adicionais em vários componentes, incluindo transformadores. O superaquecimento reduz a vida útil dos transformadores e, em casos extremos, pode levar à sua destruição. É importante considerar todos esses aspectos ao determinar o melhor esquema para restrição harmônica, bloqueio harmônico e proteção contra sobreexcitação.

#### 4.4 COORDENAÇÃO DE ALIMENTADORES

Parques eólicos, devido à natureza intermitente de suas turbinas, podem operar dentro de uma faixa de voltagem limitada no ponto de interconexão. Para cumprir com os padrões regulatórios, as companhias de transmissão são geralmente obrigadas a manter seus sistemas em uma faixa de tensão normal de  $\pm 5\%$  em relação à tensão nominal do sistema (PSRC Working Group C25,2021).

É relevante considerar a resposta da frequência para as turbinas eólicas em parques na América do Norte (PSRC Working Group C25,2021). Atualmente, os reguladores não abordam os requisitos de resposta à frequência para essas turbinas. Contudo, certos padrões definem ajustes específicos para relés de proteção de

frequência, visando maximizar a capacidade da unidade geradora de permanecer conectada durante uma excursão de frequência (PSRC Working Group C25,2021).

No que diz respeito a sobretensões temporárias, parques eólicos podem experimentar picos transitórios mais elevados do que sistemas de distribuição típicos. Falhas à terra nos circuitos de coleta são uma causa primária dessas sobretensões. Quando o disjuntor é acionado após uma falha, isso cria um período de risco para sobretensões transitórias, cuja gravidade depende do grau de aterramento no circuito remanescente. Transformadores de aterramento podem ser empregados para reduzir essas sobretensões.

É importante notar que, em situações de falta à terra, a falta de efetiva coordenação de isolamento pode resultar em sobretensões transitórias que ultrapassam os 173% do valor nominal (PSRC Working Group C25,2021). O uso de transformadores de aterramento pode ser uma medida eficaz para limitar essas sobretensões entre a falha e o desligamento das turbinas eólicas no circuito afetado.

Outras estratégias para reduzir sobretensões transitórias incluem o uso de chaves de aterramento de alta velocidade nos circuitos de coleta e a aplicação de esquemas de transferência de disparo (PSRC Working Group C25,2021). Em alguns casos, é inevitável que ocorram sobretensões transitórias, e isso geralmente é endereçado por meio de uma adequada coordenação de isolamento.

#### 4.5 PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

A proteção da linha de interconexão de transmissão em parques eólicos enfrenta desafios únicos em comparação com interconexões de transmissão convencionais para estações geradoras. Dois desafios principais surgem nesse contexto: a variabilidade da força do vento e a contribuição controlada de curto-circuito.

A variabilidade da força do vento, provocada pela própria instabilidade do vento, aumenta a complexidade e a variabilidade do sistema. A variabilidade das sequências zero, positiva e negativa é considerada uma condição operacional normal. As diferentes redes de sequência podem ser tratadas separadamente, levando em consideração cenários em que todas as máquinas estão paradas, desligadas devido

à falta de vento, e dispositivos de compensação de potência reativa podem estar ligados ou desligados (PSRC Working Group C25,2021). A proteção da linha deve ser projetada para lidar com altas impedâncias de fonte positiva e negativa, bem como impedâncias de fonte de sequência zero proporcionadas pelos transformadores de potência interconectados (PSRC Working Group C25,2021).

A contribuição de corrente de curto-circuito é controlada em magnitude e fator de potência. A limitação da magnitude da contribuição de corrente é geralmente mantida abaixo de 150% da corrente nominal (PSRC Working Group C25,2021). I. No entanto, a complexidade surge nos primeiros ciclos após uma falha, onde a contribuição de corrente pode exceder esse limite. Dispositivos de proteção instantânea de sobrecorrente de fase tornam-se úteis nesse contexto, enquanto dispositivos temporizados de sobrecorrente de fase têm aplicação limitada (PSRC Working Group C25,2021). A contribuição intencionalmente limitada de corrente de sequência negativa para falhas desequilibradas e a necessidade de reconsiderar o alcance reativo de elementos de distância quadrilateral, que dependem de fontes de corrente convencionais, acrescentam complexidade à proteção da linha em parques eólicos (PSRC Working Group C25,2021).

#### 4.6 PROTEÇÃO DE FILTROS E BANCOS DE CAPACITORES

É importante que seja avaliado os efeitos da conexão das turbinas eólicas a concessionária de energia elétrica, para avaliar se os níveis de tensão e harmônicos estão dentro dos limites (PSRC Working Group C25,2021).

Os inversores conectados às turbinas eólicas podem causar harmônicos, e a ordem e a magnitude das correntes harmônicas dependem da tecnologia do conversor e do modo de operação do conversor (PSRC Working Group C25,2021). Pequenas distorções de tensão podem causar grandes correntes harmônicas devido a condição de ressonância em série entre a capacitância do cabo e a indutância da alimentação. Alguns fatores podem levar ao aumento das correntes harmônicas resultantes da interação dos aerogeradores com a rede, são elas (PSRC Working Group C25,2021):

- Aumento do tamanho dos parques eólicos.
- Grandes transformadores.
- Capacitores e reatores comutados na rede.

- Aumento da capacitância por consequência do uso de cabos de extra alta tensão.

Os esquemas de proteção aplicados a capacitores e filtros harmônicos na subestação principal do coletor são essencialmente os mesmos que os aplicados em subestações convencionais (PSRC Working Group C25,2021). O Padrão IEEE C37.99: “Guia IEEE para a Proteção de Capacitores Derivativos” fornece informações detalhadas sobre a aplicação e configuração de relés de proteção para capacitores shunt (PSRC Working Group C25,2021). De maneira semelhante, o Padrão IEEE C37.109: Guia IEEE para a Proteção de Reatores Derivativos fornece informações detalhadas sobre a aplicação e configuração de relés de proteção para reatores derivativos. Embora o C37.109 não aborde diretamente a proteção dos reatores usados em filtros harmônicos, os esquemas de proteção apresentados também são aplicáveis aos reatores utilizados em filtros harmônicos (PSRC Working Group C25,2021).

#### 4.7 PROTEÇÃO NA REGIÃO DE INTERCONEXÃO COM A CONCESSIONÁRIA

A proteção do barramento coletor na subestação do parque eólico e do transformador de potência principal é um aspecto crítico da segurança do sistema. Isso é alcançado por meio de um sistema de relé numérico multifuncional, que inclui o relé diferencial do transformador principal, relé de sobrecorrente de backup do transformador, relé diferencial do barramento coletor e relé de falha do disjuntor. Esses dispositivos trabalham em conjunto para identificar e isolar falhas, minimizando os impactos na operação global do parque eólico.

## 5 ESTUDOS DE CASO

### 5.1 CASO - PARQUE EÓLICO TRIANEL BORKUM

O Trianel Borkum, também conhecido como Borkum West II, é um parque eólico offshore localizado próximo à ilha de Borkum, na Alemanha (Figura 6.1). Sua primeira fase, composta por 40 turbinas Areva M5000-116, cada uma com uma capacidade de 5 MW, totalizando uma capacidade instalada de 200 MW. A primeira fase opera desde julho de 2015 e. Em julho de 2020 foi finalizado o comissionamento da segunda fase deste parque eólico, composta por 32 turbinas Senvion 6.2M152, cada um com capacidade de 6,15 MW, totalizando capacidade instalada por volta de 200 MW, na Figura 6.2 está uma foto do parque. No total o parque eólico Trianel Borkum, possui 400 MW de capacidade instalado. Ambas as fases tem limite de operação de 25 anos.

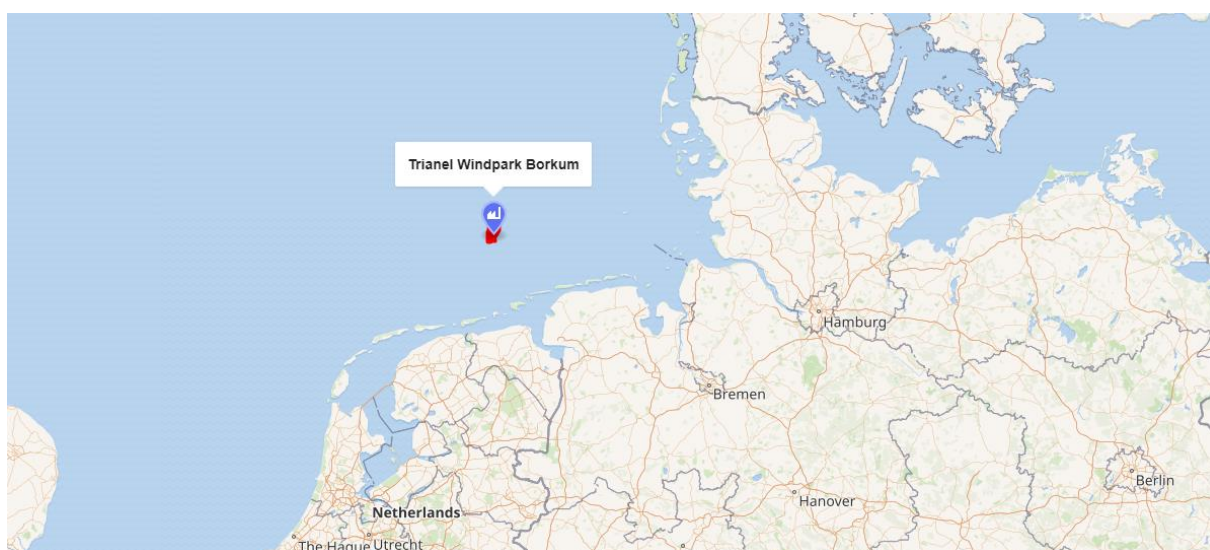


Figura 6.1 — Localização do parque eólico Trianel Borkum

Fonte: Wikimedia maps.



Figura 6.2 — Parque eólico Trianel Borkum II

Fonte: <https://www.trianel-borkum.de/en/wind-farm/twb-ii/>. Acesso em: 2 de novembro de 2023.

A primeira e a segunda fase do projeto estão conectadas a uma subestação offshore, localizada a 20 m acima do nível do mar e abriga dois transformadores (Trianel Wind Farm Borkum). Estes convertem a eletricidade produzida do nível de tensão de 33 kV para a tensão de 155 kV necessária para transmissão à rede.

Na plataforma conversora DolWin alpha (Figura 6.3), a corrente alternada trifásica produzida no parque eólico é convertida em corrente contínua e posteriormente transportada para o continente por meio de um cabo submarino com 75 quilômetros de extensão. Esta plataforma tem capacidade para 800 MW (Trianel Wind Farm Borkum).

A energia eólica chega à estação conversora Dörpen West (Figura 6.4) por meio de um percurso adicional de 90 quilômetros em terra (Trianel Wind Farm Borkum). Nessa estação, a corrente contínua é novamente convertida em corrente alternada trifásica antes de ser integrada à rede de transmissão, chegando, finalmente, aos consumidores (Trianel Wind Farm Borkum).



Figura 6.3 — Subestação offshore DolWin Alpha

Fonte: [https://www.trianel-borkum.de/en/wind-](https://www.trianel-borkum.de/en/wind-farm/#:~:text=Trianel%20Wind%20Farm%20Borkum%20consists,rotor%20star%20and%20the%20tower.)

[farm/#:~:text=Trianel%20Wind%20Farm%20Borkum%20consists,rotor%20star%20and%20the%20tower.](https://www.trianel-borkum.de/en/wind-farm/#:~:text=Trianel%20Wind%20Farm%20Borkum%20consists,rotor%20star%20and%20the%20tower.) Acesso em: 2 de novembro de 2023.



Figura 6.4 — Subestação Dörpen West

Fonte: [https://www.trianel-borkum.de/en/wind-](https://www.trianel-borkum.de/en/wind-farm/#:~:text=Trianel%20Wind%20Farm%20Borkum%20consists,rotor%20star%20and%20the%20tower.)

[farm/#:~:text=Trianel%20Wind%20Farm%20Borkum%20consists,rotor%20star%20and%20the%20tower.](https://www.trianel-borkum.de/en/wind-farm/#:~:text=Trianel%20Wind%20Farm%20Borkum%20consists,rotor%20star%20and%20the%20tower.) Acesso em: 02 de novembro de 2023.

#### 5.1.1 Sistema de transmissão do parque eólico

Na plataforma DoIWin Alpha, onde converte-se a corrente alternada para contínua, sai a linha de transmissão DoIWin1 para se conectar a subestação onshore Dörpen West (Figura. 6.5). Além da Trianel Borkum, a linha DoIWin1 é responsável por conectar os parques eólicos Borkum Riffgrund e Merkur Offshore ao continente (Figura. 6.6).

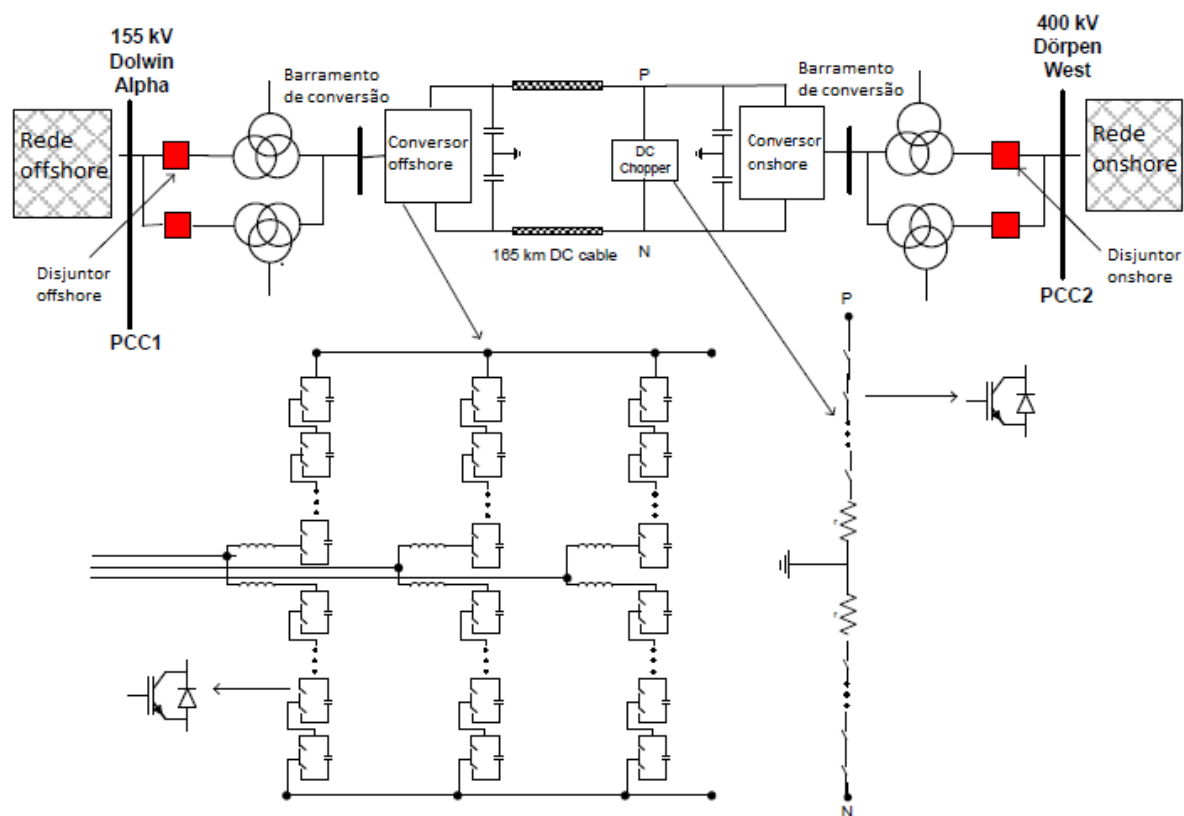


Figura 6.5 — Sistema de transmissão DolWin1

Fonte: Abdalrahman e Isabegovic.

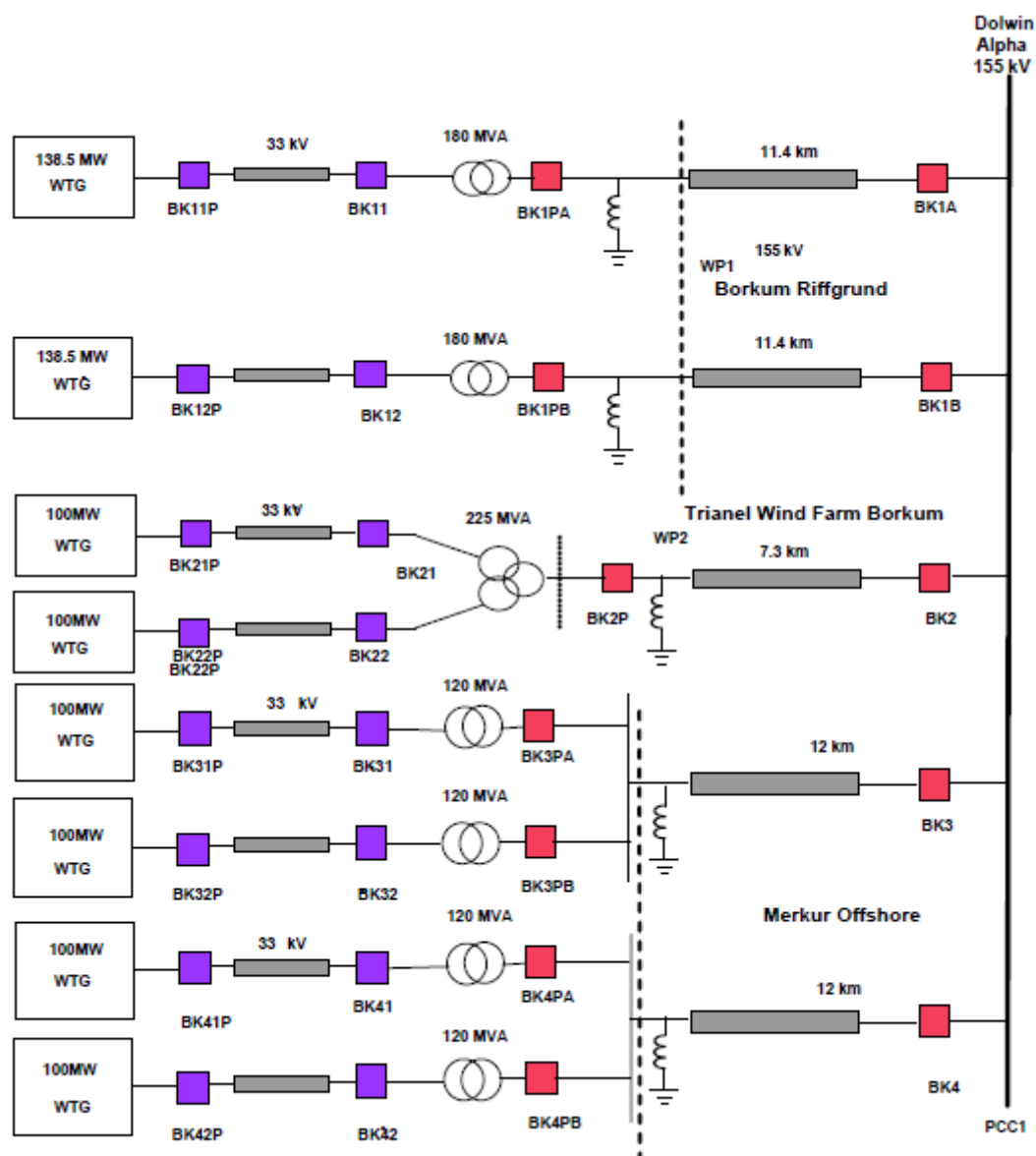


Figura 6.6 — Modelo de conexão do DolWin1

Fonte: Abdalrahman e Isabegovic.

A linha DolWin1 possui as seguintes características:

- Tipo: submarina e subterrânea.
- Isolação do cabo: XLPE.
- Tipo de corrente: HVDC.
- Comprimento total: 165 km.
- Potência máxima: 800 MW.
- Tensão CA: 380 kV (onshore)

- Tensão CC:  $\pm 320$  kV
- Número de polos: 1 (monopolo simétrico)
- Conversores: VSC.
- Tipo de conversor: Conversor cascada de dois níveis.

A energia gerada é transmitida em HVDC por 75 km através de cabos submarinos com isolamento XLPE, e 90 km na terra em direção a subestação de conversão Dörpen West.

#### 5.1.1.1 Cabos

Apesar dos cabos parecerem uma simples parte de uma usina grandiosa, com diversos equipamentos complexos, na realidade, os cabos, principalmente nas linhas de transmissão submarinas, são extremamente desafiadoras de serem fabricados e instalados. Eles requerem muitos mais cuidados comparados as linhas terrestres, e uma falha pode acarretar consequências técnicas e econômicas catastróficas.

Geralmente, os cabos da geração offshore é constituído por três núcleos, com uma blindagem metálica (normalmente de alumínio) em cada condutor para proteger contra água. Além disso, os cabos submarinos podem ter várias camadas por fitas de inchamento semicondutoras ou não condutoras destinadas a impedir a entrada de água no isolamento (Gulski *et al.*, 2021). Nas figuras abaixo, temos respectivamente, um corte de um cabo submarino indicando as principais partes e um corte real.

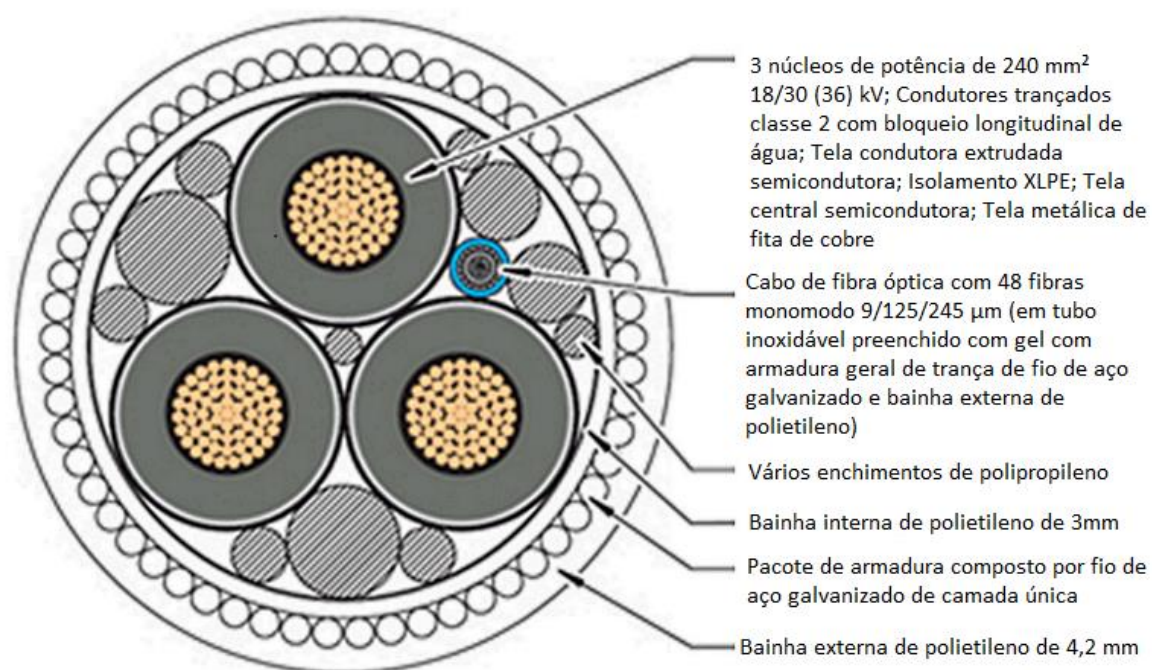


Figura 6.7 — Corte de um cabo submarino

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



Figura 6.8 — Corte real de um cabo para geração offshore

Fonte: ABB.

É comum a utilização do alumínio como condutor para linhas terrestres, este material é mais leve e barato, mas para linhas submarinas isso pode ser um grande problema decorrente de suas propriedades físico-químicas. O alumínio possui alto coeficiente de expansão térmica e a alta suscetibilidade à corrosão no ambiente aquático (Gulski *et al.*, 2021). A corrente, condições climáticas e marítimas extremas, podem causar expansão térmica do condutor, o que pode resultar em uma mudança em seu diâmetro. Como consequência do fenômeno de expansão e contração térmica do material, a camada isolante do cabo pode ser danificada. O rompimento do material isolante ou surgimento de microfissuras, pode levar ao contato do condutor com a água ou até mesmo a ruptura do cabo. O contato do alumínio com a água resulta na oxidação deste metal. Já nos condutores de cobre, este fenômeno não ocorre, por isso o motivo de usar o cobre como condutor para cabos submarinos. Apesar do condutor ser mais caro e pesado, suas propriedades físico-químicas, se adequam melhor a esse tipo de ambiente.

Outra particularidade dos cabos submarinos, é a forma de instalação. Geralmente, os cabos são divididos em várias partes para facilitar a produção e transporte. Para linhas terrestres, esses cabos segmentados, são conectados entre si através de conectores. Para linhas submarinas, não é possível de se fazer o mesmo, pois representa um risco de entrar água nos conectores. Neste caso, é necessário reconstruir os elementos estruturais. Esses serão os pontos mais sensíveis dos cabos, caso essa junção não seja feita adequadamente, pode levar a ruptura, por isso a importância de se atentar a esse detalhe na instalação do cabo.

#### 5.1.1.2 Conversores

O projeto DolWin1 incorpora um notável conversor eletrônico de potência, que representa um componente fundamental de seu sistema HVDC, utilizado para eficiente transmissão de energia de parques eólicos offshore para a rede elétrica terrestre. O DolWin1 adota um design de conversor eletrônico denominado Cascaded Two-Level (CTL), composto por várias células de comutação em cascata. Esse design se destaca por suas características distintivas, contribuindo para sua notável eficiência e desempenho.

O cerne do design CTL está nas múltiplas células de comutação em cascata, sendo cada uma composta por dispositivos semicondutores, notadamente os transistores bipolares de porta isolada (IGBTs), responsáveis pela comutação da tensão. O aspecto primordial do CTL é a baixa frequência de comutação por célula, o que traz diversas implicações vantajosas.

A baixa frequência de comutação viabiliza a geração de uma tensão de saída praticamente senoidal, eliminando, assim, a necessidade de filtros harmônicos de corrente alternada (AC). Isso resulta em uma notável melhoria na qualidade da energia convertida. Além disso, a baixa frequência de comutação reduz as perdas de comutação nos IGBTs, minimizando significativamente as perdas de potência no processo.

A frequência mais baixa de comutação também contribui para a minimização das perdas harmônicas no reator, aprimorando ainda mais a eficiência geral do sistema. A eficiência é um elemento crítico na transmissão de energia em longas distâncias.

Um destaque do projeto DolWin1 é seu elevado nível de redundância de equipamentos, que supera sistemas HVDC monopolos convencionais. O sistema conta com transformadores conversores paralelos, cada um com a capacidade de lidar com até 800 MW de energia. Essa redundância desempenha um papel vital na manutenção da confiabilidade operacional. No caso de falha em um dos transformadores, o sistema é capaz de continuar operando com a capacidade restante, assegurando a continuidade da transmissão de energia.

A proteção e o controle são elementos críticos no funcionamento do sistema DolWin1. Um componente notável é o DC chopper, cujo propósito é aprimorar a capacidade de passagem durante falhas de corrente alternada na rede terrestre. Essencialmente, atua como um isolador, impedindo que distúrbios na rede de CA afetem a rede offshore, preservando assim a estabilidade do sistema HVDC.

Esse controle é responsável por manter a qualidade da tensão de saída, ajustar a potência transmitida e monitorar o sistema para garantir sua operação segura e eficiente.

Neste projeto, a geração de tensão praticamente senoidal, a redução das perdas de comutação e a minimização das perdas harmônicas. A alta redundância de equipamentos e os sistemas avançados de proteção e controle contribuem para tornar

o DolWin1 um sistema altamente confiável e eficiente para a transmissão de energia de parques eólicos offshore para a rede elétrica terrestre. Juntos, esses elementos solidificam a posição do Trianel Borkum como um exemplo notável, principalmente na área de transmissão HVDC.

### 5.1.2 Principais desafios

O texto aborda uma série de desafios significativos associados à conexão de parques eólicos offshore em larga escala à rede elétrica por meio da tecnologia de transmissão em corrente contínua de alta tensão (VSC-HVDC). Esses desafios são de natureza técnica e envolvem a estabilidade, controle e operação desses sistemas.

Um dos desafios mais proeminentes está relacionado à baixa inércia do sistema de corrente alternada offshore, ou seja, a baixa capacidade de um sistema de manter sua estabilidade em face de distúrbios, como rejeições de carga devido a falhas na rede AC onshore ou offshore. No contexto dos parques eólicos offshore, o sistema é geralmente fraco em termos de inércia, o que significa que ele é sensível a flutuações na frequência e ângulo de fase, que podem surgir em caso de falhas. Essas flutuações podem impactar a capacidade dos controladores dos aerogeradores de rastrear com precisão a tensão da rede, levando a problemas de estabilidade ou até mesmo ao desligamento das turbinas eólicas para evitar sobrecargas.

Além disso, a situação de excedente de potência ativa na rede AC offshore durante rejeições de carga do HVDC é um desafio adicional. Esse cenário ocorre quando o HVDC experimenta uma falha ou um controle deficiente, resultando em uma grande quantidade de potência ativa não gerenciada na rede AC offshore. O controle do HVDC é projetado com alta redundância para evitar falhas, mas garantir que esse excedente de potência seja gerenciado de maneira segura representa um desafio adicional.

A energização de transformadores offshore é outra fonte de desafio técnico. Quando os transformadores são energizados, eles podem gerar correntes de inrush de magnetização transitória, que são caracterizadas por um aumento súbito na corrente. Isso pode levar à interação simpática quando um transformador é energizado em conjunto com outros já em operação. Essa interação pode causar uma

série de problemas, incluindo falhas nos relés de proteção dos transformadores, sobretensões harmônicas temporárias e quedas na tensão RMS.

A interação de controle entre os sistemas HVDC e as turbinas eólicas também é um desafio importante. Durante a fase de projeto, é frequentemente difícil prever como os controladores dos aerogeradores dos sistemas HVDC interagirão. Essa incerteza pode resultar em problemas de harmonia, oscilações e até desligamentos causados por sobrecorrente.

Outro desafio decorre do baixo amortecimento das ressonâncias na rede AC offshore. Isso ocorre devido à baixa resistência nos cabos e transformadores que conectam os aerogeradores ao sistema HVDC. Durante a energização inicial do sistema AC, especialmente quando a geração eólica é baixa ou inexistente, as ressonâncias podem se formar na rede eólica offshore. Essas ressonâncias não amortecidas podem causar problemas, incluindo sobretensões prejudiciais a equipamentos a menos que sejam adequadamente controladas.

Garantir a detecção de falhas fase-fase na rede offshore, especialmente quando as turbinas eólicas estão desconectadas ou operando com baixa potência, representa outro desafio. Os conversores VSC geralmente são projetados para não injetar corrente de sequência negativa na rede AC, o que pode tornar a detecção de falhas fase-fase difícil, uma vez que a corrente de curto-circuito é limitada durante tais condições.

## 6 CONCLUSÃO

A geração eólica offshore é uma fonte promissora de energia renovável que desempenha um papel vital na transição global para uma matriz energética mais limpa e sustentável. No entanto, o desenvolvimento e operação de parques eólicos offshore trazem consigo uma série de desafios técnicos complexos relacionados à proteção e controle dos sistemas envolvidos.

Um dos desafios fundamentais na geração eólica offshore diz respeito à baixa inércia do sistema AC offshore. A falta de inércia torna o sistema mais sensível a distúrbios e variações na geração eólica, o que pode afetar a estabilidade e a qualidade da energia produzida. Para superar esse desafio, é necessário desenvolver sistemas de controle capazes de lidar com a baixa inércia e de responder rapidamente a mudanças na geração de energia eólica.

Outro desafio significativo é o grande excedente de potência ativa no mar durante a rejeição de carga. Isso ocorre quando a demanda de energia é menor do que a capacidade de geração dos parques eólicos offshore, o que pode levar a sobretensões e outros problemas na rede. Soluções para esse desafio envolvem o desenvolvimento de sistemas de controle de potência capazes de ajustar a produção de energia de forma eficiente e garantir a estabilidade do sistema durante a rejeição de carga.

A interação simpática na energização do transformador é outro problema que pode afetar a operação segura e eficiente dos parques eólicos offshore. Quando os transformadores são energizados, pode ocorrer uma interação prejudicial entre os equipamentos de alta tensão, o que pode resultar em sobretensões e danos aos equipamentos. Para mitigar esse desafio, é importante desenvolver estratégias de controle que minimizem a interação simpática durante a energização.

Além disso, a possível interação de controle entre HVDC e as turbinas eólicas é um desafio que precisa ser abordado de forma cuidadosa. A transmissão de energia a partir de parques eólicos offshore muitas vezes envolve a conversão de corrente alternada para corrente contínua e vice-versa. A interação inadequada entre os sistemas de controle HVDC e os aerogeradores pode levar a problemas de estabilidade e qualidade de energia. Portanto, é fundamental projetar sistemas de controle compatíveis e integrados para garantir uma operação suave.

Outro desafio técnico crucial é o baixo amortecimento da rede AC offshore devido à baixa resistência em cabos e transformadores. Isso resulta em ressonâncias mal amortecidas, especialmente durante o estágio inicial de energização do sistema CA, quando a geração eólica é baixa ou inexistente. Para resolver esse problema, é necessário desenvolver sistemas de controle capazes de identificar e mitigar ressonâncias indesejadas, garantindo a estabilidade do sistema.

Ainda assim, outro desafio relacionado à proteção é o fornecimento de corrente de curto-circuito suficiente para detectar falhas de fase na rede offshore nos aerogeradores de baixa potência ou desconectados. Detectar falhas é essencial para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema. Superar esse desafio requer a implementação de dispositivos e sistemas de proteção adequados que possam detectar falhas de fase, mesmo em situações adversas.

Por outro lado, esses desafios também representam oportunidades significativas para avançar na proteção e controle na geração eólica offshore. O desenvolvimento de tecnologias de controle avançadas, algoritmos de proteção mais robustos e sistemas de monitoramento em tempo real pode melhorar a operação e a eficiência dos parques eólicos offshore. Além disso, a pesquisa contínua na área de sistemas de energia eólica offshore pode levar a soluções inovadoras para enfrentar esses desafios técnicos.

A colaboração entre especialistas em energia, fabricantes de equipamentos, empresas de energia e pesquisadores desempenhará um papel fundamental na superação desses desafios e na realização do potencial total da geração eólica offshore. Com a devida atenção à proteção e ao controle, a geração eólica offshore pode continuar a crescer e contribuir de forma significativa.

## REFERÊNCIAS

- ABB SOLUTIONS for switching and protection of low speed wind turbines, Bergamo, Italy, 2011. 16 p. ABB.
- ABDALRAHMAN, Adil; ISABEGOVIC, Emir. DoWin1 – Challenges of Connecting Offshore Wind Farms. *In: IEEE INTERNATIONAL ENERGY CONFERENCE (ENERGYCON)*, 2016, APRIL 4-8, LEUVEN, BELGUM, 2016. 2016. ABB.
- ACKERMANN, Thomas. **Wind Power in Power Systems**. John Wiley & Sons, v. 3, f. 560, 2012. 1120 p.
- AHMED, Mohamed; KIM, Young-Chon. Hierarchical Communication Network Architectures for Offshore Wind Power Farms. **Energies**, 22 maio 2014.
- ANAYA-LARA, Olimpo; CAMPOS-GAONA, David; MORENO-GOYTIA, Edgar; ADAM, Grain. **Offshore Wind Energy Generation: Control, Protection, and Integration to Electrical Systems**. John Wiley & Sons, v. 3, f. 156, 2014. 312 p.
- BASACK, Sudip; SAHA, Dispasri; DUTTA, Shantanu; DAS, Goutam. **Power Generation by Offshore Wind Turbines: An Overview on Recent Research and Developments**. Research Gate. Elite College of Engineering, Affiliation: MAKU University of Technology, Kolkata 700113, INDIA, 2021. 9 p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/356245605>. Acesso em: 11 ago. 2023.
- BLAABJERG, Frede; CHEN, Z.; MA, Ke; IOV, Florin. Power Electronics and Controls for Wind Turbine Systems. *In: PROCEEDINGS OF THE IEEE ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, ENERGYCON 2010*. 2010.
- BURTON, Tony; SHARPE, David; JENKINS, Nick; BOSSAYNI, Ervin. **Wind Energy Handbook**. John Wiley & Sons, v. 1, f. 324, 2001. 648 p.
- CALLAVIK, Magnus; BAHRMAN, Michael; SANDEBERG, Peter. Technology Developments and Plans to Solve Operational Challenges Facilitating the HVDC Offshore Grid. *In: IEEE-PES GENERAL MEETING*. 2012.
- FILHO, João MAMEDE; MAMEDE, Daniel Ribeiro. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 2020.
- GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **GLOBAL WIND REPORT 2023**. GWEC. <https://gwec.net/>, 2023. 120 p. Disponível em: <https://gwec.net/>. Acesso em: 13 ago. 2023.

GOMES, Bianca. **OTIMIZAÇÃO DO CABEAMENTO INTERCONECTOR DE AEROGERAADORES EM PARQUES EÓLICOS OFFSHORE**. Alegrete, 2018 Monografia (Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pampa.

GULSKI, Edward; ANDERS, George J.; JONGEN, Rogier A.; PARCIAK, Jarosław; SIEMIŃSKI, Jakub; PIESOWICZ; Elżbieta; PASZKIEWICZ, Sandra; IRSKA, Izabela. Discussion of electrical and thermal aspects of offshore wind farms' power cables reliability. **Science Direct**, v. 151, Novembro 2021.

HAMON, Camille. **On Frequency Control Schemes in Power Systems with Large Amounts of Wind Power**. Estocolmo, Suécia, 2012 Tese - Kth School Of Electrical Engineering.

KAWADY, Tamer; TAALAB, A.M.I.; MANSOUR, Naema. **Wind Farm Protection Systems: State of the Art and Challenges**. Research Gate. Electrical Engineering Department, Minoufiya University Shebin El-Kom, Egypt, 2010. 25 p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/221907529>. Acesso em: 11 ago. 2023.

MARTINEZ, Rodrigo Augusto. **UMA ABORDAGEM QUANTITATIVA E QUALITATIVA DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ENERGIA COM ÊNFASE NAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS PRODUZIDAS EM PARQUES EÓLICOS**. São Paulo, 2014. 52 p Monografia (ENERGIAS RENOVÁVEIS, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA) - Universidade de São Paulo.

MARTINEZ-RODRIGO, Fernando; RAMIREZ, Dionisio; REY-BOUE, Alexis B.; DE PABLO, Santiago; HERRERO-DE LUCAS, Luis Carlos. Modular Multilevel Converters: Control and Applications. **Energies**, 26 outubro 2017.

MOLINA, Marcelo; MERCADO, Pedro. Modelling and Control Design of Pitch-Controlled Variable Speed Wind Turbines. *In*: AL-BAHADLY, Ibrahim. **Wind Turbines**. IntechOpen, 2011. 666 p. cap. 16, p. 375-402.

MOREIRA, José Roberto (Org.) SIMÕES. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. 2 ed. LTC, 2021.

NIU, Yukun; WEN, Jun; MA, Limin; WANG, Shujie. Analysis of Offshore Wind Power Integration. **Journal of Physics: Conference Series**, 2021.

OFFSHORE Wind Outlook 2019, 2019. 98 p. International Energy Agency.

PSRC WORKING GROUP C25. **Protection of Wind Electric**, 2021.

SECCO, Gustavo. **Procedimento para estudo de coordenação das proteções elétricas em Centrais de Geração Eólica**. São Paulo, 2015 Dissertação - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SILVA MARQUES, CAROLINA. **Wind Integration into Power Systems Operation**. São Paulo, 2018. 68 p Trabalho de Conclusão de Curso (Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Universidade de São Paulo.

TECHNICAL Application Papers No. 13 Wind power plants, Bergamo, Italy, 2011. 136 p. ABB.

TRIANEL Wind Farm Borkum Facts and Figures. Disponível em: <https://www.trianel-borkum.de/en/wind-farm/#:~:text=Trianel%20Wind%20Farm%20Borkum%20consists,rotor%20star%20and%20the%20tower..> Acesso em: 17 dez. 2023.

TRIANEL Windpark Borkum. Wikipedia. 2023. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Trianel\\_Windpark\\_Borkum#cite\\_note-8](https://en.wikipedia.org/wiki/Trianel_Windpark_Borkum#cite_note-8). Acesso em: 17 dez. 2023.

WENZEL, Guilherme. **PROJETO AERODINÂMICO DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL**. Porto Alegre, 2007. 76 p Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

YANG, Bo; LIU, Bingqiang; ZHOU, Hongyu; WANG, Jingbo; YAO, Wei; WU, Shaocong; SHU, Hongchun; REN, Yaxing. **A critical survey of technologies of large offshore wind farm integration: summary, advances, and perspectives**. Springer Open. 2022. Disponível em: <https://pcmp.springeropen.com/articles/10.1186/s41601-022-00239-w>. Acesso em: 17 dez. 2023.