

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
TECNOLOGIA EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

LEONARDO BOLLINI DE ARAÚJO

GUSTAVO DA SILVA LUIZ

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE UM
PARQUE EÓLICO MARÍTIMO NO BRASIL**

SÃO PAULO

JUNHO DE 2019

LEONARDO BOLLINI DE ARAÚJO
GUSTAVO DA SILVA LUIZ

ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE UM PARQUE
EÓLICO MARÍTIMO NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Faculdade de Tecnologia de
São Paulo como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do Grau de
Tecnólogo em instalações elétricas. Sob
a orientação do Professor Me. Romildo
de Campos Paradelo Jr.

São Paulo
Junho, 2019

“A vida é e sempre será uma equação incapaz de
solução, mas contém certos fatores conhecidos.”

(Nikola Tesla)

RESUMO

A geração de energia eólica tem um grande potencial para desenvolvimento no Brasil, devido a sua imensa área continental e costeira e por estar localizado em uma região de alto fluxo de vento. Ainda sim, a diversificação da matriz energética é essencial para a segurança energética nacional sendo a energia eólica uma fonte renovável sem emissão de poluentes e com o custo de operação e implementação atrativos quando comparadas as usinas termoeletricas, nucleares e hidráulicas.

O desenvolvimento dos parques eólicos vem aumentando cada vez mais no Brasil, porém muitas tecnologias como as usadas em geradores eólicos *offshore* ainda são novidades no setor. Atualmente o Brasil não possui parques eólicos *offshore*, tecnologia que no continente Europeu vem sendo usada desde 1991 na inauguração do primeiro parque eólico *offshore*, o VINDEBY na Dinamarca. Com base nisso, o objetivo do nosso trabalho é elencar e analisar o desenvolvimento dessa tecnologia ainda em crescimento e averiguar a viabilidade de implantação de um parque eólico *offshore* no Brasil.

Para a construção do trabalho, foi utilizado como metodologia a obtenção de dados por meio de pesquisas no qual foi levantado tanto informações técnicas dos mecanismos utilizados em um gerador eólico como também dados quantitativos referentes a custo de implantação e de venda da energia.

No demais, ao findar o trabalho concluímos que para curto prazo investimentos em energia eólica *offshore* não são viáveis financeiramente principalmente por conta das tecnologias e logísticas que esse tipo de empreendimento precisa durante sua implantação. Todavia, a longo prazo o mercado pode passar por um processo de amadurecimento o que possibilita a redução no custo de implantação. O trabalho também retrata algumas estratégias na qual foram utilizadas em projetos ainda em fase de licenciamento no Brasil que reduzirão o valor final desses investimentos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente aos nossos pais que nos apoiaram o que nos possibilitou chegar até aqui.

Aos colegas de faculdade pelo qual convivemos toda essa jornada durante esse curso e que sempre nos ajudaram a superar as dificuldades.

Ao nosso orientador Prof. Romildo de Campos Paradelo Jr. pelo qual nos deu todo apoio para a elaboração desse trabalho.

A todos professores pela qual tivemos aula, que nos orientaram não somente a formação acadêmica, mas nos ensinaram a viver e enfrentar o mercado de trabalho que nos espera.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – OS LIMITES DA ZONA ECONÔMICA EXCLUSIVA.....	11
FIGURA 2 - CARGA INSTALADA POR FONTE GERADORA EM MW	12
FIGURA 3 - MARCOS DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA.....	14
FIGURA 4 - GERADOR EÓLICO DE CHARLES F. BRUNCH	15
FIGURA 5 - O FLUXO E A MOVIMENTAÇÃO DAS MASSAS DE AR TERRESTRES.....	17
FIGURA 6 – VIABILIDADE DE GERAÇÃO ENERGÉTICA EM ALTO MAR	18
FIGURA 7 - PRINCIPAIS COMPONENTES DE UMA TURBINA EÓLICA	20
FIGURA 8 - MECANISMO DO ÂNGULO DAS PÁS.....	21
FIGURA 9 - MECANISMO DE GUINADA.....	23
FIGURA 10 - EIXO DE TRANSMISSÃO E CAIXA DE ENGRENAGENS	24
FIGURA 11 - EIXO DE TRANSMISSÃO, CAIXA DE ENGRENAGENS E DISCO DE FREIO	25
FIGURA 12 - A) BIRUTA; B) MICROTURBINA.....	26
FIGURA 13 - TIPOS DE FUNDAÇÕES FIXAS.....	27
FIGURA 14 - TIPOS DE FUNDAÇÃO FLUTUANTES	27
FIGURA 15 - REDE DE COMUNICAÇÃO DE DADOS	29
FIGURA 16 - TIPOS DE TOPOLOGIA DE TRANSMISSÃO.....	31
FIGURA 17 - SUBESTAÇÕES	32
FIGURA 18 - SUBESTAÇÃO OFFSHORE ANDAR INFERIOR	33
FIGURA 19 - SUBESTAÇÃO OFFSHORE ANDAR SUPERIOR.....	34
FIGURA 20 - SUBESTAÇÃO OFFSHORE.....	35
FIGURA 21 - CORTE DE UM CONDUTOR UTILIZADO NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO MARÍTIMA	36
FIGURA 22 – MAPA DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	38
FIGURA 23 - BALANÇO ENERGÉTICO	39
FIGURA 24 - INSTITUIÇÕES DO SETOR ELÉTRICO.....	42
FIGURA 25 - PROJETOS EM FASE DE LICENCIAMENTO NO BRASIL.....	52
FIGURA 26 - COMPARAÇÃO ENTRE CUSTOS DOS PROJETOS EÓLICOS ONSHORE E OFFSHORE	55
FIGURA 27 - COMPARAÇÃO ENTRE CUSTOS DE DIFERENTES MEIOS DE GERAÇÃO	56
FIGURA 28 - MAPA DOS PRINCIPAIS PORTOS BRASILEIROS / MAPA DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO	57
FIGURA 29: TABELA DO RETORNO FINANCEIRO NO 1º ANO.....	59
FIGURA 30 – COMPARATIVO DOS AEROGERADORES EÓLICOS OFFSHORE E ONSHORE.....	60
FIGURA 31 – INDÚSTRIAS DO SETOR DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NO BRASIL.....	61
FIGURA 32 - PREVISÃO PARA PREÇOS DA ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NO BRASIL	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

kWh – Quilowatt Hora

MWh – Megawatt Hora

GWh – Gigawatt Hora

LED – Diodo emissor de luz

ICMS – Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

ART – Anotação de Responsabilidade Técnica

kV – quilovolt

m/s – Metros por Segundo

PEN – Política Energética Nacional

CERNE - Centro de Estratégia em Recursos Naturais

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

EIA - Estudo de Impacto Ambiental

RIMA - Relatório de Impacto Ambiental

a.C. – Antes de Cristo

MTBF - Tempo médio entre falhas

HVDC – Alta Tensão Corrente Continua

HVAC – Alta Tensão Corrente Alternada

IED - Dispositivos Eletrônicos Inteligentes

WT – Turbina Eólica

SCADA - Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados

BEM - Balanço Energético Nacional

RE-SEB - Restruturação do Setor Elétrico Brasileiro

MME - Ministério de Minas e Energia

CNPE - Conselho Nacional de Política Energética

CMSE - Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

LP – Licença Prévia

LI – Licença de Instalação

LO ou LF – Licença de Operação ou Funcionamento

IPHAC - Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Cultural

PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social

PIS - Programas de Integração Social

CSLL - Contribuição Social sobre o Lucro Líquido

COFINS - Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	11
1.1	Estruturação do Trabalho.....	13
2	FUNDAMENTOS DA ENERGIA EÓLICA	14
2.1	Desenvolvimento Histórico.....	14
2.2	Potência Extraída do Vento e a Meteorologia	16
3	PARQUE EÓLICO E SEUS COMPONENTES	19
3.1	Nacele.....	19
3.2	Mecanismo de Inclinação do ângulo das pás	21
3.3	Mecanismo de Guinada	22
3.4	Eixo de Transmissão e Caixa de Engrenagens	23
3.5	Sensores.....	25
3.6	Tipos de Fundação	26
3.7	Transmissão	28
3.7.1	Comunicação de Dados	28
3.7.2	Topologia de Transmissão	30
3.7.3	Subestação	31
3.7.4	Linhas de Transmissão Marítimas	36
3.7.5	Sistema Interligado Nacional	37
4	VIABILIDADE PARA IMPLANTAÇÃO NO BRASIL.....	40
4.1	Cenário Brasileiro	40
4.2	EIA-RIMA	43

4.2.1. EIA.....	44
4.2.2. RIMA	45
4.2.3. Métodos de avaliação do Impacto Ambiental	45
4.2.4. Zonas de Proteção e Preservação	46
4.2.5 Zonas de Proteção - Patrimônio Histórico, Cultural e Artístico Nacional	47
4.2.6 Zonas de Proteção - Turismo	47
4.2.7 Zonas de Proteção - Pesca	48
4.2.8 Possíveis impactos na implantação de um Parque Eólico <i>Offshore</i>	48
4.2.9 Medidas de Defesa.....	49
4.3 PROINFA	49
4.3.1 Primeira Fase	50
4.3.2 Segunda Fase	51
4.4 PROJETOS EM LICENCIAMENTO NO BRASIL.....	51
4.4.1 Planta Piloto Eólica Offshore da Petrobras	52
4.4.2 Projeto do Complexo Eólico Marítimo Asa Branca I	53
4.4.3 Complexo Eólico de Caucaia.....	53
4.4.4 Estratégias para redução de custo	53
4.5 Viabilidade para Implantação de um parque Eólico Offshore no Brasil.....	54
4.5.1 Parâmetros Financeiros.....	54
4.5.2 Parâmetros Geográficos.....	57
4.5.3 Exemplo de custos de Implantação no Brasil	58
4.5.4 O futuro da energia eólica <i>offshore</i> no Brasil.....	59
5 CONCLUSÃO.....	63

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos

Nos últimos anos, o Brasil viveu uma turbulência no sistema de geração energética ocasionada pela crise hídrica, afetando drasticamente a produção de energia pelas hidrelétricas e a confiança sobre esse meio de geração. Segundo o ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, mais de 70% da produção de energia do Brasil depende das hidrelétricas.

Para contornar essa situação foi necessário o acionamento massivo das usinas termelétricas, que utilizam combustíveis fósseis de alto custo de operação, além de medidas como por exemplo a implantação do sistema das bandeiras tarifárias, que implicam no acréscimo monetário na tarifação do kWh consumido em função das condições favoráveis de geração. Por essa e outras razões que as fontes alternativas e sustentáveis estão em alta, sendo no Brasil a principal delas a eólica.

Figura 1 – Os limites da zona econômica exclusiva

OS LIMITES DA ZONA ECONÔMICA EXCLUSIVA – ZEE



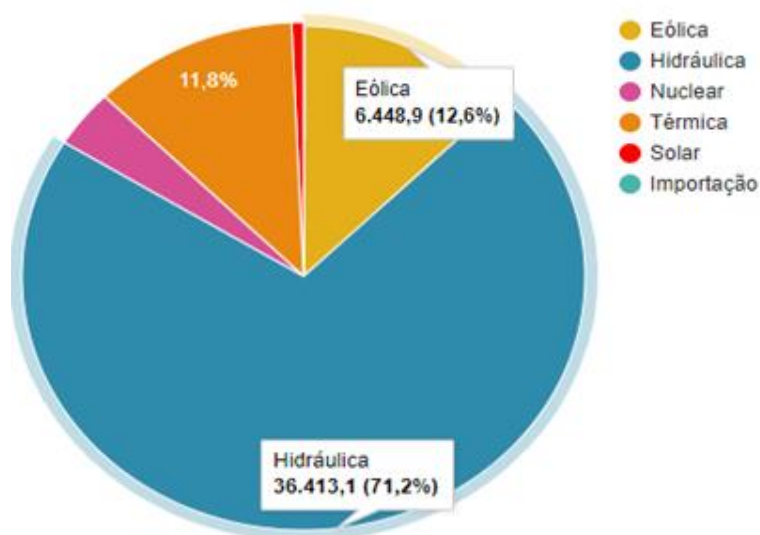
Fonte: Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2006)

O risco crescente da escassez de combustíveis fósseis e a crise hídrica tornando um fenômeno climático recorrente que afeta o abastecimento das cidades e

dos reservatórios das usinas hidráulicas, torna-se indispensável o investimento na diversificação e na geração de energia renovável, limpa e de baixo custo.

A geração de energia eólica tem um grande potencial para desenvolvimento no Brasil, devido a sua imensa área continental e marítima como mostra a figura 1, e por estar localizado em uma região de alto fluxo de vento. Ainda assim, a diversificação da matriz energética é essencial para a segurança energética nacional, no qual a carga instalada como fonte eólica representa apenas 12,6% do total, sendo ela uma fonte renovável sem emissão de poluentes e com o custo de operação e implementação atrativos quando comparadas as usinas termoeletricas, nucleares e hidráulicas.

Figura 2 - Carga instalada por fonte geradora em MW



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)

O desenvolvimento dos parques eólicos vem aumentando cada vez mais no Brasil, porém muitas tecnologias como as usadas em geradores eólicos *offshore* ainda são novidades no setor nacional. Atualmente o Brasil não possui parques eólicos *offshore*, tecnologia que no continente Europeu vem sendo usada desde 1991 na inauguração do primeiro parque eólico *offshore*, o VINDEBY na Dinamarca.

Portanto o objetivo desse trabalho é elencar e analisar o desenvolvimento dessa tecnologia ainda em crescimento e averiguar a viabilidade de implantação de novas fontes de geração energética no Brasil, especificamente a eólica *offshore*.

1.1 Estruturação do Trabalho

O capítulo 2 descreve o desenvolvimento histórico da energia eólica no mundo, os primeiros indícios da tecnologia nos primórdios, e uma análise dos recursos eólicos presente no Brasil.

O capítulo 3 dispõe dos mecanismos e sistemas essenciais em um gerador eólico *offshore*, os tipos de fundações, sistemas de transmissão com suas topologias e um breve descritivo do Sistema Interligado Nacional.

O capítulo 4 relaciona os diversos fatores que levam a decisão quanto a viabilidade da implantação de um parque eólico em alto mar no Brasil. Esse capítulo explica o que é o PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, seus resultados e importância, o EIA - Estudo de Impacto Ambiental e RIMA - Relatório de Impacto Ambiental no qual são aplicados a projetos com potência instalada igual ou maior que 10 MW, e ainda um estudo financeiro e geográfico.

O capítulo 5 finaliza o trabalho com as conclusões tiradas da pesquisa.

2 FUNDAMENTOS DA ENERGIA EÓLICA

2.1 Desenvolvimento Histórico

A história e a evolução até chegar nos sistemas atuais de geração de energia eólica começaram a muito tempo atrás, datado de 200 a.C. na Pérsia, sistemas pelas quais substituíram a força de trabalho humano e animal gerada por moinhos a roda utilizado principalmente para irrigação de lavouras e moagem de grãos.

Acredita-se que antes da invenção dos cata-ventos na Pérsia, a China, por volta de 2000 a.C. e o Império Babilônico, por volta 1700 a.C. também utilizavam cata-ventos rústicos para irrigação (CHESF-BRASCEP, 1987), (SHEPHERD, 1994). Os geradores eólicos foram frutos do avanço tecnológico da roda d'água, que era limitada apenas a lugares que possuíam condições hídricas adequadas para sua utilização.

Figura 3 - Marcos da Geração de Energia Eólica



FONTE DUTRA, 2001

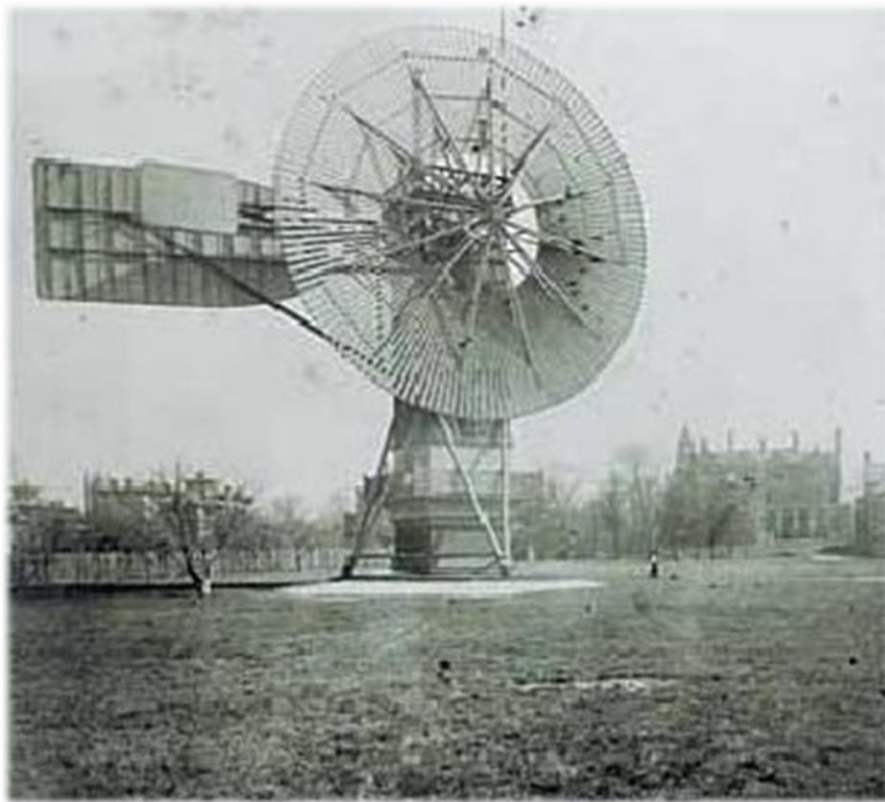
No início do século XVII, com o crescimento dos feudos, os cata-ventos eólicos se tornaram cada vez mais fortes, tanto é que se tinha leis que impossibilitava o plantio de árvores no seus arredores, e ainda, impediam que os camponeses do feudo obtivessem cata-ventos próprios, sendo assim, apenas os senhores feudais podiam ter cata-ventos.

Além das aplicações no campo, os cata-ventos tiveram grande importância na drenagem de água em terras de níveis inferiores ao mar e aos rios, um exemplo foi a

região de Beemster Polder, onde foi utilizado 26 cata-ventos para drenar águas em terras a 3 m abaixo do nível do mar.

Seu declínio começou logo após a revolução industrial, com o surgimento das máquinas a vapor que tinha mobilidade e versatilidade muito maior que os moinhos eólicos fazendo com que aos poucos tornassem obsoletos. Por conta desse fato histórico, foi criado na Holanda em 1923 uma sociedade com o propósito de resguardar e conservar os moinhos que ainda existiam.

Figura 4 - Gerador Eólico de Charles F. Brunch



Fonte: SPERA, 1994

O período pela qual os moinhos de vento começaram a ser transformado em geradores eólicos foi no final do século XIX mais especificamente no ano de 1888, construído por Charles F. Brush como mostra a Figura 4, o primeiro gerador eólico produzia 12 kW em corrente contínua, alimentando um banco de baterias que era utilizado para energizar um total de 350 lâmpadas incandescentes.

Com avanço da exploração do petróleo e com o desenvolvimento de usinas termelétricas, os geradores eólicos ficaram apenas como base de estudo pelo fato de

não ser viável financeiramente, até chegar às grandes guerras mundiais, na qual se consumia muita energia e derivados de petróleo. Nesse momento se desenvolveu diversas tecnologias que possibilitaram chegar até no que nós temos nos dias atuais.

2.2 Potência Extraída do Vento e a Meteorologia

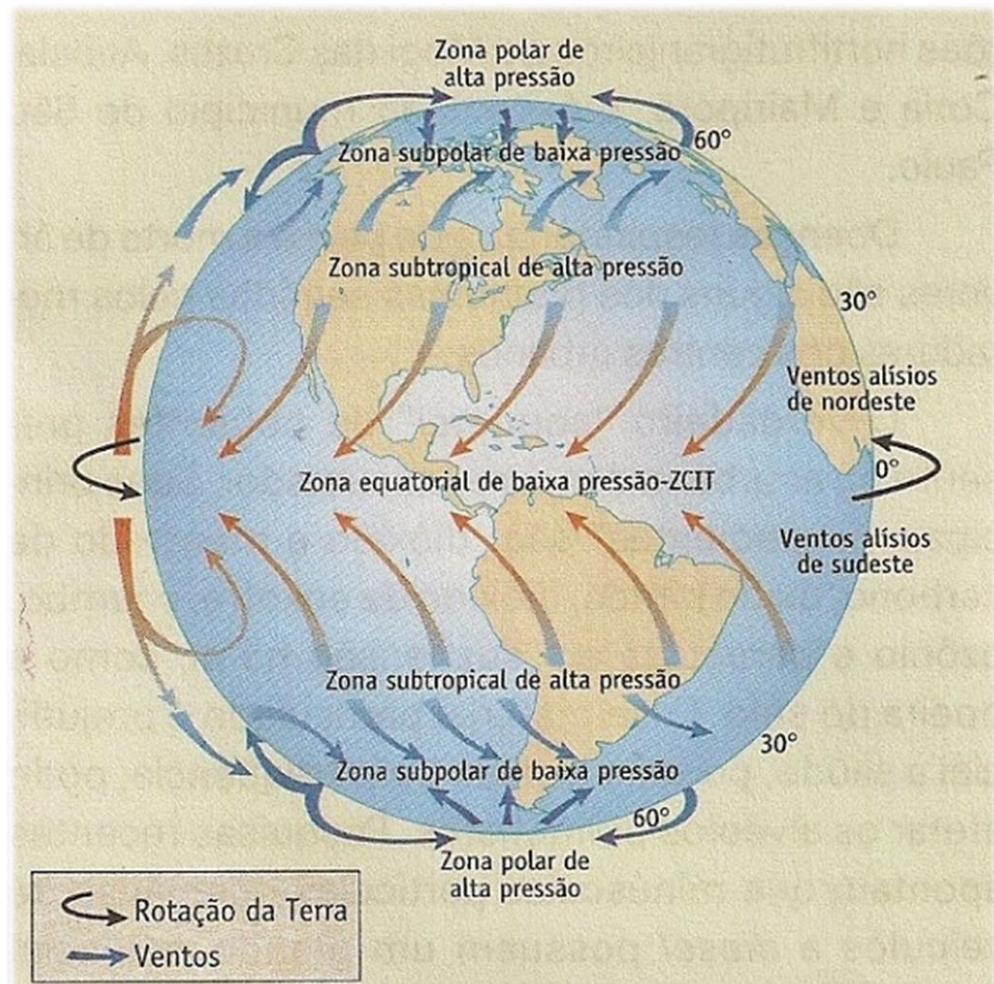
Para que venhamos conhecer as características básicas quanto ao potencial eólico Brasileiro precisamos aprofundar um pouco sobre o comportamento dos ventos. A circulação dos ventos oceânicos acontece pela relação de baixa e alta pressão que estão vinculadas as regiões frias do planeta, polo Norte e Sul, e as zonas tropicais próximas a linha do Equador. Essa diferença de pressão é resultado principalmente do grau de incidência dos raios solares no planeta. Devido a terra ser redonda, os raios que caem próximo a linha do Equador são perpendiculares a terra, ocorrendo uma melhor absorção, em contrapartida, os que caem nas regiões polares do planeta tendem a ser oblíquos, onde a incidência dos raios é menor, resultando nas regiões mais frias do planeta. Vale ressaltar que além do fator de distribuição dos raios solares na superfície do planeta, existem ainda outros tais que podem influenciar no regime dos ventos, como a rotação e translação da terra e os diferentes períodos do ano ocasionados pela inclinação do planeta.

Para aprofundarmos mais neste tema, precisamos de alguns conhecimentos básicos quanto a formação de massas de vento. Segundo o estudioso Buys Ballot (1ª Lei da Circulação Atmosférica), os fluxos de ventos sempre se originam das regiões com alta pressão, os chamados anticiclones, soprando em direção as baixas pressões, que são os ciclones, e esse fenômeno acontece por conta da diferença da temperatura, gerando um ciclo vicioso. Um segundo ponto observado por Stephenson (2ª Lei da Circulação Atmosférica), é que a velocidade dos ventos em uma determinada massa de ar depende diretamente da diferença de pressão do anticiclone e do ciclone, sendo que quanto maior essa diferença maior será a velocidade dos ventos na massa de ar.

No Brasil incidem predominantemente os ventos alísios, de natureza constante, por conta de ser um país Equatorial. Os ventos alísios incidentes no Brasil são formados nas regiões de alta pressão da zona subtropical (Trópicos de Câncer e de

Capricórnio) e sopram até a zona equatorial (linha do Equador) que é de baixa pressão conforme a figura 5.

Figura 5 - O Fluxo e a Movimentação das Massas de ar Terrestres

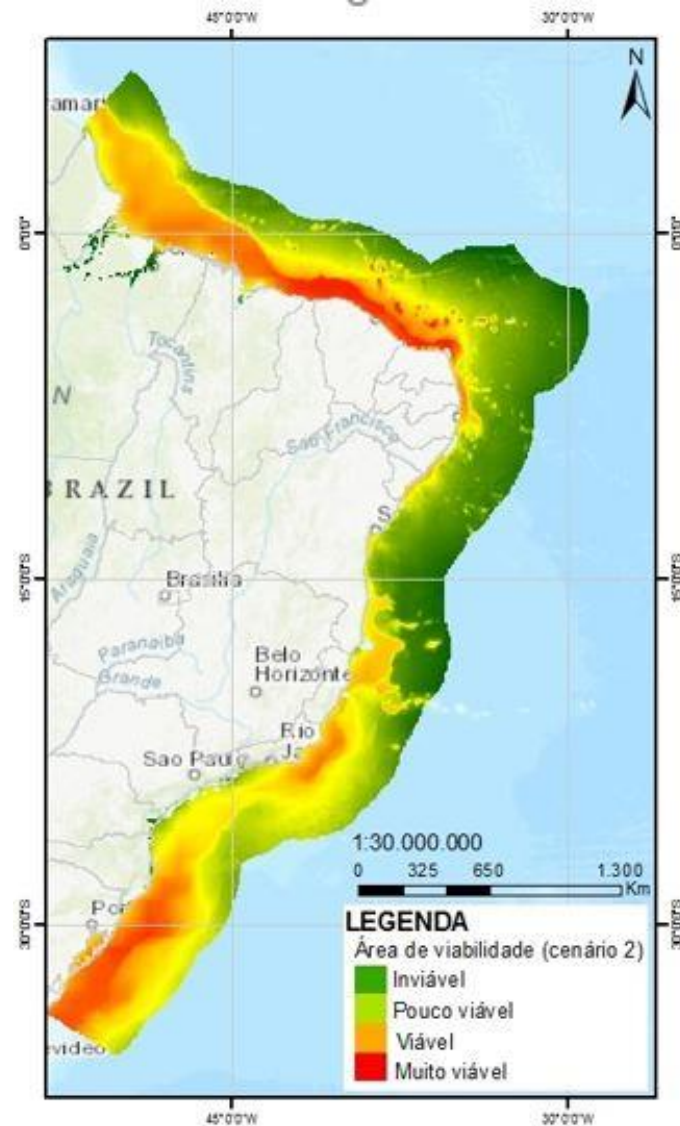


Fonte: Atlante geográfico metódico de Agostini, Novara, Instituto Geográfico de Agostini, 1996.

Durante o seu deslocamento, por conta da rotação da terra, acabam tomando forma arredondada sendo no hemisfério norte no sentido horário e no hemisfério sul no sentido anti-horário. Ao chegar próximo a linha do Equador, os ventos alísios são aquecidos se tornando menos densos e retornando as Zonas Subtropicais em altitudes elevadas, e são conhecidos como os contra-alísios. É por conta dos ventos alísios que a região Nordeste do Brasil possui grande potencial eólico.

De acordo com estudos meteorológicos, a velocidade média dos ventos ideal para que se obtenha energia eólica é por volta de 7,5 m/s a 50 m de altura.

Figura 6 – Viabilidade de geração energética em alto mar



Fonte: Instituto Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte (IFRN), 2018.

Sendo assim, analisando a figura 6 podemos destacar como locais propícios a geração de energia sob a perspectiva do estudo dos ventos o litoral do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco para a região Nordeste, na região litorânea entre Rio de Janeiro e Espírito Santo no Sudeste, e no Sul, nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Dentre essas regiões citadas destaque se o Nordeste, que hoje possui o maior potencial eólico do país.

3 PARQUE EÓLICO E SEUS COMPONENTES

Os parques eólicos são um conjunto de turbinas instalados em uma malha local, com uma subestação para conectar com o SIN - Sistema Integrado Nacional e realizar o acoplamento de diferentes linhas, a linha geradora com a de transmissão ou subtransmissão, no caso dos parques eólicos marítimos também conhecido por *offshore wind farm*, as turbinas são instaladas no mar próximo a região costeira, esse método apresenta diversas vantagens em relação aos parques eólicos em terra firme.

Sua consolidação no mercado Europeu ocorreu por meados dos anos de 1990, e sua evolução se tornou efetiva principalmente por conta de políticas governamentais que tinham como objetivo desenvolver formas de diversificar as matrizes energéticas. Isso refletiu em um grande crescimento de quase 400% dentro do período de 2001 na qual a capacidade energética mundial era de 23,9 GW passando para 486,7 GW em 2016 (GWEG, 2017)

A utilização dos parques *offshore* foi desenvolvida quando os sistemas *onshore* atingiu o seu auge a ponto de reduzir os lugares no qual se pudesse implantar sistemas *onshore*, e pela capacidade de se ter torres mais altas com capacidade de geração maior em comparação aos sistemas *onshore*.

3.1 Nacele

A nacele é uma carenagem feita de materiais leves e resistentes como alumínio, fibra de carbono, sendo mais comum o uso da fibra de vidro, devido ao seu custo benefício. A fibra de vidro é de fácil produção e custo relativamente baixo comparado aos outros materiais de alta tecnologia, ela possui características de material isolante e não corrosivo que se mostra importante para estruturas construídos a céu aberto.

A nacele abriga todos os mecanismos da turbina, como a caixa de engrenagens, eixo de baixa e alta velocidade, instrumentos de medição, gerador, sistema de freio, rolamentos, sistema de guinada e painéis elétricos. A nacele protege

esses elementos contra intempéries e possui design aerodinâmico para reduzir o arrasto e a turbulência do vento que por ela passa.

Figura 7 - Principais componentes de uma Turbina Eólica



Fonte: Max Marduke, 2018

A nacele no caso das turbinas eólicas instaladas no mar também conhecidas por *offshore wind turbine* abriga uma estrutura adicional chamada heliponto, nela é possível o rápido transporte de equipes de manutenção e pequenos e leves componentes, também é utilizada para evacuação em casos de emergência, alguns modelos de turbinas de alta capacidade de produção elétrica possuem uma torre resfriadora com líquido refrigerante para caixa de engrenagens.

3.2 Mecanismo de Inclinação do ângulo das pás

Devido ao fato de os ventos serem um fenômeno natural muito variável, mudando constantemente sua velocidade em um curto espaço de tempo, torna-se necessário o uso de mecanismos para adequar a velocidade do rotor, através da mudança do ângulo das pás em relação ao vento, o mecanismo de inclinação de pás.

Com a variação da velocidade do vento e em alguns casos tendo uma taxa de variação muito grande, é indispensável o uso de um mecanismo para estabilizar as rotações por minuto do rotor e proteger as pás e o rotor contra eventuais avarias devido ao excesso de velocidade formando o fenômeno da força centrípeta fazendo com que as pás atinjam um ponto crítico de ruptura.

Figura 8 - Mecanismo do ângulo das pás



FONTE: <https://www.geograph.org.uk/photo/754033>, taken 6 April 2008, autor Paul Anderson / Interior of the hub of Turbine No 3 / CC BY-SA 2.0.

O mecanismo de inclinação de pás é orientado pelo sensor tipo anemógrafo instalado na parte superior da carenagem da turbina, o controlador utiliza as medições da velocidade do vento e através do processamento de dados comanda a variação do

ângulo das pás para obter o melhor aproveitamento disponível para aquela velocidade de vento, esse mecanismo também é utilizado como forma de proteção para velocidade excessiva no rotor e também para falhas mecânicas, retraindo o ângulo de ataque e diminuindo consideravelmente o arrasto das pás.

A figura 8 mostra a parte mecânica do mecanismo de mudança de ângulo das pás, nela é possível observar os motores acoplados com seus redutores e seus pinhões conectados com a engrenagem tipo anel das pás. Também é possível observar os painéis elétricos de controle dos motores, todos abrigados na estrutura chamada HUB, conectada por parafusos ao eixo principal de baixa velocidade, no qual além de unir as pás e seus mecanismos de controle, transfere a energia mecânica à caixa de engrenagens através do eixo principal, revestida por uma carenagem de fibra de vidro para tornar mais aerodinâmico protegendo contra as intempéries.

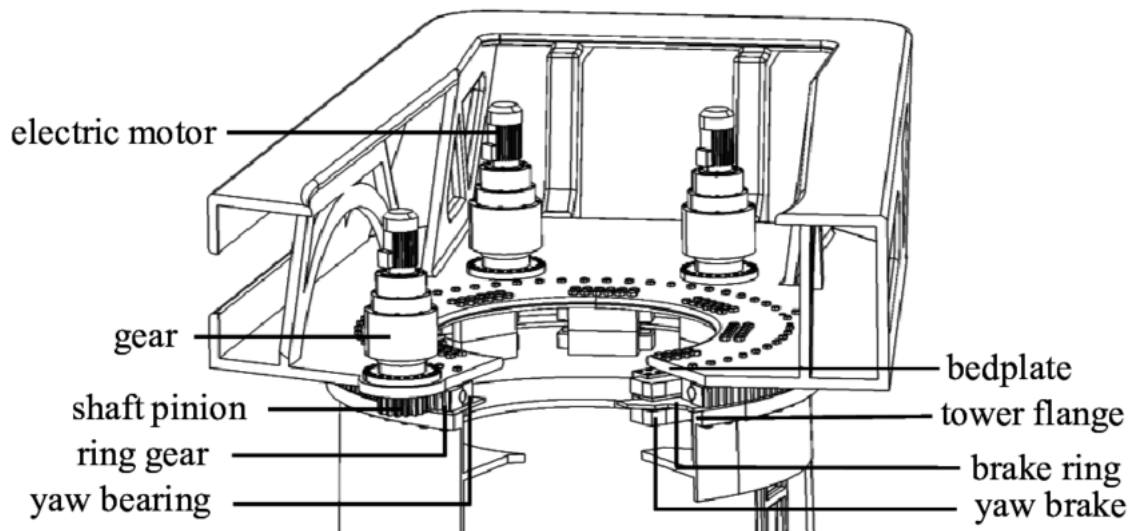
3.3 Mecanismo de Guinada

Devido ao fato de os ventos serem um fenômeno natural muito variável, mudando constantemente sua direção inúmeras vezes ao dia, torna-se necessário o uso de mecanismos para a adequação da orientação em relação às pás da turbina, o mecanismo de guinada.

O mecanismo de guinada também conhecido como *Yaw mechanism* opera mudando o ângulo de guinada da turbina, a rotacionando para posicionar o rotor em paralelo com a direção do vento, podendo assim obter-se um melhor aproveitamento da energia eólica em comparação com um ângulo obtuso, agudo ou reto em relação a direção do vento.

A figura 9 é uma ilustração da parte Mecânica do Mecanismo de guinada, nela podemos observar os motoredutores com seus pinhões acoplados na engrenagem tipo anel localizada na haste de suporte da turbina, os rolamentos unem a nacele à haste e permitem sua rotação, e o conjunto de travas a mantem em posição.

Figura 9 - Mecanismo de Guinada



Fonte: Kim, M-G & H Dalhoff, P. (2014). Yaw Systems for wind turbines ? Overview of concepts, current challenges and design methods. *Journal of Physics: Conference Series*. 524. 012086. 10.1088/1742-6596/524/1/012086. (CreativeCommons by 3.0)

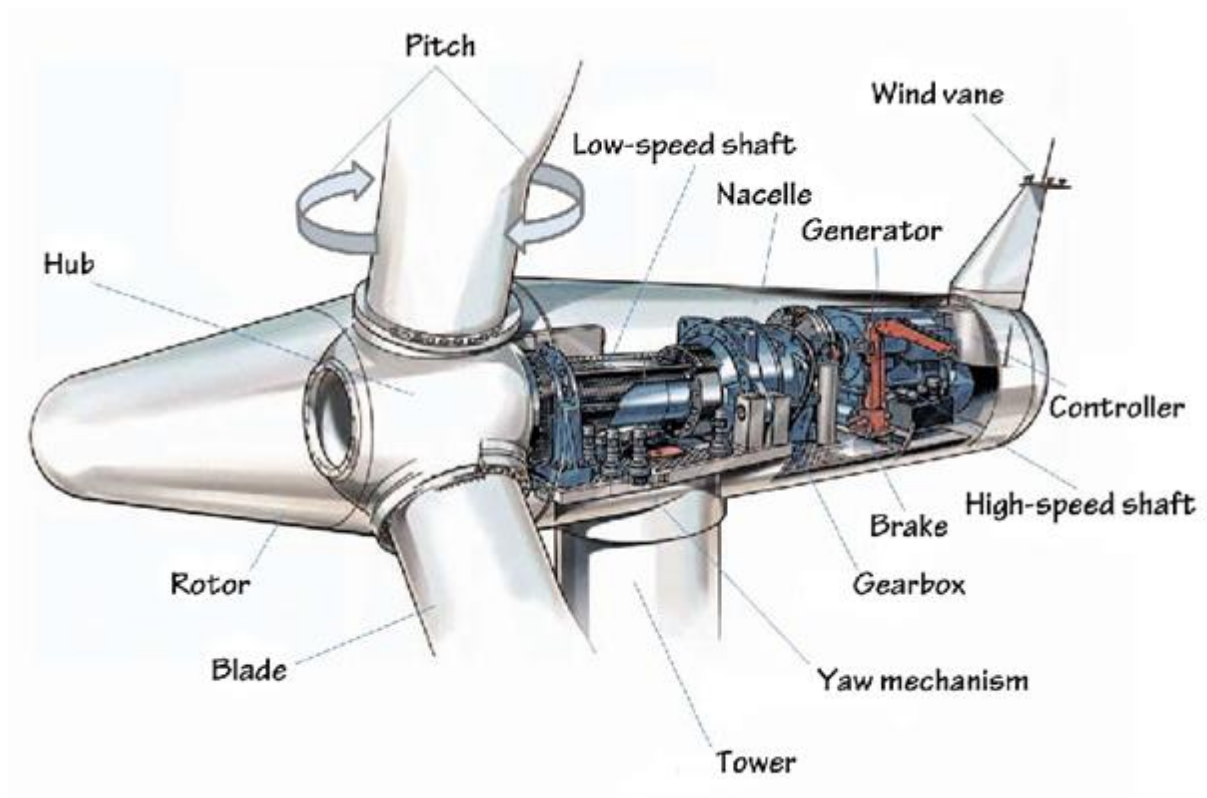
O mecanismo de guinada é orientado através de um sensor do tipo anemógrafo, esse sensor mede e registra continuamente a velocidade do vento e sua direção. Ele é instalado na parte superior da carenagem da turbina, conhecida como nacele, os dados adquiridos pelo sensor são processados pelo controlador local da turbina que também são registrados e armazenados para estudos posteriores e indicadores de produtividade. O controlador da turbina comanda o acionamento do motor, ditando seu sentido de rotação e a posição de parada para orientar a turbina na posição adequada. As travas de posição do mecanismo de guinada mantêm a turbina na posição.

3.4 Eixo de Transmissão e Caixa de Engrenagens

A energia dos ventos é convertida em energia mecânica pelas pás da turbina eólica, essa energia é transmitida do cubo da turbina para a caixa de engrenagens através de um Eixo principal, de baixa velocidade e altíssimo torque, a caixa de engrenagens no caso das turbinas eólicas tem a função de aumentar a rotação de saída em relação à rotação de entrada com base em uma relação conhecida sendo

que a rotação de saída da caixa de engrenagens é bem alta quando comparada com a entrada, ideal para o aproveitamento do gerador.

Figura 10 - Eixo de Transmissão e caixa de engrenagens



FONTE: Center on Globalization, Governance, and Competitiveness, Duke University

Na figura 10 é possível observar o cubo (*Hub*) conectado com o eixo principal de baixa velocidade (*Low Speed Shaft*) acoplado à caixa de engrenagens (*Gearbox*) que por sua vez, sua saída é conectada ao eixo de alta velocidade (*High Speed Shaft*) e finalmente conectado ao Gerador, que pode ser de Corrente Alternada ou Corrente Contínua. O sistema de freio do eixo de transmissão é instalado na parte de baixa velocidade, ele é utilizado em casos de manutenção ou anomalias.

Figura 11 - Eixo de Transmissão, caixa de engrenagens e Disco de Freio



*Fonte : Paul Anderson / Gearbox , Rotor Shaft and Disk Brake Assembly for
Turbine No 3 / CC BY-SA 2.0*

A Figura 11 corresponde a uma foto da turbina eólica fabricada pela companhia NORDEX, com altura total de 100 Metros, instalada no Reino Unido, nela é possível visualizar o acoplador do *HUB*, o eixo de baixa rotação, a caixa de engrenagem e o disco de freio.

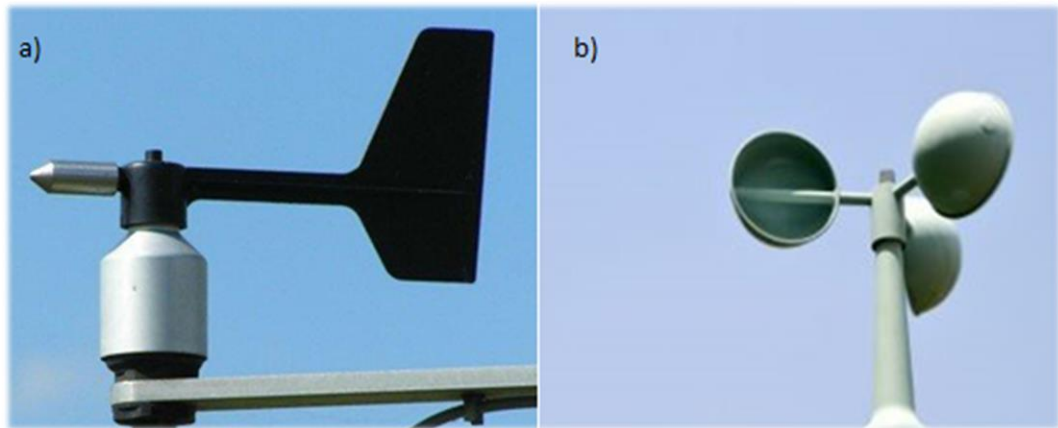
3.5 Sensores

Duas grandezas importantes para operação dos geradores eólicos são a velocidade do vento e sua direção. Essas duas grandezas são primordiais para a segurança dos geradores em situações atípicas como em caso de tempestade e para o máximo aproveitamento. Para a coleta de dados dos ventos é utilizado sensores que são chamados de anemômetros.

Existe basicamente dois tipos como mostra a figura 12, os de interação mecânica e os que utilizam ondas eletromagnéticas para a aferição. Os sensores

mecânicos, a microturbina que aferi velocidade e a biruta que aferi o sentido do vento são formadas por mecanismos ópticos e usualmente ficam localizados na parte de trás do nacele.

Figura 12 - a) Biruta; b) Microturbina



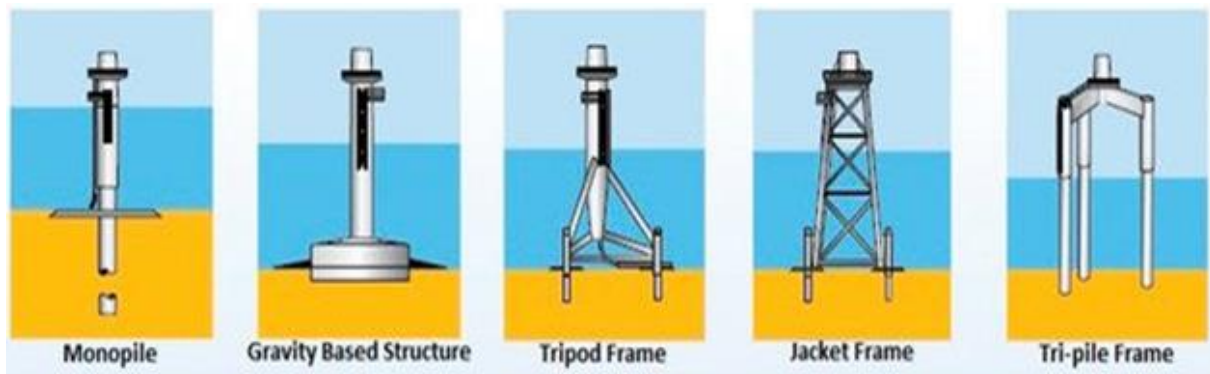
FONTE: Portal Energia (PEDRO REIS, 2019)

Já os ultrassônicos, que utilizam ondas eletromagnéticas são mais sensíveis e confiáveis, porém são muito mais caros. Eles possuem uma tecnologia que aferi de forma tridimensional.

3.6 Tipos de Fundação

A função da fundação é garantir a estabilidade da turbina para uma segura operação, evitar deslocamentos de posição por conta das marés, ventos e tormentas marítimas, como ressaca do mar, rajadas de vento de alta velocidade e manter em posição mesmo com o deslocamento do leito oceânico.

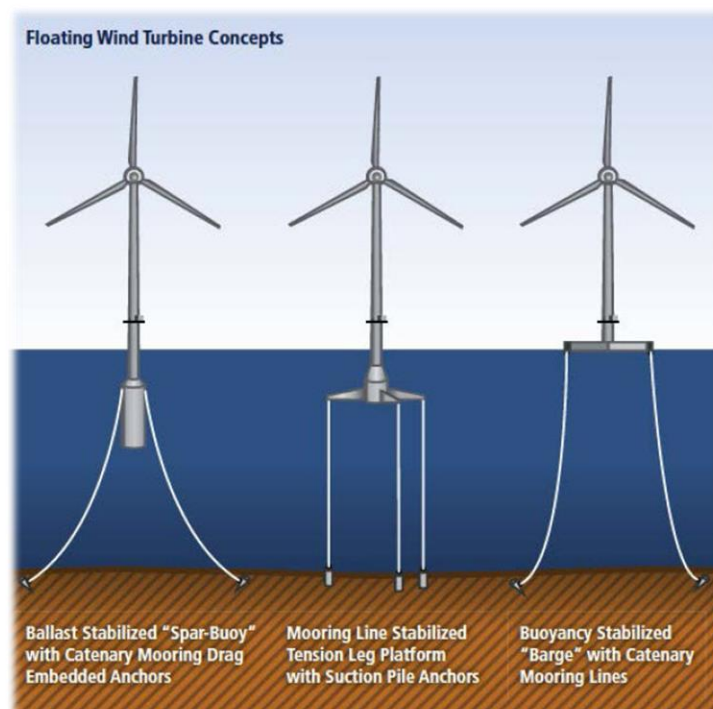
Figura 13 - Tipos de Fundações Fixas



Fonte: MDPI and ACS Style. Luengo Frades, J.; Negro, V.; García Barba, J.; Martín-Antón, M.; López-Gutiérrez, J.S.; Esteban, M.D.; Moreno Blasco, L.J. Preliminary Design for Wave Run-Up in Offshore Wind Farms: Comparison between Theoretical Models and Physical Model Tests. *Energies* 2019, 12, 492.

Existem diversos tipos de Fundações, a fundação é escolhida através da análise da distância da costa, profundidade do leito, tipo de sedimento do qual o leito é constituído e as características da turbina, como altura, peso e resistência aerodinâmica, sendo as fundações classificadas em dois grupos, os Fixos (figura 13) e os Flutuantes (figura 14).

Figura 14 - Tipos de Fundação Flutuantes



Fonte: IPCC 2012, Figure 7.19

3.7 Transmissão

O sistema de Transmissão tem a função de transmitir a potência gerada para a linha de transmissão que por sua vez transmite para os centros consumidores. Diversas etapas devem ser respeitadas para a correta transmissão, como adequação da tensão das linhas, casamento de impedâncias e a ligação com o SIN - sistema interligado nacional.

Os parques eólicos possuem necessariamente duas ou mais subestações de transformação, sendo uma delas obrigatoriamente em terra firme para a conexão da potência com a linha de transmissão.

Existem diversas topologias de ligação das turbinas eólicas com a subestação marítima, cada topologia apresenta suas vantagens e desvantagens. A topologia adotada também é relevante para a comunicação de dados da turbina com sistemas supervisores, sistemas de proteção e instrumentos de medição.

3.7.1 Comunicação de Dados

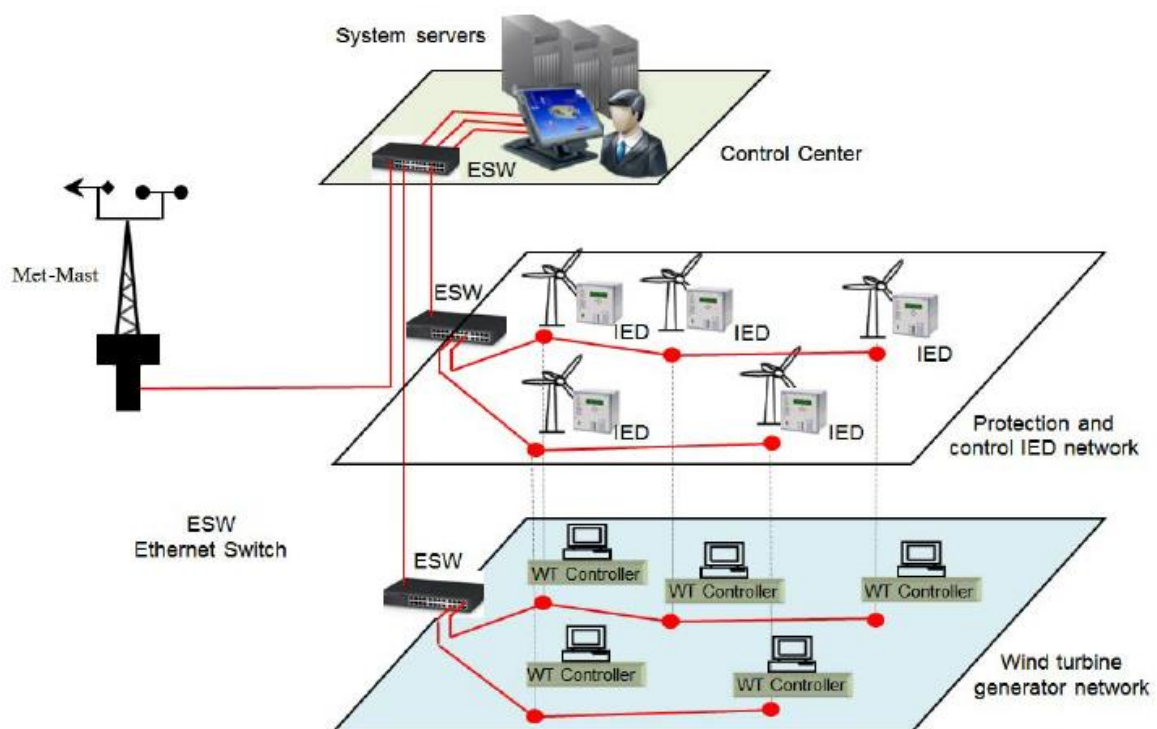
A comunicação de dados é parte vital para o funcionamento e planejamento de rotinas de manutenção e projeto de futuros parques eólicos, os dados são produzidos por sensores e equipamentos de controle. Os dados possuem diversas finalidades, dentre elas:

- **Planejamento da Manutenção:** Através de dados coletados por sensores e outros equipamentos é possível identificar uma falha ou um defeito, a quantidade de horas em funcionamento dos equipamentos e realizar um plano de manutenção preventiva do tipo MTBF, Tempo médio entre falhas.
- **Controladores:** Os controladores utilizam os dados provenientes dos sensores para realizar a orientação de mecanismos para obter a máxima capacidade de produção disponível, como exemplo temos o mecanismo de guinada que utiliza a informação da direção do vento, e também mecanismo de inclinação do

ângulo das pás que utiliza a velocidade do vento como parâmetro de orientação.

- Supervisão e Controle: É possível monitorar em tempo real a situação das turbinas, verificar a sinalização de falhas, potência produzida em tempo real, medição dos instrumentos, efetuar o religamento remoto da turbina ou dos dispositivos de proteção.
- Controle dos Equipamentos de Proteção: Os relés utilizam a rede para efetuar a comunicação com equipamentos de proteção como disjuntores.

Figura 15 - Rede de Comunicação de Dados



Fonte: A. Ahmed, Mohamed. (2014). Hierarchical Communication Network Architectures for Offshore Wind Power Farms. Energies. volume 7. 3420-3437. 10.3390/en7053420.

A figura 15 mostra o sistema de comunicação de dados de um parque eólico. Nessa figura é mostrado apenas um instrumento de medição da velocidade e direção do vento para todas as turbinas, sendo que no modelo proposto esse sistema é

descentralizado, cada turbina deverá apresentar seu próprio instrumento de medição com a finalidade de aumentar a confiabilidade e reduzir possíveis impactos no caso de uma falha. Ela também exemplifica a ligação dos relés, instrumentos de medição, controladores e a supervisão de uma central de controle.

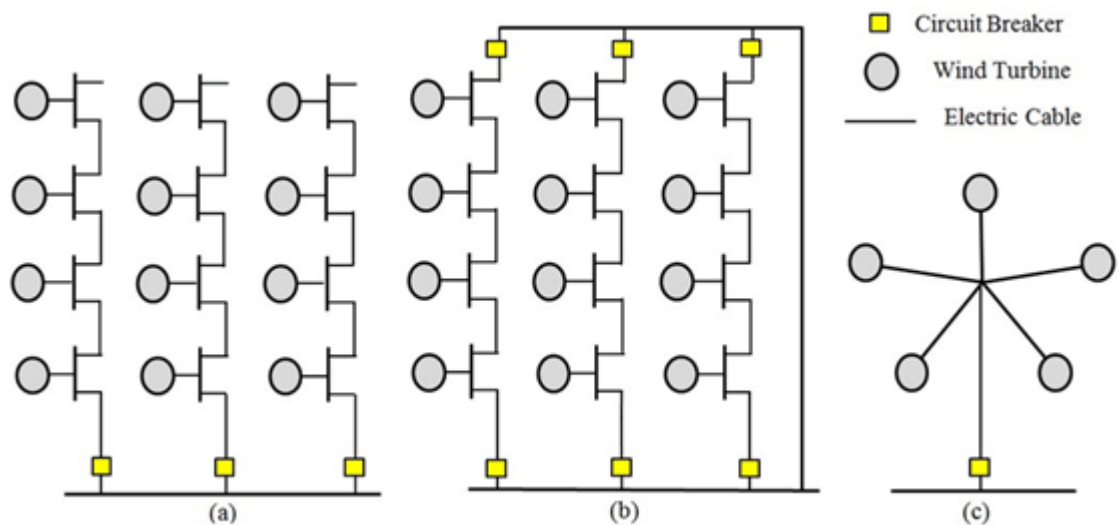
3.7.2 Topologia de Transmissão

A topologia de transmissão é a forma como ligação elétrica das turbinas é associada com a subestação marítima, cada topologia possui sua vantagem e desvantagem, devendo ser avaliado a quantidade de dispositivos geradores que devem ser associados, a posição geográfica das turbinas e a consequência de um eventual rompimento de cabo e seus prejuízos. Os tipos mais comuns utilizados são:

- **Topologia em Estrela:** Cada turbina é conectada individualmente com a subestação, esse modelo de ligação apresenta um alto custo de implementação e no caso de falha apenas uma unidade geradora é isolada, diminuindo o impacto na capacidade de produção.
- **Topologia em Estrela Estendida:** Esse método consiste na associação do tipo estrela com o hierárquico, existindo várias ramificações da subestação cada uma com um grupo de unidades geradoras, apresenta um custo de implementação intermediário e no caso de falha isola um grupo de geradores. Apresenta um impacto médio na capacidade de produção.
- **Topologia Hierárquica:** Esse método é similar as ramificações de uma árvore, apresenta um custo de implantação intermediário e as falhas possuem graus diferentes de impacto, quanto mais perto da base maior o impacto.
- **Radial:** Muito similar a estrela, porém com um grupo de geradores conectados em série ou paralelo em mesmo barramento. Apresenta custo médio de implementação e no caso de falhas isola um grupo de geradores, tendo médio impacto na capacidade produtiva.

- Radial Paralela: Um grupo de geradores é conectado em série ou paralelo com um barramento secundário, que por sua vez está conectado com o barramento principal, apresenta um médio custo de implementação e em caso de falha um grupo de geradores é isolado. Apresenta também um médio impacto na capacidade de geração.

Figura 16 - Tipos de Topologia de Transmissão



Fonte: A. Ahmed, Mohamed. (2017). Communication Network Architectures for Southwest Offshore Wind Farm. The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences. 42. 1-10. 10.7840/kics.2017.42.1.88.

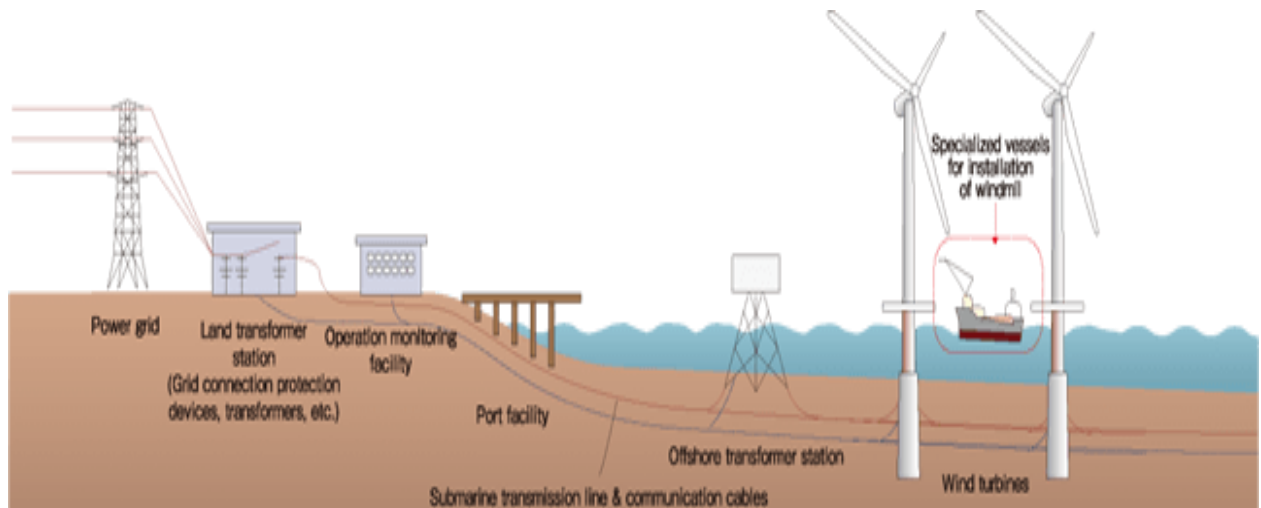
A figura 16 mostra três modelos de topologia comumente utilizados em parques eólicos, o Item (a) mostra a topologia Radial, o Item (b) mostra a topologia Radial Paralela e o item (c) mostra a topologia Estrela.

3.7.3 Subestação

A subestação tem por finalidade conectar e transmitir a potência de duas linhas diferentes, uma linha de entrada e outra de saída, elevando ou reduzindo a tensão conforme o projeto, no caso dos parques eólicos e outros sistemas de geração é mais comum o emprego de subestações elevatórias, casando a potência da carga geradora com a linha de transmissão que distribui a potência para os centros consumidores.

A figura 17 ilustra a disposição das subestações e sua ligação com a linha de transmissão. No caso dos parques eólicos são necessários duas ou mais subestações, sendo elas divididos em dois grupos:

Figura 17 - Subestações



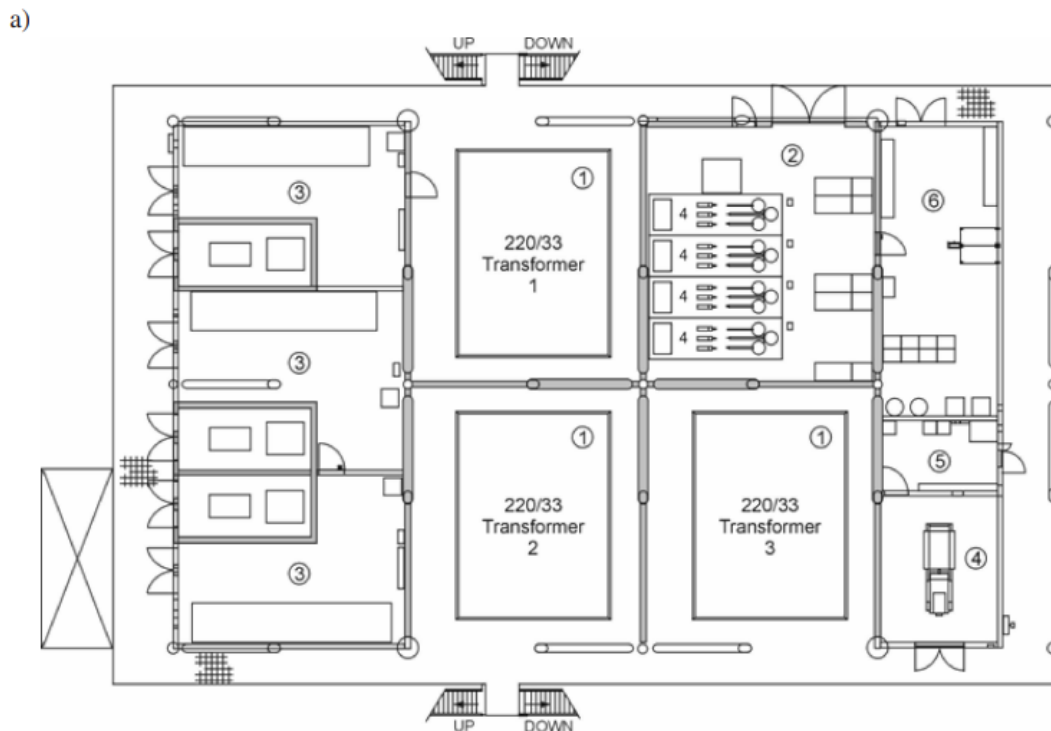
Source: NEDO White Paper on Renewable Energy Technologies, 2nd Edition

Fonte: NEDO White Paper on Renewable Energy Technologies, 2nd Edition, 2010

- Subestação Marítima: A função dela é unificar a energia produzida proveniente dos diversos geradores eólicos ou subestações secundárias e transmitir para a subestação em terra. Ela recebe a potência dos geradores eólicos através de cabos marítimos no qual é transmitida para a subestação em solo seco também por cabos marítimos, a corrente proveniente das turbinas eólicas podem ser tanto HVCA - corrente alternada quanto HVDC - corrente contínua, no caso das subestações HVDC é necessário transformar para corrente alternada para posteriormente adequar a faixa de tensão através da utilização de um transformador. Os principais componentes da subestação marítima são:
 - Transformadores
 - Transformadores auxiliares, utilizados para alimentação elétrica dos instrumentos, no caso dos transformadores de potência, transformar a corrente para uso dos reles e sistemas de medição no caso dos transformadores de corrente.
 - Transformadores de aterramento, no caso de algumas subestações, cria um ponto de aterramento do neutro adicional.

- Painéis elétricos de média e alta tensão isolados a gás.
- Gerador Diesel.
- Resistores de Aterramento, para limitar corrente de curto fase-terra.
- Reatores, introduz uma reatância indutiva na linha que limita a corrente de curto circuito para a faixa de capacidade de interrupção dos disjuntores de alta tensão ou media tensão.
- Filtros de corrente alternada.
- Conversores com sistema de refrigeração, no caso de subestações HVDC.
- Filtros de corrente continua no caso de subestações HVDC.

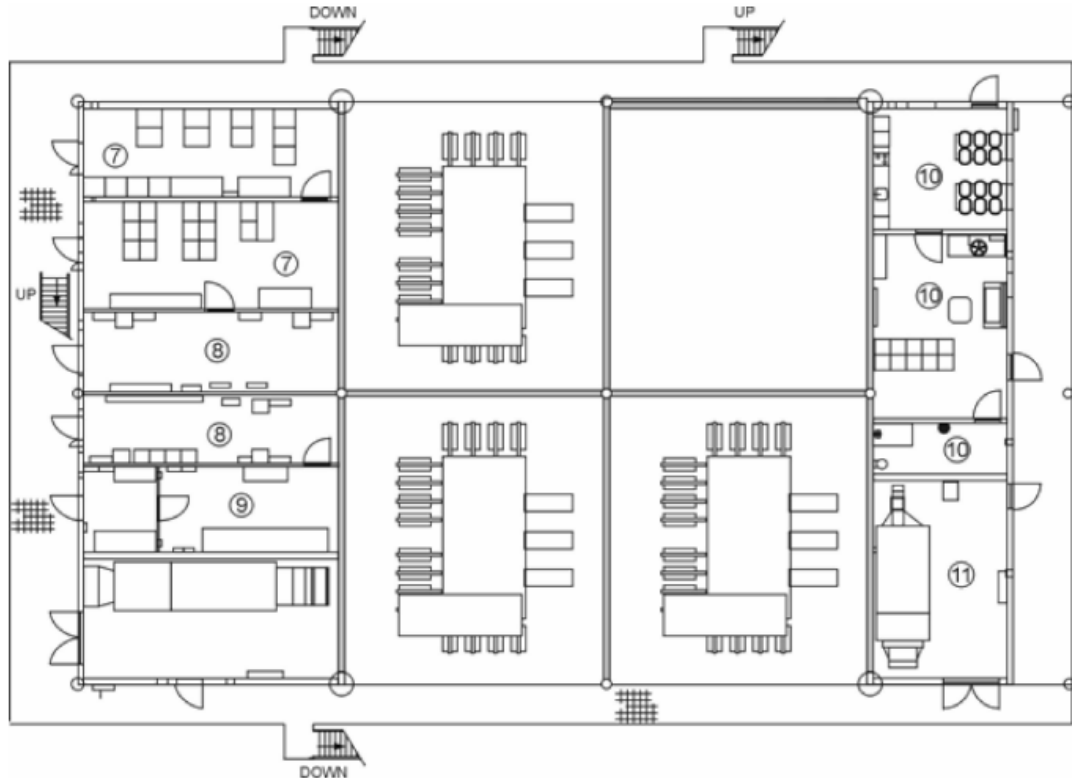
Figura 18 - Subestação offshore andar inferior



Fonte: S. ROBAK and R.M. RACZKOWSKI; Substations for offshore wind farms: a review from the perspective of the needs of the Polish wind energy sector; Electrical Power Engineering Institute, Faculty of Electrical Engineering, Warsaw University of Technology, 75 Koszykowa St., 00-662 Warsaw, Poland.

Figura 19 - Subestação offshore andar superior

b)



Fonte: S. ROBAK and R.M. RACZKOWSKI; Substations for offshore wind farms: a review from the perspective of the needs of the Polish wind energy sector; Electrical Power Engineering Institute, Faculty of Electrical Engineering, Warsaw University of Technology, 75 Koszykowa St., 00-662 Warsaw, Poland.

A figura 18 e 19 exemplifica a planta com vista superior de uma subestação offshore, os ícones a seguir descrevem seus equipamentos ou ambientes.

- o ícone 1 exhibe o transformador de alta tensão.
- o ícone 2 exhibe os painéis elétricos que abrigam os disjuntores e seccionadoras de alta tensão.
- o ícone 3 exhibe os painéis elétricos de média tensão, que abrigam disjuntores e seccionadoras.
- o ícone 4 exhibe o gerador diesel.
- o ícone 5 exhibe os painéis de backup no caso de uma falha dos painéis de média e alta tensão.
- o ícone 6 exhibe uma oficina para reparos e almoxarifado para pequenos itens.

- o ícone 7 exibe o SCADA, o sistema de supervisão, controle e aquisição de dados.
- o ícone 8 exibe os painéis elétricos de baixa tensão, para alimentação da iluminação, ferramentas elétricas.
- o ícone 9 exibe o banco de bateria para alimentação dos reles, iluminação de emergência e acionamentos dos dispositivos de controle.
- o ícone 10 exibe as salas sociais.
- o ícone 11 exibe o sistema de refrigeração e aquecimento da subestação.

Figura 20 - Subestação offshore



Fonte: Wikichops, Offshore 132 KV Substation for Barrow Windfarm, Take on: 29 January 2006, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported

A figura 20 é uma foto tirada da subestação do parque eólico *offshore* Barrow, localizado no Reino Unido.

- Subestação em Solo Seco: Ela recebe a potência da subestação marítima através de cabos marítimos e a transmite para a linha de transmissão através

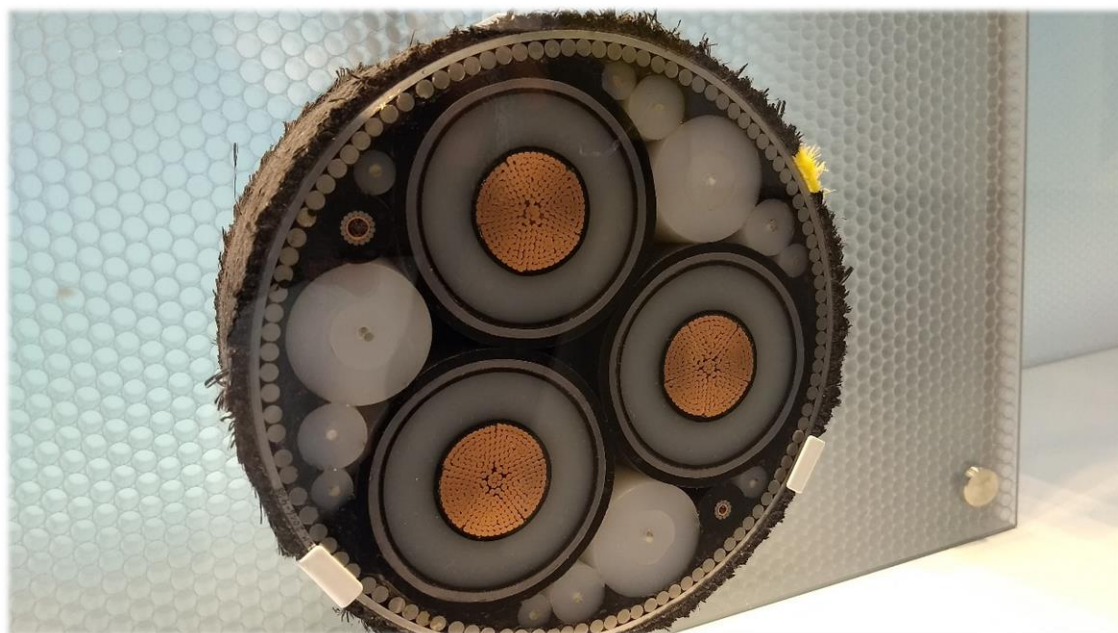
de cabos aéreos, nesse processo a faixa de tensão é adequada conforme a aceitação da linha de transmissão.

3.7.4 Linhas de Transmissão Marítimas

As linhas de Transmissão submarinas são dimensionadas em função da tensão de operação nominal, corrente nominal, corrente de sobrecarga, tensão de isolamento, raio de curvatura do cabo, tipo de isolante e esforço mecânico suportável, tanto tração quanto compressão do cabo.

A figura 21 mostra um cabo submarino trifásico de 150 Kv, nele é possível ser observadas seus condutores de cobre, as múltiplas camadas de diferentes isolantes, a blindagem metálica que envolve todo o cabo e alguns cabos de fibra ótica.

Figura 21 - Corte de um condutor utilizado nas Linhas de Transmissão Marítima



Fonte: Eduardo Sanchez, 9 April 2018, 15:16:44, "Cross section view of a 150 Kv 3-phase submarine power cable. Image captured at Deutsches Museum Munich." licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International.

No projeto da transmissão marítima deve se prever a expansão do parque eólico marítimo e a vida útil do cabo, os cabos de energia marítimos possuem fibras óticas adicionais destinadas a telecomunicações. A fibra ótica é utilizada pelo fato de

não ser sensível a interferências eletromagnéticas, sendo utilizada para aquisição das informações dos sensores da turbina e comunicação dos sistemas de proteção e controle, como relés, sensores de incêndio, entre outros.

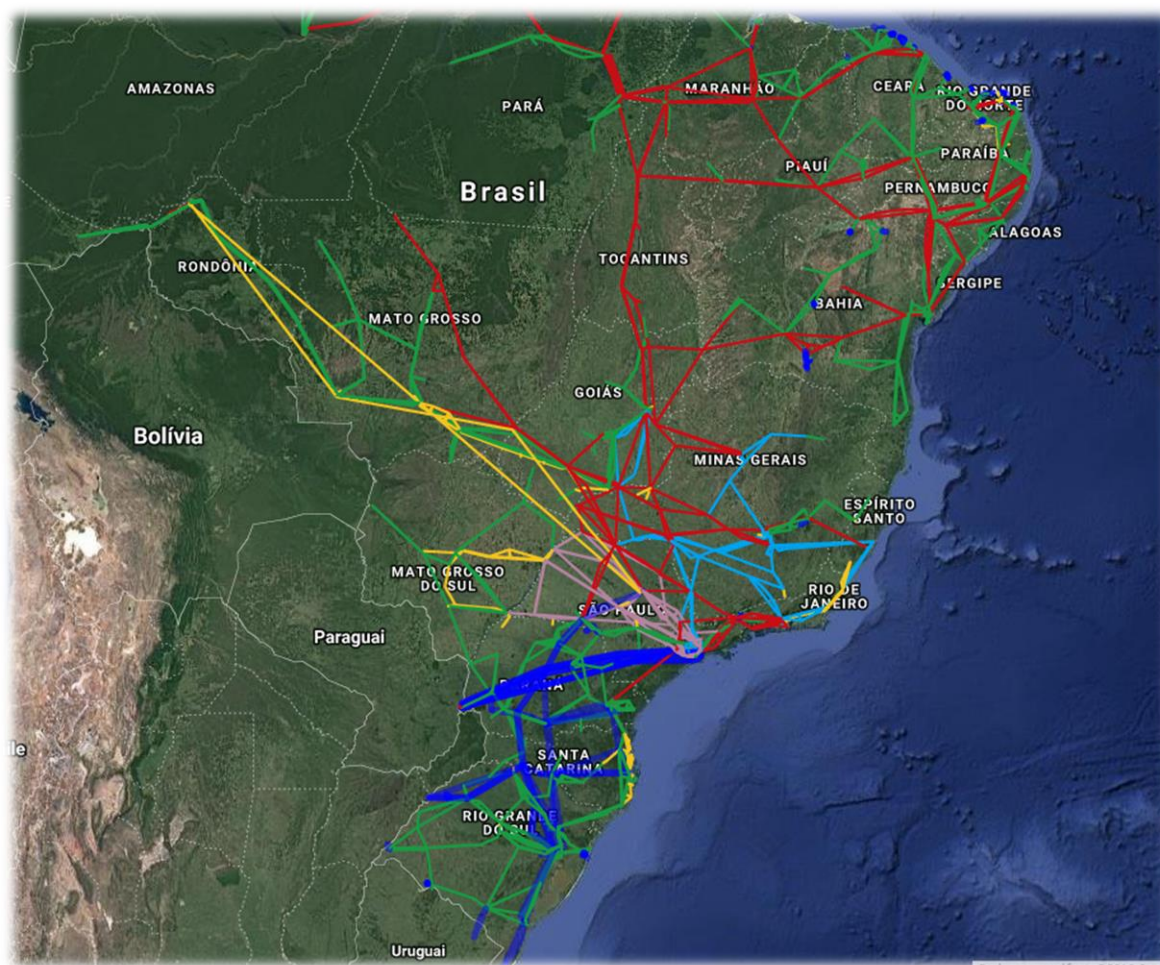
3.7.5 Sistema Interligado Nacional

A malha de geração energética possui diversos proprietários, sendo a grande maioria interconectada no sistema interligado nacional. Devido ao conflito de interesses dos diversos proprietários de centros geradores, torna-se necessário garantir a coordenação e controle do sistema como um todo, mesmo dos sistemas isolados, que não possuem conexão com o SIN.

“O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) e pelo planejamento da operação dos sistemas isolados do país, sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel)”. Segundo o ONS

“A interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, propicia a transferência de energia entre subsistemas, permite a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias. A integração dos recursos de geração e transmissão permite o atendimento ao mercado com segurança e economicidade.” Segundo o ONS

Figura 22 – Mapa das linhas de transmissão



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico, Mapa dinâmico do SIN, consultado em 20/05/2019. Disponível em: <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>

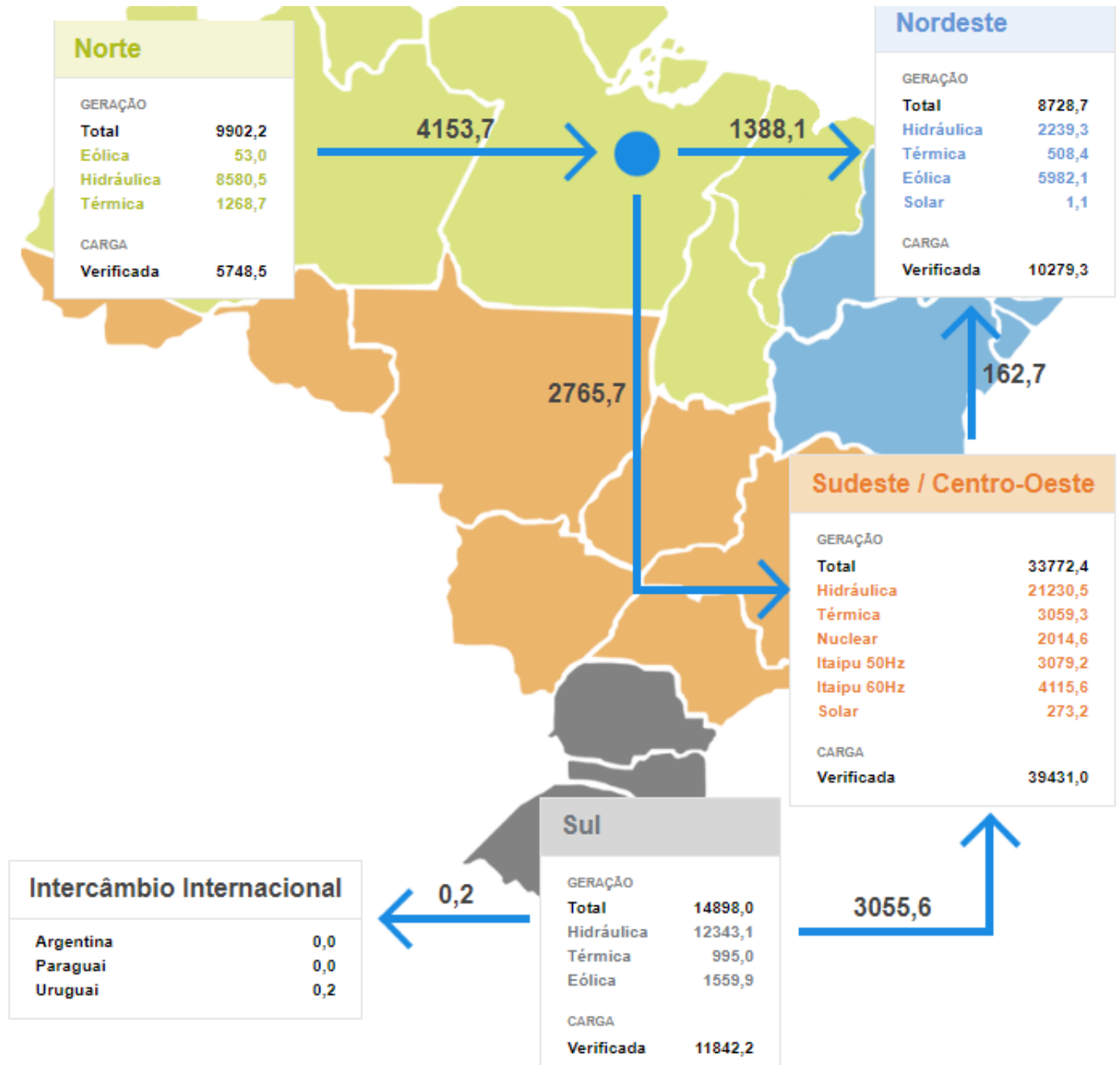
Segundo a ONS, o Sistema Interligado Nacional é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte.” Certas sub-regiões devido a fatores geográficos tem uma produção maior do que o consumo de energia, como exemplo temos a região norte que transfere energia para o subsistema nordeste e Centro-Oeste/Sudeste.

O SIN é dinâmico, constantemente redireciona fluxos de potência para suprir cargas que variam em função do horário e coordena a produção de usinas para atender a carga de maneira estratégica e otimizada.

A figura 22 é uma foto do mapa das linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional, como é possível observar há uma grande quantidade de linhas de transmissão que beiram o litoral na Região Sul/Sudeste e Nordeste, ideal para

aproveitamento para transmissão de potência gerada pelos parques eólicos *onshore* e *offshore*.

Figura 23 - Balanço Energético



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico, Balanço de Energia, consultado em 20/05/2019.
Disponível em: <http://ons.org.br/paginas/energia-agora/balanço-de-energia>

A figura 23 é uma foto da energia agora, balanço energético, ela mostra dinamicamente a carga e geração de cada subsistema e o direcionamento da potência excedente para subsistemas com déficit de geração, como é o caso do subsistema Sudeste/Centro-Oeste.

4 VIABILIDADE PARA IMPLANTAÇÃO NO BRASIL

4.1 Cenário Brasileiro

No Brasil o ramo que sempre teve grande avanço na produção de energia é o setor hidrelétrico, pela nossa riqueza híbrida. Porém, por conta da escassez principalmente na região Nordeste e pela grande variação pluviométrica, o incentivo para diversificação energética se tornou forte no país. Um grande pontapé foi o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de energia elétrica (PROINFA), criado em 2002 pela Lei nº 10.438, teve como objetivo fomentar e regar o crescimento da geração de energia eólica, biomassa e de pequenas centrais hidrelétricas no país. Esse programa trouxe resultados positivos a ponto da energia eólica ter sido o setor que mais expandiu entre 2006 a 2016.

Mesmo com o grande avanço tecnológico mundial na geração de energia eólica e com o desenvolvimento dos parques eólicos *offshore*, o Brasil até o presente momento não possui sistemas *offshore* de geração em funcionamento. E isso não parece ser um problema desencadeado por bloqueios socioambientais visto que cada vez mais tem se falado em geração de energia sustentável com tecnologias que minimizam impactos ambientais e nem muito menos falta de espaço físico já que o Brasil possui aproximadamente 200 milhas marinhas de largura marítima.

Em trabalho elaborado por (BARBIER, 2003), ele relata os três pilares importantes para a economia de um país, o capital humano, capital físico e o capital natural. O capital humano é a capacidade de se ter habilidades, técnicas, conhecimento que são frutos de uma boa base educacional que pode gerar crescimento tecnológico para o país. O capital físico está relacionado com as condições de infraestrutura, arquitetura, tecnologias utilizadas em maquinário de fábricas que formam a base tecnológica do país. E por último e um dos pontos que passa por despercebido é o capital natural, que é contemplado pelas condições hídricas, eólicas, condições do solo, fauna e flora, entre outros recursos que são essenciais para o desenvolvimento econômico.

Esse é uma importante análise partindo do pressuposto que até algumas décadas atrás se tinha destaque econômico apenas países com recursos físicos com

destaque financeiro, que desenvolviam atividades que agrediam os poucos recursos naturais que ainda restavam, e hoje sabemos que as coisas não são bem assim e que o equilíbrio das riquezas do país envolve inclusive recursos naturais coisa que o Brasil tem em relativa abundância. O nosso país é um dos poucos países que é influenciado por 5 massas de ar diferentes, possui também 6 biomas com uma diversidade ecológica impressionante, além dos recursos hídricos que chegam a 12% da reserva de água doce do mundo.

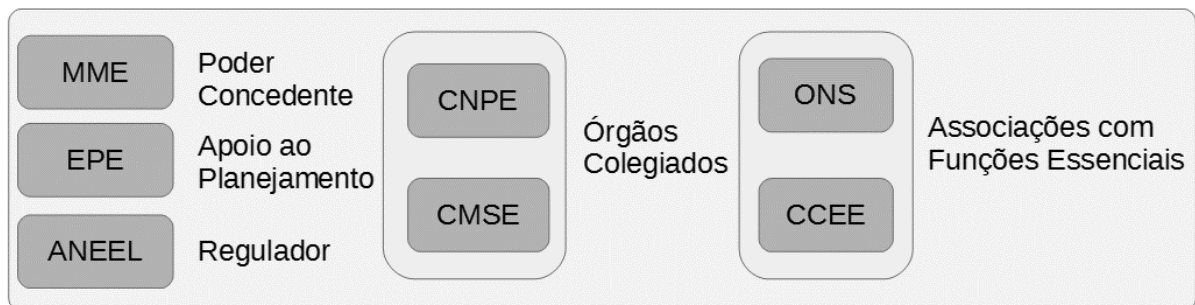
Ao tocante ao desenvolvimento de estratégias no setor energético, o Brasil passou por grandes transformações nas últimas décadas frutos da participação da Política Energética Nacional - PEN que desencadeou formas promissoras de geração de energia. Quando se fala em utilizar recursos naturais para produção de energia logo se pensa nas variações pelas quais esses recursos sofrem ao longo de todo ano. No caso das hidrelétricas o recurso primário é a água que possui seu ciclo anual pluviométrico de acordo com os meses do ano e a região do país, acarretando em variações na geração de energia de acordo com o período do ano. Isso se torna um problema, pois em linhas gerais, existe um equilíbrio no consumo energético durante todo o ano. Sendo assim, umas das soluções para minimizar esse desequilíbrio foi a utilização de fontes eólicas que somam e equilibram sazonalmente o BEN - Balanço Energético Nacional.

Atualmente o potencial eólico *onshore* brasileiro é de aproximadamente 160 GW (Amarante et al., 2001) e o potencial instalado no país é cerca de 7,6 GW (ONS, 2019). Embora o potencial seja alto, boa parte dessa energia eólica disponível não pode ser aproveitada por estar situada em regiões de preservação, regiões já habitadas, ou ainda devido a variação do relevo. Já com os *offshore's*, esses impedimentos não ocorrem, não existem barreiras naturais que possam reduzir o potencial eólico, e ainda possuem condições que favorecem a mitigação dos impactos ambientais tornando muito atrativa.

Em estudo feito por (ORTIZ, 2011), análises feitas do período de 1999 a 2009, utilizando dados obtidos por satélite e processados por *softwares*, concluiu que em alturas marítimas de até 20 m o potencial eólico nos nossos mares é de 176 GW, até 50 m de 399 GW e por fim até 100 m nosso potencial eólico é de 606 GW, números que apontam o quanto é vasto o nosso capital natural.

No Brasil em 1995, foi feito um projeto de RE-SEB - Restruturação do Setor Elétrico Brasileiro, com ele foi organizado toda estrutura básica de geração, transmissão e consumo de energia, além de estabelecer estratégias que pudessem equalizar o balanço energético Brasileiro. Com base nisso foram criadas algumas instituições relacionadas ao setor elétrico que estão expostas na figura 24 e descritas as suas funções.

Figura 24 - Instituições Do Setor Elétrico



Fonte: (LOPES, 2011)

- a) MME: Ministério de Minas e Energia. Órgão derivado da desconcentração administrativa da União. Representa a União na função de Poder Concedente para os atos federais relacionados ao setor energético. Áreas de atuações definidas na Lei nº 10.683/2003, e posteriores alterações;
- b) EPE: Empresa Pública vinculada ao MME. Subsidia o planejamento energético nacional com estudos técnicos. Funções definidas na Lei nº 10.847/2004;
- c) ANEEL: Agência Reguladora vinculada ao MME. Tem a finalidade de regular e fiscalizar a produção³⁹, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. Constituída por meio da Lei nº 9.427/1996;
- d) CNPE: Conselho Nacional de Política Energética. Órgão de assessoramento do Presidente da República, cuja função é formular políticas e diretrizes destinadas a promover o aproveitamento racional dos recursos energéticos do Brasil. Presidido pelo Ministro de Estado de Minas e Energia. Criado pela Lei nº 9.478/1997;

e) CMSE: Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico. Presidido pelo Ministro de Estado de Minas e Energia. Órgão responsável por avaliar permanentemente o suprimento de energia elétrica do Brasil. Criado pela Lei nº 10.848/2004;

f) ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico. Responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no SIN. Criação possibilitada pela Lei nº 9.648/1998, com atribuições ratificadas pelo Decreto nº 5.081/2004; e

g) CCEE: Câmara de Comercialização de Energia. Elétrica Responsável por registrar contratos e transações de compra e venda de energia elétrica e efetuar a contabilização e liquidação financeira das operações realizada no mercado de curto prazo. Substitui o Mercado Atacadista de Energia Elétrica. Criada pela Lei nº 10.848/2004.

4.2 EIA-RIMA

A definição de Impacto Ambiental segundo o CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente no seu Artigo 1º da Resolução n.º 001/86 é: “qualquer alteração das propriedades físicas, químicas, biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que afetem diretamente ou indiretamente:

- A saúde, a segurança, e o bem-estar da população;
- As atividades sociais e econômicas;
- A biota;
- As condições estéticas e sanitárias ambientais;
- A qualidade dos recursos ambientais"

O estudo de impacto ambiental é uma ferramenta utilizada em todo território nacional em determinados empreendimentos afim de minimizar, mitigar ou compensar impactos na fauna, flora, nas relações sociais, econômicas e ambientais. Esse estudo é realizado por uma equipe multidisciplinar habilitada que não tenha interação com

quem está propondo o projeto e que terá total responsabilidade nos resultados apresentados, porém de acordo com a resolução 237/97 do Conama no Art. 11 – “Os estudos necessários ao processo de licenciamento deverão ser realizados por profissionais legalmente habilitados, às expensas do empreendedor”, a equipe portanto dependerá economicamente do empreendedor. Segundo o CONAMA, qualquer projeto com geração de energia elétrica que supere os 10 MW deverá ter o estudo do EIA RIMA na qual tornou-se obrigatório a partir da Constituição Federal de 1988 descrito no artigo 225. A sigla EIA RIMA é entendida por Estudos prévio dos Impactos Ambientais “EIA” e Relatório de Impacto Ambiental “RIMA”, que são feitos para a obtenção da Licença Prévia (LP), Licença de Instalação (LI) e Licença de Funcionamento ou Operação (LF ou LO).

- Licença Prévia (LP): É a primeira licença a ser emitida na fase preliminar das atividades do projeto e tem como caráter decisório quanto a viabilidade da implantação.
- Licença de Instalação (LI): Tem como objetivo autorizar a construção do projeto de acordo com as especificações do projeto.
- Licença de Funcionamento ou de Operação (LF ou LO): Como o nome já diz, retrata a autorização da última parte do projeto já implantado pronto para funcionamento.

4.2.1. EIA

Cronologicamente é feito primeiro o EIA e com base nele é feito o RIMA. O primeiro passo para elaboração do EIA é o diagnostico ambiental profundo da região que será impactada pelo projeto, com ele se poderá fazer um programa de monitoramento futuro para a obtenção de dados quanto ao impacto ambiental. Logo na sequência será feito a análise dos impactos ambientais do projeto, podendo ser positivos ou negativos, temporários ou permanentes, diretos ou indiretos, curto, médio ou longo prazo, reversíveis ou irreversíveis e ainda locais, regionais ou estratégicos prevendo suas possíveis alterações. A próxima etapa feita pela equipe multidisciplinar

do EIA é o estudo afim de minimizar, mitigar ou compensar visando reduzir as alterações feitas pelo projeto. E por último e não menos importante temos os programas monitoramento com a finalidade de avaliar curto, médio e longo prazo as medidas implantadas.

4.2.2. RIMA

Basicamente o RIMA é um relatório que apresenta os dados observados no EIA de forma objetiva e simplificada, de fácil entendimento para a população. O RIMA traz também os objetivos e as justificativas para a implantação e sua relação com os programas governamentais, além do detalhamento do desenvolvimento e implantação do projeto, a mão de obra, matéria prima, prováveis impactos ambientais e socioeconômicos, resíduos, entre outros. E por fim, vale ressaltar que o RIMA precisa descrever as soluções para os impactos negativos provenientes do projeto afim de minimizar, mitigar ou compensar, com programa de acompanhamento e monitoramento desses impactos e com elas apontar a solução mais favorável tanto do ponto de vista econômico, social e ambiental.

Depois de feito o Estudo Prévio de Impacto Ambiental e o Relatório de Impacto Ambiental, a próxima etapa é fazer o cadastro junto a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e pôr fim a elaboração das Licenças Prévias “LP”, Licença de Instalação “LI” e Licença de Operação “LO”.

4.2.3. Métodos de avaliação do Impacto Ambiental

A princípio existem vários métodos que podem ser usados durante a elaboração do estudo de impacto ambiental sendo que cada um possui sua devida aplicação de acordo com a abordagem pretendida pela equipe. Vale lembrar ainda que a escolha errada do método pode elevar o custo do estudo ou ainda trazer dados não tão embasados. Abaixo segue uma lista dos principais métodos e suas especificações:

- **AD HOC**
 - Descrição: Levantamentos de dados em reuniões com especialistas;
 - Aplicação: Avaliação rápida;
 - Vantagens: Rapidez e baixo custo;
 - Desvantagem: dados subjetivos;

- **CHECKLIST**
 - Descrição: Estudo feito por listagem;
 - Aplicação: Diagnostico e aplicações;
 - Vantagens: Rápido e simples;
 - Desvantagem: não identifica impactos diretos e indiretos;

- **MATRIZ DE INTEGRAÇÃO**
 - Descrição: Listagem de controle bidimensional (fatores x ações);
 - Aplicação: Identificação de impactos diretos;
 - Vantagens: Simples permitindo uma boa visualização;
 - Desvantagem: não identifica impactos indiretos;

- **REDES DE INTERAÇÃO**
 - Descrição: Feito por gráficos ou diagramas;
 - Aplicação: Identificação de impactos diretos e indiretos;
 - Vantagens: Ampla abordagem;
 - Desvantagem: não detecta a importância do impacto;

4.2.4. Zonas de Proteção e Preservação

No Artigo 23 da Constituição Federal de 1988 são definidas às Zonas de Proteção no qual são de interesse comum da União, dos Estados, Distrito federal e dos Municípios e que são distribuídas em sítios arqueológicos, edifícios históricos, obras de valor cultural e de interesse público, entre outros. Para um melhor entendimento desse assunto, abaixo serão classificados as Zonas de proteção e preservação que podem influenciar na tomada de decisão nos projetos na geração eólica offshore:

4.2.5 Zonas de Proteção - Patrimônio Histórico, Cultural e Artístico Nacional

São considerados Patrimônio Histórico, Cultural e Artístico Nacional bens materiais e imateriais de interesse público que refletem o processo histórico das civilizações que já existiram naquela região ou ainda das transformações naturais no qual o local foi submetido. Para limitar essa Zona de Proteção a nossa análise, o ponto na qual pode se ter incidência nas águas marítimas são regiões com preservação natural que são tombados, no caso os sítios arqueológicos.

Normalmente esses sítios arqueológicos são formados principalmente por naufrágios que aconteceram a centenas de anos e que guardam acontecimentos históricos. A princípio, essas Zonas de Proteção são vigiadas pela Marinha e pelo IPHAC - Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Cultural que caracterizam, tombam e resguardam para que suas condições venham ser mantidas originalmente.

Sem que haja autorização, os naufrágios tombados não podem ser removidos de seu local, nem tão pouco podem ser feitos ou instalados algum tipo de infraestrutura nas suas proximidades, com pena de embargar o projeto e até extingui-lo do local. Esse tópico pode ser até considerado sem grande importância, porém na costa Brasileira existem aproximadamente 2000 naufrágios tombados que são considerados atrações subaquáticas e que sim, é importante para o nosso estudo.

4.2.6 Zonas de Proteção - Turismo

As Zonas de Proteção de interesse turístico são delimitações que são asseguradas pelos entes da federação com o objetivo de incentivo no desenvolvimento cultural e econômico. Para ser definida a Zona de Proteção Turística é feito um estudo de caso na qual é descrito suas delimitações e declarado seus bens materiais e imateriais, na qual são de obrigação dos entes da federação inspecioná-los e mantê-los.

Para o nosso estudo, esses locais poderiam ser praias, ilhas ou arquipélagos. Dependendo das condições encontradas podem ser estudados a possibilidade da implantação da infraestrutura de um parque eólico nas suas proximidades, que

normalmente é feito pela equipe multidisciplinar que fará o EIA-RIMA. Vale lembrar que um projeto de grande porte gera inúmeros empregos, existindo a possibilidade de ser abrigados esses trabalhadores nessas regiões turísticas, além dos impactos com ruídos sonoros que estão cada vez menores com o avançar da tecnologia, mas não extintos.

4.2.7 Zonas de Proteção - Pesca

O objetivo da Zona de Proteção de pesca tem como ponto de partida condições econômicas das famílias que dependem desse recurso natural para se manter financeiramente. A lei pelo qual rege esse tópico é a Lei nº 11.959/2009 que junto com o poder público possui estratégias de preservação do ecossistema aquático.

4.2.8 Possíveis impactos na implantação de um Parque Eólico *Offshore*

Embasado na teoria anteriormente citado, elencamos os principais Impactos Ambientais que podem ser causados na implantação de um Parque Eólico *Offshore*:

- **Acústica:** Durante a geração de energia eólica, o atrito do vento com as pás dos geradores formam oscilações acústicas de baixa frequência que podem influenciar a vida marinha ao seu redor.
- **Radioatividade:** Os geradores eólicos, por serem feitos para reverter força motriz em energia elétrica, geram uma grande interação eletromagnética que pode ser prejudicial ao meio ambiente.
- **Dinâmica dos Ventos/Águas:** A alteração da dinâmica dos ventos e das águas é um assunto complexo e que é gerada pelo fato da velocidade do vento depois de passar pela turbina ser menor do que ao atingi-la.
- **Aves Migratórias:** Mesmo sendo em alto mar, dependendo do local a região pode ser uma rota de aves migratórias, e mesmo as pás tendo velocidade de giro

baixo existem inúmeros casos de morte de aves por conta dos geradores eólicos.

- **Queda de Detritos em alto mar:** Isso irá acontecer principalmente durante a implantação do parque no qual a sobra do material usado é descartada no meio-ambiente.

4.2.9 Medidas de Defesa

Com Base nas Medidas de Defesa do Meio-Ambiente foi criada em 1999 a “Lei de Crimes Ambientais” no qual “dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências”. Para isso existem três tipos de dispositivos legais que podem ser usadas pela sociedade e são eles:

- Ação Civil Pública
- Ação popular
- Mandado de Segurança

4.3 PROINFA

Um dos principais programas de desenvolvimento de fontes de energia sustentável foi o PROINFA, implementado pela Lei nº 10.762 / 2003 e regulamentada pelo decreto 5.025 / 2004 teve como objetivo principal a implantação de projetos independentes de geração eólica, biomassa e de Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH controlados ou não por concessionárias. Esse programa trouxe para o país um grande desenvolvimento que a priori não foi dado muito valor por questões de viabilidade, porém logo na primeira fase as expectativas foram ultrapassadas e a demanda energética foi o triplo da prevista. Essa atitude do governo é apenas fração do vem sendo implantado há décadas na Europa, incentivos pela qual traz grande crescimento econômico, com desenvolvimento de novas áreas de atuação no mercado de trabalho e equilíbrio no Balanço Energético Nacional.

Foi definido em lei que o projeto seria dividido em duas etapas, na qual a primeira fase seria implantação a curto prazo e a segunda a longo prazo. Na primeira fase foi estipulado uma tarifa para energia, a chamada *Feed-in*, na qual estipulava um preço tabelado para projetos com contratos de 20 anos. Logo na emissão dos valores, muitas críticas quanto as viabilidades foram postas afirmando que os valores não seriam compatíveis com os projetos. Porém o PROINFA disponibilizou créditos especiais no BNDES para projetos selecionados por ele, o que trouxe resultados surpreendentes, a oferta foi de cerca de 1.100 MW só para eólica, três vezes a demanda estipulada pelo Programa.

Dizer que o sistema *Feed-in* é inovador no tocante ao desenvolvimento de projetos de fontes renováveis é um ponto de vista de muitos, pelos seus resultados obtidos ainda em curto prazo. Porém contrapondo a isso, muitos analistas concluem que esse sistema possui deficiência no que se refere a competição de mercado, sendo que só utilizando sistema de mercado aberto que se pode gerar novas tecnologias e ainda o fato dos valores utilizados pelo *Feed-in* ser tabelados e muito elevados, o que por muitas vezes só se cobria os custos da operação.

4.3.1 Primeira Fase

Logo na primeira fase do programa que tinha como objetivo implantar 3.300 MW de capacidade, muitas dificuldades foram encontradas. Um dos pontos de incentivo do PROINFA era a obtenção de equipamentos apenas por indústrias brasileiras, algo que traria desenvolvimento tecnológico para o país, porém naquele momento somente duas empresas estavam no mercado e não teriam capacidade para atender todos os projetos. Outros pontos como a falta de planejamento durante a execução do projeto, falta de capital, fizeram atrasar o cronograma estabelecido pelo PROINFA e o prazo final para entrega foi para dezembro de 2008, dois anos depois do previsto no planejamento do Programa.

Mesmo com tantos empecilhos o programa atendeu todas as expectativas. Segundo o PROINFA a participação dos projetos eólicos no Nordeste alcançou marco de 56% sobre todo o país, e com ele foi possível reduzir os riscos hidrológicos da Bacia do Rio São Francisco na qual com ajuda de estudos concluiu-se que os regimes

de ventos e o de chuva na região Nordeste são complementares. Dessa forma no período do ano que o sistema hidrelétrico estiver em baixa o sistema eólico estará em alta complementado a demanda de energia da região.

4.3.2 Segunda Fase

Na segunda fase do PROINFA muitas dificuldades que fizeram parte da primeira fase ainda continuaram principalmente o fornecimento de equipamentos pela indústria nacional. Isso trouxe receio aos investidores que muitas vezes deixaram de investir. Porém as metas dessa 2ª etapa que eram atender 10% de toda demanda do país em 20 anos e o incremento de carga de 15% ao ano foram alcançadas. Segundo dados do PROINFA, os investimentos alcançaram a casa de R\$10 bilhões gerando 150 mil empregos.

O Novo Modelo para o fornecimento de energia elétrica no Brasileiro, criado pela Lei nº 10.848 de 2004, trouxe grande avanço no mercado nacional. Dentre as soluções apresentadas está principalmente a renovação tarifária e o comércio por meio de leilões na qual garante aquele que der a melhor oferta para a demanda. Essas medidas possibilitaram competitividade no mercado na qual os consumidores podem comprar diretamente do fornecedor com preços mais justo e ainda garantir o fornecimento pra longo prazo.

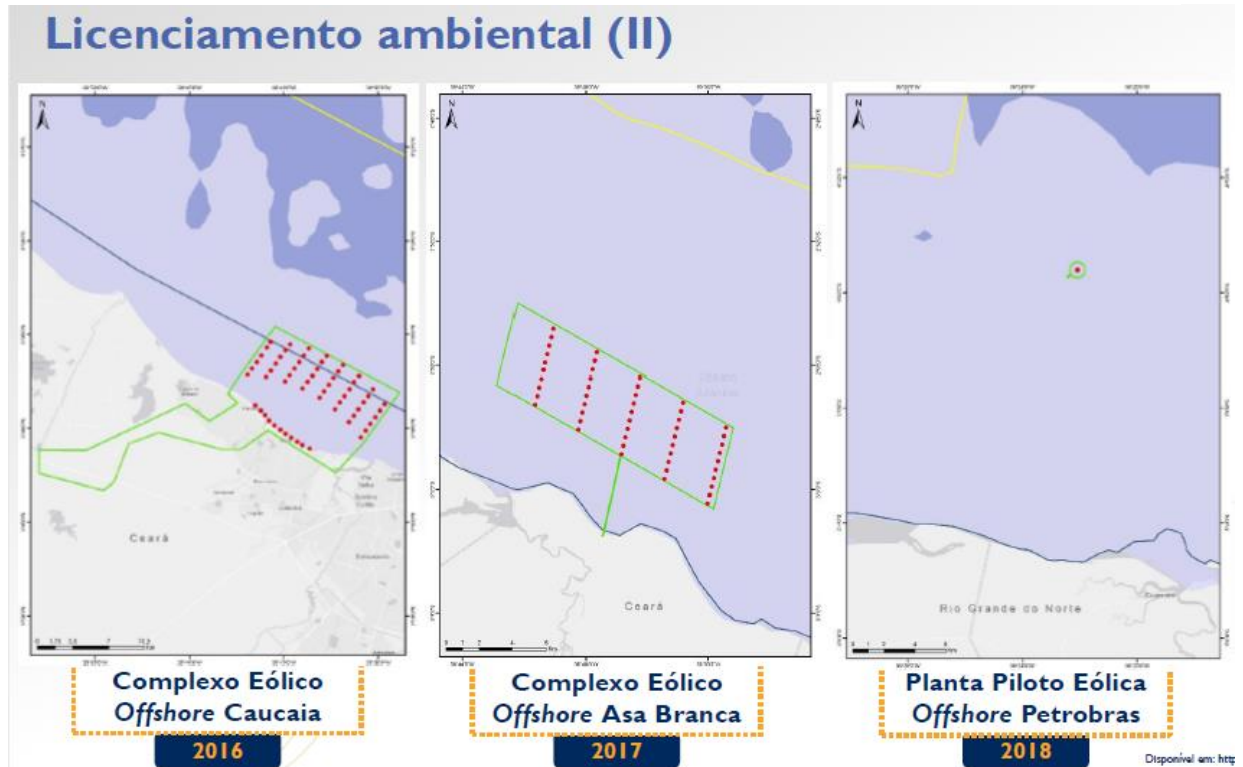
4.4 PROJETOS EM LICENCIAMENTO NO BRASIL

Como citado anteriormente, o Brasil no presente momento não possui nenhum parque eólico *offshore* em funcionamento, porém está em estudo três projetos, como mostra a figura 25, com características diferentes que podem ser o pontapé inicial para a chegada de novas tecnologias no Brasil.

Os projetos são relativamente recentes sendo o mais novo deles a Planta Piloto Eólica *Offshore* da Petrobras de 2018 seguido de pelo Complexo Eólico *Offshore* Asa Branca de 2017 e por último o Complexo Eólico *Offshore* de Caucaia de 2016. Mesmo com a previsão do alto investimentos para esse tipo de projeto, muitos custos foram

aliviados pelas estratégias adotadas pelos projetistas que provavelmente irá reduzir o preço final.

Figura 25 - Projetos em fase de Licenciamento no Brasil



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2019

4.4.1 Planta Piloto Eólica Offshore da Petrobras

A Planta Piloto Eólica *Offshore* da Petrobras será implantada no litoral do Município de Guamaré – RN a cerca de 20 km da costa que fornecerá energia por um aro gerador de aproximadamente 6 MW de potência com altura estimada de 170 m contando com as pás. Esse projeto faz parte do plano de estratégia da Petrobras e tem como objetivo fornecer energia para atender a demanda da Plataforma de Ubarana 3 (PUB-3). Em 2018 foi iniciado o processo de licenciamento e a previsão de entrega do projeto é em 2022.

4.4.2 Projeto do Complexo Eólico Marítimo Asa Branca I

O projeto do Complexo Eólico Marítimo Asa Branca I é formado por 10 parques Eólicos com 5 aerogeradores formando um complexo com potência estimada em 400 MW. O complexo terá 15 km de frente e 5 km de largura com profundidades variando na casa de 7 a 12 metros. Será interligado por uma linha de transmissão de 230 kv até o litoral do município de Amontada/CE que fica a uma distância média de 7 km. A linha que chega ao litoral segue enterrada até a Subestação PECÉM II 230/500 kV, de propriedade da TDG - Transmissora Delmiro Gouveia, onde finalmente será injetada a energia na Rede Básica do Sistema Interligado Nacional.

4.4.3 Complexo Eólico de Caucaia

Não se tem muitas informações técnicas disponíveis sobre o Complexo Eólico de Caucaia. Sua estrutura é formada por 9 parques sendo 8 com 6 aerogeradores cada e o 9º com 11 aerogeradores. A previsão da demanda de potência total é de 310 MW e seu licenciamento foi iniciado no ano de 2016.

4.4.4 Estratégias para redução de custo

Com base nos três projetos apresentados acima, nesse tópico iremos analisar as estratégias que foram utilizadas para obter um custo menor no final do projeto. Para termos uma base de comparação vamos elencar os principais investimentos dos parques eólicos *offshore* em relação a *onshore*. Para ser mais preciso o aumento do investimento nas *offshore* se dá por três aspectos, o primeiro pela necessidade de se ter uma linha de transmissão especial que suporte as características que serão impostas como grau de isolamento e proteção e o seu comprimento que elevam seu valor. O segundo é o tipo de fundação, que servira de sustentação para o aerogerador, nesse caso o valor da implantação depende muito da profundidade no local e das condições do solo. E por último, o custo de implantação, que depende de embarcações especiais para fazer toda logística até o local.

Sabendo dos principais aspectos que elevam o custo final vamos a análise da Planta Piloto Eólica *Offshore* da Petrobras. O objetivo principal para implantação desse parque é abastecer uma plataforma, sendo assim, o projeto foi desenvolvido para que a distância entre o parque e a plataforma fosse mínima reduzindo o custo com linha de transmissão. Em linhas gerais um projeto desse possui inúmeros benefícios para empresa já que não haverá necessidade de obter energia de concessionárias tendo apenas custo de operação do parque eólico, nem tão pouco a necessidade de adquirir uma linha de transmissão até a costa para interligar a uma subestação de fornecimento.

Já nos outros dois complexos as estratégias foi prioritariamente deixar os parques mais próximo possível da costa, sendo assim o investimento com linha de transmissão cairia absurdamente, lembrando que o fornecimento de energia será interligado a rede terrestre para moradias e empresas.

4.5 Viabilidade para Implantação de um parque Eólico Offshore no Brasil

O Caso do Brasil é muito particular, é um país com grande extensão territorial que ocupa uma boa porcentagem do continente sul-americano e em terra seca há uma grande disponibilidade de território para implantação de Parques Eólicos, que não impactam significativamente na oferta de solo fértil, espaço para ocupação humana e na devastação de biomas. Com base em todas as ferramentas e dados anteriormente citados, iremos agora apresentar um estudo de viabilidade que irá abranger as áreas financeiras, geográficas, estratégias de balanço energético entre outros tópicos.

4.5.1 Parâmetros Financeiros

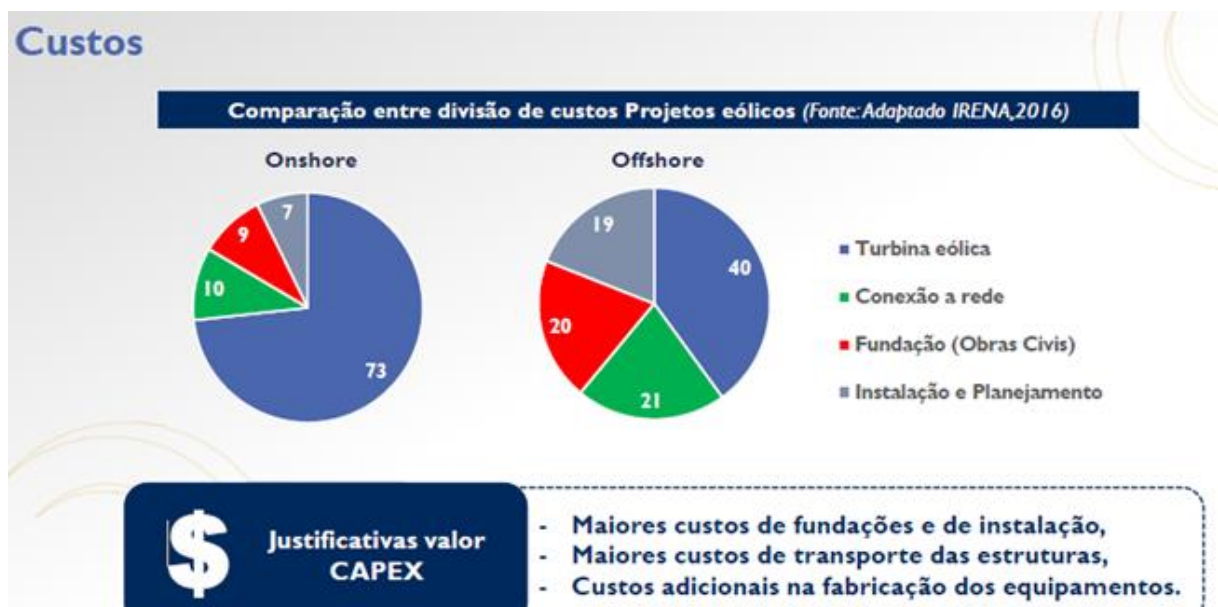
O primeiro tema relevante é a questão do custo. O levantamento dos custos em geral possui muitas variáveis que impactam diretamente ou indiretamente no custo

final, além do fator do custo de implantação há o custo de operação e a obsolescência das turbinas, cabos e subestação.

Nesse caso, a implantação de um parque eólico *offshore* necessita de uma tecnologia mais avançada quando comparada ao parque eólico *onshore*, para determinação do tipo de fundação requer um estudo aprofundado dos aspectos geográficos do local onde pretende se instalar os aerogeradores, são utilizados navios de sondagem para determinação exata da profundidade e tipo de sedimento, é empregado condutores submarinos para as linhas de transmissão, a subestação marítima adicional além da subestação em terra, requer um estudo de planejamento da logística para a implantação e manutenção. Esses fatores contribuem significativamente como mostra a figura 26, comparado as com a *onshore*. Porém temos benefícios em relação à *onshore*.

Nos estudos feitos, em alto mar, o aproveitamento eólico para transformação de energia é muito maior, isso se dá principalmente pela ausência de barreiras físicas no mar ao contrário por exemplo da geração em terra firme onde se tem montanhas, prédios, etc, que diminuem a energia transmitida pelos ventos. Entrelaçado com essa ideia, chegaram à conclusão que os aerogeradores podem ser maiores, sendo assim temos menos aerogeradores, que serão mais robustos e que terão um melhor aproveitamento se comparado com os *onshore*.

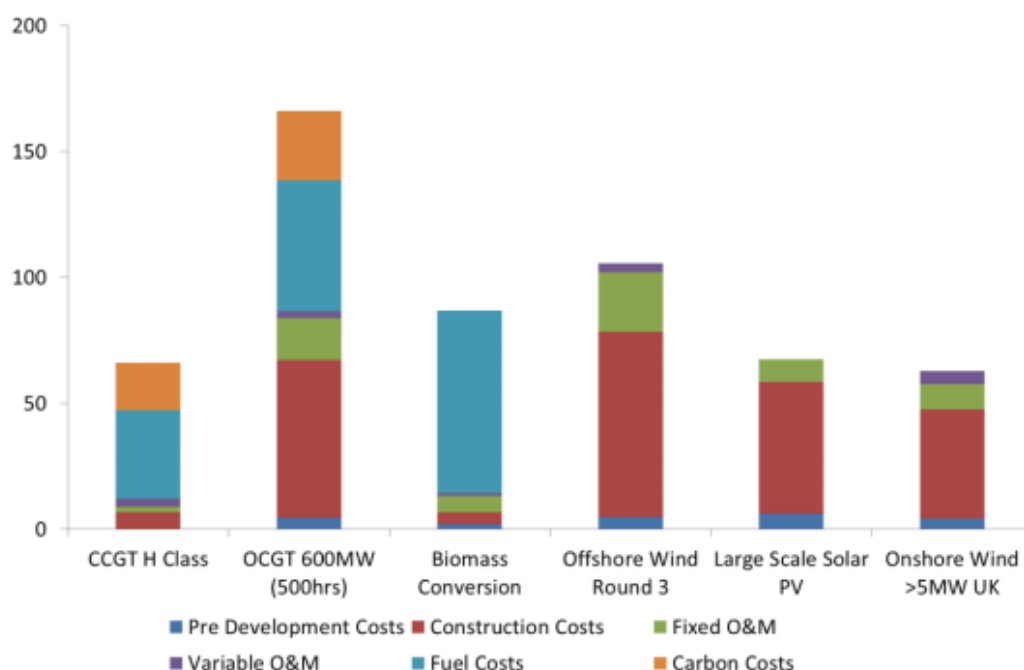
Figura 26 - Comparação entre custos dos Projetos Eólicos Onshore e Offshore



Ainda nos preços, pelo alto investimento feito nos parques eólicos *offshore*, infelizmente o preço da energia para o consumidor final também se eleva. Comparada com a *onshore*, a previsão para o preço da energia fornecida pelas *offshore's no Brasil* será quase 35% maior, sendo a *onshore* R\$156,00/MWh, a *offshore* R\$210,00/MWh e as hidrelétricas R\$185,00/MWh, dados tirados de pesquisas feita pela EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2019). Porém ainda sim temos uma perspectiva de melhora nesses valores, segundo estudos da CERNE - Centro de Estratégia em Recursos Naturais & Energia em conjunto com a Petrobrás e outras empresas (2018) o preço final da energia daqui a 20 anos pode cair 12%, concorrendo com preços das hidrelétricas.

Figura 27 - Comparação entre custos de diferentes meios de geração

Chart 4: Levelised Cost Estimates for Projects Commissioning in 2020, Technology-specific Hurdle Rates, £/MWh



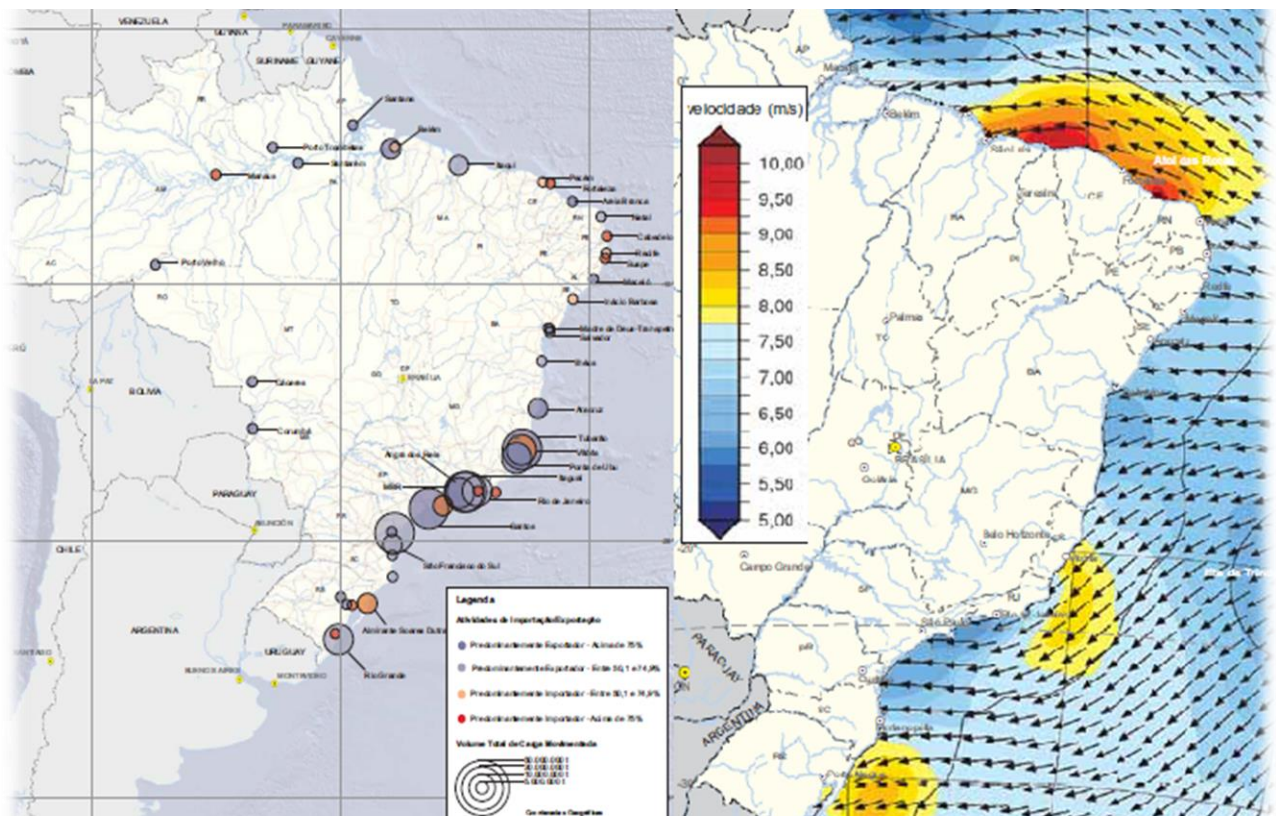
Fonte: United Kingdom Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS), Electricity generation costs, November 2016.

Devido ao fato de o Brasil não possuir parques eólicos offshore até o momento da elaboração desse trabalho foi necessário recorrer à fontes internacionais. A figura 27 foi retirada do Departamento de Negócios, Energia e Estratégia Industrial do Reino Unido, a figura representa uma estimativa de custo para o comissionamento de plantas de energia para o ano de 2020, em Libras por MWh, como é possível observar o custo total da energia *offshore* ultrapassa o custo da energia *onshore*, Tanto na operação e manutenção (representado pela cor verde) quanto na implantação (representado pela cor vermelha), o tempo de instalação de um parque eólico *offshore* pode variar de 5 a 7 anos, incluindo a fase de planejamento e licenciamento ambiental, utilizando como referência os parques eólicos offshore europeus.

4.5.2 Parâmetros Geográficos

No ponto de vista geográfico vamos analisar dois aspectos, o primeiro sobre a região mais propícia em relação aos ventos e em segundo do ponto de vista das rotas marítimas e locais com portos.

Figura 28 - Mapa dos principais portos brasileiros / Mapa do Potencial Eólico Brasileiro



Fonte: Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas do Brasil (2011)

Como mostra na figura 28, mapa do lado direito, o Brasil é rico em ventos principalmente pela sua grande extensão territorial. Todavia, existem duas regiões com os maiores índices, primeiramente no Nordeste brasileiro mais especificamente no litoral do Ceará e no Rio Grande do Norte e em segundo no Sul do país no litoral dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. No Nordeste existe local que a média anual dos ventos chegam 9 m/s a uma altura de 50 m e no Sul 8 m/s para mesma altura, ventos que por sua vez superam os parâmetros mínimos para geração de energia que é 7,5 m/s.

Na figura 28, mapa do lado esquerdo, temos portos com o maior fluxo de tráfego de embarcações e rotas marítimas comerciais (Círculos maiores) que prioritariamente se concentra na região Sudeste e Sul. Sendo assim essas regiões diminuem a probabilidade da implantação de um parque offshore, porém temos uma salvação, a região Nordeste, que possui pequenas rotas comerciais marítimas o que ajuda na decisão do local de implantação do parque.

Sendo assim, o Brasil possui potencial eólico e disponibilidade geográfica para implantação de um parque eólico *offshore*, sendo que local mais indicado as regiões que beiram os estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Piauí na região Nordeste.

4.5.3 Exemplo de custos de Implantação no Brasil

Para termos um panorama dos valores de investimentos, custos e receitas em um projeto de um parque eólico *offshore*, fizemos uma tabela representada pela figura 22. A potência estipulada para transmissão foi de 400 MW, a mesma do projeto em licenciamento Asa Branca I.

O valor obtido como custo de Implantação foi de R\$17.659,17, utilizado como base de cálculo os valores do estudo “Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica” (EPE, 2018), sendo seus valores para transmissão e operação/manutenção respectivamente R\$2,50/kW/mês e R\$41,12MWh (Lemming, Morthorst e Clausen, 2007).

Como base de impostos, temos o PIS - Programas de Integração Social, CSLL- Contribuição Social sobre o Lucro Líquido, e COFINS - Contribuição para o

Financiamento da Seguridade Social, que são respectivamente 1,65%, 7,6% e 9% e por fim, o IR – Imposto de Renda, que para pessoa jurídica a alíquota é de 25%.

Figura 29: Tabela do Retorno Financeiro no 1º ano

Custo de Implantação (R\$/kW):	17.659,17
Investimento total para os 400 MW (R\$)	7.063.668.000,00
Produção Mensal de energia p/ 400 MW (MWh):	122.249,90
Valor previsto da venda de energia (R\$/MWh)	210,00
Custo Operação e Manutenção (R\$/MWh)	41,12
Custo de Transmissão em (R\$/KW/mês)	2,50
Cálculo do Retorno Financeiro no 1º ano	
Faturamento:	308.069.748,00
Custo de manut. e Operação	60.322.990,66
Custo de Transmissão	3.667.497,00
Faturamento:	244.079.260,34
PIS: 1,65%	4.027.307,80
COFINS: 8%	18.550.023,79
CSLL: 9%	21.967.133,43
Receita antes do IR	199.534.795,33
IR 25%	49.883.698,83
Receita Líquida (R\$)	149.651.096,50

Fonte: Feita pelos autores, 2019

Ao analisar a figura 29 vemos que o investimento para um parque eólico *offshore* de 400 MW é de aproximadamente 7 Bilhões de reais, comparado com um parque eólico *onshore*, com custo de implantação de aproximadamente R\$5.374,53/kW (EPE, 2018), e um investimento 2,1 Bilhões de reais, considerando o dólar a R\$3,84 (20/06/2019). Em tese os valores obtidos pela pesquisa da EPE são valores médios, que podem variar muito de acordo com as características do empreendimento, porém está claro a discrepância dos dois investimentos.

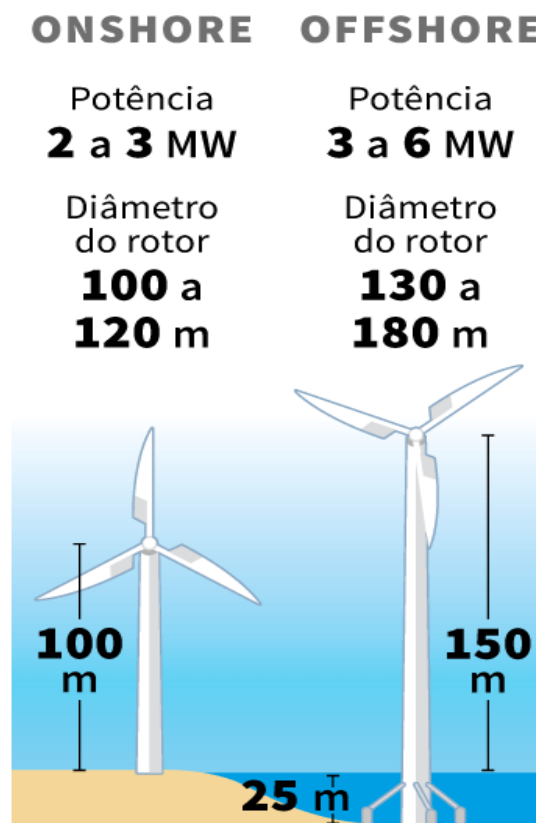
4.5.4 O futuro da energia eólica *offshore* no Brasil

Atualmente o mundo passa por um grande avanço tecnológico na geração eólica *offshore*. Uns dos principais motivos que levaram esse crescimento é a falta de terras com potencial eólico suficiente para tocar um parque *onshore*, como é o caso

do Reino Unido e da Alemanha. O potencial eólico *offshore* da Europa está ultrapassando a marca dos 16 GW, o equivalente a 4.000 turbinas espalhadas por 11 países (*Wind Europe*, 2018). Também, se tem visto um grande investimento em empreendimentos de geração *offshore* por empresas petrolíferas, no qual investem nessa fonte com o objetivo de atender a demanda de suas plataformas em alto mar.

Hoje a demanda energética fornecida pela fonte eólica no Brasil está chegando a casa de 15 GW, com 583 parques em operação, números que ainda possuem previsão de crescimento a curto e médio prazo. Porém, como vimos nos estudos anteriores, os locais com potencial eólico no Brasil estão concentrados em poucas regiões o que pode levar a uma limitação de espaço a longo prazo, sendo umas das soluções o desenvolvimento dos parques offshore.

Figura 30 – Comparativo dos Aerogeradores eólicos offshore e onshore

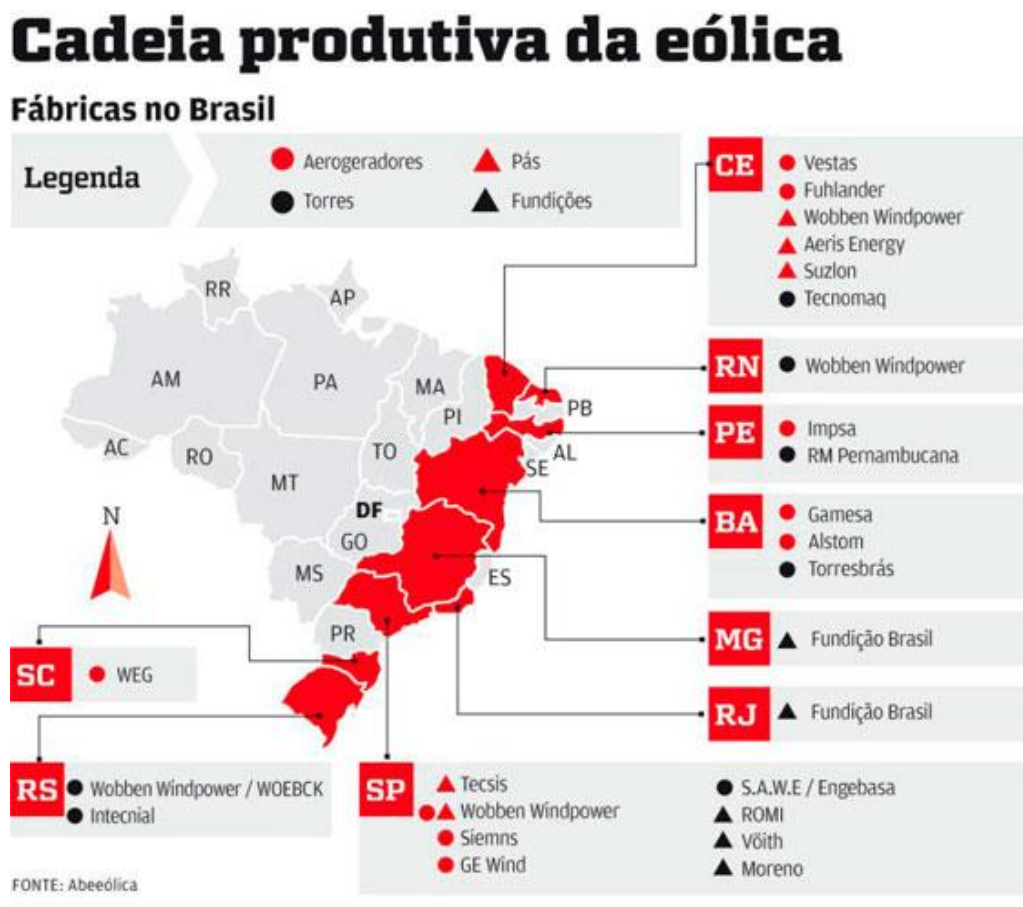


Fonte: "International Renewable Energy Agency.
GWEC. Infografia: Gazeta do Povo."

A evolução tecnológica na produção de energia eólica em alto mar na Europa, fizeram com que os aerogeradores *offshore* mudassem suas características em

comparação aos *onshore*. Segundo estudos, o aproveitamento energético em alto mar é maior se comparado com o em terra firme. Para isso, as indústrias no ramo vêm desenvolvendo aerogeradores cada vez maiores, como mostra a figura 30, reduzindo principalmente custo com implantação, já que a quantidade de turbinas para uma mesma potência instalada será menor.

Figura 31 – Indústrias do setor de geração de energia eólica no Brasil

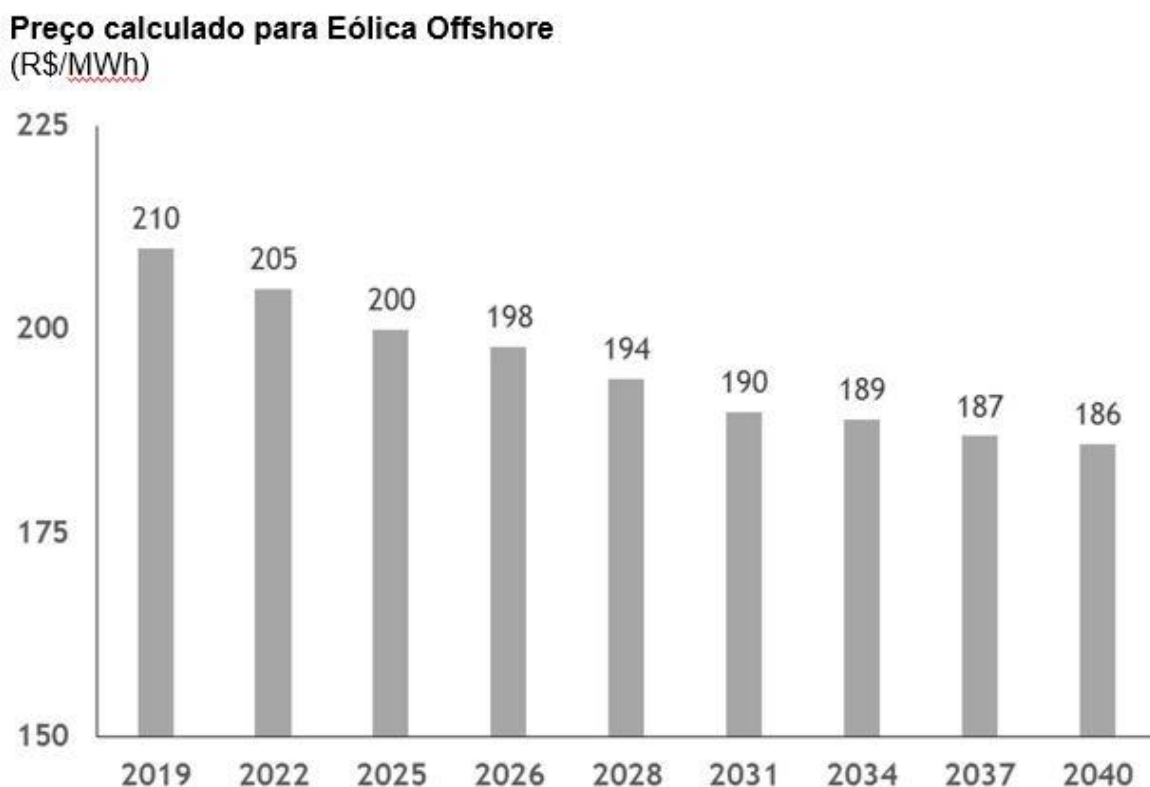


Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (Abeeólica) e da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel)

Falando agora no desenvolvimento dessa tecnologia, pode-se dizer que o Brasil está preparado para suprir as necessidades. Em linhas gerais o setor eólico brasileiro é muito forte, possui industriais grandes como a VESTAS no Ceará e a Wobben Windpower em São Paulo que fabricam aerogeradores, a Tectis em São Paulo do setor de pás, a Torresbrás na Bahia fabricando torres e a ROMI e a Voith em São Paulo que atuam no setor de fundições como mostra a figura 31. Esses são apenas exemplos do potencial comercial eólico que temos no Brasil

Em pesquisas e reuniões feitas com grandes empresas do setor de energia brasileira, a CERNE - Centro de Estratégias em Recursos Naturais e Energia chegou à conclusão que o preço inicial previsto para a energia eólica *offshore* no Brasil seria de R\$210,00/MWh. Valor consideravelmente alto se comparado com as demais fontes que já atuam no mercado. Porém, como mostra a figura 32, a previsão para 2040 é de R\$186,00/MWh, uma redução considerável, que será fruto do amadurecimento do mercado.

Figura 32 - Previsão para preços da energia eólica *offshore* no Brasil



Fonte: CERNE – Centro de Estratégias de Recursos Naturais e Energia, 2019.

Um dos problemas que ainda se torna uma barreira econômica para a geração eólica *offshore* é o custo implantação. Como mostramos no Tópico Exemplo de custos de implantação no Brasil, o preço médio inicial previsto será de aproximadamente US\$4.600,00/kW. Porém, em estudos feitos pela EPE, 2018, comparando o desenvolvimento no mercado Europeu, temos previsão que reduz esse custo para US\$3.550,00/kW em até 2025 e US\$3.000,00 para 2040. Sendo assim, existe uma grande probabilidade desse mercado crescer no Brasil a médio e longo prazo.

5 CONCLUSÃO

No Brasil o desenvolvimento da energia eólica tem se tornando muito atrativo no que se diz respeito a viabilidade econômica, principalmente por seu rápido tempo de implantação e custo de operação inferior à das usinas hidrelétricas. Atualmente a energia proveniente dos parques eólicos supre aproximadamente 12,6% de toda a capacidade energética do país. Lembrando que o primeiro projeto de geração de energia eólica no Brasil aconteceu em 1992 no arquipélago de Fernando de Noronha – PE, o que reflete o quão rápido foi essa evolução.

Com o crescimento dessa nova fonte de energia no Brasil muitas indústrias do ramo se instalaram no país, como é caso da *Wobben Windpower* desde 1995 fornecendo projetos, implantação e programas de manutenção para geradores eólicos, e também a *Vestas* que está no Brasil a 19 anos, uma líder mundial em fabricação de turbinas eólicas, dentre outras grandes no mercado. Ter grandes indústrias eólicas no Brasil é excelente para a implantação de novos parques *offshore* pois o desenvolvimento dessa tecnologia será muito mais rápido e acaba reduzindo custos de importação, câmbio e alfândega.

A produção de energia eólica tem caráter complementar a geração de energia fornecidas pelas hidrelétricas, então nos períodos em que os índices de pluviosidade são menores, especificamente no meio do ano, temos o maior aproveitamento da geração eólica. Sendo assim, a geração eólica no Brasil tem um importante papel no equilíbrio energético sazonal.

Quanto a viabilidade econômica, teremos certas dificuldades quanto ao custo de implantação e ao valor final da energia entregue ao consumidor. Porém com o amadurecimento do mercado esses valores podem diminuir chegando a concorrer diretamente com as fontes de energia existentes hoje no Brasil. Vale lembrar que a presença de programas de incentivo e o acesso a informação pode alavancar o crescimento dessa tecnologia no Brasil, como foi o caso do incentivo as fontes alternativas do programa do PROINFA (2002), que fomentou a geração de energia trazendo resultados positivos até os dias atuais.

Com base nessa análise o Brasil possui uma grande área de desenvolvimento da tecnologia de geração energética eólica *offshore* principalmente na região Nordeste do país. Suas principais dificuldades serão o preço final da energia e o custo de implantação que poderão ser superados a longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MONTEZANO, Bruno Eduardo Moreira – **Modelo dinâmico de visualização de um aerogerador com velocidade de rotação variável e controle de passo em VRML** – Rio de Janeiro, 2007. P. 3 a 21

AMARANTE, Odilon A. Camargo; BROWER, Michael; SÁ, Antônio Leite; ZACK, John – **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro** – Brasília, 2001. P. 9 a 44

AMBRIZZI, Tércio; KRUSCHE, Nisia; REBOITA, Michelle Simões; ROCHA, Rosmeri Porfírio – **Entendendo o tempo e o clima da América Latina** – Campinas, 2012. P. 1 a 5

IBGE – **Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas do Brasil** – Rio de Janeiro, 2011. P 78 a 84 e 143 a 151

GARCIA, Claudia Lorena Esquivel – **Energia eólica no setor eólico brasileiro segundo a perspectiva do direito ambiental: Análise comparada e integrações regionais** – São Paulo, 2018. P. 51 a 59

DUTRA, Ricardo Marques – **Viabilidade técnico-econômica da energia eólica face ao novo marco regulatório do setor elétrico brasileiro** – Rio de Janeiro, 2001. P. 28 a 34 e 203 a 208

Workshop EPE Energia Eólica Marítima – **RoadMap Energia Eólica Marítima no Brasil** – Rio de Janeiro, 2019. P. 10 e 37

PEREIRA, Felipe – **Análise do arcabouço legal associado ao desenvolvimento dos parques eólicos offshore no Brasil** – Brasília, 2017. P. 167 a 169

INPE/ELETOBRAS CEPEL – **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro** – Rio de Janeiro, 2017. P.28

KAMPEL, M.; ORTIZ, G. P. – **Potencial de energia eólica offshore na margem do Brasil** – Santos, 2011. P. 1 a 4

DUTRA, Ricardo Marques; SZKLO, Alexandre Salem – **A energia eólica no Brasil: PROINFA e o novo modelo do setor elétrico** – Rio de Janeiro. P. 843 a 853

BATAGLIOLI, Rodrigo Pavanello – **Proteção digital de geradores eólicos com conversores de potência de escala completa no contexto das *Smart Grids*** – São Carlos, 2018. P. 41 a 61

ELETROSUL – **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica**- disponível: <<https://www2.camara.leg.br/acamara/estruturaadm/altosestudios/seminarios/energiasrenov/custodio2.pdf>> – Acessado em 25/05/2019

ONS - **Energia agora, Carga e Geração** - Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao>> - Acessado em 10 de Jun. de 2019.

EPE - **Participação de Empreendimentos Eólicos nos Leilões de Energia no Brasil** - Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-394/NT_EPE-DEE-NT-041_2018-r0.pdf> - Acessado em 09 de Jun. de 2019.

BBC - **Verificação da realidade, qual fonte de energia renovável é mais barata** - Disponível em: <<https://www.bbc.com/news/business-45881551>> - Acesso em 10 de Jun. de 2019.

Department for Business, Energy & Industrial Strategy - **Eletricidade Custos de Geração** - Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/566567/BEIS_Electricity_Generation_Cost_Report.pdf> - Acesso em 10 de Jun. de 2019.

EPE - **Consumo Nacional de Energia por Classe** - Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-Anual-de-Energia-Eletrica-por-classe-nacional> - Acesso em 10 de Jun. de 2019.

A. AHMED, Mohamed - **Hierarchical Communication Network Architectures for Offshore Wind Power Farms** – 2014, Energies. volume 7. 3420-3437. 10.3390/en7053420.

KIM, M-G & H DALHOFF, P. - **Yaw Systems for wind turbines, Overview of concepts, current challenges and design methods** - Journal of Physics, 2014 Conference Series. 524. 012086. 10.1088/1742-6596/524/1/012086.

RESOLUÇÃO CONAMA 462 - Disponível em <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=703> - Acesso em 10 de Jun. de 2019.

EPE - **Plano Nacional de Energia** - Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es.pdf> - Acesso: em 10 de Jun. de 2019.

CREASP - **Tecnologias de Operação e Controle de Aerogeradores** - Disponível : http://www.creasp.org.br/arquivos/camaras/ceemm/CEEMM_Eolica_CREASP3_02-05-2016.pdf - Acesso em 10 de Jun. de 2019.

EPE - **Expansão da Geração, Empreendimentos Eólicos** - Disponível em: http://epe.gov.br/sites-pt/leiloes-de-energia/Documents/Instrucoes/EPE-DEE-017_2009_R14_2017_EOL.pdf - Acesso em 10 de Jun. de 2019.

ANEEL - **Energia Eólica** - Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf) - Acesso em 10 de Jun. de 2019.