



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LORENA MARTINS FERREIRA

**PERSPECTIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NO
BRASIL**

UBERLÂNDIA – MG

2019

LORENA MARTINS FERREIRA

**PERSPECTIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NO
BRASIL**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Aídson Antônio de Paula

Assinatura do Orientador

UBERLÂNDIA – MG

2019

Dedico este trabalho aos meus pais, Ana Maria e Geralmino, ao meu padrasto Sérgio e aos meus irmãos Mariana e Paulo Victor, pelo apoio, incentivo e paciência durante todo o curso.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus. Por ter me dado serenidade quando orei, forças quando fraquejei e conforto quando me esgotei.

Aos meus pais Ana Maria e Geralmino, e meu padrasto Sérgio, que não mediram esforços para que eu pudesse realizar este sonho.

Aos meus irmãos Mariana e Paulo Victor, pelo incentivo e apoio.

À toda minha família e amigos, pelo companheirismo e ajuda durante todos estes anos.

Sou grata a todos os professores que contribuíram para a minha formação acadêmica, especialmente ao professor Aídson, que me orientou neste trabalho. Obrigada pela dedicação, paciência e confiança.

*“Quando os ventos de mudanças sopram,
umas pessoas levantam barreiras, outras
constroem moinhos de vento”.*

Érico Veríssimo

RESUMO

Devido ao grande aumento da demanda por energia elétrica atrelado às preocupações ambientais, surgiu a necessidade de buscar fontes renováveis de energia. No Brasil, a energia eólica se consolidou nessa perspectiva, de atendimento à demanda e de fornecer um recurso limpo e renovável. Os parques eólicos *offshore* se apresentam como uma alternativa aos parques eólicos *onshore*. Apesar de possuir um grande potencial de geração de energia elétrica em alto mar, o Brasil ainda não possui nenhuma central eólica instalada no mar. No entanto, já é previsto a inserção de energia eólica *offshore* na matriz energética brasileira. A PETROBRAS anunciou os primeiros investimentos no setor e pretende instalar a primeira planta piloto eólica *offshore* no litoral do Rio Grande do Norte. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar as perspectivas de geração de energia eólica *offshore* no Brasil e sua tecnologia.

Palavras-chave: Energia eólica. Energia eólica *offshore*. Perspectiva energia eólica *offshore*.

ABSTRACT

Due to the large increase in the demand for electric energy tied to environmental concerns, the need to search for renewable energy sources arose. In Brazil, wind energy was consolidated from this perspective, of meeting the demand and providing a clean and renewable resource. Offshore wind farms present themselves as an alternative to onshore wind farms. Although it has a great potential for generating electric power in the high seas, Brazil does not yet have any wind power plant installed in the sea. However, the insertion of offshore wind energy into the Brazilian energy matrix is already foreseen. PETROBRAS announced the first investments in the sector and intends to install the first offshore wind pilot plant on the coast of Rio Grande do Norte. In this context, this work aims to analyze the perspectives of offshore wind generation in Brazil and its technology.

Keywords: Wind energy. Offshore wind energy. Offshore wind energy perspective.

LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Velocidade média anual dos ventos a 150 metros de altura.....	16
Figura 2 - Evolução da Capacidade Instala.....	17
Figura 3 - Matriz Energética Brasileira.. ..	18
Figura 4 - Potência Instalada por Estado (MW).....	19
Figura 5 – Condições do ambiente que afetam um parque eólico <i>offshore</i>	21
Figura 6 – Principais componentes de uma turbina eólica <i>offshore</i>	22
Figura 7 – Grupo de fundações energia eólica <i>offshore</i>	23
Figura 8 – Tipos de fundações.....	24
Figura 9 – Sistema do gerador de indução em gaiola de esquilo	25
Figura 10 – Sistema do gerador de indução duplamente alimentado.....	26
Figura 11 – Sistema do gerador síncrono	27
Figura 12 – Processo de <i>layout</i> parque eólico	28
Figura 13 – Layout típico de um parque eólico <i>offshore</i>	28
Figura 14 – Parque Eólico <i>offshore</i> Vinderby na Dinamarca.....	29
Figura 15 – Evolução dos aerogeradores <i>offshore</i>	30
Figura 16 – Aerogerador V164 – 9,5 MW	30
Figura 17 – Capacidade instalada por país em 2017	31
Figura 18 – Capacidade instalada na Europa em 2017	31
Figura 19 – Capacidade acumulada energia <i>offshore</i> no mundo	32
Figura 20 - LCOE histórico e projetado para eólica <i>offshore</i>	32
Figura 22 – Áreas de viabilidade para instalação de parques <i>offshore</i>	34
Figura 23 – Complexo eólico <i>offshore</i> Asa Branca	37
Figura 24 – Complexo eólico <i>offshore</i> Caucaia.....	38
Figura 25 – Complexo eólico <i>offshore</i> Petrobras	39
Figura 26 – Disposição do parque eólico e do sistema de transmissão	45
Figura 27 – Tipo de transmissão de acordo com a relação entre potência e comprimento da linha	46
Figura 28 – Esquema de um parque eólico <i>offshore</i> usando transmissão HVAC.	47
Figura 29 - Esquema de um parque eólico <i>offshore</i> usando sistema HVDC LCC	53
Figura 30 - Esquema de um parque eólico <i>offshore</i> usando sistema HVDC VSC	57
Figura 31 – Diagrama típico de uma linha.....	62
Figura 32 – Estrutura de custos usinas eólicas <i>onshore</i> vs <i>offshore</i>	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais mercados onshore em 2018.	Error! Bookmark not defined.
Tabela 2 – Potencial instável de geração eólica offshore por distância na costa.....	35
Tabela 3 – Potencial instável de geração eólica offshore por profundidade.....	35
Tabela 4 – Fatores de permanência dos ventos	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica

AC – Corrente Alternada (do inglês *Alternating Current*)

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CAPEX – Despesas de Capital (do inglês *Capital Expenditure*)

CO₂ – Dióxido de Carbono

DC – Corrente Contínua (do inglês *Direct Current*)

DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação

DRO – Despacho de Registro de Outorga

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EWEA – Associação Europeia de Energia Eólica (do inglês *European Wind Energy Association*)

FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental

GW – Gigawatt

GWEC – Conselho Global de Energia Eólica (do inglês *Global Wind Energy Consil*)

HVAC – Alta Tensão em Corrente Alternada (do inglês *High Voltage Alternating Current*)

HVDC – Alta Tensão em Corrente Contínua (do inglês *High Voltage Direct Current*)

Hz – Hertz

IEA – Instituto de Economia Agrícola

IGBT – Transistor Bipolar de Porta Isolada (do inglês *Insulated Gate Bipolar Transistor*)

INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária

KW – Quilowatt

Km – Quilômetro

LCC – Conversor de Comutação Natural de Linha (do inglês *Line Commutated Converters*)

LCOE – Custo Nivelado de Energia (do inglês *Levelized Cost of Energy*)

m - Metros

MME – Ministério de Minas e Energia

MW – Megawatt

OPEX – Despesas Operacionais (do inglês *Operational Expenditure*)

PCHs – Pequenas Centrais Hidrelétricas

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental

SIN – Sistema Interligado Nacional

TW – Terawatt

TWh – Terawatt-hora

VSC – Conversor de Comutação Forçada de Fonte de Tensão (do inglês *Voltage Source Converts*)

ZEE – Zona Econômica Exclusiva

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. ENERGIA EÓLICA NO BRASIL	15
2.1 Potencial eólico.....	19
3. ENERGIA EÓLICA OFFSHORE	21
3.1 Componentes turbina eólica <i>offshore</i>	22
3.2 Fundações.....	23
3.3 Geradores.....	24
3.3.1 Gerador de indução de rotor em gaiola de esquilo	24
3.3.2 Gerador de indução duplamente alimentado (GIDA).....	26
3.3.3 Gerador síncrono	27
3.4 <i>Layout</i> do parque eólico e efeito esteira	27
3.5 Energia eólica <i>offshore</i> no mundo	29
3.6 Energia eólica <i>offshore</i> no Brasil	33
3.6.1 Desenvolvimento energia eólica <i>offshore</i> no Brasil	41
3.7 Vantagens e desvantagens	43
4. CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA.....	45
4.1 Sistema de transmissão	45
4.1.1 Sistema de transmissão em alta tensão em corrente alternada (HVAC)....	46
4.1.2 Sistema de transmissão em alta tensão em corrente contínua (HVDC)....	49
4.2 Impacto dos aerogeradores na rede elétrica	58
4.2.1 Impacto nas redes locais	58
4.2.2 Impacto na rede global	59
5. ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA	61
5.1 Análise técnica	61
5.1.1 Local de instalação	61
5.1.2 Seleção do aerogerador	61
5.1.3 Conexão com a rede elétrica.....	62

5.2 Análise econômica.....	63
5.2.1 Desenvolvimento e Consentimento [13]	65
5.2.2 Produção e Aquisição	66
5.2.3 Instalação [13]	66
5.2.4 Operação e Manutenção	67
5.2.5 Descomissionamento	68
5.3 LCOE – Levelized Cost of Energy	69
6. CONCLUSÃO	70
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1. INTRODUÇÃO

Visto o grande aumento da demanda por energia elétrica e a necessidade urgente de diminuir a emissão de gases poluentes, surgiu a preocupação da preservação do meio ambiente atrelado ao consumo de energia elétrica. Sendo assim, o investimento em energias renováveis teve crescimento acelerado nos últimos anos.

A geração de energia proveniente dos ventos foi uma das que mais se destacou, isso se deve ao seu baixo impacto ambiental e de ser uma fonte de energia limpa. Logo, se tornou uma alternativa para minimizar os efeitos das mudanças climáticas, diversificar a matriz elétrica e garantir segurança energética do Sistema Interligado Nacional (SIN). A geração de energia pelos ventos se complementa na matriz energética brasileira devido a sua sazonalidade e não sobrecarrega as hidrelétricas quando os reservatórios estão com baixos níveis de água.

A energia eólica se consolidou nessa perspectiva de atendimento da demanda e de fornecer um recurso limpo, renovável, e hoje, o mais competitivo do país. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), o Brasil possui potencial eólico *onshore* estimado em cerca de 500 GW, o que representa três vezes mais que a demanda atual de energia. Além disso, o país apresenta fator de capacidade – razão entre a produção de energia real gerada pelo aerogerador e a produção que o aerogerador iria produzir se trabalhasse em plena capacidade de operação – maior que a média mundial.

A produção de energia eólica *offshore* tem se destacado cada vez mais nos últimos anos, principalmente nos países do continente europeu. De acordo com o GWEC 2018, a Europa possui 84% da capacidade mundial instalada.

Os complexos eólicos *offshore* representam uma alternativa na geração de energia elétrica e na busca pelo cumprimento de metas a serem alcançadas no desenvolvimento sustentável. Apesar dos altos custos de instalação, operação e manutenção, a energia gerada em alto mar se tornou uma solução atrativa, visto que possui rugosidade superficial do oceano baixa, maior velocidade dos ventos, que aumenta o potencial de geração de energia, entre outras vantagens.

Muitos autores atribuem o crescimento expressivo desta fonte, sobretudo na Europa, ao espaço limitado de terras, impacto visual e menor emissão de ruídos. Ainda reiteram que a produção de energia no mar é de suma importância para os países cumprirem metas de energia renovável e diminuir emissão de gases poluentes.

Mesmo com um expressivo potencial *offshore*, o Brasil ainda não possui geração de energia eólica em alto mar, porém sua inserção na matriz energética já está anunciada. Em 2018 a Petrobrás anunciou os primeiros investimentos no setor e pretende instalar até 2022 a primeira planta piloto eólica *offshore* no litoral do Rio Grande do Norte.

O desenvolvimento de energia eólica *offshore* no Brasil é barrado pela falta de um marco regulatório vigente para o setor. Para atrair investidores é necessária uma consistente regulamentação que contemple o desenvolvimento sustentável atrelado às necessidades energéticas.

Este trabalho tem como objetivo reiterar a importância da geração de energia eólica e analisar o desenvolvimento de parques eólicos *offshore* no Brasil.

2. ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Em 1992 foi instalada no arquipélago de Fernando de Noronha a primeira turbina eólica no país com potência de 75 KW. Porém, devido a falta de políticas públicas e custos bastantes elevados, o país ficou cerca de dez anos sem progredir no setor.

A fim de aumentar a participação de fontes alternativas (pequenas centrais hidrelétricas, usinas eólicas e projetos termoeletricos a biomassa) na geração de energia elétrica, em 2002 o Governo Federal criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA). O Programa proporcionou maior segurança nos investimentos do setor eólico, que era uma tecnologia nova no país. A partir de 2009 a energia eólica passou a ser comercializada em um ambiente regulado por meio dos leilões de energias renováveis. No entanto, o desenvolvimento se consolidou mesmo em 2010 com os fortes investimentos das empresas de energia visando os bons

ventos. Consta-se que o investimento no setor foi de R\$ 32 bilhões nos anos de 2010 a 2017.

Com um potencial de geração de energia elétrica de 500 GW, que representa três vezes mais que a demanda atual de eletricidade, o Brasil é considerado um dos países com os melhores ventos do mundo para geração de energia eólica. Isso pode ser comprovado ao se comparar a média mundial de fator de capacidade, que é em torno de 25%, com o fator de capacidade brasileiro médio, que em 2018 foi de 42%.

O país já ocupa o oitavo lugar em capacidade instalada, fica atrás apenas da China, Estados Unidos, Alemanha, Índia, Espanha, Reino Unido e França. Esse potencial considera apenas aerogeradores com potência de 2 MW e 3 MW instalados em torres de 150 metros de altura, porém já estão sendo fabricados aerogeradores com 5 MW de potência e com isso o potencial eólico pode ter um aumento significativo. A qualidade dos ventos associado à tecnologia fez com que a fonte eólica se tornasse a mais competitiva do país e hoje mais barata que a hidrelétrica.

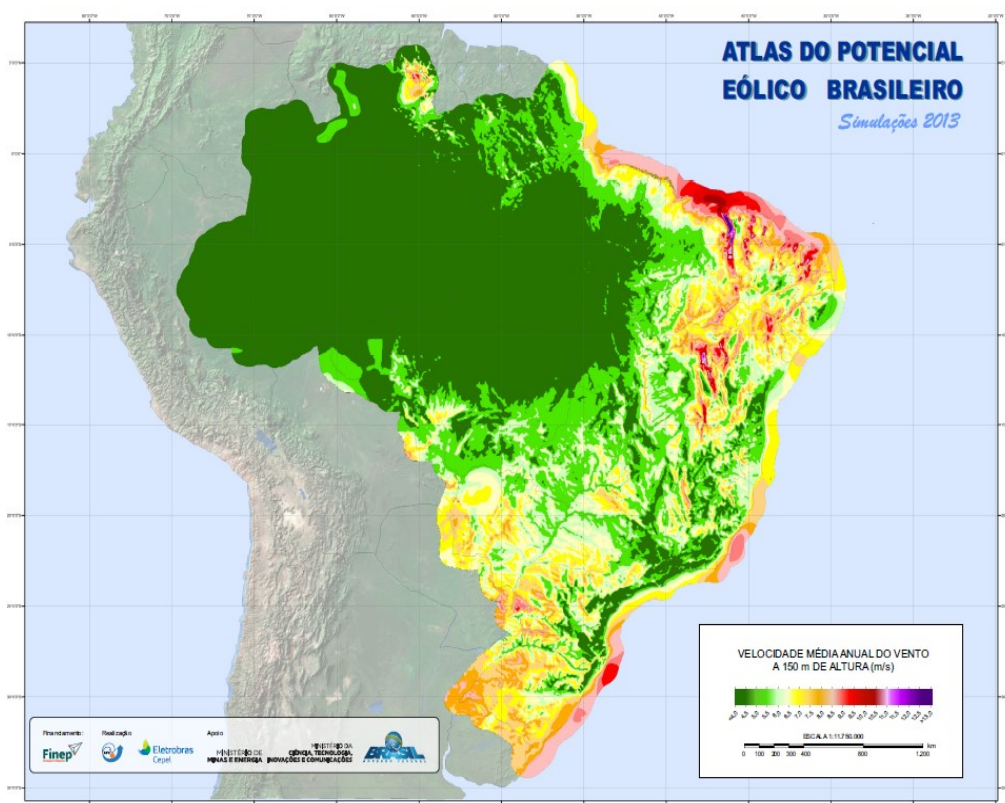


Figura 1 - Velocidade média anual dos ventos a 150 metros de altura.
Fonte: [11].

Nos próximos anos a capacidade instalada da fonte eólica tende a ter um crescimento expressivo. Até o final de 2024 espera-se que o país tenha instalado 19,04 GW de potência.



Figura 2 - Evolução da Capacidade Instala. Fonte: [4].

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a capacidade instalada em dezembro de 2018 foi de 162,5 GW, sendo que 14,2 GW foram provenientes de usinas eólicas, que igualou a capacidade instalada da usina de Itaipu, de 14,0 GW. Nesse mesmo ano, de acordo com a ABBEólica os parques eólicos produziram 48,4 TWh, que em relação a 2017 representa um crescimento de 14,6%.

Além de ser uma fonte renovável, a energia eólica teve grande destaque no Brasil pela sua complementariedade na matriz energética que tem como base as hidrelétricas. O período denominado de safra dos ventos, onde ocorre maior produção de energia, varia de junho a dezembro, coincide com os meses de menor incidência de chuva, quando as hidrelétricas geram menos energia, assim o sistema elétrico não fica sobrecarregado.

No ano de 2018 o Brasil esteve entre os cinco principais mercados de energia eólica *onshore* no mundo.

Tabela 1 – Principais mercados *onshore* em 2018.

Principais mercados <i>onshore</i> em 2018	MW construído
China	21.200
EUA	7,588
Alemanha	2.402
Índia	2191
Brasil	1,939

Fonte: [31].

Em abril de 2019 a ABEEólica divulgou dados referentes a geração de energia eólica no país e mostrou que a geração de energia através dos ventos atingiu 15 GW, logo passou a ocupar o segundo lugar na matriz energética. São mais de 7 mil aerogeradores distribuídos em 601 parques, localizados em 12 estados. Nos estados do Nordeste estão concentrados 86% desses parques.

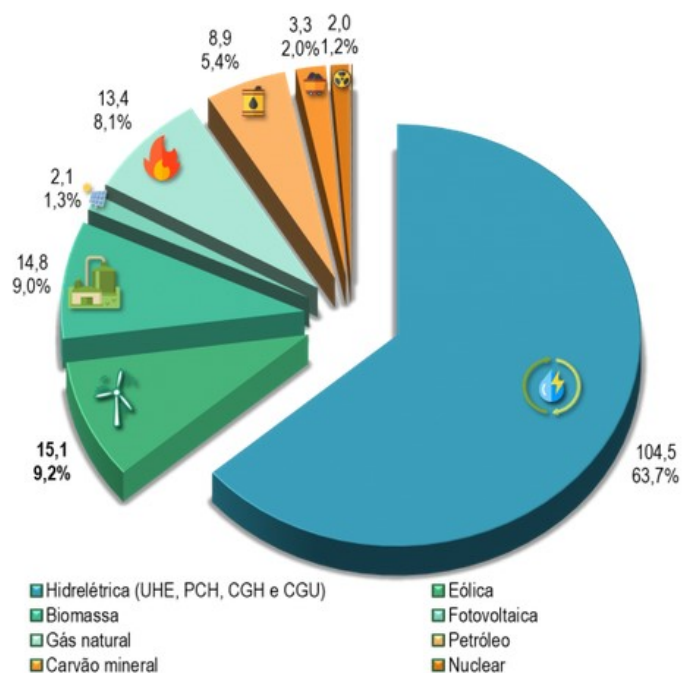


Figura 3 - Matriz Energética Brasileira. Fonte: [3].

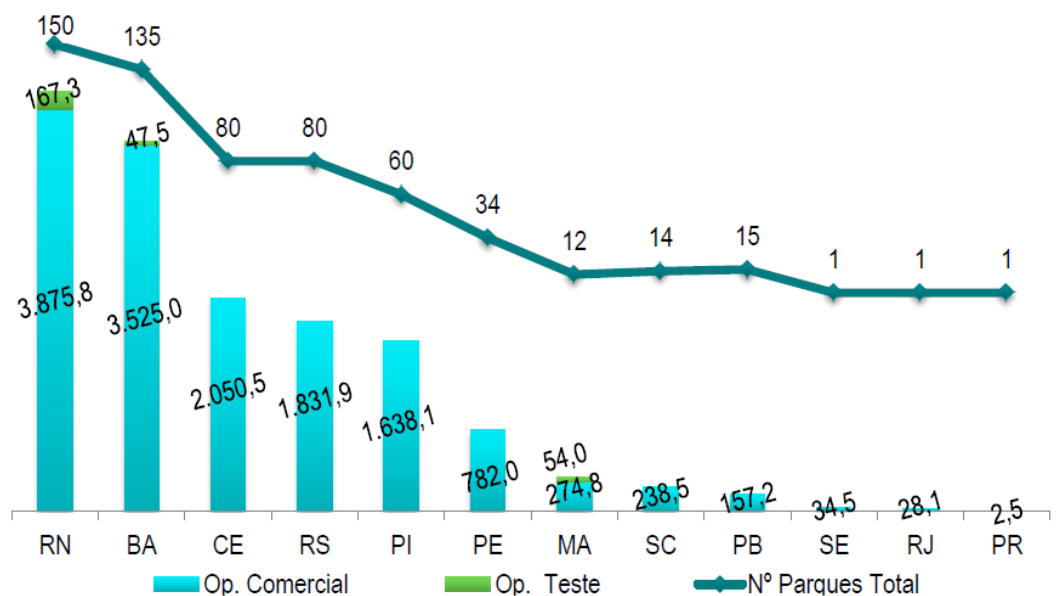


Figura 4 - Potência Instalada por Estado (MW). Fonte: [4].

Durante a safra dos ventos, quase 14% do Sistema Interligado Nacional é suprido pela fonte eólica. No Nordeste em novembro de 2018 foi registrado o maior recorde de atendimento a carga, todo subsistema foi suprido por energia eólica e ainda houve exportação, em um dia foram gerados 8.920 MW e atendeu 104% da demanda com um fator de capacidade de 86%. Por duas horas 100% da energia eólica abasteceu a região nordestina.

2.1 Potencial eólico

Conhecer as características do vento é extremamente importante para poder calcular quanto de energia o parque poderá produzir. O potencial eólico local é estimado por meio da distribuição de velocidade anual do vento e do gráfico de potência do modelo da turbina.

Para descrever o perfil de velocidade do vento é utilizado o modelo de distribuição de *Weibull*. A equação (1) representa a função densidade de probabilidade de *Weibull*.

$$f(v) = \frac{K}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^K\right] \quad \begin{cases} K > 0 \\ c > 1 \end{cases} \quad (1)$$

Onde,

c : Fator de escala

K : Fator de distribuição

Através do Atlas eólico Brasileiro é possível determinar os parâmetros necessários da equação (1). Em seguida, é preciso escolher qual aerogerador será utilizado. A partir dessa informação é possível calcular o potencial eólico de acordo com equação abaixo:

$$E = \sum_i f_i P_i T \quad (2)$$

Onde,

E : Energia gerada [KWh].

f_i : Frequência anual de ocorrência de uma velocidade de classe i .

P_i : Potência equivalente para velocidade de classe i [KW].

T : Período de referência de um ano dado [h].

Através do fator de capacidade é possível analisar a eficiência da produção de eletricidade do parque eólico. Pode ser calculado através da equação (3):

$$FC = \frac{E}{E_n} \quad (3)$$

Onde,

E : Energia gerada, calculada pela equação 2.

E_n : Energia nominal [KWh].

3. ENERGIA EÓLICA OFFSHORE

A energia eólica *offshore* é a energia eólica gerada por aerogeradores instalados no mar. Essa tecnologia é relativamente recente e se encontra em plena expansão.

Os parques eólicos marítimos permitem maior aproveitamento dos ventos e assim podem gerar mais energia. Atrelado a isso, a preocupação com o meio ambiente e a crescente demanda energética, fez com que os investimentos no setor crescessem consideravelmente nos últimos anos.

As turbinas são muito parecidas com as dos parques *onshore*, porém requer maior reforço para suportarem as adversidades encontradas no ambiente marítimo, como tempestades, ventos e ondas muito fortes, entre outros.

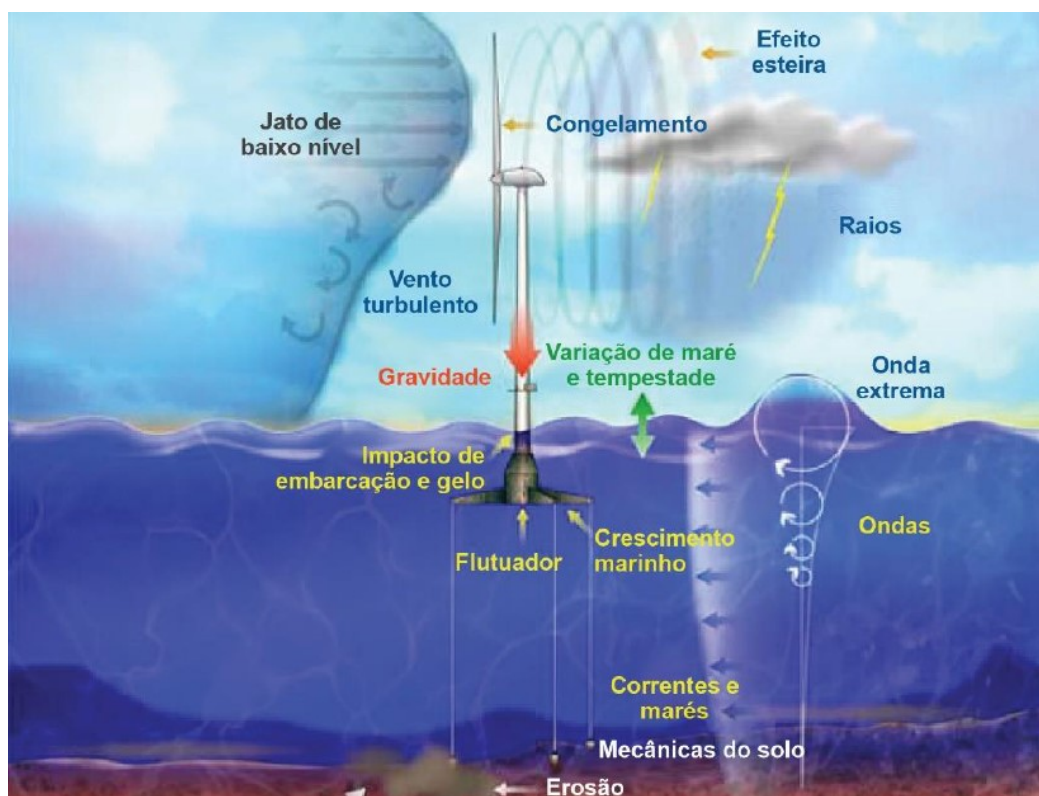


Figura 5 – Condições do ambiente que afetam um parque eólico *offshore*.
Fonte: [5].

3.1 Componentes turbina eólica *offshore*

Os principais componentes da turbina eólica são, nacelle, rotor e fundação. A turbina é composta por um rotor de três pás conectadas ao gerador por um sistema de transmissão, ambos se encontram dentro da nacelle – que abriga também os demais componentes para acionamento e sistema de controle e segurança. A torre tem a função de sustentar a turbina a uma altura adequada para captação do vento [4].

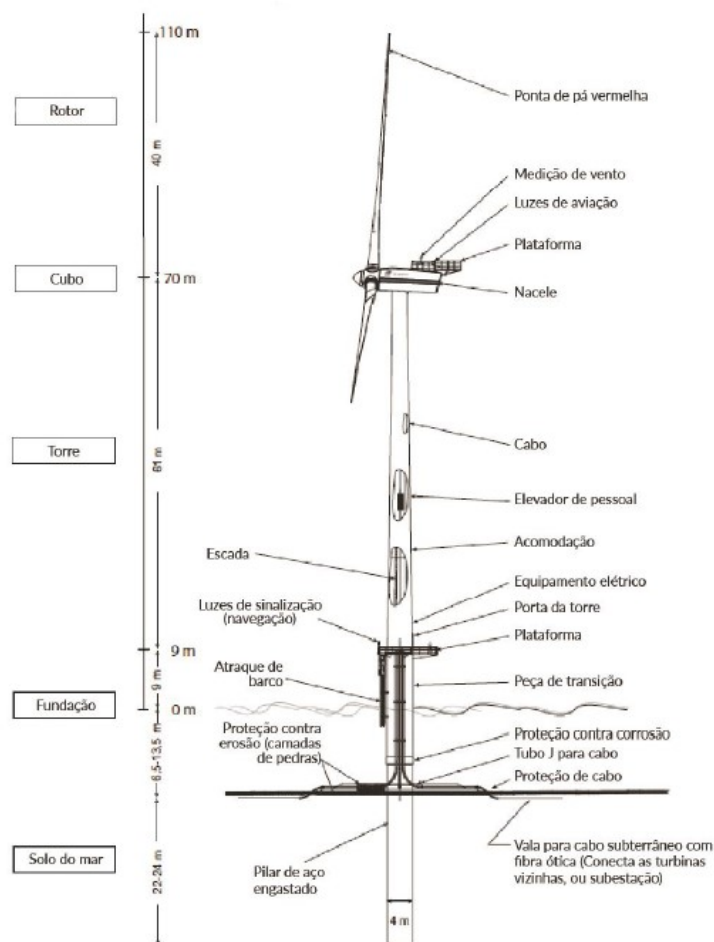


Figura 6 – Principais componentes de uma turbina eólica *offshore*. Fonte: [5].

3.2 Fundações

As fundações dão suporte aos aerogeradores e são selecionadas de acordo com o projeto. Na escolha devem ser considerados a profundidade da água, ações das ondas, custos, propriedade geotécnicas do fundo do mar, velocidade máxima dos ventos, peso e altura das turbinas.

Essas estruturas podem ser divididas em dois grupos, as de base fixa e flutuantes. As fundações de base fixa são utilizadas em águas de até 50 m. Já as fundações de base flutuante são utilizadas para profundidades profundas, maiores que 50 m.

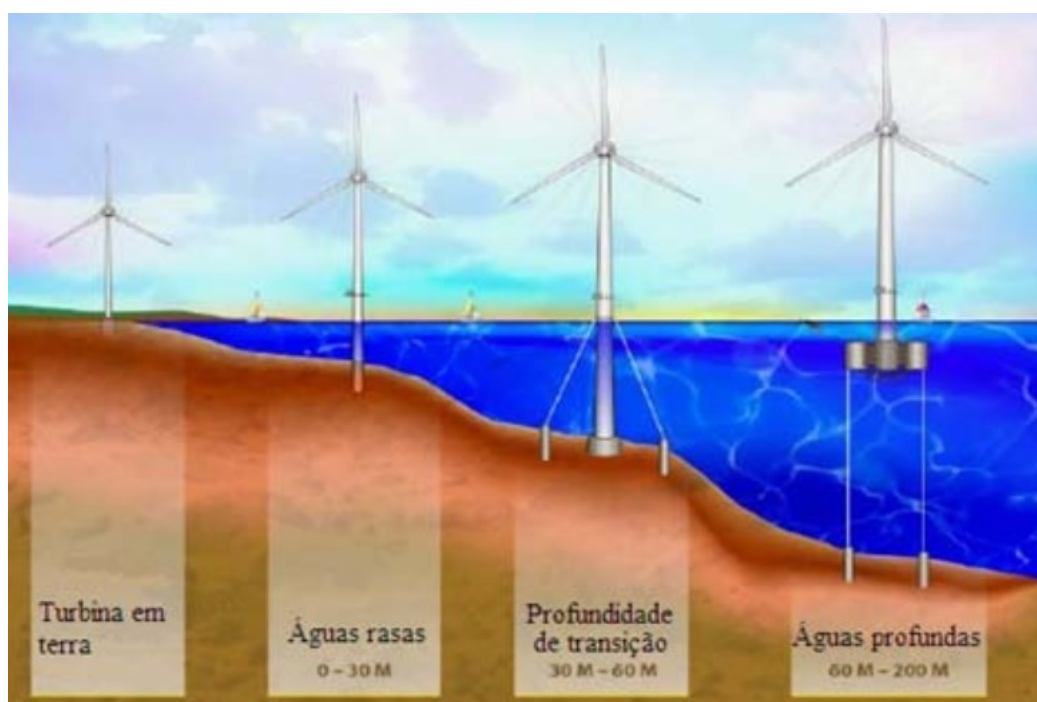


Figura 7 – Grupo de fundações energia eólica *offshore*. Fonte: [39].

As estruturas de suporte podem ser de seis tipos, sendo fundação por estaca, por gravidade, tripé, treliça, sucção e flutuante. A fundação por gravidade se estabiliza no mar pela atuação do seu peso e do tamanho de sua estrutura. As fundações por estaca, tripé e treliça são fixadas no solo marinho. Já as fundações por sucção e flutuante são implementadas pelo método de ancoragem.

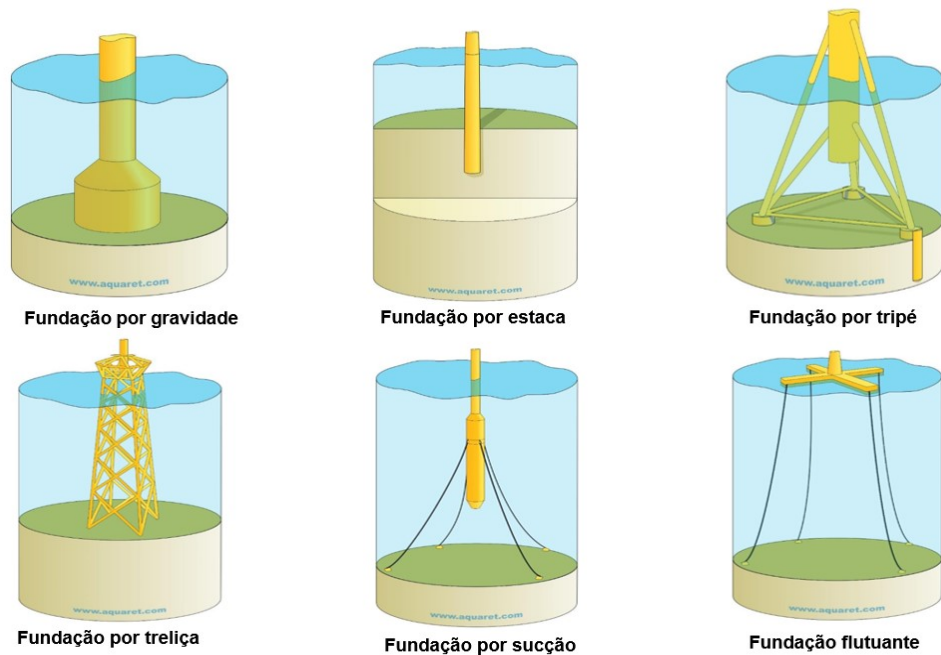


Figura 8 – Tipos de fundações. Fonte: Adaptado de [32].

3.3 Geradores

Os geradores podem ser classificados como:

- Gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo;
- Gerador de indução duplamente alimentado;
- Gerador síncrono.

3.3.1 Gerador de indução de rotor em gaiola de esquilo

O gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo tem velocidade fixa e é conectado diretamente à rede elétrica.

A velocidade de rotação do gerador é determinada pela frequência da rede, tendo em vista o número de pólos e o limite de variação do deslizamento, que varia de 1% a 2%. O deslizamento é definido como sendo a diferença relativa entre a velocidade de sincronismo e a velocidade do rotor.

A fim de aumentar a eficiência do sistema, muitas vezes são utilizados dois geradores de indução, um para baixa velocidade de vento e outro para alta velocidade de vento. Para controlar a diferença de velocidade de operação entre o rotor ligado à turbina e o gerador, é usado uma caixa de velocidade para adaptar essas velocidades.

Como consequência do consumo de energia reativa pela máquina, há problemas no nível de tensão no ponto de conexão devido ao fluxo de potência reativa na rede elétrica. Para a compensação de reativos é necessário utilizar capacitores.

Neste tipo de gerador, as turbinas possuem regulação do tipo *stall*. Esta regulação, permite o controle da potência da turbina usando a regulação por perda aerodinâmica. As pás do rotor são projetadas para que entrem em perdas aerodinâmicas quando a velocidade do vento é superior à velocidade nominal da máquina [38].

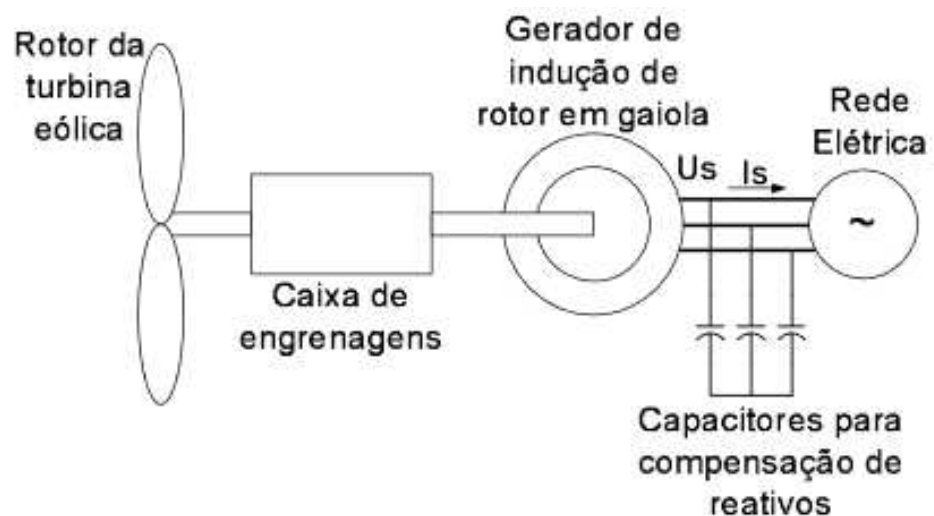


Figura 9 – Sistema do gerador de indução em gaiola de esquilo. Fonte: [35].

3.3.2 Gerador de indução duplamente alimentado (GIDA)

O GIDA é um gerador de indução com velocidade variável e rotor bobinado, em que o estator é diretamente conectado à rede e o rotor é ligado à rede por meio de um conversor eletrônico de potência. Este conversor efetua o desacoplamento entre a frequência da rede e a frequência do gerador, possibilitando o controle da velocidade de rotação do gerador.

O controle da potência ativa e reativa é possível através da eletrônica de potência. Ao injetar potência reativa na rede, permite também o controle ativo da tensão.

As principais vantagens de utilizar o GIDA são [35]:

- Redução do custo do inversor, pois a potência do mesmo é cerca de 25% da potência total do sistema;
- Redução dos custos do filtro, pois são dimensionados para 25% da potência total do sistema, e os harmônicos produzidos pelo inversor representam apenas uma fração da distorção harmônica total;
- Ganho de 2% a 3% de eficiência;
- Desacoplamento das potências ativa e reativa do gerador.

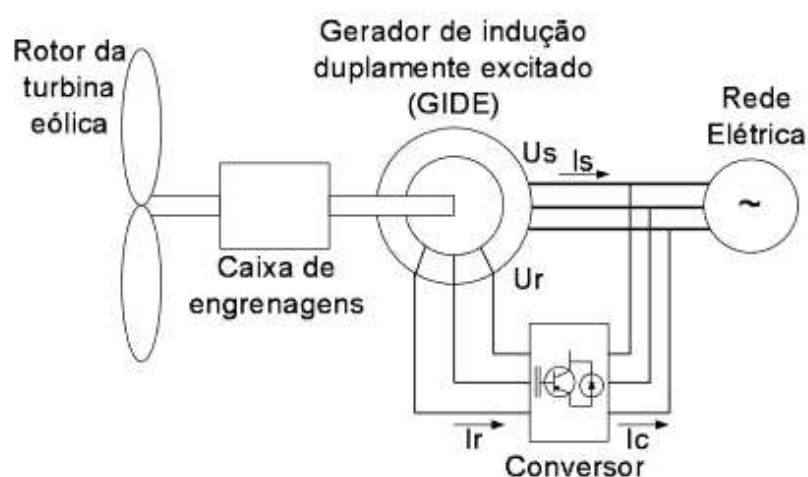


Figura 10 – Sistema do gerador de indução duplamente alimentado.
Fonte: [35].

3.3.3 Gerador síncrono

Este tipo de gerador se caracteriza por utilizar máquinas síncronas de excitação separada ou de ímãs permanentes. É totalmente desacoplado da rede por um dispositivo eletrônico conectado aos enrolamentos do estator.

O gerador síncrono tem como principal vantagem não necessitar de caixa de velocidades. Por outro lado, apresenta como desvantagens [35]:

- O inversor deve suportar a potência total do sistema;
- Como consequência, a eficiência do inversor vai afetar a eficiência total do sistema.

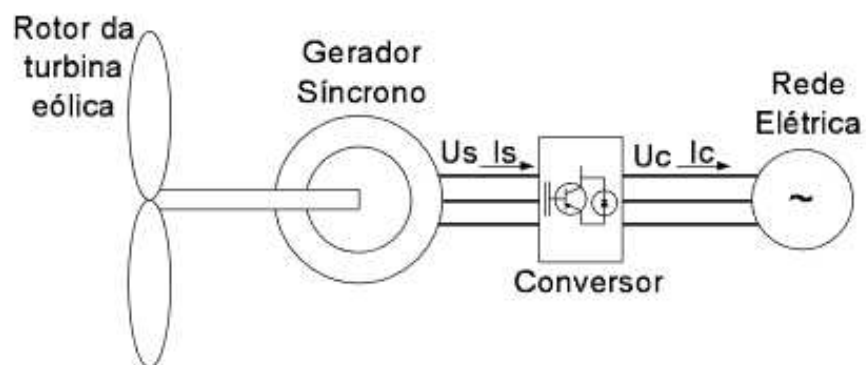


Figura 11 – Sistema do gerador síncrono. Fonte: [35].

3.4 Layout do parque eólico e efeito esteira

A escolha do local do parque é primordial para o desenvolvimento do projeto. Após ter feito a escolha, todos os dados do projeto são colocados no *layout*.

Com o projeto de *layout* é possível avaliar a viabilidade do projeto, os custos e estimar quanto de energia será produzido.

Os processos de *layout* podem ser definidos como:

- Licença do local;

- Restrições não técnicas, como impactos ambientais, navegação e rota de peixes;
- Capacidade máxima de exportação;
- Modelo de turbina;
- Cabos e custos do ciclo de vida;
- Projeto de fundação e custos;
- Perdas por esteira;
- Impactos das instalações;
- Descomissionamento.

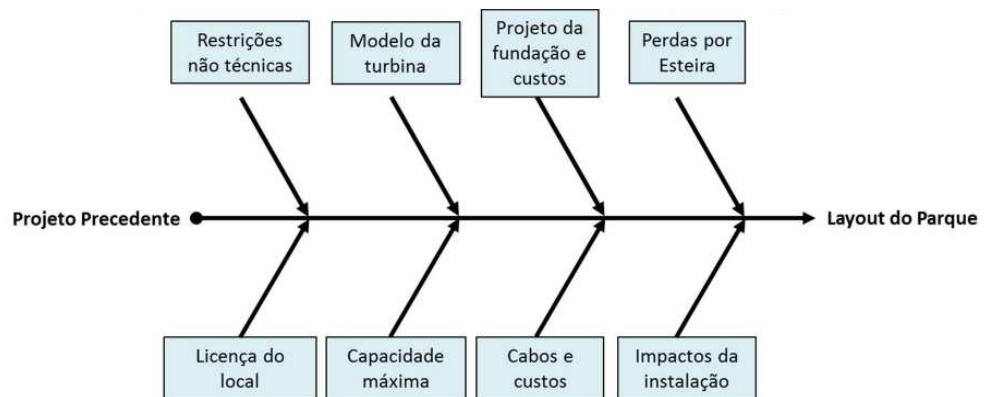


Figura 12 – Processo de layout parque eólico. Fonte: [20].

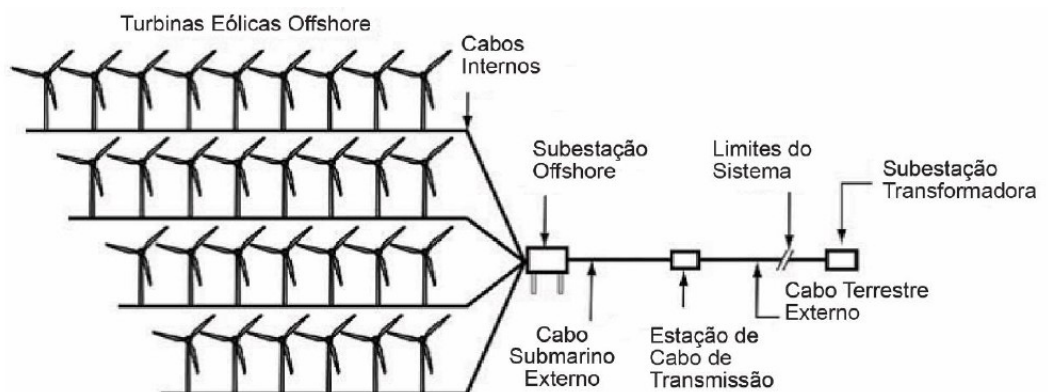


Figura 13 – Layout típico de um parque eólico *offshore*. Fonte: [5].

Ao se definir o *layout* é importante que seja considerado o efeito esteira. Esse efeito ocorre devido à perda de velocidade do vento ao passar pelos primeiros

aerogeradores da fileira, sendo assim as turbinas das fileiras posteriores produzem menos energia, a falta de alinhamento pode reduzir em até 50% o seu potencial de geração. Para minimizar o efeito, os aerogeradores devem ter um espaçamento entre si de até oito vezes o diâmetro do rotor.

3.5 Energia eólica *offshore* no mundo

As primeiras instalações *offshore* ocorreram no continente europeu na década de 1990, desde então a Europa lidera a geração de energia eólica no mar. O primeiro parque eólico *offshore* a entrar em operação no mundo foi em 1991 na Dinamarca. O projeto tinha 11 aerogeradores e capacidade instalada de 4,95 MW. O parque ficou em operação durante 25 anos e em 2017 foi desativado.



Figura 14 – Parque Eólico *offshore* Vinderby na Dinamarca. Fonte: [29].

Em 2002 no mar do Norte foi instalado o primeiro parque com grande capacidade de geração, 80 aerogeradores com 80 metros de diâmetros, 70 metros de altura e 2 MW de potência. Hoje no mundo já é produzido mais de 18 GW de energia proveniente de *offshore*, a tendência é que esse número aumente nos próximos anos,

isso se deve aos avanços tecnológicos e aos altos investimentos em pesquisas na área, com maiores aerogeradores é possível produzir mais energia.

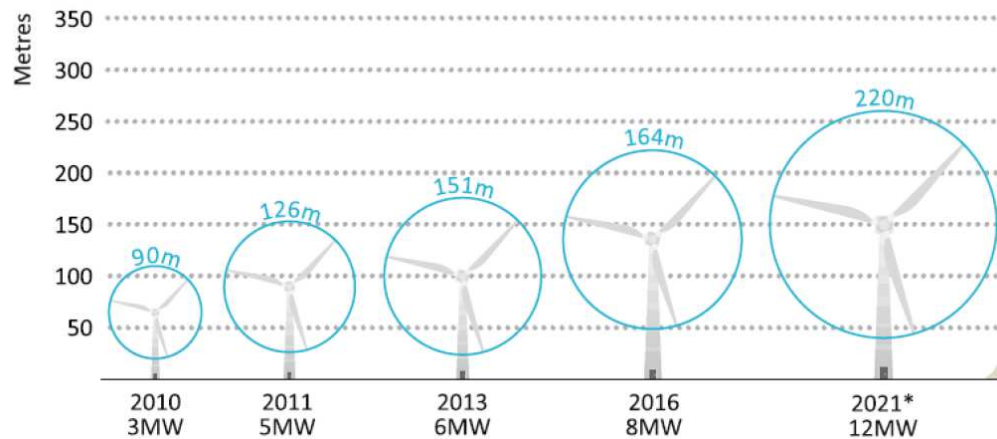


Figura 15 – Evolução dos aerogeradores *offshore*. Fonte: [16].

Até 2020 é previsto a comercialização de aerogeradores com potência maior que 10 MW, atualmente o maior aerogerador em escala comercial é o modelo V164-9.5 fabricado pela Vestas, tem potência de 9,5 MW e 164 m de diâmetro. Como apresentado na figura (16), seu tamanho foi comparado com a roda gigante *London Eye*.

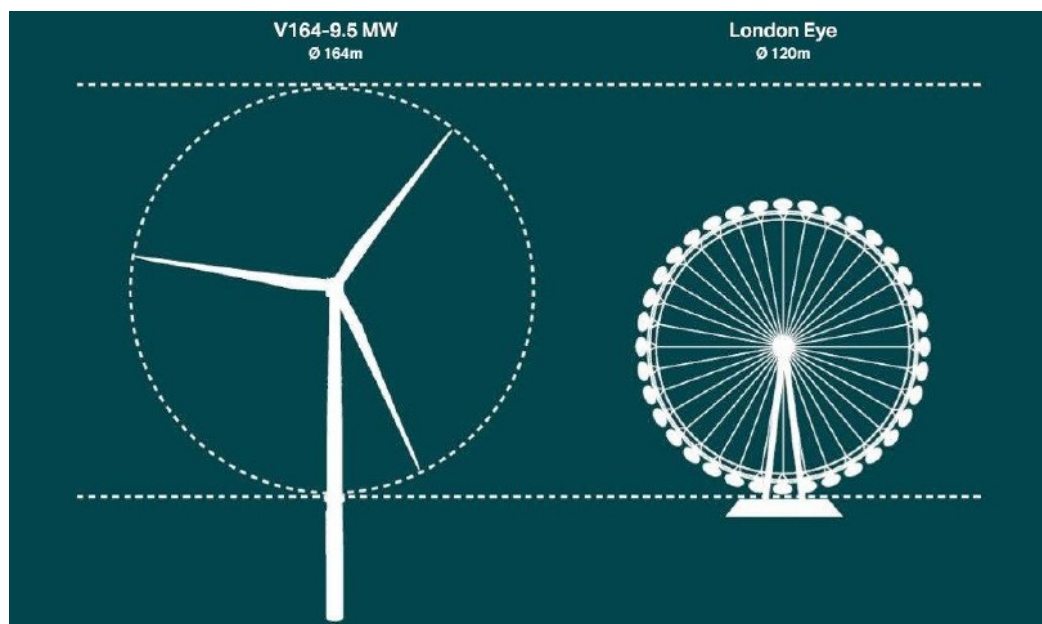


Figura 16 – Aerogerador V164 – 9,5 MW. Fonte: [16].

Desde 2011 a energia eólica *offshore* cresceu quase cinco vezes. Terminou 2017 com 600 novas turbinas instaladas no mundo, totalizando 3 GW. Com 16 GW, o continente europeu é o que possui maior capacidade instalada, sendo Reino Unido, Alemanha e Bélgica os países que mais aumentaram sua capacidade instalada.

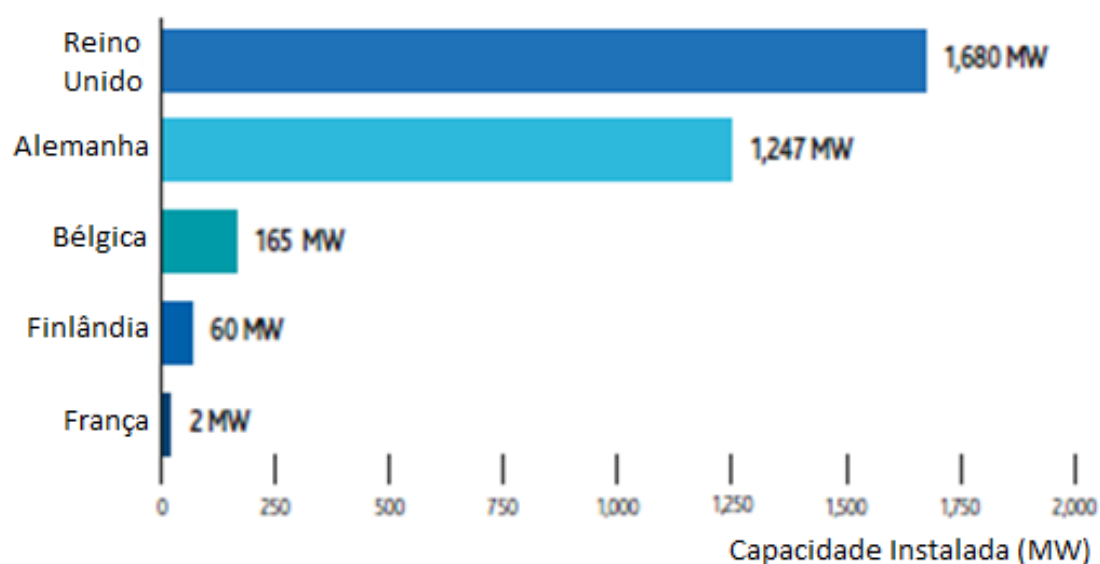


Figura 17 – Capacidade instalada por país em 2017. Fonte: Adaptado de [21].

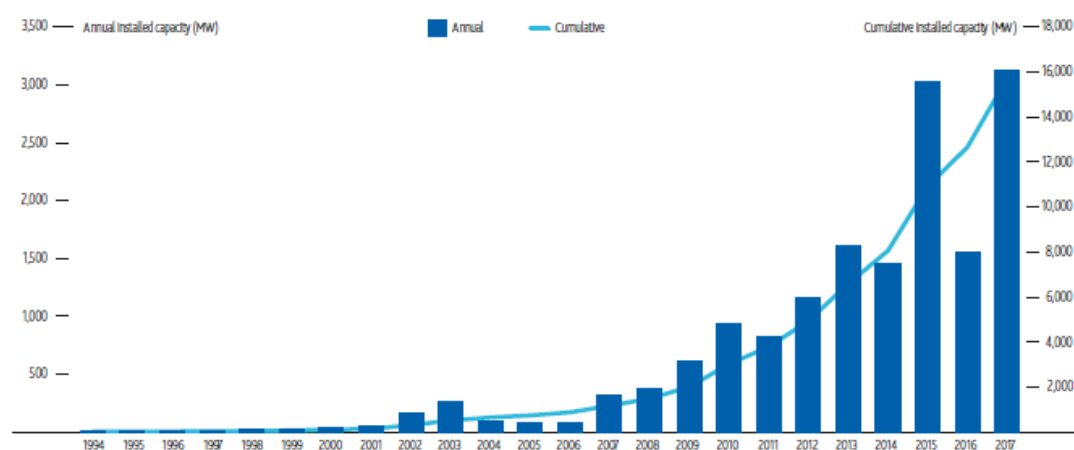


Figura 18 – Capacidade instalada na Europa em 2017. Fonte: [21].

Além dos países europeus, países da América do Norte e da Ásia investem cada vez mais nessa tecnologia, em especial Estados Unidos, que possui alto potencial de desenvolvimento *offshore* na costa Leste, e China.

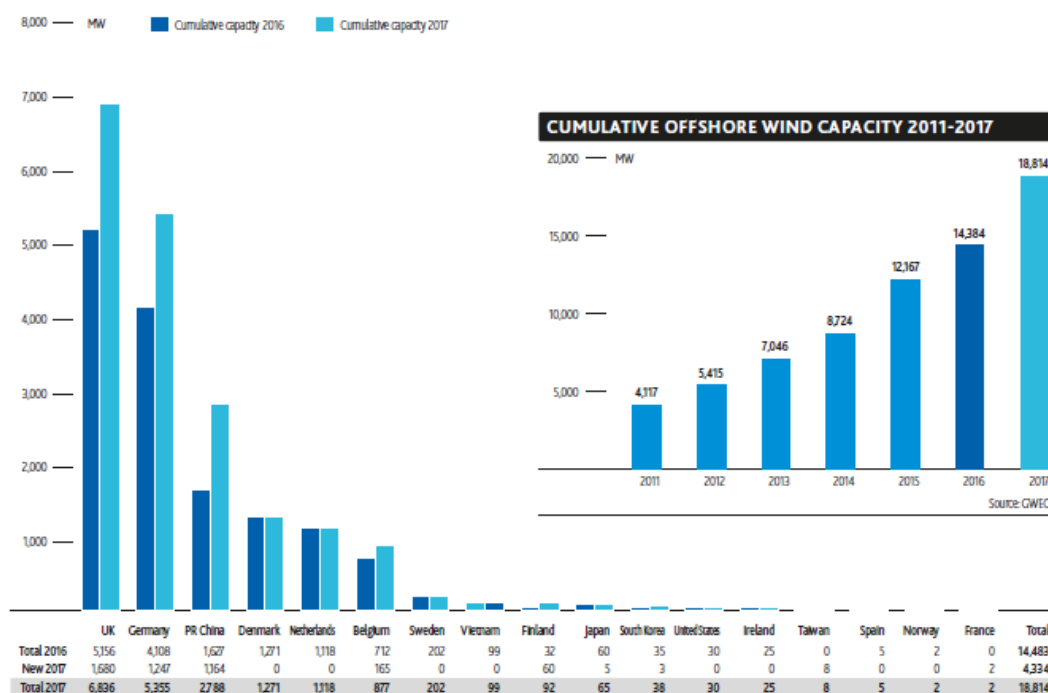


Figura 19 – Capacidade acumulada energia *offshore* no mundo. Fonte: [21].

Segundo a IEA é previsto uma redução de custos dos empreendimentos *offshore* até 2040.

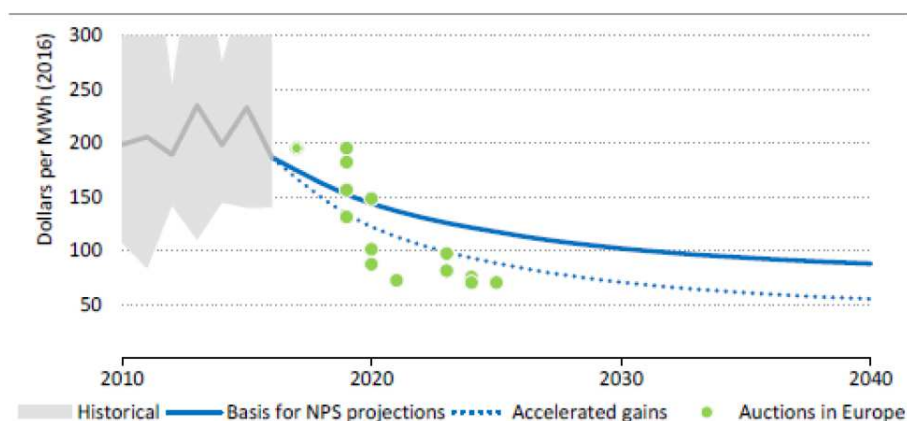


Figura 20 - LCOE histórico e projetado para eólica *offshore*. Fonte: [16].

A consultora *Wood Mackenzie Power & Renewables* destacou em seu novo relatório que nos próximos 10 anos entrarão em operação mais de 680 GW de nova capacidade de energia eólica, sendo 40% representados pela fonte *offshore*. Até 2030 é estimado que sejam investidos em projetos de parques eólicos marítimos US \$ 500 bilhões.

3.6 Energia eólica *offshore* no Brasil

O Brasil ainda não possui parques eólicos *offshore* instalado em sua costa marítima. Um estudo publicado por Ortiz e Kampel (2011), estima que o potencial *offshore* brasileiro seja de 1,78 TW em toda Zona Econômica Exclusiva (ZEE¹), o que representa quase doze vezes mais que o potencial *onshore*, com destaque para as regiões costeiras dos estados de Alagoas e Sergipe, Rio Grande do Norte e Ceará, Rio Grande do Sul e Santa Catarina, que apresentaram altas magnitudes de vento. A média da magnitude do ventos *offshore* brasileiro está entre 7 e 12 m/s, com valores máximos próximos à costa de Sergipe e Alagoas e mínimo próximo à costa de São Paulo. Estima-se que o fator de capacidade seja de 65%, bem maior que o fator de capacidade *onshore*.

¹ Faixa situada além das águas territoriais, sobre a qual cada país costeiro tem prioridade para utilização dos recursos naturais do mar e responsabilidade na sua gestão ambiental. A ZEE brasileira tem uma área oceânica de aproximadamente 3,6 milhões de Km².

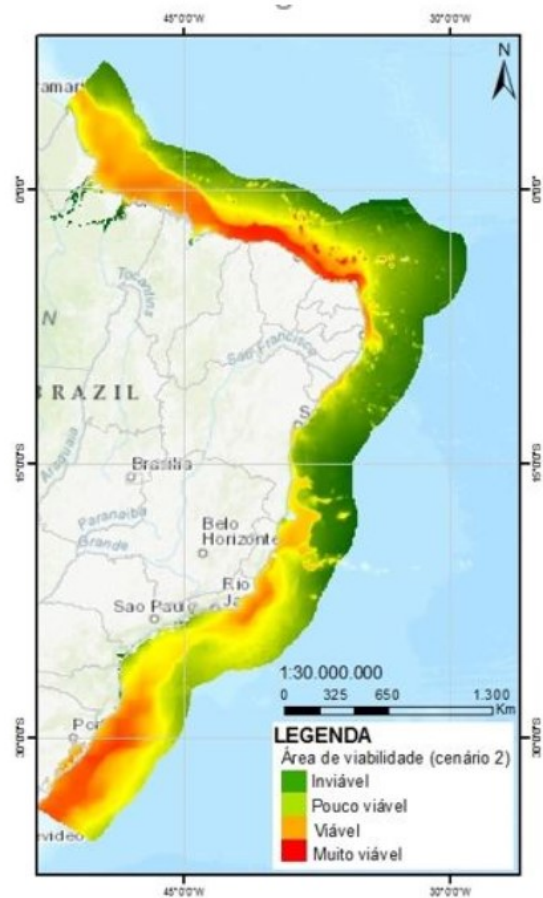


Figura 21 – Áreas de viabilidade para instalação de parques *offshore*.
Fonte: [12].

Ortiz e Kampel ainda fizeram um estudo do potencial de geração de energia de acordo com a distância da costa e profundidade no Brasil. Os dados podem ser observados nas tabelas (2) e (3).

Tabela 2 – Potencial instável de geração eólica offshore por distância na costa.

Distância da Costa	Potencial (GW)
0 - 10 km	57
0 - 50 km	259
0 - 100 km	514
0 - 200 mi (ZEE) ⁴⁶	1.780

Fonte: [33].

Tabela 3 – Potencial instável de geração eólica offshore por profundidade.

Intervalo batimétrico	Potencial (GW)
0 - 20 m	176
0 - 50 m	399
0 - 100 m	606

Fonte: [33].

A Marinha por meio da sua Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) realiza medições ao longo da costa brasileira a partir de boias localizadas a 50 Km da costa, onde a profundidade é de 200 m. As medições são de caráter horário a uma altura de 4,5 metros. Os valores encontrados servem para indicar a boa qualidade dos ventos. Os fatores de capacidade das medições realizadas pela Marinha do Brasil podem ser observados na tabela (4) [17].

Tabela 4– Fatores de permanência dos ventos.

Localização	FC (%) 3 m/s	FC (%) 4 m/s	FC (%) 6 m/s	Medições	Início
Fortaleza	99,0%	97,6%	90,5%	9.126	2016
Recife	97,6%	93,3%	63,1%	21.351	2012
Porto Seguro	83,9%	72,3%	41,0%	17.773	2012
Vitória	83,9%	72,3%	41,1%	17.730	2012
Cabo Frio	66,9%	56,1%	34,6%	7.494	2009
Cabo Frio I	91,0%	84,6%	65,0%	7.700	2016
Niterói	51,5%	36,0%	14,7%	13.270	2014
Santos	88,2%	81,0%	60,0%	27.477	2011
Rio Grande	72,0%	68,1%	56,0%	57.557	2009

Fonte: [17].

Com uma costa de 7.367 Km, extensa plataforma continental de águas rasas ao longo do seu litoral (que são características favoráveis para a implementação de empreendimentos *offshore*) e alto potencial de geração, a falta vigente de regulamentação e os altos custo de instalação e operação das centrais eólicas instaladas em alto mar são os principais fatores que impedem o investimento dessa tecnologia no país. O apoio político e regulatório podem servir de incentivo para o incremento da fonte na matriz energética.

A geração de energia eólica *offshore* vai de conformidade com a Política Energética Nacional, que tem como principais objetivos [7]:

- i. promover o desenvolvimento, ampliar o mercado de trabalho e valorizar os recursos energéticos;
- ii. proteger o meio ambiente e promover a conservação de energia;
- iii. utilizar fontes alternativas de energia, mediante o aproveitamento econômico dos insumos disponíveis e das tecnologias aplicáveis;
- iv. atrair investimentos na produção de energia;
- v. fomentar a pesquisa e o desenvolvimento relacionados às energias renováveis;
- vi. mitigar as emissões de gases causadores de efeito estufa e de poluentes no setor de energia.

Estão sendo realizados estudos para verificar o potencial energético e a viabilidade de instalações *offshore* na costa brasileira. Na Câmara dos Deputados – na Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, já está em pauta a

criação de leilões para parques eólicos e solares *offshore*. Atualmente o Ibama tem três projetos com solicitação de licença ambiental, são eles:

- Complexo Eólico Marítimo Asa Branca I: Com potencial de 400 MW, distante de 3 km e 8 km da costa e com profundidades entre 7 e 12 metros, o complexo será instalado no município de Amontada – CE.

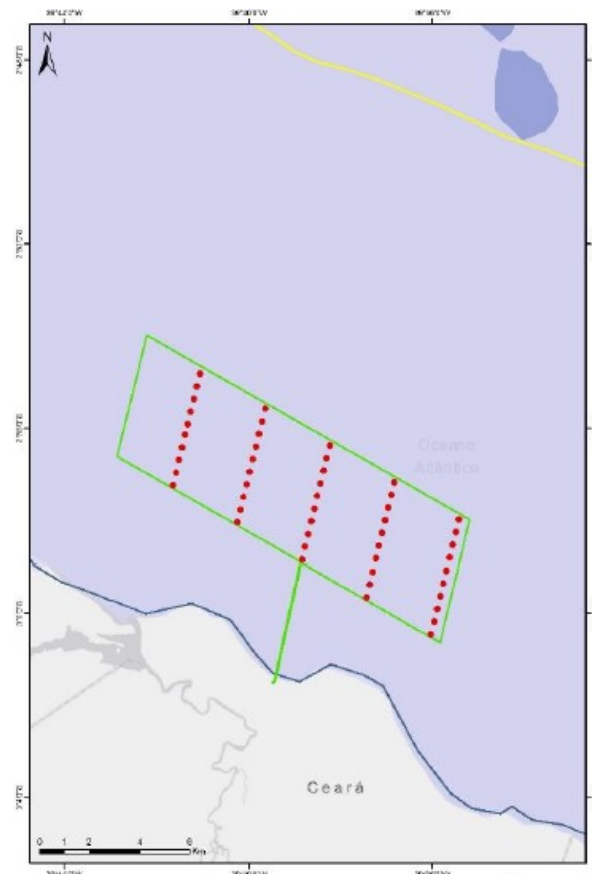


Figura 22 – Complexo eólico *offshore* Asa Branca. Fonte: [18].

- Complexo Eólico Caucaia: O parque *offshore* terá potência de 416 MW, com torres instaladas a uma distância de 2 a 9 km da costa e profundidade de até 15 metros. Será instalado no litoral da cidade de Caucaia – CE.

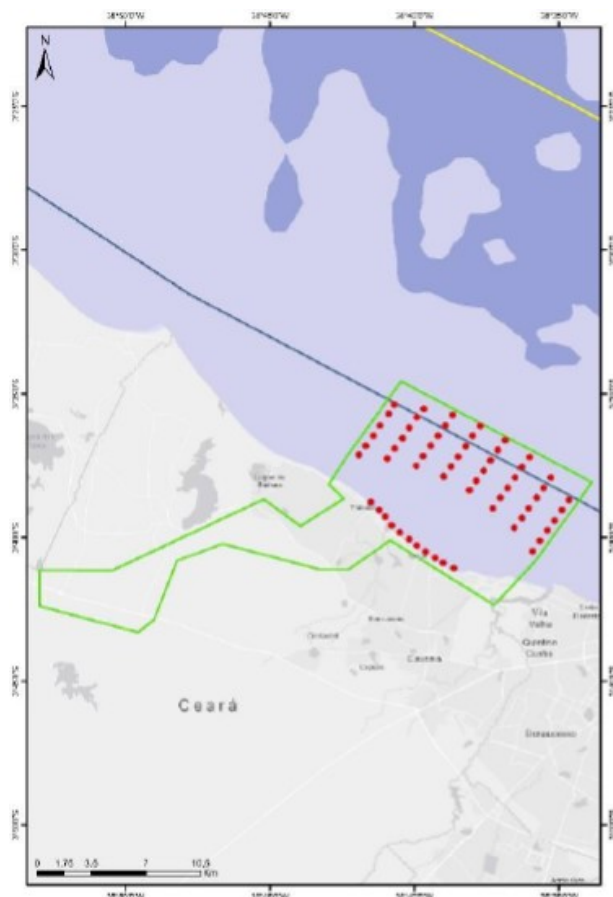


Figura 23 – Complexo eólico *offshore* Caucaia. Fonte: [18].

- Planta Piloto de Geração Eólica *Offshore* – Petrobras: Com o intuito de compensar suas emissões de carbono e com um amplo conhecimento na exploração e produção *offshore*, a empresa começa a investir na geração de energia em alto mar. A planta piloto será instalada em Guamaré, no Rio Grande do Norte, a uma distância de 20 Km da costa e lâmina d'água de 12 e 16 metros. O aerogerador terá potência de 5 MW e será conectado à plataforma PUB-3 por cabo submarino umbilical elétrico-óptico. Se comprovado a viabilidade do projeto, a estatal tem expectativa de expandir no segmento de geração de energia eólica *offshore*.

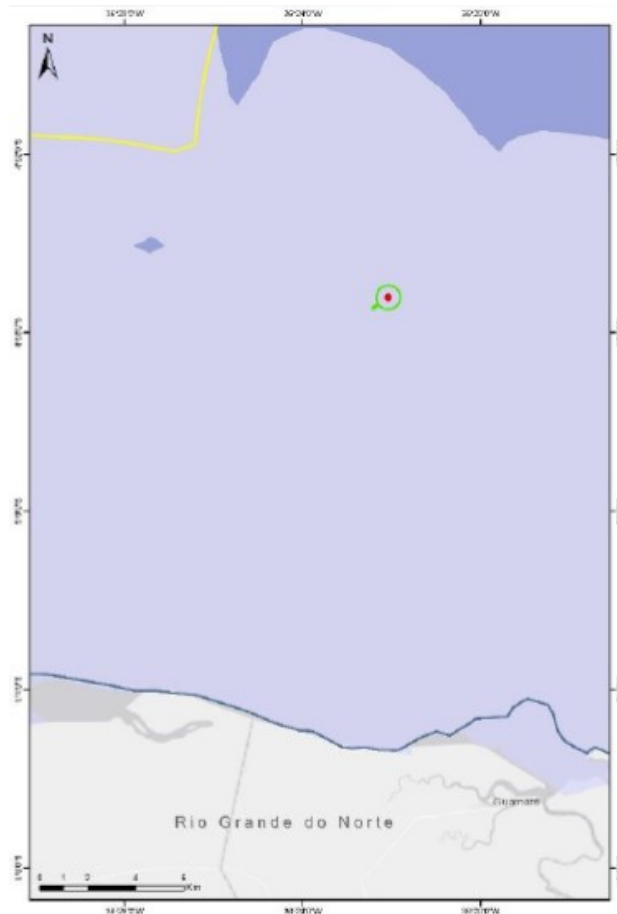


Figura 24 – Complexo eólico *offshore* Petrobras. Fonte: [18].

Em um recente artigo, Lima (2017) analisou alguns motivos que tendem a reduzir a exploração do potencial eólico *onshore*, são eles:

- Para viabilizar empreendimentos eólicos em áreas com velocidades médias anuais de vento inferiores a 7 m/s e 10 m de altura será necessário que os preços dos leilões sejam mais atrativos do que aqueles recentemente praticados. Neste caso, pode ser que a ANEEL e a EPE considerem que essa não seja a melhor estratégia para a expansão da geração e poderá optar por outras fontes renováveis, como PCH's e fotovoltaicas. Entretanto essas áreas são de grande interesse da geração distribuída, micro e mini geração, pois a referência econômica é o preço da energia paga pelo consumidor de baixa tensão.

- Incra: muitas áreas em regiões de grande potencial pertencem ao Incra, que aumenta os riscos dos empreendimentos.
- Áreas de preservação ambiental: alguns estados são mais criteriosos com a avaliação dos empreendimentos eólicos e seus impactos no meio ambiente, como Rio Grande do Sul, através do órgão ambiental FEPAM. Muitas vezes as áreas de preservação ambiental coincidem com as áreas de melhor recurso eólico.
- Distância mínima entre parques eólicos vizinhos: a resolução normativa da Aneel 675/2015, esclarece que “região de interferência é a região que dista de 20 vezes a altura máxima da pá, considerando-se todas as direções do vento com permanência superior a 10%”. Portanto, se um determinado empreendedor obtém a DRO de seu parque eólico e um outro empreendedor quiser implementar parque eólico na vizinhança daquele já cadastrado, não poderá violar o critério estabelecido pela região de interferência. Essa distância é imposta para que o vento recomponha seu perfil, livre de turbulências, para que não imponha perdas aerodinâmicas nos parques já habilitados. Uma solução para o novo investidor, se não quiser obedecer a essa distância, é entrar em contato com o seu vizinho e fazer as devidas compensações financeiras pelas perdas aerodinâmicas. Neste caso, a rentabilidade do investimento tende a reduzir, podendo inviabilizá-lo. O resultado dessa limitação da região de interferência é a formação de “ilhas” entre os parques eólicos.
- Especulação fundiária: muitos proprietários de terra tentaram ganhar mais dinheiro na negociação de suas terras e perderam a oportunidade de venda, ficando “ilhados”. Essas áreas poderiam ser utilizadas, por exemplo, para instalação de usinas fotovoltaicas, que contariam com a vantagem de já ter acesso ao sistema elétrico, que já foi expandido para conectar as usinas eólicas.
- Esgotamento do sistema e dos corredores de transmissão: quando existe concentração da exploração de uma determinada fonte de energia, os sistemas de transmissão para escoamento da produção tendem a ser concebido em corredores, limitados por diversas

questões. Assim, se uma determinada região não é explorada, poderá ser inviabilizada no futuro, pois tais corredores não comportariam mais a expansão.

- Áreas urbanas: estima-se que 13% do território nacional é ocupado pelas cidades e povoados. Em algumas delas, o potencial eólico é representativo, como as capitais do nordeste, o que empurra os empreendimentos para o interior desses estados e para as faixas litorâneas ainda não ocupadas.

3.6.1 Desenvolvimento energia eólica *offshore* no Brasil

De acordo com Lima e Costa (2017) existem três principais limitações e restrições que o Brasil deve superar para investir na tecnologia *offshore*.

1. O que irá impulsionar a viabilidade de eólicas *offshore* é a diminuição do custo efetivo da energia elétrica produzida por esta fonte, considerando os custos de geração, transmissão, distribuição, operação e manutenção do empreendimento, além do custo de capital e financiamento ao longo de toda a vida do projeto, denominado de *Levelized Cost of Energy* (LCOE), o Custo Efetivo Nivelado de Energia.
2. Planejamento e regulação setorial: para desenvolver esta fonte, o Governo por meio dos agentes EPE, MME e ANEEL, poderia estabelecer o planejamento e a regulação setorial para o desenvolvimento e implantação da fonte.
3. Legislação ambiental: é necessária uma legislação específica para este tipo de empreendimento através de um esforço conjunto dos órgãos ambientais federais e estaduais, para estabelecerem em quais áreas o desenvolvimento de parques eólicos *offshore* seria possível com o menor impacto ambiental.

Pereira (2017) fez uma análise do arcabouço legal associado ao desenvolvimento de energia eólica *offshore* no Brasil e aponta que existem três

aspectos desfavoráveis ao desenvolvimento do setor: (i) a Empresa de Pesquisa Energética não tem competência para obter licença ambiental prévia para a construção dessas usinas; (ii) o Conselho Nacional de Política Energética não tem competência de definir áreas ou blocos marítimos destinados à licitação para empreendimentos eólicos; e (iii) a composição do Conselho não representa setores relevantes que deveriam ser consultados quanto à possibilidade de serem afetados os empreendimentos eólicos.

Pereira ainda fez um diagnóstico da realidade atual (“Brasil não utiliza seu potencial eólico *offshore*”) e apresentando um objetivo a ser perseguido (“Brasil deve construir parques eólicos *offshore*”), citou os condicionamentos que devem ser perseguidos para transformar essa realidade.

- a. Capacidade Tecnológica: deve ter sido desenvolvida tecnologia de conversão de energia eólica *offshore* em energia elétrica;
- b. Capacidade Empreendedora: deve existir a vontade empreendedora (privada ou governamental) de assumir riscos de construção e operação de parques eólicos *offshore*;
- c. Capacidade Financeira: devem existir condições financeiras para o financiamento (por capital próprio ou de terceiros) das atividades de construção e operação dos parques;
- d. Condições Sociopolíticas: os projetos eólicos *offshore* devem ser percebidos pelas camadas decisórias políticas e pela sociedade civil afetadas como atividades que produzam algum benefício. Não é necessário haver consenso, mas, se houver pressões sociais ou políticas fortemente contrárias, entraves das mais variadas formas podem emergir. Por exemplo, paralisação de obras devido a obstrução de acesso a portos e embarcações realizadas por movimentos sociais;
- e. Segurança Jurídica: o ordenamento jurídico brasileiro deve proporcionar condições para estabilidade e garantia dos negócios jurídicos. Diversos entraves podem surgir nessa esfera. A título de exemplo, se houver normas jurídicas proibindo a instalação de engenhos humanos em águas marítimas de potencial eólico apropriado para a geração elétrica, licença e permissões não serão

emitidas pelo governo ou serão emitidas sem validade jurídica. Por conseguinte, haverá insegurança por parte do empreendedor para realizar o investimento, já que as obras poderão ser embargadas pelo Poder Público.

A incorporação de 40 GW eólico *offshore* movimentaria cerca de R\$ 20-75 bilhões anuais. Identificar se existem (e quais são) potenciais dispositivos legais desfavoráveis ao desenvolvimento da geração eólica *offshore* revela-se como necessário, pois pode auxiliar a promover esse setor bilionário ainda inexplorado no Brasil [34].

Para a inserção da energia eólica *offshore* no país, Barbosa propões algumas recomendações, tais como:

- Contemplar a inserção da energia eólica *offshore* nos instrumentos de planejamento energético do país, em particular, no Plano Nacional de Energia.
- Estabelecer políticas de longo prazo, com a definição de metas progressivas de participação da energia eólica *offshore* na matriz energética do país.
- Formular o marco regulatório da energia eólica *offshore* com a participação de parlamentares, juristas, acadêmicos, especialistas, empreendedores, fabricantes e fornecedores, agentes reguladores e a sociedade como um todo, incluindo a realização de audiências públicas.

3.7 Vantagens e desvantagens

Ao comparar os dois tipos de parques eólicos, é possível analisar algumas vantagens da fonte *offshore* em relação a *onshore*. Sendo elas:

- Maior recurso eólico, devido a inexistência de obstáculos e baixa rugosidade da superfície marinha;
- Maior geração de energia com menor quantidade de aerogeradores, pois no mar não há limites para o tamanho das turbinas;

- Menos turbulência e mais estabilidade dos ventos, o que resulta na diminuição da fadiga das turbinas e aumenta sua vida útil;
- Não ocupação de terras habitáveis ou agricultáveis;
- Disponibilidade de áreas maiores, sem que seja necessário arrendamento de terras, que encarecem os custos do projeto;
- Geração de energia próximo aos maiores centros de carga, que estão localizadas em regiões litorâneas. Como consequência, linhas de transmissão mais curtas;
- Mitigação dos impactos sonoro e visual, devido a sua localização, longe da costa;
- Facilidade logística, pois não é necessário usar estrada para transportar os componentes pesados até o local de implantação.
- Geração de crédito de carbono, via Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL.

Algumas desvantagens também são citadas abaixo:

- Maior complexibilidade de instalação, devido a distância da costa e profundidade da água, o que resulta em maiores custos;
- Devido a corrosão marinha, os custos de manutenção e dos materiais usados na fabricação das turbinas são mais caros.
- Dificuldade no transporte das turbinas em alto mar, são necessários navios maiores;
- Maiores custos de conexão à rede elétrica;
- Condições de trabalho desfavoráveis;
- Risco de ciclones e tempestades tropicais que podem danificar os equipamentos;
- Impacto negativo na vida marítima, que pode ser provocado pelas turbinas e campos eletromagnéticos devidos às linhas de transmissão submarinas.

4. CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA

4.1 Sistema de transmissão

Os três tipos de transmissão de energia de parques eólicos *offshore* são:

1. Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Alternada (*High Voltage AC Transmission – HVAC*);
2. Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua usando Conversores com comutação natural de linha (*High Voltage DC using Line Commutated Converters – HVDC LCC*);
3. Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua usando conversores com comutação forçada – Conversores fonte de tensão (*High Voltage DC using Voltage Source Converters – HVDC VSC*).

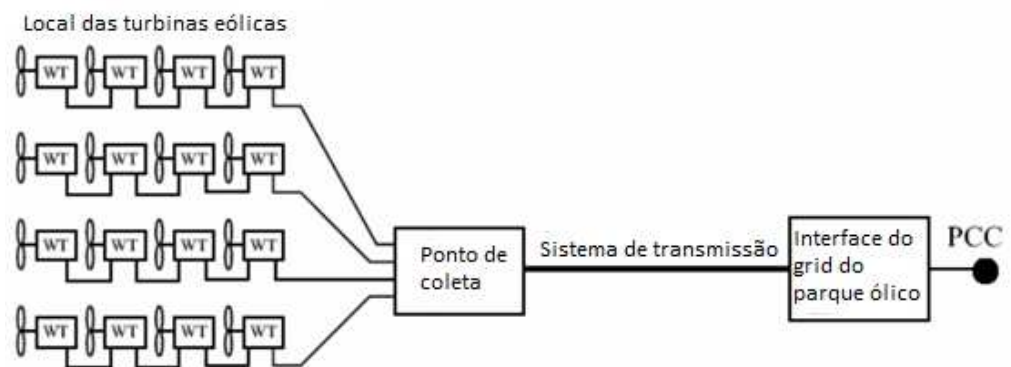


Figura 25 – Disposição do parque eólico e do sistema de transmissão.
Fonte: Adaptado de [26].

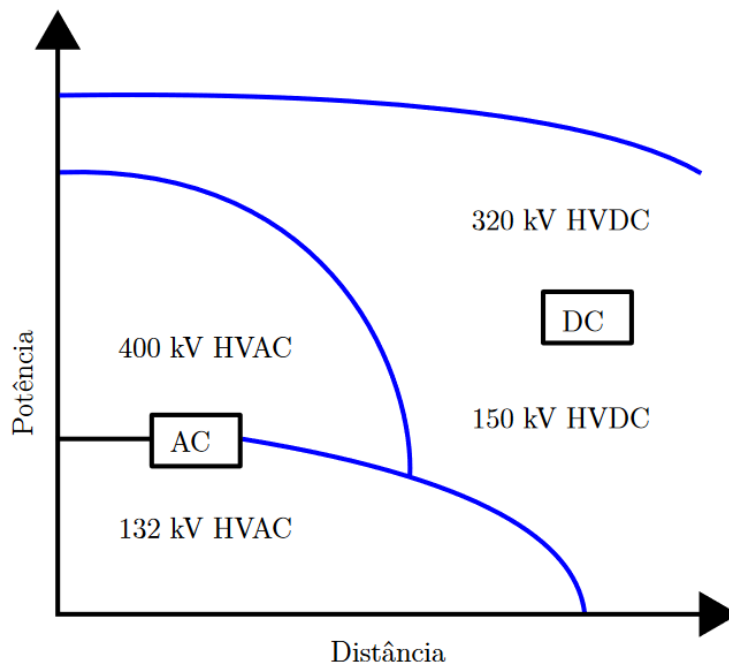


Figura 26 – Tipo de transmissão de acordo com a relação entre potência e comprimento da linha. Fonte: [22].

4.1.1 Sistema de transmissão em alta tensão em corrente alternada (HVAC)

O sistema de transmissão HVAC é o mais utilizado nos parques eólicos *offshore*. Esse sistema é composto por um cabo submarino com três condutores, duas subestações (uma *onshore* e uma *offshore*) e ponto comum de conexão em corrente alternada (*offshore*). Até distâncias de 50 Km o sistema HVAC não necessita de conversores de potência nas subestações e nem fontes auxiliares de tensão, isso representa uma redução nos custos. Para distâncias maiores que 50 Km há o efeito capacitivo dos cabos submarinos, assim é necessário que haja compensação da potência reativa nas extremidades do cabo.

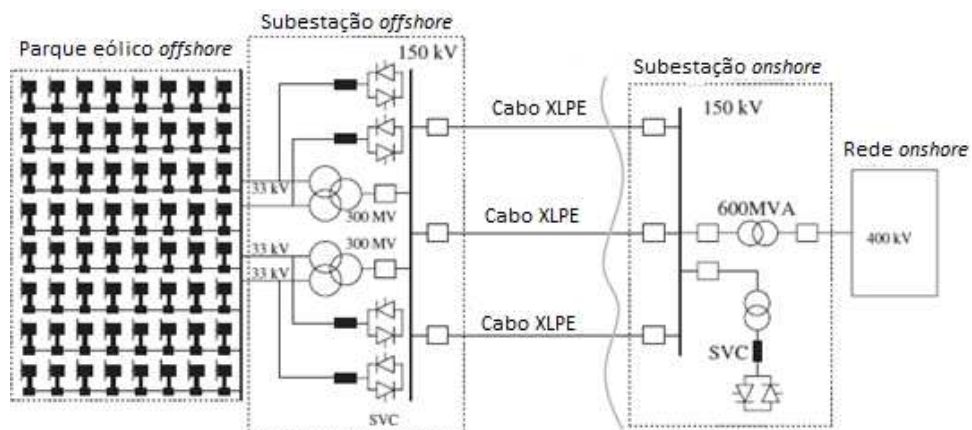


Figura 27 – Esquema de um parque eólico *offshore* usando transmissão HVAC. Fonte: Adaptado de [2].

Equipamentos necessário para a transmissão HVAC [38]:

- Cabos submarinos HVAC XLPE com três almas condutoras;
- Subestação onshore;
- Subestação offshore;
- Ponto comum de conexão em corrente alternada;

I. Cabos Submarinos HVAC XLPE com três almas condutoras

Os cabos utilizados possuem isolação XLPE (polietileno reticulado). Suportam até 90°C em funcionamento normal e 250°C em regime de curto-circuito com duração de 0,2 a 0,5s.

Para a transmissão em corrente alternada é recomendado que as três fases sejam unidas, formando um cabo trifásico. Fazendo isso, é possível reduzir os custos de montagem, pois diminui o campo magnético criado em torno do cabo.

Os cabos submarinos têm como função realizar a comunicação entre o parque eólico *offshore* e o centro de manutenção/gestão, localizado em *onshore*. Através desse sistema de comunicação é possível monitorar o funcionamento do parque *offshore* e de seus equipamentos, pois fornece informações da velocidade de rotação das turbinas, ângulo das pás, níveis

de temperatura, níveis hidráulicos, entre outros. O sistema ainda permite a gestão e controle de diversos equipamentos instalados na subestação *offshore* e no próprio parque eólico [38].

II. Subestação *onshore* e *offshore*

Uma central eólica *offshore* opera com nível de tensão entre 30 e 36 KV, porém se a distância até a costa for grande, a transmissão tem que ser feita em um nível de tensão maior, o que implica na necessidade de uma subestação *offshore* com um transformador elevador para que a tensão seja de 100 a 220 KV. Além do transformador, a subestação também terá equipamentos para compensação de potência reativa, equipamentos de proteção e instrumentação.

Para que a transmissão seja no mesmo nível de tensão que o da rede em terra, também é necessário instalar uma subestação *onshore* com um transformador para abaixar o nível de tensão. Nessa subestação também será instalado os equipamentos de compensação reativa, equipamentos de proteção e instrumentação.

III. Ponto comum de conexão em corrente alternada

Tem como objetivo reunir a potência gerada por cada turbina do parque eólico, para depois ser transmitido pelo o sistema HVAC para a terra.

4.1.1.1 Vantagens e desvantagens sistema HVAC

As principais vantagens são:

- Não é uma tecnologia recente e é usada na maioria dos parques eólicos;
- Apresenta menor custo, pois não é necessário o uso de conversores eletrônicos de potência nas subestações;
- Para distâncias até 50 km da costa, tem pequenas perdas;
- Em relação ao sistema HVDC não é necessário usar uma fonte de tensão auxiliar;

- Facilidade de interligação e manutenção.

Principais desvantagens:

- Os cabos HVAC têm efeito capacitivo considerável, então é gerado muita potência reativa;
- Em decorrência do efeito capacitivo, não é possível utilizar a tecnologia HVAC para grandes distâncias da costa;
- A distância da costa e o aumento das potências do parque eólico, faz com que as perdas aumentem significativamente.

4.1.2 Sistema de transmissão em alta tensão em corrente contínua (HVDC)

O sistema HVDC é mais vantajoso para parques situados distantes da costa, superiores à 50 km. Com essa tecnologia as perdas no sistema e os efeitos por indução são menores e é necessário somente um cabo.

4.1.2.1 Sistema de transmissão em alta tensão em corrente contínua com comutação natural de linha (HVDC LCC)

O sistema HVDC LCC pode ter entre as redes frequências diferentes e o controle da potência ativa do parque *offshore* feito por conversores eletrônicos. Uma das principais desvantagens desse tipo de transmissão é a necessidade de grandes estações conversoras. Com o uso de conversores, que geram harmônicos de corrente, é necessário usar filtros para mitigação dos mesmo e isso eleva o custo do projeto.

Para esse sistema são necessários os seguintes componentes [38]:

- Filtro de corrente alternada;
- Filtro de corrente contínua;
- Válvula tiristores;
- Transformador;
- Bobinas de alisamento;

- Cabo de corrente contínua;
- Sistemas auxiliares de compensação de potência reativa.

I. Filtros de corrente alternada e corrente contínua

A função dos filtros é eliminar os harmônicos de corrente e tensão gerados pelos conversores. Os filtros de corrente alternada junto com o banco de capacitores são usados para absorver ou fornecer potência reativa. Já os filtros de corrente contínua são usados para impedir harmônicos de corrente alternada no cabo de corrente contínua.

II. Válvula tiristores [2] [38]

Esse componente tem como função assegurar a conversão de corrente alternada em contínua, e corrente contínua em alternada. O princípio básico de funcionamento é conduzir apenas se a tensão ânodo-cátodo for positiva e se for aplicada uma tensão positiva à porta (cátodo). Quando a corrente se anula e se a tensão ânodo cátodo for negativa, a válvula bloqueia a condução.

O valor da tensão de saída pode ser calculado pela equação (4).

$$V_{saída} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} V \cos \alpha - \frac{6\omega L_s}{\pi} I_d \quad (4)$$

Onde,

$V_{saída}$: Tensão entre o terminal positivo e negativo [V]

V : Tensão eficaz [V]

α : Ângulo de disparo [graus]

L_s : Indutância por cada fase do transformador [H]

I_d : Corrente que flui para o cabo DC [A]

Através do ângulo de disparo é possível controlar o valor médio da tensão contínua. Para $\alpha = 0^\circ$ a tensão é máxima e para $\alpha = 90^\circ$ a tensão será zero. À medida que o valor do ângulo aumenta, a tensão diminui.

A indutância da fonte de corrente alternada não é nula, devido a isso não é possível existir uma comutação instantânea, que demora um tempo finito. Durante este tempo, três válvulas conduzem uma corrente, duas em um dos grupos e uma no outro grupo. O ângulo associado a este tempo é representado por μ , que tem seu valor entre 15° e 25° .

Os valores de α e μ podem definir o fator de potência, logo definem também os valores das potências ativa e reativa transmitidas. Através do ângulo de disparo dos tiristores é possível controlar o nível de tensão DC.

A potência ativa e reativa do parque eólico *offshore* podem ser definidas pelas seguintes equações (5) e (6).

$$P_e = V_{saída} \times I_d \quad (5)$$

$$Q_e = V_{saída} \times I_d \times \tan \alpha \quad (6)$$

III. Transformador

Para eliminar os harmônicos e reduzir o tamanho do filtro, os transformadores são ligados em estrela/estrela e estrela/triângulo em *offshore* e estrela/estrela e triângulo/estrela em *onshore* [38].

IV. Bobinas de alisamento

As bobinas de alisamento têm como objetivo reduzir harmônico da tensão e intensidade da corrente contínua, prevenir falhas de comutação dos inversores e limitar a corrente de pico caso ocorra um curto-circuito no cabo de corrente contínua.

V. Cabo de corrente contínua [2]

Os condutores DC podem ser de dois tipos, cabos de massa impregnada (MI) e cabos revestidos a óleo (OF).

Os cabos de massa impregnada são formados por um condutor com segmentos constituídos por cobre, isolados por papel impregnado de resina

e óleos de alta viscosidade. As camadas interiores são de papel carregado de carbono e as outras camadas de telas entrelaçadas de cobre. Estes cabos são constituídos também por bainhas, ecrã de isolamento, armaduras e camada de proteção anti-corrosiva de polietileno extrudido para proteger o condutor e o isolamento do ambiente externo.

Devido às suas propriedades são os cabos mais utilizados em sistemas HVDC. Em um sistema DC pode ser transmitido até 1000 MW por cabo a 600 KV, e 2000 MW em um sistema bipolar. A temperatura máxima em um condutor é de 50°C.

O cabo revestido a óleo é isolado por papel impregnado com óleo de baixa viscosidade sob baixa pressão e incorpora um canal para transportar o óleo. No sistema DC pode ser utilizado para níveis de tensão até 600 KV.

Tem a desvantagem de ter seu tamanho limitado a cerca de 100 km, em consequência do canal que transporta o óleo ao longo do cabo. Devido a possibilidade de derrame de óleo, este cabo é considerado um risco ambiental.

VI. Sistema auxiliar de compensação de potência reativa [38]

Quando o parque eólico tem baixa produção, o mesmo não é capaz de manter o nível de tensão estável para garantir o correto funcionamento da estação conversora *offshore*, então é necessário um sistema auxiliar de compensação de potência reativa.

Esse sistema auxiliar pode ser um grupo diesel ou compensador estático, denominado STATCOM. O compensador estático é baseado na tecnologia VSC (conversores de fonte de tensão), este é ligado através de um transformador ao barramento cuja tensão se pretende regular ou até mesmo fornecer/absorver potência reativa.

O banco de capacitores é conectado em paralelo ao transformador ou juntamente com os filtros. Em relação ao banco de capacitores, o STATCOM tem a vantagem de produzir e consumir potência reativa, prover o suporte de tensão e assegurar maior estabilidade na estação de conversão.

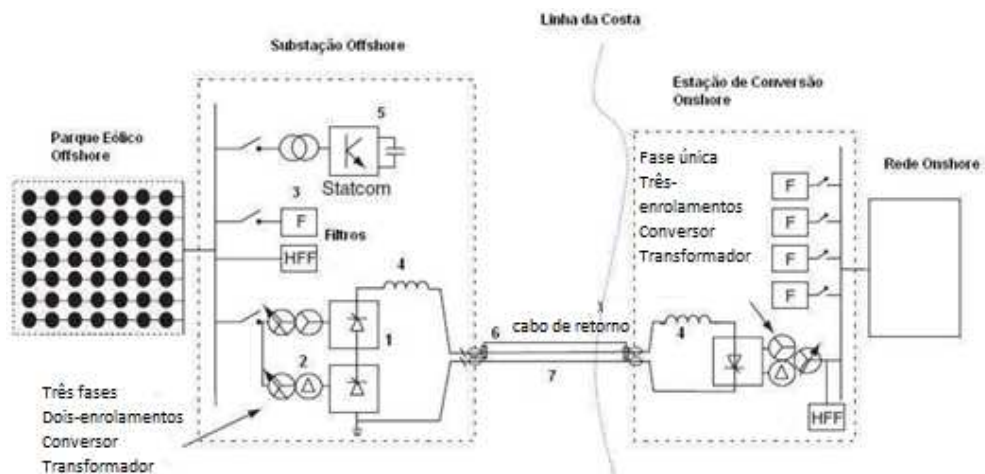


Figura 28 - Esquema de um parque eólico *offshore* usando sistema HVDC LCC. Fonte: Adaptado de [38].

Legenda da figura:

- 1 - Válvulas tiristores;
- 2 - Transformador/Conversor;
- 3 - Filtro AC;
- 4 - Bobinas de alisamento;
- 5 - Sistemas auxiliares de compensação de potência reativa;
- 6 - Filtro DC;
- 7 - Cabo de corrente contínua com caminho de retorno integrado.

Em transmissão em corrente contínua, é necessário existir um caminho de corrente de retorno (representado pelo número 7 na figura 28). Para realizar este retorno pode-se usar duas configurações, monopolar ou bipolar.

A configuração monopolar utiliza apenas um cabo para a transmissão de energia, sendo o retorno de corrente efetuado por terra e por meio de eletrodos instalados nas extremidades do sistema de transmissão. Em áreas que possuem alta resistividade da terra ou se o retorno pela água apresentar restrições devido à

existência de estruturas metálicas nas vizinhanças dos eletrodos de terra, pode ser utilizado um condutor de retorno metálico [2] [38].

Na configuração bipolar são usados dois condutores, um com polaridade positiva e o outro com polaridade negativa. Os pontos neutros definidos pela junção dos conversores encontram-se ligados à terra dos dois lados. Apesar de ter o preço mais elevado que a configuração monopolar, apresenta como vantagem a capacidade de transmitir maior potência e em caso de falha em um dos cabos, o outro pode continuar transmitindo até metade da potência [38].

4.1.2.1.1 Vantagens e desvantagens sistema HVDC LCC

As principais vantagens são:

- É possível o controle de potência ativa do parque eólico *offshore* por meio da eletrônica potência;
- Permite transportar maior potência à mesma tensão;
- Pode ser usado para grandes distâncias;
- Caso ocorra uma falha em uma das linhas, pode operar parcialmente;
- Na interligação de duas redes, estas podem ter frequências diferentes, a ligação pode ser assíncrona.

As principais desvantagens:

- É necessário grandes estações conversoras, *onshore* e *offshore*;
- Geração de harmônicos através dos conversores, sendo necessário o uso de filtros para mitigação dos mesmo;
- Caso ocorra um colapso no sistema, não contribui ativamente para a normalização do sistema, uma vez que só consegue entrar em funcionamento quando estiverem sob tensão.

4.1.2.2 Sistema de transmissão em alta tensão em corrente contínua usando conversores com comutação forçada (HVDC VSC)

O sistema HVDC VSC é uma tecnologia mais recente, são usados IGBTs ao invés de tiristores, o que permite o controle da potência ativa e reativa separadamente. Quando comparado com o sistema HVDC LCC, é necessário um número menor de filtros, pois não precisa usar fontes CA, STATCOM ou banco de capacitores para comutação. Além de ter como desvantagem um custo maior em relação às outras tecnologias, há limitação da potência de transmissão devido a modulação do PWM, que em altas frequências aumenta significativamente as perdas.

Para o sistema serão necessários os seguintes equipamentos [38]:

- Conversores (Válvulas IGBTs);
- Transformadores;
- Filtros em corrente alternada;
- Capacitores em corrente contínua;
- Indutâncias de acoplamento dos conversores;
- Cabo de corrente contínua (HVDC VSC).

I. Conversores (Válvulas IGBTs)

A estação conversora HVDC VSC utiliza válvulas IGBTs, comutadas a altas frequências, cerca de 2000 Hz. Por ter frequência elevada, o número de harmônicos é menor, consequentemente o tamanho dos filtros também é menor. Por outro lado, as perdas são maiores, o que reduz a eficiência do sistema.

Para controlar o circuito é usado a modulação por largura de pulso, PWM. O PWM tem a função de calcular o tempo do próximo instante (ou o instante da próxima amostragem) e modelar a tensão de referência. Através deste método é possível eliminar os harmônicos e reduzir as perdas no conversor.

Desta forma, a vantagem de usar um PWM é a possibilidade do rápido controle da potência ativa e reativa caso ocorra distúrbios na rede de corrente alternada.

II. Transformadores

Além das suas funções habituais, como variação do nível de tensão e isolamento galvânico, o transformador também liga os conversores à rede de corrente alternada.

III. Filtros de corrente alternada

Ao utilizar a modulação por largura de pulso, PWM, a onda perde a sua característica senoidal. Para tentar tornar a forma de onda senoidal, utiliza-se os filtros de correntes alternada. Dessa forma, é possível reduzir os harmônicos.

IV. Capacitores DC [2] [38]

Esses capacitores têm como objetivo oferecer caminho para a corrente de retorno, armazenar energia para manter o equilíbrio de potência, reduzir os harmônicos e limitar as variações de tensão em caso de falhas na rede de corrente alternada.

V. Indutância de acoplamento dos conversores

São bobinas verticais sobre isoladores com armaduras para eliminar os campos magnéticos criados fora do reator. Permite o controle contínuo e independente da potência ativa e reativa. Têm como função fornecer filtragem passa baixo do PWM para obter a frequência desejada, bloquear correntes harmônicas relacionadas com a frequência de comutação, limitar as correntes de curto-circuito e controlar a potência ativa e reativa.

VI. Cabo de corrente contínua (HVDC VSC) [38]

A tecnologia HVDC VSC é usado para potências até 1200 MW em configuração bipolar e tensão de aproximadamente 320 KV usando cabos XPLE, com temperatura térmica máxima de 90°C.

Os cabos têm o condutor de alumínio ou de cobre, em forma redonda, constituídos em várias fileiras de material condutor. Assim como os cabos HVAC, também possuem isolamento próprio, como ecrã isolante, blindagem e proteção.

Ao ser comparado com os cabos de tecnologia LCC, o cabo de corrente contínua possui melhores características térmicas.

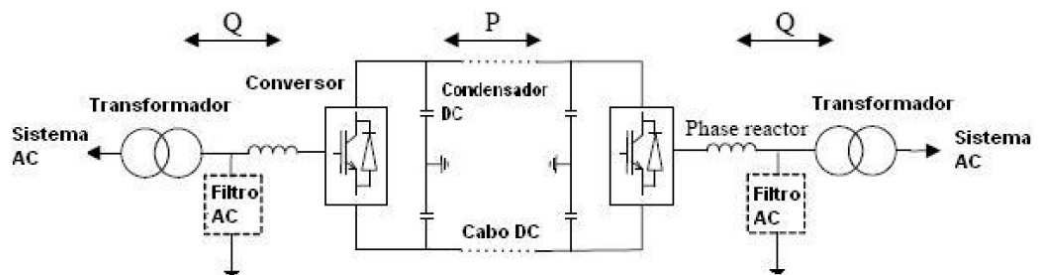


Figura 29 - Esquema de um parque eólico *offshore* usando sistema HVDC VSC. Fonte: [38].

4.1.2.2.1 Vantagens e desvantagens sistema HVDC VSC

Além de possuir as vantagens do sistema HVDC LCC, ainda possuem outras vantagens, tais como:

- Pode funcionar como compensador síncrono estático, fornecendo ou absorvendo potência reativa, sem gerar ou absorver potência reativa;
- Não é necessário utilizar muitos filtros como no sistema HVDC LCC, visto que as frequências de comutação são elevadas e assim, os níveis de harmônicos são mais baixos;
- Pode ser usada a função “*Black start*” mesmo em uma rede sem cargas, o que permite apoio total ou parcial do sistema em caso de falha.
- Nos casos em que não há necessidade de transmitir potência ativa entre as duas extremidades, o sistema pode operar em modo de

suspensão, potência ativa zero, e ambas as estações conversoras operam como dois STATCOMs independentes para regular as tensões da rede AC [2].

As principais desvantagens:

- Em relação ao sistema HVDC LCC, tem maior custo devido ao uso de IGBTs;
- Transmite menores valores de potência comparado com HVDC LCC. Sendo assim, é necessário um sistema de transmissão maior, o que reflete no custo total do projeto;
- Apresenta maiores perdas em relação ao HVDC LCC devido a alta frequência da modulação por largura de pulso, cerca de 4% a 6%.

4.2 Impacto dos aerogeradores na rede elétrica

Quando comparados aos outros meios de geração de energia, as turbinas eólicas possuem algumas diferenças na integração com a rede elétrica. Pode-se destacar [25]:

- Forte variação do vento, não sendo, portanto, controlável;
- Uso recorrente de conversores de potência;
- Menores dimensões dos geradores quando comparados com os convencionais.

Devido a estas diferenças, os sistemas de energia eólica podem ter impactos nas redes locais e impactos na rede global.

4.2.1 Impacto nas redes locais

➤ Controle de tensão

O impacto causado pelo aerogerador na rede local vai depender de qual modelo será usado. Os geradores podem ser de velocidade fixa ou

velocidade variável. Os geradores de velocidade fixa possuem um banco de capacitor em paralelo para compensação da potência reativa e controle do nível de tensão.

Já os geradores de velocidade variável, estabilizam o nível de tensão da rede através da variação da potência reativa trocada com a rede. Porém, isso depende do tipo de conversor que será usado em cada turbina.

➤ Proteção contra faltas

Para faltas equilibradas os geradores de indução contribuem apenas para correntes subtransitórias e para faltas desequilibradas, contribuem integralmente para a corrente de falta.

Os geradores de velocidade variável, como gerador de indução duplamente alimentado, também contribui para a corrente de falta. Devido aos conversores de potência, que são muito sensíveis ao curto, em caso de falta esses geradores têm que ser rapidamente desconectados da rede [6].

➤ Qualidade de energia

Os geradores de velocidade variável são os que mais geram harmônicos na rede devido ao uso de conversores de potência, que são equipamentos que geram grande quantidade de correntes harmônicas de alta frequência.

As turbinas de velocidade fixa causam pequenas variações de tensão, se conectadas em redes mais fracas, essas variações podem gerar fenômenos como flutuação de tensão e *flicker*.

4.2.2 Impacto na rede global

➤ Estabilidade da rede

No gerador de indução tipo gaiola de esquilo ao ocorrer uma falta no sistema o rotor aumenta de velocidade, essa queda de tensão gera desequilíbrio entre a potência mecânica gerada pelo vento e a potência gerada para a rede. Após a falta ser eliminada o gerador absorve potência

reativa, o que dificulta que a rede volte a tensão nominal. Caso isso demore a ocorrer, as turbinas tendem a acelerar e absorvem mais reativos. Isso leva à instabilidade da tensão e da velocidade do rotor.

Os conversores de potência são muito sensíveis a variação de tensão e corrente e podem ter sérias consequências na estabilidade do sistema. Com um grande número de turbinas eólicas conectadas no sistema, ao ocorrer variações de tensão e as turbinas se desconectarem, irá ocorrer uma grande queda de tensão. Para evitar que isso ocorra, os códigos de rede estabelecem níveis de tensão para os quais as turbinas eólicas devem suportar sem se desconectar, isso evita a desconexão de grande quantidade de energia eólica caso ocorra uma falta [2].

➤ Tensão, potência reativa e frequência

Em sistemas de potência, o valor da tensão é fortemente influenciado pelo fluxo de potência reativa no sistema. Geradores de indução de velocidade fixa absorvem potência reativa da rede para manter seu campo magnético e não têm controle direto sobre seu fluxo de potência reativa. Portanto, se faz necessário o uso de capacitores para compensação do fator de potência [2].

Turbinas de velocidade variável possuem um sistema de controle que, através dos conversores de potência, permite a absorção ou fornecimento de potência reativa. O controle atua para manutenção de valores de tensão dentro de uma faixa aceitável pelas normas de cada região [2] [6].

Tanto as turbinas de velocidade fixa, quanto as de velocidade variável são capazes de atuar para manter estável a frequência de operação da rede.

5. ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA

Para verificar a viabilidade de um empreendimento eólico *offshore* devem ser analisados alguns fatores que determinam se é viável ou não a instalação e manutenção do parque, assim como os custos relacionados a este.

5.1 Análise técnica

5.1.1 Local de instalação

O regime dos ventos na região escolhida para instalação do parque deve ser estudado para que seja possível verificar a quantidade de energia que pode ser gerada, sendo assim é possível fazer uma análise econômica, pois o retorno do investimento está diretamente relacionado com o quanto de energia o parque irá produzir.

Além disso, deve ser analisado a distância do empreendimento até as linhas de transmissão, isso afeta nos custos e perdas na transmissão. Deve-se considerar também, a profundidade que irá instalar os aerogeradores para a escolha adequada do tipo de fundação, e os impactos ambientais e sociais, como rota dos peixes e de navegação, e atividades de pesca na região.

5.1.2 Seleção do aerogerador

Para selecionar o aerogerador que será utilizado é necessário considerar sua curva de potência, capacidade nominal, assistência técnica na região do parque, diâmetro do rotor e sua característica de confiabilidade.

5.1.3 Conexão com a rede elétrica

Como já analisado no capítulo 4, o sistema de transmissão pode ser feito em corrente contínua ou alternada. O sistema de conexão, a distância das linhas de transmissão e o valor da tensão, determinam a quantidade de subestações *offshore* que serão necessárias para manter ou elevar os níveis de tensão.

Um sistema elétrico *offshore* consiste de seis elementos principais [20]:

1. Geradores;
2. Cabos entre as turbinas (sistema coletor);
3. Subestação *offshore* (se necessário);
4. Cabo de transmissão para a costa;
5. Subestação *onshore*;
6. Conexão a rede.

No projeto do sistema elétrico deve ser considerado as características do aerogerador e da rede elétrica que o parque será conectado. Na figura (30) é possível visualizar esta conexão.

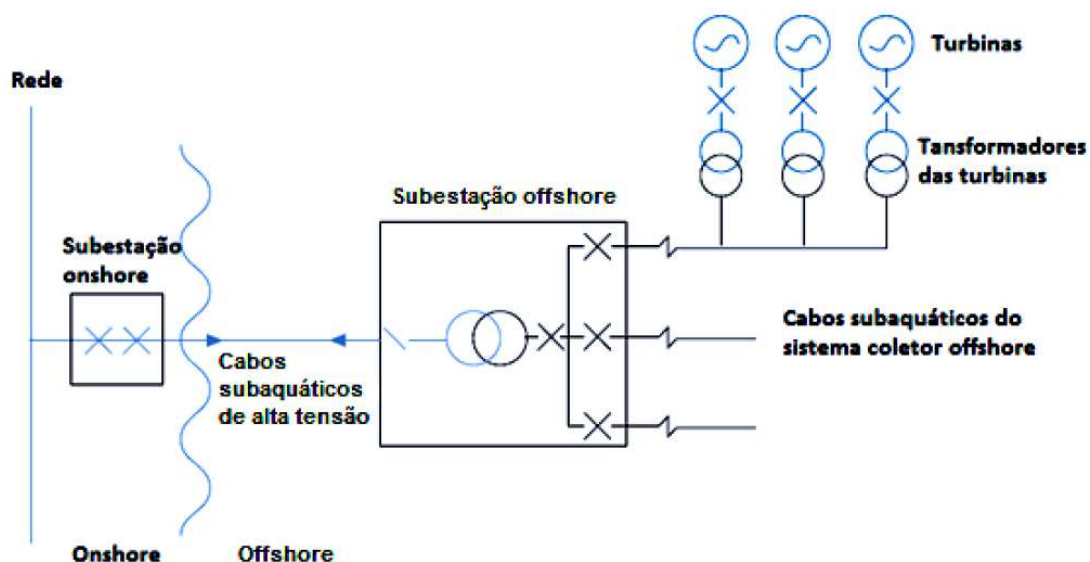


Figura 30 – Diagrama típico de uma linha. Fonte: [20].

5.2 Análise econômica

Para verificar a viabilidade econômica de um parque eólico *offshore* é necessário analisar os investimentos na instalação, preço dos equipamentos, custos de operação e manutenção, taxa de juros, valor de impostos e o valor da venda de energia. De acordo com a quantidade total de energia que o parque irá gerar, é possível verificar quanto será o ganho com a venda de energia. Estima-se que os custos de um parque eólico *offshore* é três vezes maior que os custos de um parque eólico *onshore*. Porém o custo mais elevado pode ser compensado com a maior geração de energia.

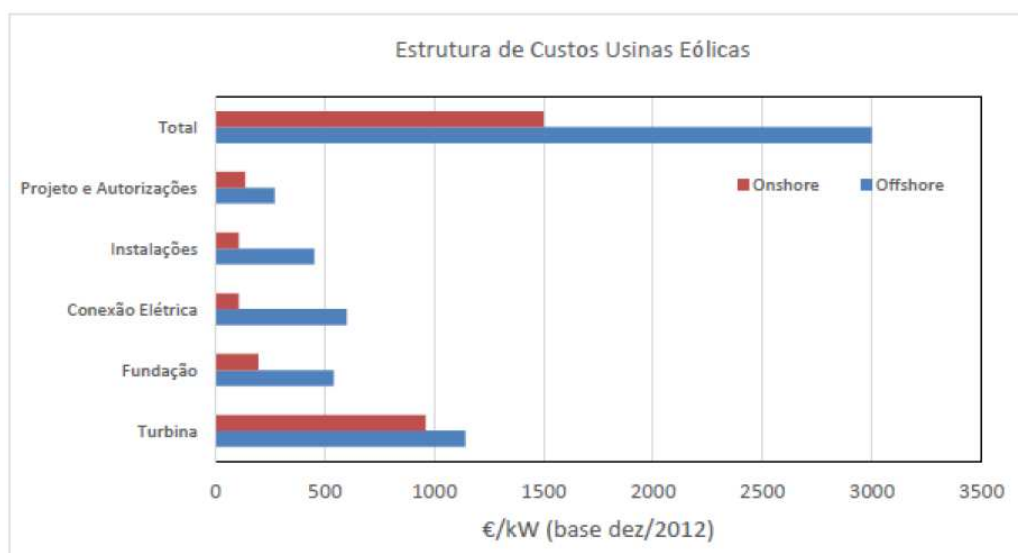


Figura 31 – Estrutura de custos usinas eólicas *onshore* vs *offshore*. Fonte: [34].

Em relação a energia eólica *onshore*, os maiores custos dos parques *offshore* estão nas fundações e conexão com a rede. As fundações apresentam valores mais elevados pois necessitam de reforço nas estruturas e a conexão com a rede é devido à distância das turbinas até a costa e sofrem maior corrosão por causa do ambiente salino.

Tabela 5 – Custo percentual na implantação de uma usina eólica *offshore*.

Turbina eólica	30 - 50 %
Fundação	15 - 25 %
Interconexão e conexão com a rede	15 - 30 %
Instalação	0 - 30 %
Outros	8 %

Fonte: [22].

Os custos podem ser divididos em custos de capital (CAPEX – *Capital Expenditure*) e custo de operação (OPEX – *Operating Expenditure*). O CAPEX é referente a todos os custos do empreendimento e varia de acordo com o país e projeto e o OPEX representa todos os custos referentes após a aquisição do parque eólico.

De acordo com Costa (2018) as fases e custos de vida útil do projeto podem ser divididos em:

a. Desenvolvimento e Consentimento:

- Planejamento e gestão
- Licenciamento
- Análise de viabilidade
- RIMA/EIA
- Pesquisas meteorológicas e geofísicas
- Projeto conceitual
- Estudos sociais

b. Produção e Aquisição:

- Turbinas eólicas
- Subestrutura
- Equipamentos elétricos

c. Instalação:

- Turbinas eólicas

- Subestrutura
- Equipamentos elétricos
- Comissionamento
- Porto de apoio

d. Operação e Manutenção:

- Seguro
- Manutenção corretiva
- Manutenção preventiva
- Perdas de transmissão e disponibilidade

e. Descomissionamento:

- Desativação
- Engenharia reversa
- Estudos ambientais
- Sucata

5.2.1 Desenvolvimento e Consentimento [13]

A fase de desenvolvimento e consentimento tem início na aquisição de um local para instalação do parque eólico. Os custos nesta etapa são referentes à fase inicial de desenvolvimento do projeto, incluindo todas as atividades precedentes à produção e aquisição.

Os componentes de custos incluídos nessa etapa abrangem despesas de planejamento e gestão de projeto, licenciamento, análise de viabilidade, estudos de impactos ambientais, pesquisas meteorológicas e geofísicas, projeto conceitual de engenharia e estudos de impactos sociais. Também são considerados contratos de prestação de serviço durante as etapas de construção e operação.

5.2.2 Produção e Aquisição

Os custos de produção e aquisição referem-se aos custos dos elementos do projeto, como torre, sistema de transmissão de energia, subestrutura e turbinas. Nesta etapa do projeto também está incluso o seguro de construção. Devido a sua complexidade, os projetos de parques eólicos necessitam de uma rigorosa análise de riscos. Para atrair mais investidores e transmitir mais segurança nos investimentos, as seguradoras concedem proteção financeira para danos físicos e atrasos na obra durante a etapa de construção, montagem e transporte.

5.2.3 Instalação [13]

Os custos de instalação do projeto são divididos em custos com transporte e instalação das turbinas, subestrutura e cabos elétricos.

- Turbinas

Para instalar as turbinas no local selecionado para o parque *offshore* é usado um tipo de embarcação chamada de *jack-up*. Os componentes das turbinas são carregados do porto até o local da instalação.

Uma turbina eólica consiste em pelo menos sete componentes individuais: nacelle, eixo, três pás e duas seções de torres, os quais podem ser transportados e instalados de várias formas. Para escolher a melhor estratégia de instalação da turbina é necessário conhecer as condições ambientais do local de instalação, número de içamento, a capacidade de içamento dos guindastes do porto e da embarcação, entre outros.

Nesta etapa, também devem ser considerados todos os custos com a tripulação que trabalha durante todo o processo de instalação das turbinas. Após o correto planejamento e estudo da operação é possível estimar os reais custos.

- Subestruturas

As subestruturas são todos os componentes que dão suporte às turbinas, como a fundação e peças de transição. Por apresentar menor custo, a instalação da subestrutura é feita por navios *jack-up* especializados em instalação de turbinas eólicas. Estima-se que a instalação completa de uma subestrutura com fundação tipo jaqueta seja de três dias e o tempo para instalação da estrutura adicional e peça de transição seja de um dia.

- Componentes elétricos

Os cabos elétricos marítimos e terrestres compreendem aos componentes elétricos que fazem parte do parque eólico. Para evitar danos causados por impactos, os cabos submarinos são sempre enterrados no leito marinho, o que gera custos relacionados à embarcação responsável pela escavação do trecho. O preço da instalação dos cabos varia muito de acordo com o tipo de cabo, profundidade da instalação, localização do parque eólico e tipo de solo.

5.2.4 Operação e Manutenção

O processo de operação e manutenção tem como objetivo assegurar o bom estado e funcionamento do parque eólico. Neste processo é realizado a troca de componentes danificados, limpeza e manutenção de peças, atualizações de software e mudanças ou ajustes de novas configurações.

A manutenção pode ser dividida em preventiva e corretiva.

- Manutenção Preventiva [14]: tem como objetivo evitar quebras e falhas nas máquinas e componentes. As tarefas preventivas são realizadas periodicamente e garantem que as máquinas mantenham seu funcionamento eficaz e de forma confiável. Por ser uma operação totalmente planejada, é possível evitar quedas de rendimento, paradas para reparo e diminuir os custos de manutenção. Dentre as principais vantagens pode-se citar:
 - Redução do envelhecimento e degradação dos equipamentos;
 - Aumento da vida útil;

- Diminuição das paradas e tarefas corretivas;
 - Redução dos riscos e acidentes;
 - Redução dos custos de manutenção.
- Manutenção Corretiva [14]: atua nos equipamentos para corrigir falhas, quebras ou defeitos, realiza intervenções que façam com que as máquinas retornem à operação normal. Podem ser classificadas como:
 - i. Manutenção Corretiva não Planejada: correção de uma falha aleatória em que não existe tempo para agendamento e preparação do serviço a ser realizado. É representada por correções de quebra que mantêm máquinas fora de operação. São caras, demanda tempo e levam a perdas de produção ou serviço.
 - ii. Manutenção Corretiva Planejada: realizada quando é detectada a perda de performance das máquinas. Neste caso, tem tempo para programar e planejar a intervenção. É mais barata que a manutenção não planejada, mas gera perdas pela queda de desempenho dos equipamentos.

Por serem planejadas, as manutenções preventivas têm custo e tempo de paralização menores e podem ser determinados com antecedência. Para as manutenções não planejadas, não é possível prever os custos com muita certeza.

5.2.5 Descomissionamento

A fase de descomissionamento ocorre quando o parque eólico atinge a sua vida útil. Nesta etapa estão inclusos os custos com a remoção e descartes dos componentes, gestão dos resíduos e limpeza/liberação do local. Também são considerados os custos de monitoramento ambiental após a desativação do parque.

5.3 LCOE – Levelized Cost of Energy

O LCOE é o custo da energia produzida durante o tempo de vida do empreendimento. Calcula os custos totais da geração de energia, incluindo também os custo de capital – CAPEX e operação – OPEX [1].

A fórmula usada para o cálculo do LCOE é:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{(I_t + M_t + B_t)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (7)$$

Onde,

t : Tempo em anos;

n : Tempo de vida do sistema;

r : Taxa de desconto;

I_t : Investimento inicial em $t=1$ ou de substituição em um ano específico (CAPEX);

M_t : Custo de operação e manutenção (OPEX) no ano t ;

B_t : Custo de energia auxiliar no ano t ;

E_t : Estimativa da energia produzida no ano t .

Sendo o LCOE um custo antecipado, é importante para a sua determinação não só especificação correta dos custos de investimento, manutenção e de taxa de desconto, mas também o conhecimento da estimativa da energia produzida em cada ano. É necessário conhecer o desempenho do sistema com rigor e também a variação deste desempenho ao longo deste tempo de vida do sistema [36].

6. CONCLUSÃO

O Brasil tem um expressivo potencial eólico *offshore* e uma ampla área marítima que pode ser utilizada para implantação dos parques. Para os próximos anos a tendência é que a demanda por energia elétrica aumente, principalmente nas regiões costeiras, que estão localizadas grande parte da população brasileira. Sendo assim, a inserção da energia eólica *offshore* na matriz energética se torna uma alternativa para suprir esta demanda e evitar possíveis colapsos energéticos.

Para que o potencial energético *offshore* seja explorado é necessário promover as condições para o desenvolvimento e potenciação do mesmo, mediante políticas que apostem no crescimento sustentável, inteligente, e que tenham em conta as possibilidades de interação entre os diversos usos e atividades do mar [4]. Também é importante que tenha investimentos em pesquisas, planejamentos, e que sejam traçadas metas de longo prazo.

Visando o futuro, a Petrobras inicia os primeiros investimentos na geração de energia em alto mar por meio do seu projeto piloto, a empresa espera adquirir conhecimento e experiência na área. Do ponto de vista estratégico da estatal, os custos da energia eólica *offshore* pode ser reduzido em virtude de economias de escopo, advindas do aproveitamento conjunto com plataformas de petróleo já existentes.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. J. P. c. R. Manuel Collares Pereira. *O valor e o custo da eletricidade produzida por sistemas Solares (fotovoltaicos) (Levelised Cost of Electricity –LCOE, incentivos, política energética)*. 2016.
- [2] ANAYA-LARA, O., JENKINS, N., EKANAYAKE, J., CARTWRIGHT, P., HUGHES, M. *Wind Energy Generation Modeling and Control*. United Kington: Wiley, 2014.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. *EÓLICA JÁ É A SEGUNDA FONTE DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA*. 2019. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/noticias/eolica-ja-e-a-segunda-fonte-da-matriz-eletrica-brasileira-com-15-gw-de-capacidade-instalada>>. Acesso em: 15 abr. 2019.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. *Números ABEEólica de janeiro 2019*. São Paulo: 2019.
- [5] BARBOSA, Robson. *Inserção da Energia Eólica Offshore no Brasil: Análise de Princípios e Experiências Regulatórias*. 2018. Dissertação de Pós-Graduação – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- [6] BICALHO, Fabiano Silveira. *Integração de Turbinas Eólicas às Redes Elétricas*. 2013. Dissertação de Especialização – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- [7] BRASIL. Lei n. 9.478, de 6 de ago. de 1997. Dispões sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. Brasília, ago. 1997.
- [8] BRAZIL WIND POWER. *O FUTURO É OFFSHORE*. 2018. Disponível em: <<http://www.brazilwindpower.com.br/blog/2018/8/9/o-futuro-offshore>>. Acesso em: 21 mai. 2019.
- [9] CASTRO, Nivaldo de; LIMA, Antônio; HIDD, Gabriel; VARDIERO, Pedro. *Perspectiva da Energia Eólica Offshore*. Agência Canal Energia. Rio de Janeiro, agosto de 2018.

- [10] CAVALARI, Gabriel Margato. *Avaliação de Perdas Elétricas devido ao Ponto de Interconexão do Sistema de Geração Eólica na Rede Elétrica*. 2016. Dissertação de Graduação – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.
- [11] CEPEL. *ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO*. 2017. Disponível em: <http://novoatlas.cepel.br/wp-content/uploads/2017/07/Novo-Atlas-do-Potencial-Eolico-Brasileiro-SIM_2013.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2019.
- [12] CERNE. *EÓLICAS OFFSHORE: COMISSÃO DO CERNE ESTUDA MARCO REGULATÓRIO BRASILEIRO EM 2019*. 2019. Disponível em: <<http://cerne.org.br/eolicas-offshore-comissao-estuda-marco-regulatorio-brasileiro-em-2019/>>. Acesso em: 2 mai. 2019.
- [13] COSTA, Karen Maia da. *Reutilização de Plataformas Fixas para Geração de Energia Eólica Offshore*. 2018. Dissertação de Graduação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- [14] *ENTENDA QUAIS SÃO OS TRÊS PRINCIPAIS TIPOS DE MANUTENÇÃO*. Disponível em: <<https://blog.engeman.com.br/tipos-de-manutencao/>>. Acesso em: 2 jun. 2019.
- [15] EPBR. *TRÊS EÓLICAS OFFSHORE EM LICENCIAMENTO NO IBAMA*. 2018. Disponível em: <<https://epbr.com.br/tres-eolicas-offshore-em-licenciamento-no-ibama/>>. Acesso em: 12 mai. 2019.
- [16] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050*. Rio de Janeiro: 2018.
- [17] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no Horizonte 2050*. Rio de Janeiro: 2018.
- [18] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Roadmap – Energia Eólica Marítima no Brasil*. Rio de Janeiro: 2019.
- [19] EPALANGA, Oteniel Siliveli. *Energia Eólica – Viabilidade Técnica de Projeto Eólico na Região de Urubici*. 2013. Dissertação de Graduação – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

- [20] FILHO, Oyama de Oliveira. *Uma Metodologia Simplificada para Estimativa do Aproveitamento Eólico Offshore no Litoral Brasileiro*. 2011. Dissertação de Pós-Graduação – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.
- [21] GLOBAL ENERGY CONCIL. *Global Wind Report 2017*. 2017. Disponível em: <<https://gwec.net/publications/global-wind-report-2/>>. Acesso em: 10 abr. 2019.
- [22] GOMES, Bianca Belardony. *Otimização do Cabeamento Interconector de Aerogeradores em Parques Eólicos Offshore*. 2018. Dissertação de Graduação – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2018.
- [23] IRENA. *GLOBAL ENERGY TRANSFORMATION*. 2018. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wpcontent/uploads/2018/05/IRENA_Report_GlobalEnergyTransformation_A-Roadmapto2050_2018.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2019.
- [24] Kaiser, Mark J.; Snyder, Brian F. *Offshore Wind Cost Modeling*. Londres: Springer, 2012.
- [25] Koller, Julia; Koppel, Johann; Peters, Wolfgang. *Offshore Wind Energy – Research on Environmental Impacts*. Berlin: Springer, 2006.
- [26] LAZARIDIS, Lazaros. *Economic Comparison of HVAC and HVDC Solution for Large Offshore Wind Farms under Special Consideration of Reability*. 2005. Royal Institute of Technology, Stockholm, 2005.
- [27] LIMA, João Marcos; COSTA, Sérgio Augusto da. *PLANEJAMENTO DO SETOR ELÉTRICO E AS USINAS EÓLICAS OFFSHORE*. 2017. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/planejamento-do-setor-el%C3%A9trico-e-usinas-e%C3%B3licas-offshore-lima>>. Acesso em: 18 abr. 2019.
- [28] LIMA, João Marcos. *USINAS EÓLICAS OFFSHORE: A ÚLTIMA FRONTEIRA DO SETOR EÓLICO BRASILEIRO*. 2017. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/usinas-e%C3%B3licas-offshore-%C3%BAltima-fronteira-do-setor-e%C3%B3lico-lima>>. Acesso em: 18 abr. 2019.
- [29] MAIA, Vasco Manuel. *Análise e Dimensionamento de Torre Eólica Offshore: Estudo Paramétrico*. 2009. Dissertação de Mestrado – Universidade do Porto, Porto, 2009.

- [30] MEDEIROS, João Paulo Costa de. *Precificação da Energia Eólica Offshore no Brasil*. 2014. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- [31] MELO, Thailane. *ENERGIA EÓLICA GLOBAL INSTALA-SE ESTÁVEL EM 51,3 GW EM 2018*. 2019. Disponível em: <<https://www.opetroleo.com.br/energia-eolica-global-instala-se-estavel-em-513-gw-em-2018/>>. Acesso em: 22 abr. 2019.
- [32] NASCIMENTO, Wallisson da Silva. *TIPIFICAÇÃO DE FUNDAÇÕES DE TURBINAS EÓLICAS DE PARQUES EÓLICOS OFFSHORE*. 2018. Disponível em: <<http://revistas2.uepg.br/index.php/ret/article/viewFile/11969/209209209891>>. Acesso em: 22 abr. 2019.
- [33] ORTIZ, G.P; KAMPEL, M. Potencial de energia offshore na margem do Brasil. In: *V Simpósio Brasileiro de Oceanografia*. Santos, SP: Instituto Oceanógrafo da Universidade de São Paulo, 2011.
- [34] PEREIRA, Felipe. *Análise do Arcabouço Legal Associado ao Desenvolvimento de Parques Eólicos Offshore no Brasil*. 2017. Dissertação de Mestrado – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, 2017.
- [35] PEREIRA, Marcello Monticelli. *Um Estudo do Aerogerador de Velocidade Variável e Sua Aplicação para Fornecimento de Potência Elétrica Constante*. 2004. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2004.
- [36] PETROBRAS. *ESTAMOS DESENVOLVENDO O PRIMEIRO PROJETO PILOTO DE ENERGIA EÓLICA OFFSHORE DO BRASIL*. 2018. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/estamos-desenvolvendo-o-primeiro-projeto-piloto-de-energia-eolica-offshore-do-brasil.htm>>. Acesso em: 18 abr. 2019.
- [37] SALLES, Maurício Barbosa. *Análise do Desempenho Dinâmico de Geradores Eólicos Conectados em Rede de Distribuição de Energia Elétrica*. 2004. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- [38] TAVARES, Bruno Lopes. *Parques Eólicos Offshore: Estudos de Soluções de Interligação do tipo HVAC e HVDC*. 2010. Dissertação de Mestrado – Universidade do Porto, Porto, 2010.

- [39] TRAPP, Beatriz. *Análise de Viabilidade de uma fazenda eólica no Rio Grande do Sul*. 2009. Dissertação de Graduação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [40] VITERBO, Jean Carlo. *Geração de Energia Elétrica a Partir da Fonte Eólica Offshore*. 2008. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- [41] ZAPAROLLI, Domingos. *VENTOS PROMISSORES A CAMINHO*. 2019. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/2019/01/10/ventos-promissores-a-caminho/>>. Acesso em: 12 abr. 2019.