



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

BRENO BORBOREMA ALVES DE ALMEIDA



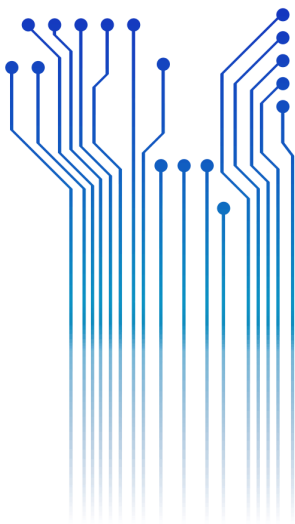
Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ENERGIA EÓLICA: ESTUDO DE CASO DE UM PARQUE EÓLICO *OFFSHORE*



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2016

BRENO BORBOREMA ALVES DE ALMEIDA

ENERGIA EÓLICA: ESTUDO DE CASO DE UM PARQUE EÓLICO *OFFSHORE*

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação de Graduação do Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a obtenção
do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Geração de Energia Eólica

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Campina Grande
2016

BRENO BORBOREMA ALVES DE ALMEIDA

ENERGIA EÓLICA: ESTUDO DE CASO DE UM PARQUE EÓLICO *OFFSHORE*

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação de Graduação do Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a obtenção
do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Geração de Energia Eólica

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a meus pais, pelo esforço, amor e carinho, sem o apoio deles seria impossível realizar os meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e coragem que foi dada para superar as dificuldades ao longo de toda essa caminhada.

Aos meus pais, Rossino e Sheyla, minha irmã Tayssa, que sempre me apoiaram e incentivaram a buscar os meus objetivos, e principalmente pelo amor que me dão.

À minha família, por sempre se fazerem presentes.

Aos meus amigos de longas datas e colegas de graduação que tornam ainda mais feliz a minha vida.

Ao meu orientador, Leimar de Oliveira, pelo grande profissional que é, que colaborou com toda sua paciência, amizade, empenho, orientação e toda instrução que foi dada para a elaboração deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos, que de alguma forma passaram pela minha vida e contribuíram para a realização de mais um sonho de me tornar o profissional que sou hoje.

“ Pedras no caminho? Eu guardo todas. Um dia vou construir um castelo. ”

Fernando Pessoa.

RESUMO

A energia eólica é uma promissora fonte de energia renovável. Nos últimos anos a energia eólica tem registrado uma grande evolução na geração de energia, aonde tem ganhado destaque na geração eólica em meio marítimo. A geração de energia *offshore* tem um potencial enorme, mas ainda é pouco explorada. Centrais *offshore* detêm vantagens em relação à perenidade e à velocidade dos ventos, redução de ruídos e impactos à vizinhança e não ocupação de terras habitáveis, contudo apresentam maior custo de instalação, operação e manutenção, além de impactar visualmente a paisagem litorânea. Pode-se inferir que o Brasil apresenta um grande potencial eólico marinho, o país é indicado como o 3º maior potencial de energia *offshore* do mundo. A Dinamarca apresenta favoráveis condições eólicas, o país é líder no fornecimento de energia a partir de turbinas eólicas. Tendo como objetivo apresentar um estudo de caso em geração de energia eólica *offshore*, este trabalho toma como base o Parque Eólico Horns Rev 1 localizado na Dinamarca, que na época da sua construção era o maior parque eólico offshore da Dinamarca, acrescentando ainda mais a capacidade instalada de geração e contribuindo para o sucesso do mercado eólico no seu país.

Palavras-chave: Energia eólica, *offshore*, parque eólico, turbina eólica, aerogerador, Dinamarca.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Turbina Charles F. Brush.....	17
Figura 2 - Turbina Smith-Putnam 1941 USA.....	17
Figura 3 - Turbina Gedser	18
Figura 4 - Capacidade eólica instalada anualmente no mundo 2000-2015.....	20
Figura 5 - Capacidade eólica instalada cumulativa no mundo 2000-2015.	20
Figura 6 - Capacidade instalada cumulativa no mundo em 2015.	21
Figura 7 – Novas capacidades instaladas no mundo em 2015.....	22
Figura 8 - Capacidades anuais e acumuladas nos EUA 1998 – 2015.....	25
Figura 9 - Cenário da produção de energia eólica entre 2015 e 2050.....	26
Figura 10 – Atlas do potencial eólico brasileiro.....	31
Figura 11 – Investimento no setor eólico brasileiro.	32
Figura 12 – Evolução da capacidade eólica instalada – Brasil – 2005 – 2020.....	33
Figura 13 – Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.....	35
Figura 14 – Velocidade do vento relacionada à altura.....	36
Figura 15 – Característica nominal de uma turbina de 660 kW.....	37
Figura 16 – Turbina de eixo vertical tipo Savonius.....	39
Figura 17 – Turbina de eixo vertical tipo Darrieus.....	39
Figura 18 – Turbina eólica de eixo horizontal.....	40
Figura 19 – Turbina de eixo horizontal tipo <i>Upwind</i>	41
Figura 20 – Turbina de eixo horizontal tipo <i>Downwind</i>	42
Figura 21 – Desenho esquemático de uma turbina eólica.....	43
Figura 22 – Princípio básico de funcionamento do aerogerador.....	44
Figura 23 – Top 15 de fabricantes de turbinas eólicas no mundo - 2015.....	45
Figura 24 – Capacidade eólica <i>offshore</i> mundial cumulativa – 2011 - 2015.....	47
Figura 25 – Participação da capacidade eólica <i>offshore</i> anuais instaladas – Europa – 2015.....	48
Figura 26 – Capacidade cumulativa de energia eólica – Reino Unido – 2000 – 2015.....	50
Figura 27 – Capacidade cumulativa de energia eólica <i>offshore</i> – Alemanha – 2008 – 2016.....	51
Figura 28 – Fundação monopilar.....	55
Figura 29 – Fundação de gravidade.....	56
Figura 30 – Fundação <i>Jacket</i>	56
Figura 31 – Fundação tripé.....	57
Figura 32 – Fundação tripilar.....	58
Figura 33 – Atlas eólico a 100 m do solo – Dinamarca.....	60
Figura 34 - Produção de energia eólica em porcentagem de consumo – Dinamarca – 2006 – 2015.....	61
Figura 35 – Disposição dos aerogeradores do parque eólico Horns Rev 1.....	63
Figura 36 – Leiaute do parque eólico Horns Rev 1.....	63
Figura 37 – Curva de geração da turbina vestas V80/2000.....	65
Figura 38 - Turbina Eólica Vestas V80/2.0 MW.....	65
Figura 39 – Subestação <i>offshore</i> Horns Rev 1.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade instalada cumulativa em 2015.	21
Tabela 2 – Novas capacidades instaladas no mundo em 2015.	22
Tabela 3 – Capacidade cumulativa instalada anualmente na China.	24
Tabela 4 - Fator de capacidade dos 10 maiores países produtores de energia eólica.	27
Tabela 5 – Capacidade cumulativa anual instalada – Brasil.....	28
Tabela 6 - Empreendimentos em Operação no Brasil.	29
Tabela 7 – Empreendimentos em construção no Brasil.....	30
Tabela 8 – Simulação do custo de despacho de usina termelétricas – 2015.....	34
Tabela 9 – Número de turbinas, parques e MW conectados à rede na Europa – 2015.....	48
Tabela 10 – Projetos em andamento – Europa – Junho 2016.	49
Tabela 11 – Desenvolvimento da energia eólica <i>offshore</i> – Alemanha - 2016.....	52
Tabela 12 – Capacidade cumulativa de energia eólica <i>offshore</i> – China – 2007 – 2015.....	54
Tabela 13 - Capacidade cumulativa anual instalada – Dinamarca – 2006 – 2015.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Ampère
ABEEólica – Agência Brasileira de Energia Eólica
ANEEL – Agencia nacional de energia elétrica
AWEA – American Wind Energy Association
BWE – Bundesverband Wind Energy
BWEA – British Wind Energy Association
CELPE – Companhia Elétrica de Pernambuco
Cp – Coeficiente de potência do aerogerador
DEWI – Deutsches Wind Energy Institut
DWG – Deutsche Wind Guard
DWIA – Danish Wind Industry Association
Ec – Energia Cinética
EIA – Environment Impact Assessement
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
EWEA - The European Wind Energy Association
FOWIND – Facilitating Offshore Wind in India
GW – Gigawatt
GWEC – Global Wind Energy Council
IEA – Internacional Energy Association
km – Quilômetro
kV – Quilovolt (10³ V)
kVA – Quilovolt-ampère
m – Metro
m/s – Metro por segundo
mm – Milímetro
MME – Ministério de Minas e Energia
MVA – Megavolt-ampère
MW – Megawatt
MWh – Megawatt hora
PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PPA – Power Purchase Agreement

PROINFRA – Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

R\$ - Real Brasileiro

TEEH – Turbina de eixo horizontal

TEEV – Turbina de eixo vertical

TWh/ano – Terawatt hora por ano

UHE – Usina Hidrelétrica

US\$ - Dólar Americano

US\$ – Dólar americano

UTE – Usina Termelétrica

V – Volt

VA – Volt-ampère

Vv – Velocidade do vento

W – Watt

WWEA – World Wind Energy Association

SUMÁRIO

1	Introdução.....	14
1.1	Objetivos.....	14
1.2	Estrutura do trabalho.....	15
2	Panorama da Geração Eólica.....	16
2.1	Uma Breve Historia.....	16
2.2	Geração Eólica no Mundo.....	19
2.2.1	Capacidade Instalada e Adicionada.....	19
2.2.2	China.....	23
2.2.3	Estados Unidos.....	24
2.2.4	Projeções do mercado de energia eólica.....	25
2.2.5	Fator de capacidade.....	26
2.3	Geração Eólica no Brasil.....	27
2.3.1	Capacidade instalada.....	28
2.3.2	Potencial Eólico.....	30
2.3.3	Investimento no setor eólico.....	31
2.3.4	Projeções de evolução da energia eólica no Brasil.....	32
2.3.5	Ganhos Sistêmicos.....	33
2.4	Recurso Eólico.....	34
2.4.1	Fatores que influenciam o regime dos ventos.....	35
2.4.2	Aproveitamento da energia cinética dos ventos.....	36
2.4.3	Ventos no mar.....	38
2.5	Modelo de turbinas.....	38
2.5.1	Turbina eólica de eixo vertical.....	38
2.5.2	Turbina eólica de eixo horizontal.....	40
2.6	Principais componentes de um aerogerador.....	42
2.6.1	Esquema de funcionamento de um Aerogerador.....	44
2.6.2	Principais fabricantes de aerogeradores.....	45
3	Panorama da Geração Eólica <i>Offshore</i>	46
3.1	Vantagens e Desvantagens.....	46
3.2	Panorama mundial.....	47
3.2.1	Reino Unido.....	49
3.2.2	Alemanha.....	51
3.2.3	China.....	52
3.2.4	Brasil.....	54
3.3	Tipos de fundações.....	54
3.3.1	Monopilar (<i>monopile</i>).....	55

3.3.2	Fundação de gravidade (<i>Gravity Foundation</i>).....	55
3.3.3	Fundação <i>Jacket</i>	56
3.3.4	Fundação Tripé (<i>tripod</i>).....	57
3.3.5	Fundação Tripilar (<i>tripile</i>).....	57
4	Estudo de Caso do Parque Eólico Horns Rev 1.....	59
4.1	Dinamarca.....	59
4.1.1	História	59
4.1.2	Recursos Eólicos.....	59
4.1.3	Geração eólica	60
4.1.4	Vestas	62
4.2	A empresa proprietária.....	62
4.3	O leiaute do parque eólico	63
4.4	Aerogerador Vestas V80/2.0 MW	64
4.5	A Subestação.....	66
5	Conclusão	67
	Referências Bibliográficas.....	68

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é de suma importância para qualquer nação sendo a base de sustentação do desenvolvimento econômico e do elevado padrão de vida na atualidade, ou seja, a cada dia nos tornamos mais dependentes. Face ao crescimento da população mundial e a elevação da produção de bens e serviços, faz-se necessária a ampliação das fontes de energia primária a curto prazo, junto com a preocupação em conseguir atender a demanda atual sem comprometer o meio ambiente, aliados a projetos que procurem prevenir a ocorrência de danos ambientais.

Dentre as fontes de energia renováveis, atualmente, a geração de energia eólica é vista como uma das fontes de energia renováveis mais promissoras, caracterizada por ter uma tecnologia bastante avançada, “limpa”, sustentável e com grande viabilidade econômica dentre as novas fontes de energia renováveis.

Com a evolução da geração de energia eólica, a área que vem ganhando destaque mundialmente é a geração de energia eólica em meio marítimo. O potencial eólico *offshore* mundial é enorme, ainda pouco aproveitado, tendo em vista uma previsão de avanço bastante promissora.

A maioria dos parques eólicos *offshore* ficam na Europa, com uma das melhores condições eólicas mundiais, a Dinamarca é a pioneira e líder mundial de tecnologia em energia eólica e é trazida como exemplo de sucesso por ter elaborado estudo aprofundado acerca da utilização futura dos espaços *offshore*.

1.1 OBJETIVOS

Diante dos diversos estudos sobre energia eólica mundial, a tecnologia *offshore* é bastante promissora e pouco aproveitada em relação a seu grande potencial. Este trabalho tem como objetivo apresentar um panorama atual relacionado à energia eólica, em especial a energia eólica *offshore*, dando ênfase ao estudo de um caso prático do Parque Eólico Horns Rev 1, situado no município de Blavand na Dinamarca, abordando seus leiautes, ventos locais, potência instalada, equipamentos e as empresas envolvidas.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 apresentou uma introdução a respeito da geração de energia eólica, os objetivos ao qual se destina este trabalho e uma visão geral dos temas que serão abordados durante os seguintes capítulos.

O Capítulo 2 apresenta o panorama da energia eólica, trazendo uma revisão histórica sobre a geração de energia eólica, uma visão geral no Brasil e no mundo, informando os mais recentes dados sobre as capacidades de geração e alguns aspectos teóricos sobre o aproveitamento cinético do vento e detalhes sobre as turbinas eólicas.

O Capítulo 3 apresenta o panorama geral da geração eólica *offshore*, informando suas vantagens e desvantagens, assim como mostrando uma visão geral da geração *offshore* em alguns países de destaques no mundo.

O Capítulo 4 apresenta os dados relevantes a respeito da geração eólica na Dinamarca, seu histórico na indústria eólica assim como seus recursos, e, contudo, o estudo de caso do parque eólico dinamarquês Horns Rev 1.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões sobre o estudo, levando em consideração todos os elementos analisados anteriormente e por fim, tem-se as referências bibliográficas que foram utilizadas para realização deste trabalho.

2 PANORAMA DA GERAÇÃO EÓLICA

No contexto mundial, a utilização da energia eólica na geração de energia elétrica está cada vez mais ganhando espaço dentre as fontes de energia renováveis. A procura por energia sustentável vem crescendo cada vez mais, face a diminuição da dependência de combustíveis fósseis, nesta conjuntura, diversos países estão em busca de mais desenvolvimento tecnológico na implantação de parques eólicos, visto seu grande potencial como geração de energia elétrica.

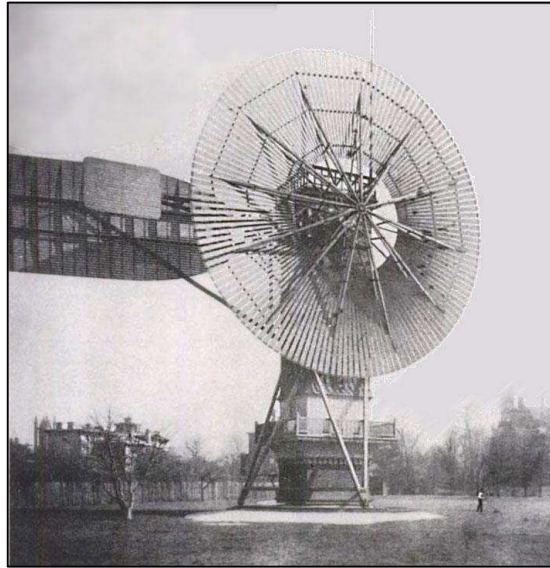
2.1 UMA BREVE HISTORIA

O aproveitamento da energia eólica pelo homem não tem data definida, contudo remonta a antiguidade. As primeiras utilizações da força dos ventos tinham como objetivo substituir a força humana ou animal em algumas atividades, tais como a moagem de grãos e o bombeamento de água, que ocorreram na China.

A ideia de gerar energia elétrica a partir do vento surgiu no final do século XIX. O rápido crescimento do consumo de energia motivou a ampliação dos conhecimentos básicos de funcionamento dos moinhos para a produção de energia elétrica.

A primeira turbina eólica, colocada em funcionamento por Charles F. Brush em 1887 nos EUA, possuía um rotor de 17m de diâmetro, constituído por 144 pás de madeira montado numa torre de 18m de altura e sustentado por um tubo metálico central que possibilitava o movimento de rotação de modo a acompanhar o vento predominante, a turbina tinha potência nominal de 12 kW. Esse sistema operou por 20 anos. O cata-vento de Brush foi sem dúvida um marco na utilização dos cata-ventos para geração de energia elétrica.

Figura 1 - Turbina Charles F. Brush



Fonte: Wikipédia (2016)

Um dos primeiros passos no desenvolvimento de turbinas eólicas de grandes dimensões, para produção de energia elétrica, foi dado na Rússia em 1931 com a ligação à rede elétrica do aerogerador Balaclava de 100 kW conectado por uma linha de transmissão de 6,3 kV de 30 km a uma usina termelétrica de 20 MW.

A segunda guerra mundial contribuiu para o desenvolvimento de aerogeradores de médio e grande porte com empenho de vários países em economizar combustíveis fósseis. Os EUA desenvolveram o maior até então projetado, em 1941, entrou em funcionamento o Smith-Putnam, com um rotor de duas pás de 53,3m de diâmetro e 16 toneladas de peso, equipado com um gerador síncrono de 1250 kW de potência, operando continuamente entre 1941 e 1945.

Figura 2 - Turbina Smith-Putnam 1941 USA



Fonte: Resende (2011)

No início da segunda guerra mundial, a Dinamarca se destacava como um dos mais significativos crescimentos em energia eólica da Europa, com a liderança dos cientistas Poul La Coure e Johannes Jull. A companhia F.L. Smidth (F.L.S.) foi pioneira no desenvolvimento e fabricação de pequenos aerogeradores com potenciais de 45 kW. A consolidação da tecnologia de aerogeradores de pequeno porte da F.L.S. possibilitou um projeto grande e ambicioso. Projetado por Johannes Jull, um aerogerador de 200 kW foi instalado em 1958 na Ilha de Gedser, nome ao qual foi batizado a turbina, que detinha alguns aspectos construtivos importantes, como três pás, 24m de diâmetro e o gerador assíncrono.

Figura 3 - Turbina Gedser



Fonte: Resende (2011)

Durante o período entre 1955 e 1968, a Alemanha construiu e operou o maior aerogerador com o maior número de inovações tecnológicas na época, os quais persistem até hoje na concepção dos modelos atuais mostrando o seu sucesso de operação. Tratava-se de um aerogerador de 100 kW, a vento de 8m/s.

O baixo preço dos combustíveis fósseis após os anos 50 gerou o desinteresse por parte dos investidores nas tecnologias de aproveitamento da força dos ventos como forma alternativa a geração tradicional de energia elétrica. Porém, o cenário mudou nos anos 70, após o choque petrolífero, as atividades de investimento e desenvolvimento intensificaram-se, a energia eólica se tornou uma fonte de interesse, onde parques eólicos foram construídos com diferentes potências instaladas.

Os esforços realizados por países como Dinamarca, Alemanha e Estados Unidos (EUA) nas décadas de 80 e 90 com objetivo de desenvolver tecnologias a partir de experiências de estímulo ao mercado de energia eólica, fizeram com que esse tipo de fonte de energia renovável

conseguisse contribuir de uma forma mais significativa no cenário de geração de energia elétrica, conseqüentemente, o aproveitamento da energia eólica apresenta uma escala significativa em termos de geração, eficiência e competitividade sustentável ao nível do setor elétrico e industrial.

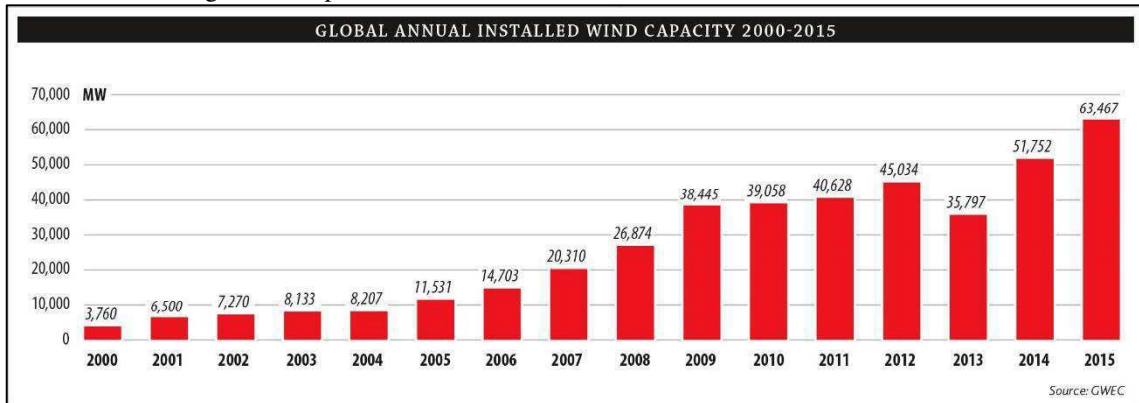
2.2 GERAÇÃO EÓLICA NO MUNDO

A primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada em 1976 na Dinamarca. O alto custo de produção de energia e o aumento da demanda, aliados a pressão pela busca de fontes de energia renováveis, fizeram com que a energia eólica se tornasse uma fonte de energia com uma boa representatividade do cenário mundial. Combinando eficiência e fonte inesgotável, a geração eólica tem levado países a estabelecer incentivos reguladores e direcionar investimentos para estimular esse mercado de geração de energia. Milhares de empregos são gerados frente ao crescente mercado energético mundial, até o ano de 2015 já foram criados mais de um milhão de empregos pela indústria eólica.

2.2.1 CAPACIDADE INSTALADA E ADICIONADA

Segundo o *Global Wind Energy Council (GWEC)*, 2015 foi um ano recorde na evolução da indústria eólica, o crescimento cumulativo foi de 17,1%, o que atende atualmente a cerca de 4% da demanda mundial de energia elétrica, o ano foi sem precedente para a indústria eólica, já que as instalações do ano passaram a marca de 60 GW pela primeira vez na história, ultrapassando 63 GW de nova capacidade eólica, impulsionado principalmente pelo investimento chinês na geração de energia eólica como fonte alternativa, um aumento de 22,6% em relação ao ano de 2014. O último recorde havia sido em 2014 quando 51,7 GW foram instaladas. Até o final de 2015, o mundo contava com 314 mil turbinas eólicas em operação e mais de 1 milhão de empregos gerados pela indústria. A Figura 4 representa a capacidade instalada no mundo nos últimos anos.

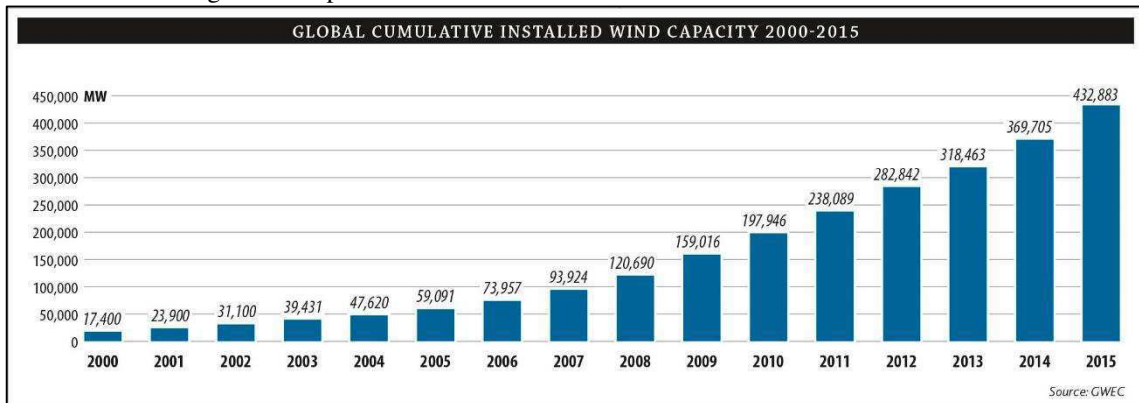
Figura 4 - Capacidade eólica instalada anualmente no mundo 2000-2015.



Fonte – GWEC

O ano de 2015 encerrou com uma capacidade eólica instalada a nível mundial de 432,883 GW, representado na Figura 5, apresentando um montante de US\$ 109 bilhões investidos, tornando-se um dos mais rápidos crescimentos no segmento industrial do mundo.

Figura 5 - Capacidade eólica instalada cumulativa no mundo 2000-2015.

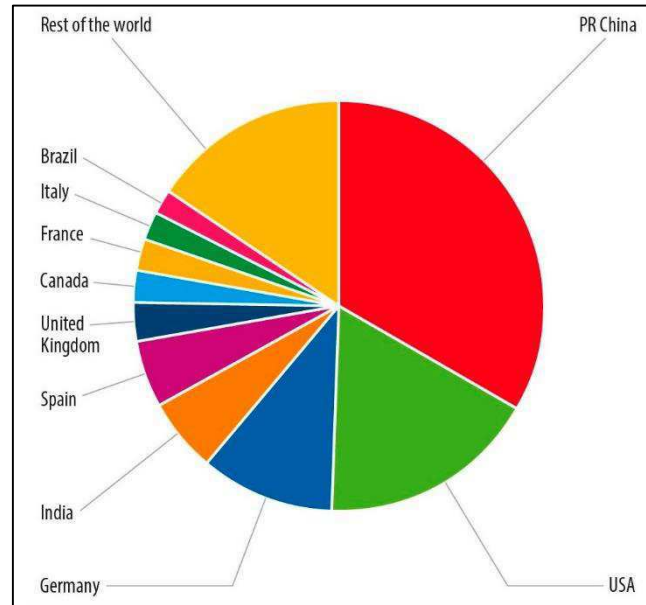


Fonte: GWEC.

O primeiro semestre de 2016 teve mais de 21 GW instalados, um crescimento de 5% na capacidade eólica mundial, atingindo mais de 456 GW, com previsão de crescimento de mais de 9% até o final do ano e uma estimativa de capacidade cumulativa de mais de 500 GW.

China, EUA, Alemanha, Índia e Espanha representam as cinco maiores nações em relação a capacidade mundial de geração de energia eólica, com cerca de 72%. A Figura 6 representa os dez primeiros países responsáveis pelos maiores valores instalados cumulativos até o final do ano de 2015.

Figura 6 - Capacidade instalada cumulativa no mundo em 2015.



Fonte - GWEC

As informações acima são melhores representadas na Tabela 1:

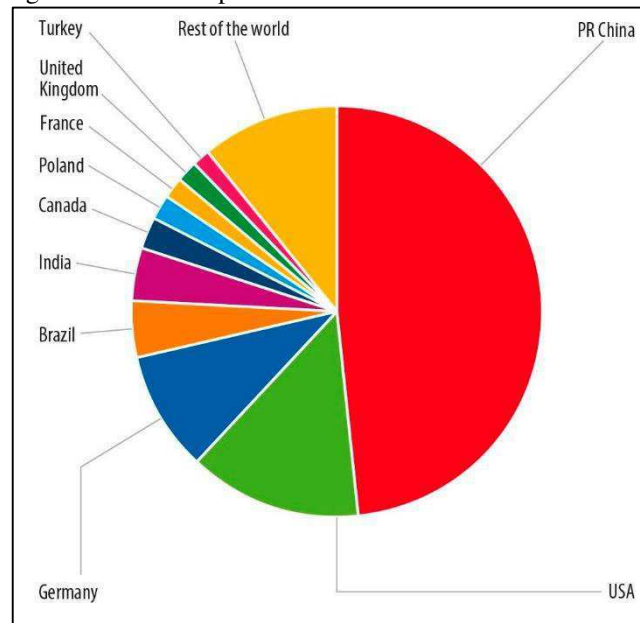
Tabela 1 – Capacidade instalada cumulativa em 2015.

Países	GW	% Compartilhada
China	145,362	33,6
EUA	74,471	17,2
Alemanha	44,947	10,4
Índia	25,088	5,8
Espanha	23,025	5,3
Reino Unido	13,603	3,1
Canadá	11,205	2,6
França	10,358	2,4
Itália	8,958	2,1
Brasil	8,715	2
Resto do Mundo	67,151	15,5
Total Mundial	432,883	100

Fonte: GWEC.

Nos últimos anos, os países que mais cresceram em termos percentuais na geração de energia eólica foram China, EUA, Alemanha, Brasil e Índia. Na figura 7 é representado os dez primeiros países que mais cresceram em valores instalados de energia eólica no ano de 2015.

Figura 7 – Novas capacidades instaladas no mundo em 2015.



Fonte: GWEC.

As informações acima são melhores representadas na Tabela 2:

Tabela 2 – Novas capacidades instaladas no mundo em 2015.

Países	GW	% Compartilhada
China	30,753	48,5
EUA	8,598	13,5
Alemanha	6,013	9,5
Brasil	2,754	4,3
Índia	2,623	4,1
Canadá	1,506	2,4
Polônia	1,266	2
França	1,073	1,7
Reino Unido	0,975	1,5
Turquia	0,956	1,5
Resto do Mundo	6,950	11
Total Mundial	63,467	100

Fonte: GWEC.

2.2.2 CHINA

Dentre os países que mais contribuíram no sentido do aumento da capacidade eólica instalada no mundo em 2015, podemos destacar a China, que lidera no que diz respeito a novas instalações, terminando 2015 com mais 30,753 GW instalados, um aumento de 28,9% em relação a 2014, lidera também a produção cumulativa mundial com 145,362 GW gerados ao final do ano de 2015, sendo mais de um quarto da capacidade mundial.

Contudo, as máquinas chinesas não são tão eficientes para a geração de eletricidade quanto as dos EUA. Em 2015, os EUA abriram uma ligeira vantagem em relação à China em produção de energia eólica, gerando 185,6 TW/h, contra 185,1 TW/h, mostra pesquisa da BNEF. Em outras palavras, os EUA produziram mais com menos.

Esse aumento se dá ao fato de o governo chinês ter implementado uma segunda fase de redução de tarifa para novos parques eólicos em cerca de 3 centavos por kW/h, junto a isso, tem-se como política governamental o compromisso do governo para substituir as usinas movidas a carvão altamente poluentes por fontes de energia renováveis. Esse incentivo leva a China a prever um crescimento de 15% da produção de energia por fontes renováveis até 2020.

Conclusões publicadas no início do ano na revista científica Nature Energy por um grupo de pesquisadores de instituições como a Universidade de Tsinghua, de Pequim, e a Universidade de Harvard, dos EUA, mostraram que a qualidade do fluxo de vento explicava parte da diferença na produção de eletricidade entre EUA e China.

Os analistas dizem que o “contingenciamento” é um dos maiores desafios. O contingenciamento ocorre quando a geração eólica está disponível, mas as operadoras da rede não aceitam a eletricidade. Os motivos são complexos e variam das conexões de rede ruins à preferência pela energia à base de carvão, mais previsível e confiável. Apesar da rápida expansão da China em energia limpa, a geração à base de carvão ainda responde por mais de 70% das necessidades energéticas do país, segundo a Agência Internacional de Energia.

Outro fator se deve ao crescimento do mercado chinês no mundo, o que levar a China a ampliar seu mercado nacional e fortalecer sua mão de obra a fim de expandir esse setor para exportação, onde vem obtendo resultados favoráveis, em 2015 o país apresentava 8 das 15 maiores empresas fabricantes de turbinas eólicas.

A Tabela 3 representa a evolução anual da capacidade instalada na China.

Tabela 3 – Capacidade cumulativa instalada anualmente na China.

Ano	Total (MW)
2006	2.599
2007	5.912
2008	12.210
2009	25.104
2010	41.800
2011	62.364
2012	75.324
2013	91.324
2014	114.763
2015	145.362

Fonte: *The Wind Power*.

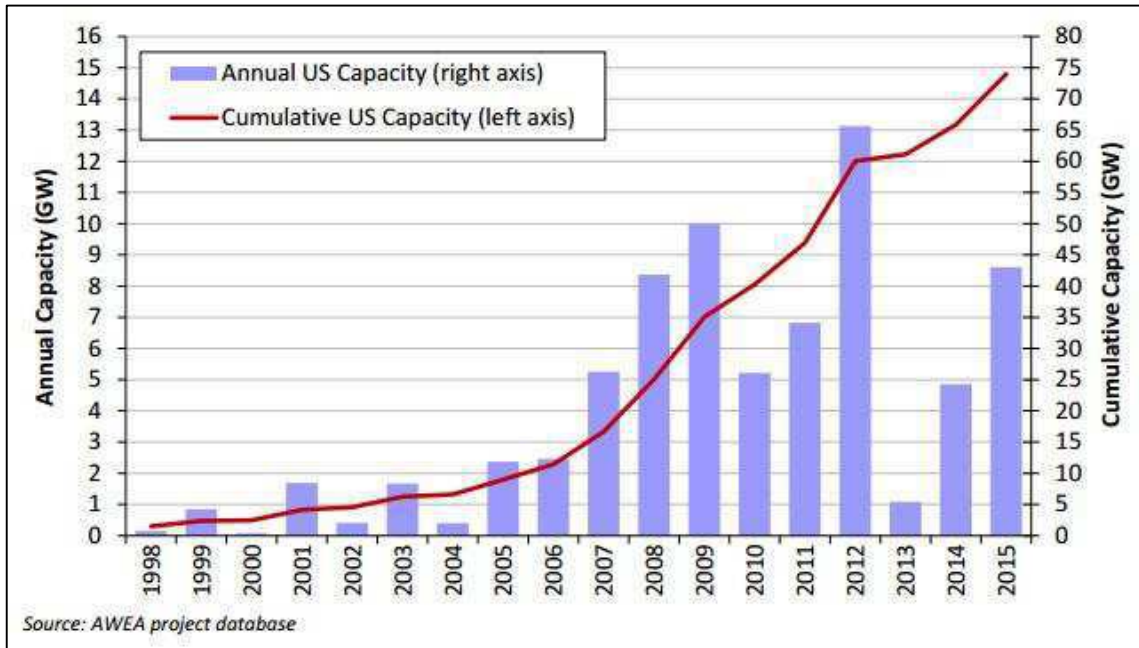
2.2.3 ESTADOS UNIDOS

Os Estados Unidos, dono do segundo maior crescimento de novas instalações em 2015, aumentaram sua capacidade eólica instalada em 8.598 MW, acumulando um total de aproximadamente 74 GW, também ocupando a segunda colocação a nível mundial. Os EUA têm desempenhado um papel importante no desenvolvimento tecnológico ao longo dos anos, só em 2015 foram mais de US\$ 14,5 bilhões investidos no mercado de energia eólica.

O desenvolvimento da energia eólica nos EUA tem sido apoiado, principalmente, pelo chamado *Investment Tax Credit* (ITC), que seria o crédito fiscal de produção, uma taxa que beneficia em 30% o custo de um projeto eólico. A incerteza sobre os benefícios futuros levou algumas empresas a desistirem de suas instalações após o fim do ITC em 2013 somada à instabilidade econômica nessa época. Porém, analistas temiam por um grande declínio do setor eólico, que movimentou o governo americano em manter por mais alguns anos o ITC, impulsionando assim o mercado eólico com projeções ainda maiores nos próximos anos.

A Figura 8 representa o crescimento do setor eólico nos EUA.

Figura 8 - Capacidades anuais e acumuladas nos EUA 1998 – 2015.



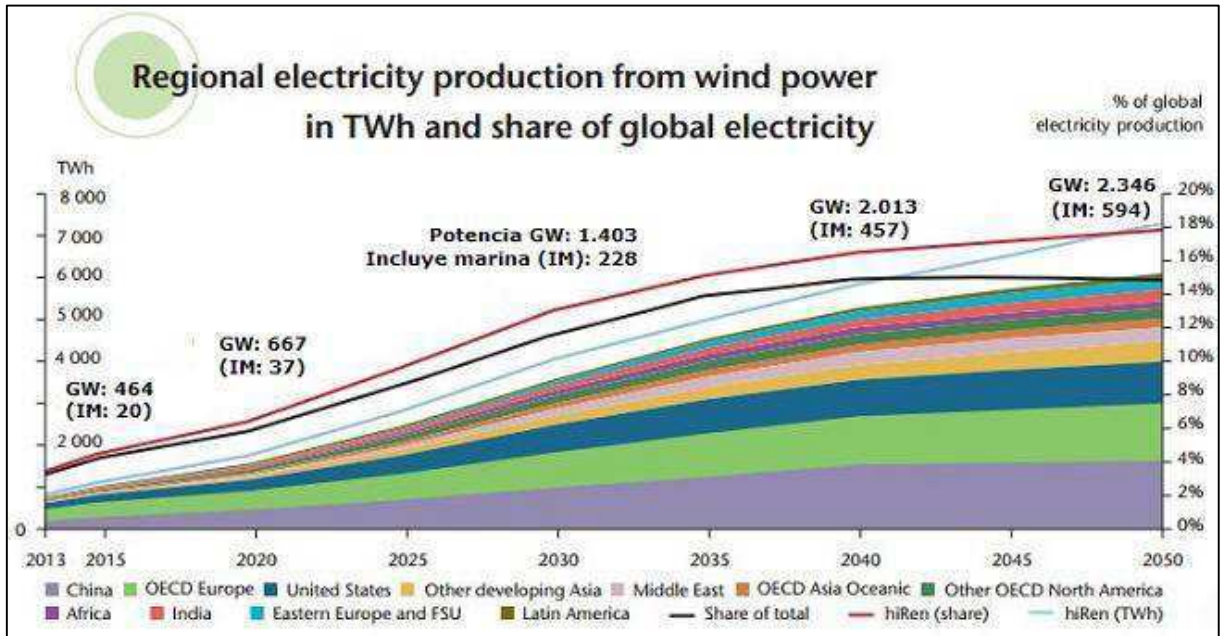
Fonte: Wind Technologies Market Report.

2.2.4 PROJEÇÕES DO MERCADO DE ENERGIA EÓLICA

De acordo com o *Global Wind Energy Council* (GWEC), é esperado que o mercado mundial da indústria eólica continue crescendo nos próximos anos. O mercado chinês demonstra ter atingido a estabilidade, após alguns anos de enormes taxas de crescimento, acompanhado do incentivo em geração de energia renovável. Por outro lado, mercados como a Índia e o Brasil apresentam uma tendência de crescimento robusto, embora sobre uma base expressivamente menor.

Em 2013, a Agência Internacional de Energia (IEA) publicou um *roadmap* (roteiro) com projeções do crescimento de energia eólica no mundo até o ano de 2050. De acordo com o *roadmap*, sugerido pela IEA, a indústria eólica deverá vivenciar um enorme crescimento nas próximas décadas, atingindo, em 2030, a produção anual de aproximadamente 5.000 TWh (provindos de uma capacidade instalada de 1.400 GW), o que representaria cerca de 13,5% do consumo global de eletricidade, e, 7.000 TWh em 2050 (provindos de uma capacidade instalada acima de 2.400 GW), o que representaria cerca de 18% do consumo global de eletricidade. A Figura 9 representa o cenário a longo prazo projetado para geração de energia eólica no mundo.

Figura 9 - Cenário da produção de energia eólica entre 2015 e 2050.



Fonte: *Internacional Energy Agence*.

Essa projeção tem como resultado 15% a 18% de participação da eletricidade global de energia eólica até 2050, um notável aumento dos 12% estimados no *roadmap* publicado em 2009. A nova meta de 2.300 GW a 2.800 GW de capacidade eólica instalada vai evitar emissões de até 4,8 gigatoneladas (Gt) de dióxido de carbono (CO₂) por ano.

Por outro lado, projeções acima de 30 anos na maioria das vezes não correspondem as expectativas, face a impossibilidade de prever incertezas políticas e econômicas que afetam diretamente o mercado mundial.

2.2.5 FATOR DE CAPACIDADE

O fator de capacidade mede a proporção entre a produção efetiva da usina em um período de tempo e a capacidade total máxima neste mesmo período. No caso de uma turbina eólica, a principal variável que afeta o fator de capacidade é a disponibilidade dos ventos. As turbinas eólicas são projetadas para gerarem a máxima potência a uma determinada velocidade do vento, conhecida como potência nominal e velocidade nominal, a qual é ajustada de acordo com o regime de ventos no local, sendo habitual encontrar valores entre 7 a 9 m/s.

A lei de Betz demonstra na teoria a existência de um máximo rendimento da conversão da energia cinética em energia mecânica usando um aerogerador, o seu valor é 59,3%.

O cálculo do fator de capacidade é feito da seguinte forma:

$$FC = \frac{\text{Energia}}{8760XP_n} \quad (1)$$

Onde:

FC – Fator de capacidade;

P_n – Potência nominal do aerogerador;

8760 – Valor de horas em um ano;

Energia – Energia efetivamente gerada neste ano.

O fator de capacidade é um elemento muito importante na viabilidade da instalação de uma usina eólica, no sistema de geração de energia eólica este fator é encontrado numa faixa entre 20 e 35%, no entanto, a média na Europa nos últimos anos foi de 21%. Este valor é estimado anteriormente a partir de *softwares* que utilizam os estudos dos ventos e determinam se haverá retorno financeiro para tal instalação, nestes dados foram utilizados como fonte os valores de geração e capacidade instalada da IEA. A Tabela 4 representa o fator de capacidade dos 10 maiores países produtores de energia eólica do mundo.

Tabela 4 - Fator de capacidade dos 10 maiores países produtores de energia eólica.

Países	Fator de Capacidade (%)
China	14,6%
EUA	29,0%
Alemanha	19,0%
Índia	14,0%
Espanha	25,5%
Reino Unido	33,1%
Canadá	22,4%
França	22,3%
Itália	18,3%
Brasil	34,2%

Fonte: IEA.

2.3 GERAÇÃO EÓLICA NO BRASIL

Apesar de o Brasil possuir um enorme potencial para o aproveitamento da fonte eólica primária para geração de energia elétrica, grande parte em função da boa qualidade dos seus

ventos, é recente a história de desenvolvimento do setor no país se comparada à evolução da fonte eólica em diversos países europeus e dos Estados Unidos, por exemplo.

O Brasil teve a instalação do primeiro aerogerador no ano de 1992. Dez anos depois, o governo criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFRA), com o objetivo de aumentar a participação de fontes alternativas renováveis (pequenas centrais hidrelétricas, usinas eólicas e biomassa) na produção de energia elétrica, privilegiando empreendedores que não tenham vínculos societários com concessionárias de geração, transmissão ou distribuição.

2.3.1 CAPACIDADE INSTALADA

Desde a criação do PROINFRA, a produção de energia eólica no Brasil aumentou de 22 MW em 2003 para 600 MW em 2009 e fechou o ano de 2015 com 8,72 GW, com 349 usinas no total, um crescimento de 46% em relação ao ano de 2014, a Tabela 5 representa o crescimento anual da capacidade instalada.

Tabela 5 – Capacidade cumulativa anual instalada – Brasil.

Ano	Total (MW)
2005	27,1
2006	235,4
2007	245,6
2008	323,4
2009	600,8
2010	931,2
2011	1.429,9
2012	2.524,5
2013	3.476,6
2014	5.982,9
2015	8.736,7

Fonte: ABEEólica

O Brasil apresenta uma crescente participação com relação as fontes de energia renovável na matriz energética, possuindo índices de grande relevância, como visto anteriormente, desempenhando o quarto maior crescimento em capacidade instalada no ano de 2015, que representa cerca de 4,3% do total de novas capacidade no mundo todo.

De acordo com o Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), dados de setembro de 2016, o Brasil subiu sete posições nos últimos dois anos, ocupando hoje o oitavo lugar mundial em geração de energia eólica, atualmente com cerca de 10,26 GW de capacidade instalada, com 410 usinas instaladas, representando cerca de 3% de toda produção eólica mundial.

A energia eólica encontra-se hoje em terceiro lugar em termos de geração elétrica no Brasil, com quase 7%. Atualmente, há 410 empreendimentos em operação, a Tabela 6 representa esses valores.

Tabela 6 - Empreendimentos em Operação no Brasil.

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (MW)	(%)
Centrais Geradoras Hidrelétricas	565	449,123	0,28%
Centrais Geradoras Eólicas	410	10.260,000	6,51%
Pequenas Centrais Hidrelétricas	445	4.875,064	3,27%
Central Geradora Solar Fotovoltaica	42	0,27	0,02%
Usina Hidrelétrica	219	101.106,620	61,03%
Usina Termoelétrica	2.930	42.631,887	27,55%
Usina Termonuclear	2	1.990,000	1,34%
Total	4.613	161.339,720	100%

Fonte: ANEEL.

No atual contexto há 133 novos empreendimentos eólicos em construção, como representado na Tabela 7, número bastante expressivo em comparação com outros tipos de fontes de energia.

Tabela 7 – Empreendimentos em construção no Brasil.

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (MW)	(%)
Centrais Geradoras Hidrelétricas	1	0,848	0,01%
Centrais Geradoras Eólicas	133	3.016,300	36,36%
Pequenas Centrais Hidrelétricas	33	427,959	5,16%
Central Geradora Solar Fotovoltaica	3	84,000	1,01%
Usina Hidrelétrica	6	1.922,100	23,17%
Usina Termoelétrica	25	1.495,446	18,02%
Usina Termonuclear	1	1.350,000	16,27%
Total	202	8.296,653	100%

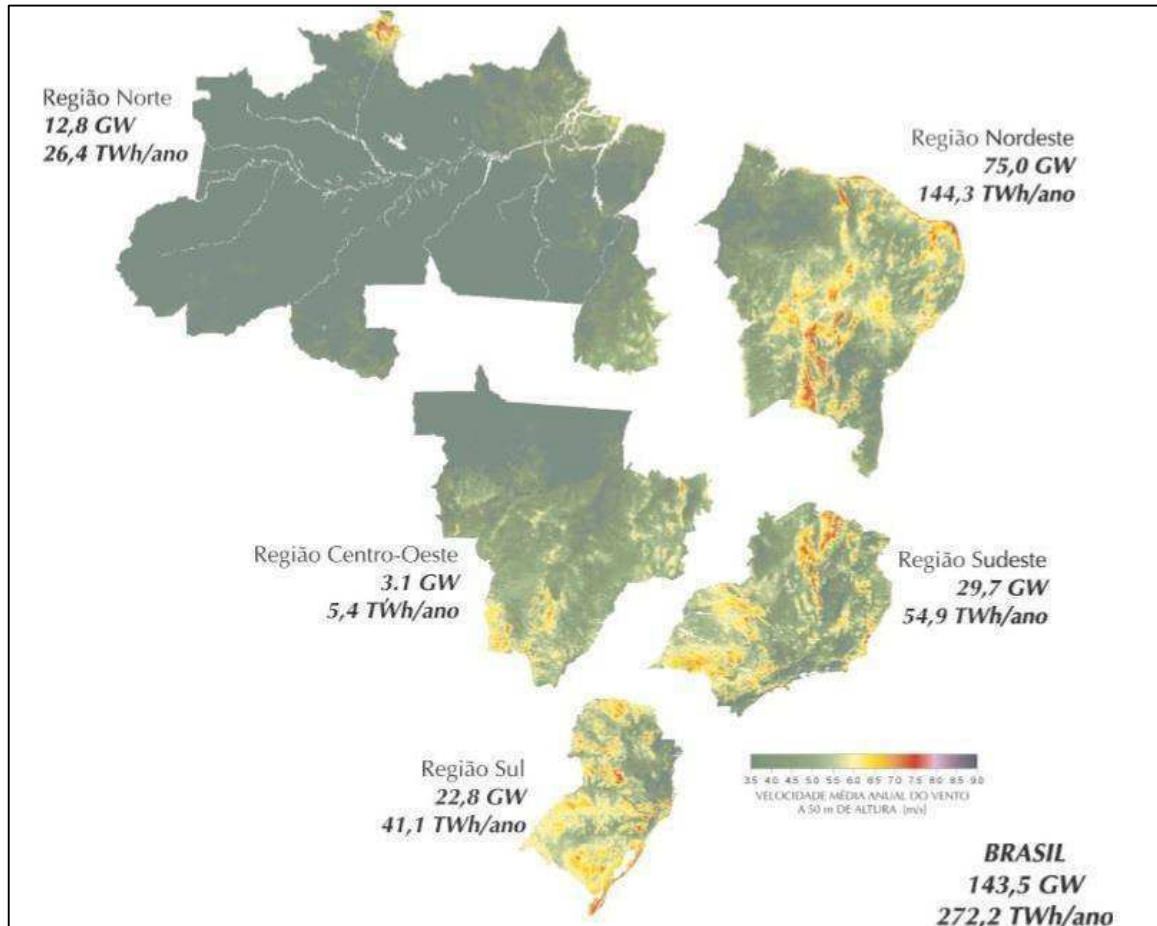
Fonte: ANEEL.

A quantidade de novos empreendimentos eólicos é superior a qualquer outra fonte de energia, com 3,016 GW sendo construídos, o que equivale a 36,36% da capacidade total dos novos empreendimentos em geração de energia elétrica, onde mostra que o Brasil continua seguindo o mercado de energia eólica como investimento principal desse tipo de fonte energética.

2.3.2 POTENCIAL EÓLICO

Embora o Brasil esteja vivendo um grande desenvolvimento no setor eólico, o último documento oficial sobre o potencial para aproveitamento energético através dos ventos é o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicado em 2001. Neste Atlas, foi estimado um potencial energético através da fonte eólica de 143,5 GW (272,2 TWh / ano), com base em medições a uma altura de 50 m, dos quais 75 GW (144,3 TWh / ano) localizam-se apenas na região Nordeste, que apresenta maior destaque, conforme é representado na Figura 10.

Figura 10 – Atlas do potencial eólico brasileiro.



Fonte:

http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf

Estudos mais atuais, contudo, não oficiais, apontam para um potencial superior a 500 GW, considerando os últimos desenvolvimentos tecnológicos.

2.3.3 INVESTIMENTO NO SETOR EÓLICO

A indústria eólica acumula, desde o primeiro parque eólico, aproximadamente 150 mil postos de trabalho e US\$ 4,93 bilhões investidos em 2015, equivalente a 66% do valor investido em fontes renováveis, como representado na Figura 11.

Figura 11 – Investimento no setor eólico brasileiro.



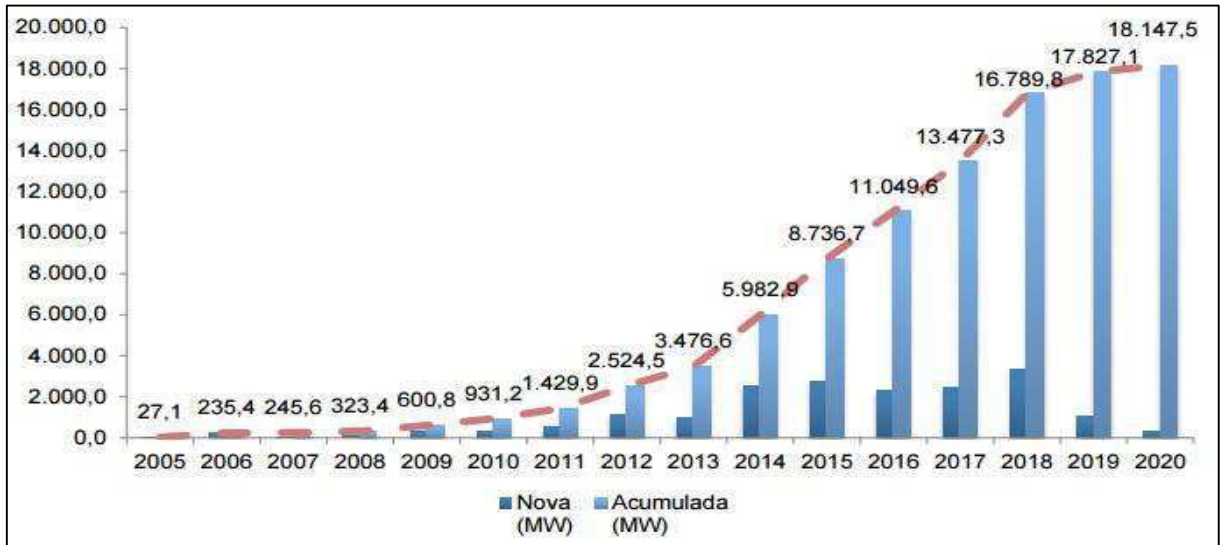
Fonte: ABEEólica.

Nos próximos 4 anos, serão R\$ 60 bilhões em investimentos já garantidos por contratos e 150 mil novos empregos diretos e indiretos gerados por contas destes novos projetos, resultados de um mercado extremamente promissor.

2.3.4 PROJEÇÕES DE EVOLUÇÃO DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Em uma projeção para 2020, segundo a publicação do Boletim de Dados de Outubro de 2016 da ABEEólica, o Brasil terá 18 GW de capacidade eólica instalada, o que corresponderá a quase 10% da matriz energética. Essa previsão é representada na Figura 12.

Figura 12 – Evolução da capacidade eólica instalada – Brasil – 2005 – 2020.



Fonte: ABEEólica

2.3.5 GANHOS SISTÊMICOS

Em 2015, o setor elétrico brasileiro foi novamente um segmento de muita atenção e manteve o trajeto de baixas afluências hidrológicas. Assim, iniciou o ano acompanhando o risco de racionamento de energia elétrica com os reservatórios em seus níveis históricos mais baixos. Na região Sudeste-Centro-Oeste (SE-CO), os reservatórios fecharam o mês de janeiro com apenas 16,84% de sua capacidade máxima, um recorde negativo. Nesse cenário, a ocorrência de uma possível insuficiência de geração de energia para atendimento do mercado torna-se pauta. Entretanto, para 2015, dada a retração no consumo de energia elétrica em 2,1% (motivada pelo agravamento da depressão econômica e pelo aumento tarifário) e também a geração expressiva da fonte eólica, superior a 20 TWh em 2015, a qual ocorre especialmente nos períodos mais secos, não foi necessária nenhuma medida de racionamento.

É importante destacar a complementaridade da fonte eólica à fonte hídrica. O regime de ventos demonstra que a fonte eólica é essencial para o Sistema Interligado Nacional – SIN, não somente pela geração efetiva, mas principalmente pela sua maior geração justamente no período de seca. A fonte eólica permite uma maior otimização do parque hidrelétrico, firmando-se como energia secundária no período chuvoso, e garantindo a energia (eólica) no sistema no período seco, e/ou preserva o nível dos reservatórios.

Consequência também das baixas afluências, os baixos índices de armazenamento dos reservatórios das hidrelétricas provocam a entrada em operação de usinas termelétricas no sistema, por meio de determinações expressas em despachos por razões de segurança

energética. Assim, em um período de escassez, como foi o ano de 2015, o benefício da geração eólica não deve ser dimensionado apenas por eventual preservação do reservatório, já que não se reduz a necessidade de utilização de todos os recursos do sistema para atendimento da demanda.

Entretanto, ao se comparar as duas simulações, confirma-se que o perfil de geração da energia eólica permite maior eficiência na otimização dos recursos, realocando despachos entre regiões ao longo do período, cujo resultado é a redução do risco de déficit e acentuada redução do custo financeiro para o sistema, sem prejuízo para as condições dos reservatórios.

Para representar a contribuição da fonte eólica para a redução dos custos operativos, em 2015, foram realizadas mais duas simulações. O benefício se deu pela diferença entre o ganho obtido com a diminuição do despacho termelétrico com a inserção da eólica e o total dos custos incorridos no pagamento das usinas eólicas. Os resultados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Simulação do custo de despacho de usina termelétricas – 2015.

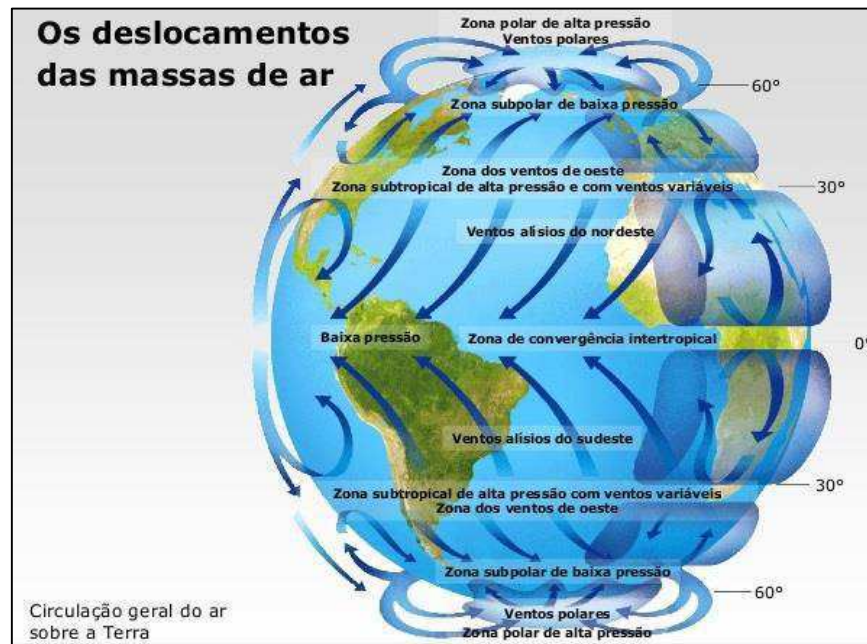
Tipo	Custo total com despacho de UTE's em 2015 (R\$ Milhões)
Cenário 1 – com eólica	25.010
Cenário 2 – sem eólica	31.407
Economia de custo com a inserção da eólica	5.397

Fonte: ABEEólica.

2.4 RECURSO EÓLICO

A energia eólica pode ser considerada como uma das formas em que se manifesta a energia proveniente do Sol, isto porque os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera. Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra. Por receber a incidência de raios solares quase que perpendicularmente, as regiões tropicais são mais aquecidas que as regiões polares, logo, o ar quente situado nas baixas altitudes, tende a subir, onde é logo substituído por uma massa de ar frio que vem se deslocando das regiões polares. O deslocamento de ar quente e ar frio resulta na formação dos ventos, como é retratado na Figura 13.

Figura 13 – Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.



Fonte: <http://pt.slideshare.net/BeatrizRamos19/geo-03>.

Os ventos mais fortes e mais constantes ocorrem em zonas localizadas a cerca de 10 km da superfície da Terra. Como não é possível colocar as turbinas nessas áreas, a área de interesse é limitada a algumas dezenas de metros na atmosfera.

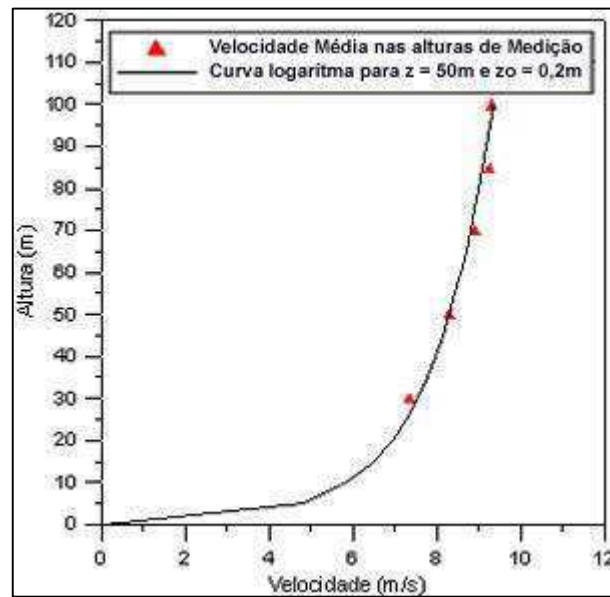
A velocidade e direção do vento estão constantemente variando no tempo, a sua medida e seu estudo é instrumento de grande importância na exploração correta do potencial eólico visto a produção de energia.

2.4.1 FATORES QUE INFLUENCIAM O REGIME DOS VENTOS

O comportamento estatístico do vento ao longo do dia é um fator influenciado pela variação de sua velocidade ao longo do tempo. Entre os principais fatores de influência no regime dos ventos, destacam-se:

- A variação da velocidade com a altura;
- Vegetação, utilização da terra e construções;
- Obstáculos nas redondezas;
- Relevo.

Figura 14 – Velocidade do vento relacionada à altura.



Fonte: <http://www.cresesb.cepel.br/>

2.4.2 APROVEITAMENTO DA ENERGIA CINÉTICA DOS VENTOS

Através das turbinas eólicas, a energia cinética contida no ar em movimento é convertida em energia mecânica pelo giro das pás acionando o rotor e é convertida em energia elétrica pelo gerado.

Uma condição necessária para a apropriação da energia contida no vento é a existência de um fluxo permanente e razoavelmente forte de vento. As turbinas modernas são projetadas para atingirem a potência máxima para velocidades do vento da ordem de 10 a 15 m/s.

A energia cinética do vento pode ser calculada pela Equação 2:

$$Ec = \frac{1}{2} * \rho * V_v^2 \quad (2)$$

A potência disponível é, portanto:

$$Pe = \frac{1}{2} \rho * A * V_v^3 \quad (3)$$

Onde:

Pe – Potência do vento [W]

ρ – Massa específica do ar [kg/m³]

A – Área da secção transversal [m²]

V_v – Velocidade do vento [m/s]

A potência disponível no vento não pode ser totalmente aproveitada pelo aerogerador na conversão de energia elétrica. A lei de Betz demonstra a existência de um máximo teórico rendimento da conversão da energia cinética em energia mecânica usando um aerogerador, o seu valor é 59,3%. Para levar em conta esta característica física, é introduzido um índice denominado coeficiente de potência (C_p), que pode ser definido como a fração da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor.

A potência que pode ser extraída por uma turbina eólica de três pás (as quais são mais utilizadas para geração de energia eólica em larga escala) com eixo horizontal (por ter mais eficiência) pode ser calculada a partir da Equação 4:

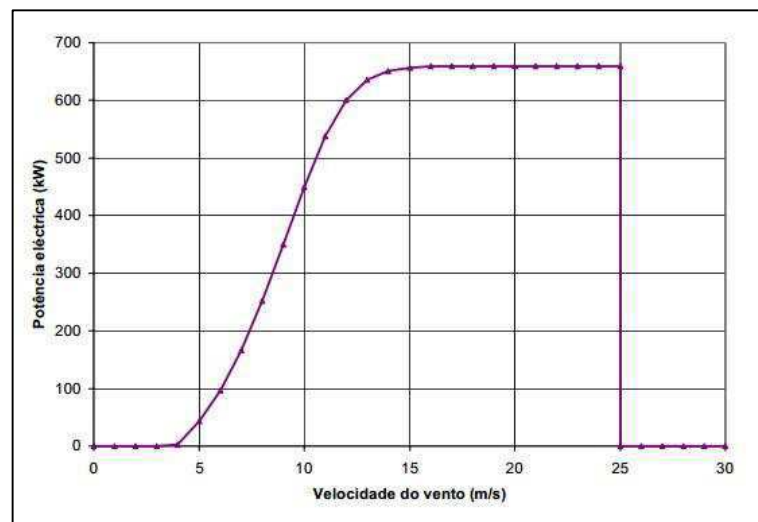
$$P_m = \frac{1}{2} * \rho * A * C_p * V_v^3 \quad (4)$$

Devido à lei de variação cúbica da potência com a velocidade do vento, para velocidades abaixo de um certo valor (normalmente, cerca de 5 m/s, mas depende do local) não interessa extrair energia.

Pela mesma razão, para valores superiores à velocidade do vento nominal não é económico aumentar a potência, pois isso obrigaria a robustecer a construção, e, do correspondente aumento no investimento, apenas se tiraria partido durante poucas horas no ano, assim, a turbina é regulada para funcionar a potência constante, provocando-se, artificialmente, uma diminuição no rendimento da conversão.

Quando a velocidade do vento se torna perigosamente elevada (superior a cerca de 25 – 30m/s), a turbina é desligada por razões de segurança.

Figura 15 – Característica nominal de uma turbina de 660 kW.



Fonte: Rui castro.

2.4.3 VENTOS NO MAR

O vento apresenta condições particulares no mar (*offshore*). O fato de, em geral, a rugosidade do mar apresentar valores baixos, faz com que a variação da velocidade do vento com a altura seja pequena, e, portanto, a necessidade de haver torres elevadas não seja importante. Por outro lado, o vento no mar é, normalmente, menos turbulento do que em terra, o que faz esperar uma vida útil mais longa para as turbinas.

A experiência de parques eólicos em operação no mar da Dinamarca revela que o efeito dos obstáculos em terra, mesmo para distâncias superiores a 20 km, parece ser superior ao inicialmente previsto. Por outro lado, os resultados obtidos até ao momento indicam que o recurso eólico no mar poderá ser superior às estimativas disponíveis em cerca de 5 a 10%.

2.5 MODELO DE TURBINAS

Abordam-se dois modelos de turbinas eólicas: turbina eólica de eixo vertical (TEEV) e turbina eólica de eixo horizontal (TEEH).

2.5.1 TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL

A turbina eólica de eixo vertical tem seu eixo montado na vertical, como vantagem, permite que o gerador fique localizado na base do sistema, não sendo necessário nenhum ajuste em relação a direção do vento, reduzindo a complexidade do projeto. Apresenta desvantagens onde o vento junto ao solo é de mais fraca intensidade, implicando em um menor rendimento, mesmo com condições de vento boas, sendo assim são menos usuais.

As TEEV's são divididas em dois tipos: Savonius e Darrieus.

O funcionamento da turbina tipo Savonius é dos mais simples, movido principalmente pela força de arrasto, ou seja, as turbinas giram predominantemente pela pressão do ar sobre suas pás. A Figura 16 retrata uma turbina Savonius.

Figura 16 – Turbina de eixo vertical tipo Savonius.



Fonte: <http://www.pcon-wind.de/>

O funcionamento da turbina tipo Darrieus (Figura 17) baseia-se no princípio da variação cíclica de incidência. Um perfil colocado ao vento, segundo diferentes ângulos, fica submetido a forças de intensidade e direção variáveis, a resultante destas forças gera um binário motor responsável pela rotação do dispositivo.

Figura 17 – Turbina de eixo vertical tipo Darrieus.



Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine.

2.5.2 TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL

A turbina eólica de eixo horizontal (Figura 18) tem seu eixo montado na horizontal e é a mais comum no mercado e nos parques eólicos.

Figura 18 – Turbina eólica de eixo horizontal.



Fonte: <http://veja2.abril.com.br/>

Aerogeradores de eixo horizontal são os mais utilizados porque o seu rendimento aerodinâmico é superior aos de eixo vertical, e estão menos expostos aos esforços mecânicos, compensando seu maior custo.

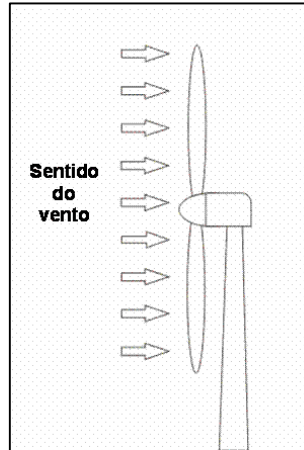
Rotores de 3 pás são os mais comuns, pois constituem um bom compromisso entre coeficiente de potência, custo e velocidade de rotação. Apesar dos rotores com 2 pás serem mais eficientes, são mais instáveis e propensos a turbulências, trazendo risco a sua estrutura, o que não acontece nos rotores de 3 pás que são muito mais estáveis, barateando seu custo e possibilitando a construção de aerogeradores de mais de 100 metros de altura e com capacidade de geração de energia que pode chegar a 5 MW.

Existem duas categorias de turbina de eixo horizontal: *upwind* (frontais) e *downwind* (retaguarda).

Nas turbinas *upwind* (Figura 19) o vento incide na área de varredura do rotor pela parte frontal da turbina, sendo que a "sombra" das pás provoca esforços vibratórios na torre. A sua principal vantagem consiste em evitar o distúrbio causado pela torre no vento. Devido a este fato, a maior parte das turbinas eólicas utilizadas atualmente são *upwind*. As desvantagens das turbinas *upwind* são a passagem periódica das pás pela torre, que causam pulsações de torque

na turbina eólica e a necessidade do mecanismo de orientação direcional, que provoca uma maior carga na torre, comparado com as turbinas *downwind*, com os sistemas a montante do vento necessita-se de mecanismos de orientação do rotor com o fluxo de vento.

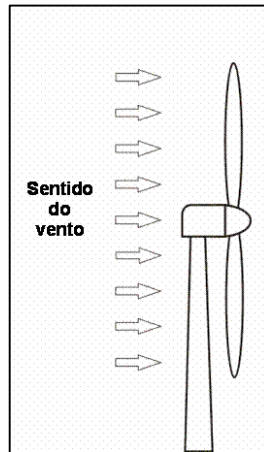
Figura 19 – Turbina de eixo horizontal tipo *Upwind*.



Fonte: <https://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/aerogerador-de-eixo-horizontal/custo-comparativo/>

Nas turbinas *downwind* (Figura 20), o vento incide na área de varredura do rotor por trás da turbina eólica. As turbinas *downwind* possuem uma vantagem teórica que reside no fato de não necessitarem de um mecanismo de orientação direcional em relação ao vento, permitindo o auto alinhamento do rotor na direção do vento. No entanto, estão cada vez mais em desuso, pois o escoamento é perturbado pela torre antes de incidir no rotor. Contudo, esta vantagem é utilizada somente para turbinas eólicas de pequena escala, pois para as de grande escala, devido a maior flexibilidade do rotor, durante fortes rajadas de vento, as pás podem colidir com a torre. A principal desvantagem desta configuração é a turbulência causada no vento pela torre da turbina. Essa turbulência cria ruídos audíveis que dificultam a autorização e a aceitação deste tipo de turbina, principalmente, em áreas próximas de habitações.

Figura 20 – Turbina de eixo horizontal tipo *Downwind*.

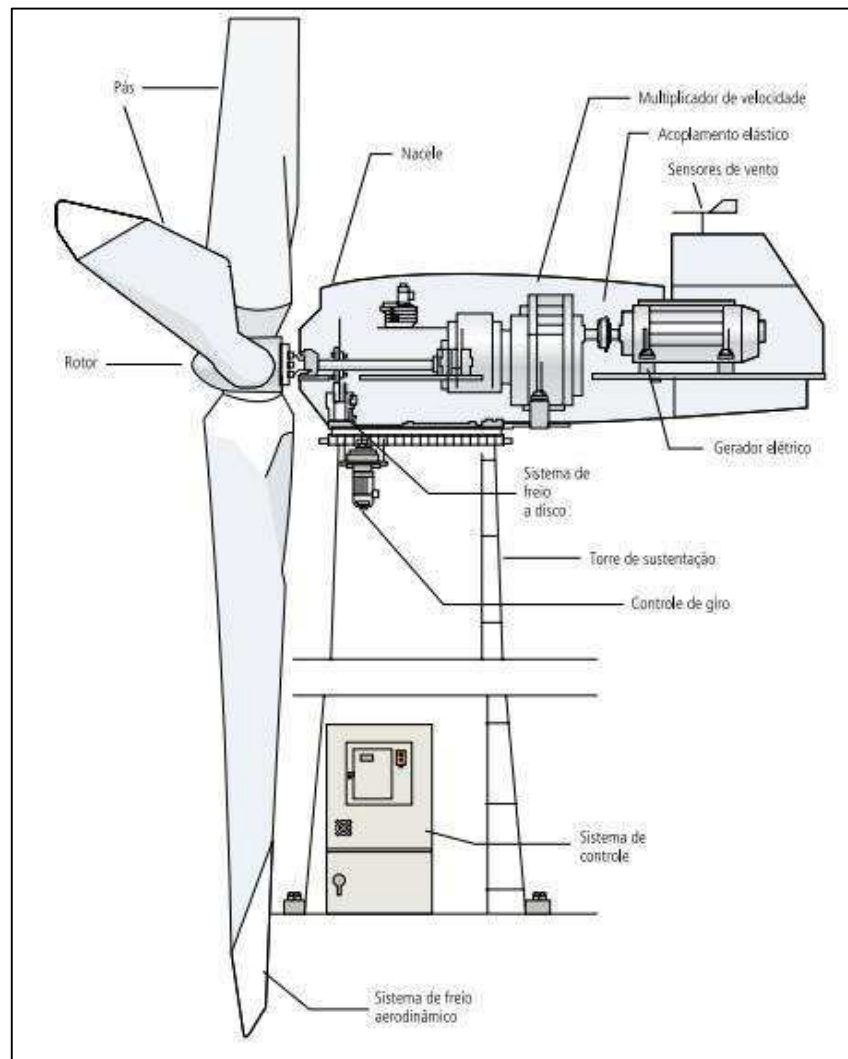


Fonte: <https://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/aerogerador-de-eixo-horizontal/custo-comparativo/>

2.6 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM AEROGERADOR

Os principais componentes de um aerogerador de eixo horizontal estão representados na Figura 21.

Figura 21 – Desenho esquemático de uma turbina eólica.



Fonte: [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)

A estrutura básica de uma turbina é formada por:

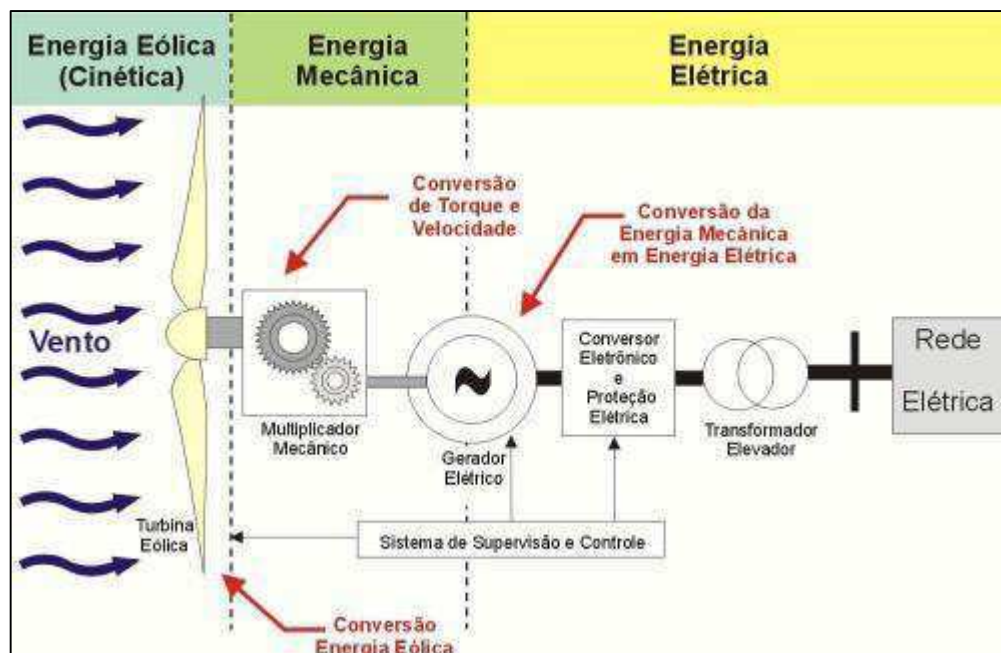
- **Torre de sustentação:** As torres são as estruturas responsáveis pela sustentação e posicionamento do conjunto rotor–nacele, a uma altura conveniente ao seu funcionamento;
- **Nacele:** É a carcaça montada sobre a torre na qual são instalados o gerador, a caixa de engrenagens, todo o sistema de controle, medição do vento e motores para rotação do sistema para o melhor posicionamento em relação ao vento;
- **Eixo:** O eixo da turbina eólica é conectado ao cubo do rotor. Quando o roto gira, o eixo gira junto, transferindo sua energia mecânica rotacional para um gerador elétrico na outra extremidade;

- Freios: O sistema de freio é ativado quando a velocidade do vento está acima do limite suportado pela turbina para geração;
- Rotor: O rotor é o componente do sistema eólico responsável pela captação da energia cinética dos ventos transformando-a em energia mecânica de rotação (parte girante). É o componente mais característico de um sistema eólico, sendo caracterizado pela definição das pás, pela determinação da sua forma e do ângulo de ataque em relação à direção do vento.
- Gerador: É uma máquina elétrica que transforma a energia cinética em energia elétrica pelo princípio de indução eletromagnética.

2.6.1 ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM AEROGERADOR

O princípio básico de funcionamento do aerogerador (Figura 22) funciona da seguinte maneira: as pás do aerogerador captam o vento e transmitem a sua energia (energia cinética) ao rolamento que está ligado a um multiplicador, este irá aumentar a velocidade do eixo. A energia mecânica é transmitida a um Gerador que irá transformá-la em energia elétrica e futuramente conectar à rede elétrica.

Figura 22 – Princípio básico de funcionamento do aerogerador.



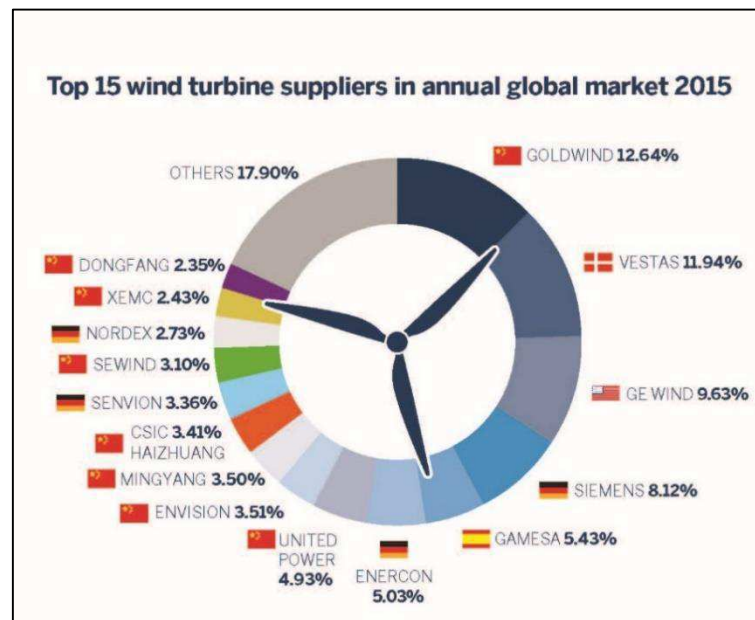
Fonte: <https://centraiselectricas.wordpress.com/energia-eolica/>

2.6.2 PRINCIPAIS FABRICANTES DE AEROGERADORES

Segundo a FTI Consultoria, de acordo com relatório publicado em março de 2016, *Global Wind Market Update – Demand & Supply 2015*, além de liderar com o maior número de instalações de aerogeradores em 2015, a China também apresenta o maior número de empresas no ranking de fabricantes, levando 8 dos 15 lugares.

Mais de 99% das instalações chinesas estavam em seu mercado doméstico, esse excelente desempenho tem sido impulsionado principalmente pelo crescimento do mercado no país. A Figura 23 representa o top 15 de fabricantes de turbinas eólicas em 2015.

Figura 23 – Top 15 de fabricantes de turbinas eólicas no mundo - 2015.



Fonte: <http://www.globenewswire.com/NewsRoom/AttachmentNg/ced854bc-6d00-4da2-a44c-99c53514abc4>

3 PANORAMA DA GERAÇÃO EÓLICA *OFFSHORE*

A energia eólica *offshore* consiste em construir parques eólicos ao longo da costa marítima. A ideia decorre da necessidade de diversificar a utilização de energias renováveis. A Dinamarca também é pioneira no que diz respeito a geração de energia eólica *offshore*, tendo o primeiro parque eólico no mar instalado em 1991, o Virdeby, com 11 turbinas eólicas e uma capacidade instalada de 4,95 MW.

3.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS

A implantação de parques eólicos *offshore* surge como complementação à geração *onshore*, seja pela saturação da geração de energia eólica no continente, seja pelas crescentes dificuldades ambientais.

Os parques *offshore* apresentam diversas vantagens, como:

- Perenidade e uniformidade dos ventos, o que resulta em menores efeitos decorrentes de turbulência;
- O recurso *offshore* é geralmente maior, gerando mais energia com menos turbinas;
- Maior velocidade dos ventos (possivelmente de modo proporcional à distância da costa), que se deve ao fato da inexistência de obstáculos no mar e a menor rugosidade da superfície marítima;
- Redução de algumas externalidades negativas, como emissão de ruídos e impactos à vizinhança;
- Não ocupação de terras habitáveis e/ou agricultáveis;
- Possibilidade de implantação de turbinas maiores, ante a ausência de limite de peso para transporte dos componentes (problema enfrentando por usinas *onshore*). O impacto à paisagem litorânea, apesar de possível, pode ser mitigado com a limitação à instalação próxima às praias e locais turísticos costeiros. (Possibilidade econômico-regulatória)

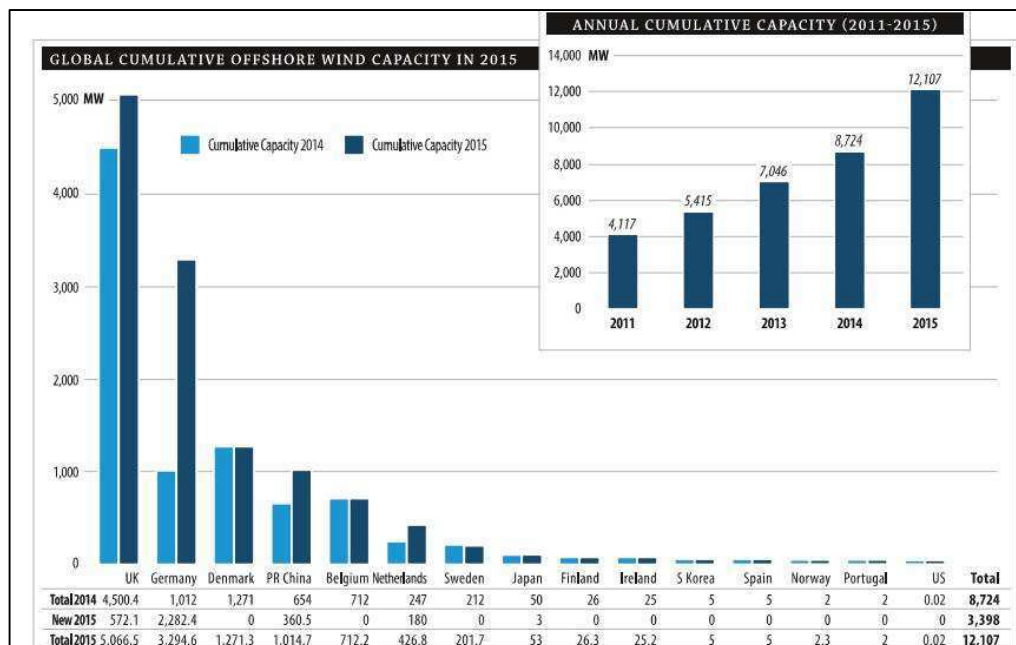
Os maiores desafios para o desenvolvimento do setor eólico *offshore* compreendem o alto investimento para o cabeamento submarino e investimento inicial para aquisição das turbinas, devido estas serem maiores que as disponíveis no mercado para um melhor aproveitamento dos ventos constantes. As dificuldades para um parque eólico *offshore* também são maiores em virtude das condições naturais, pois, a alta salinidade, a carga oriunda de ondas e a dificuldade de acesso elevam os custos de controle de manutenção.

Desta feita, usinas eólicas *offshore* apresentam diversos benefícios, em especial quanto à eficiência, o que, somado aos problemas enfrentados pelas centrais geradoras *onshore*, pode resultar em ótima relação custo-benefício.

3.2 PANORAMA MUNDIAL

Segundo o *Global Wind Energy Council* (GWEC), 2015 foi um ano recorde no crescimento da indústria eólica *offshore*, elevando em 38,8% a capacidade instalada no mundo provinda da fonte eólica *offshore*, o que representa 3,398 GW acrescentados, alcançando a marca de 12,107 GW, o que hoje reflete cerca de 3% dentre todas as fontes de energia no mundo. A Figura 24 retrata a capacidade instalada ao longo dos últimos anos.

Figura 24 – Capacidade eólica *offshore* mundial cumulativa – 2011 – 2015.



Fonte: GWEC.

Mais de 91% da capacidade mundial encontra-se instalada na Europa, principalmente no Mar do Norte, Oceano Atlântico e no Mar Báltico. O continente europeu é o que mais se destaca nesse tipo de geração, encerrou 2015 com 15 parques eólicos construídos, um total de 3,018 GW gerados e 754 turbinas instaladas, acumulando 3.230 aerogeradores instalados em 80 parques eólicos *offshore* e conectados à rede de 11 países, totalizando uma capacidade cumulativa de 11,045 GW.

Tabela 9 – Número de turbinas, parques e MW conectados à rede na Europa – 2015.

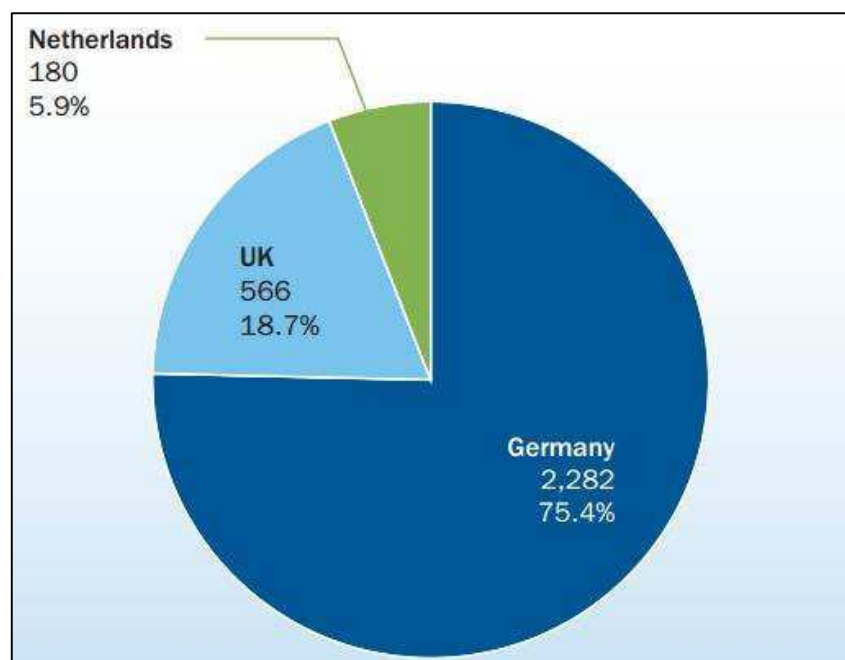
	Alemanha	Holanda	Suécia	Reino Unido	Total
Número de parques construídos	10	2	-1	4	15
Número de turbinas instaladas	546	60	-5	153	754
MW gerados	2.282,4	180	-10	566,1	3.018,5

Fonte: *Wind Europe*.

Segundo a GWEC, as medidas médias são as seguintes: tamanho da turbina eólica *offshore* é de 4,2 MW, da profundidade de água de 27,1 m, da distância a costa de 43,3 km e do tamanho de um parque eólico *offshore* conectada à rede em 2015 foi de 337,9 MW.

De acordo com a EWEA, os países com maiores participações em capacidade instalada em 2015 foram a Alemanha, Reino Unido e Holanda. Os percentuais são retratados na Figura 25.

Figura 25 – Participação da capacidade eólica *offshore* anuais instaladas – Europa – 2015.



Fonte: EWEA.

Até junho de 2016, a Europa tinha ligado à rede 114 turbinas eólicas *offshore* em 4 parques eólicos, com uma capacidade total de 511 MW. Atualmente são 13 projetos *offshore* em construção, que uma vez completos, irão acrescentar 4,2 GW de capacidade instalada ao continente europeu, representados na Tabela 10. O tamanho médio de turbinas eólicas instaladas no primeiro semestre de 2016 é 4.8MW, ou seja, 15% maior do que em relação ao mesmo período do ano passado.

Tabela 10 – Projetos em andamento – Europa – Junho 2016.

	Belgía	Alemanha	Holanda	Reino Unido	Total
Número de parques em construção	1	6	2	4	13
Número de turbinas instaladas	0	43	71	0	114
MW gerados	0	258	253	0	511

Fonte: *Wind Europe*.

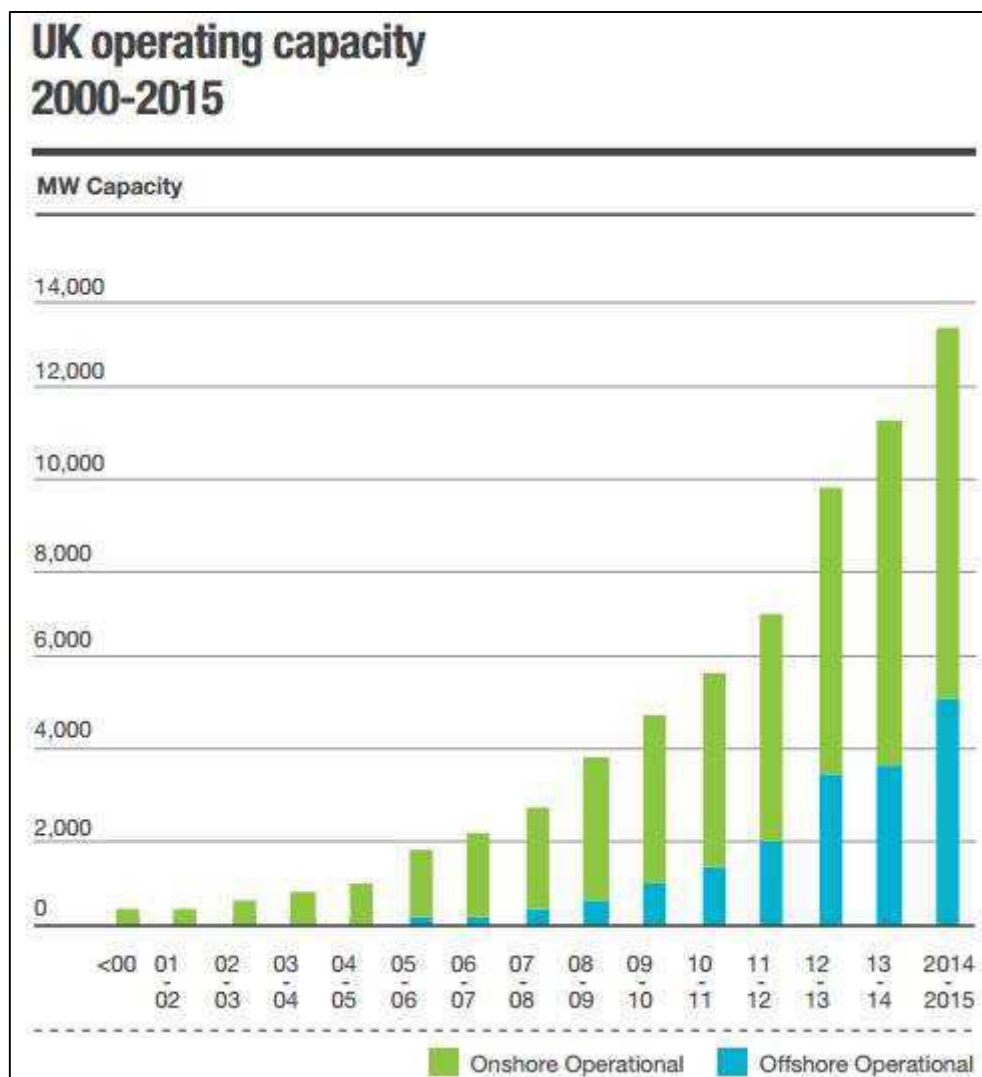
Os governos fora da Europa definiram objetivos ambiciosos para a geração eólica *offshore* e o desenvolvimento está começando a decolar na China, Japão, Coreia do Sul e os EUA. O consórcio liderado pelo FOWIND GWEC (*Facilitating Offshore Wind in India*) planeja desenvolver um atlas eólico *offshore* para a Índia, e outros mercados, como o Brasil, têm despertado o interesse em um futuro desenvolvimento. Enquanto eletricidade a partir de parques eólicos *onshore* já é mais barato do que de energia convencional em um número crescente de mercados, custos relativamente elevados continuam a ser o maior desafio para o seu desenvolvimento. Segundo a EWEA, as ações-chave para reduzir os custos incluem: a implantação de turbinas maiores para aumentar a captação de energia, encorajar uma maior concorrência, comissionamento de novos projetos, mantendo volume para cima e enfrentar os desafios da cadeia de fornecimento.

3.2.1 REINO UNIDO

A política de obrigação renovável foi implementada no país em 2002 como a primeira ação em prol da meta de 10% da geração de sua eletricidade a partir de fontes renováveis até 2010. O governo britânico reconheceu desde o início que a fonte eólica *onshore* não seria suficiente para atingir os objetivos da política energética e que a tecnologia eólica *offshore*, maremotriz e energia das ondas seriam indispensáveis para o alcance das metas em grande escala.

Segundo a RenewableUK, o Reino Unido lidera a produção de energia eólica no mundo, com capacidade, até o fim de 2015, de 5,06 GW instalados, equivalente a 42% da capacidade eólica *offshore* mundial. Um adicional em 2015 de 572 MW *offshore* e 975 MW *onshore*, dando uma capacidade total de 13,313 GW. Até outubro de 2016 este valor chegou a casa de 14,115 GW gerados. Este crescimento significa que a energia eólica já fornece mais de 10% das necessidades energéticas do país, onde foram investidos £ 1,25 bilhão e mais de 15 mil empregos. A Figura 26 representa o crescimento eólico no Reino Unido nos últimos anos.

Figura 26 – Capacidade cumulativa de energia eólica – Reino Unido – 2000 – 2015.



Fonte: RenewableUK.

Em setembro de 2016, segundo a *Dong Energy*, o Reino Unido instalou a primeira das 32 maiores turbinas eólicas *offshore* do mundo, com 8 MW de potência e 187m de altura, a turbina, da empresa Vestas, foi instalada no parque eólico de Burbo Bank.

3.2.2 ALEMANHA

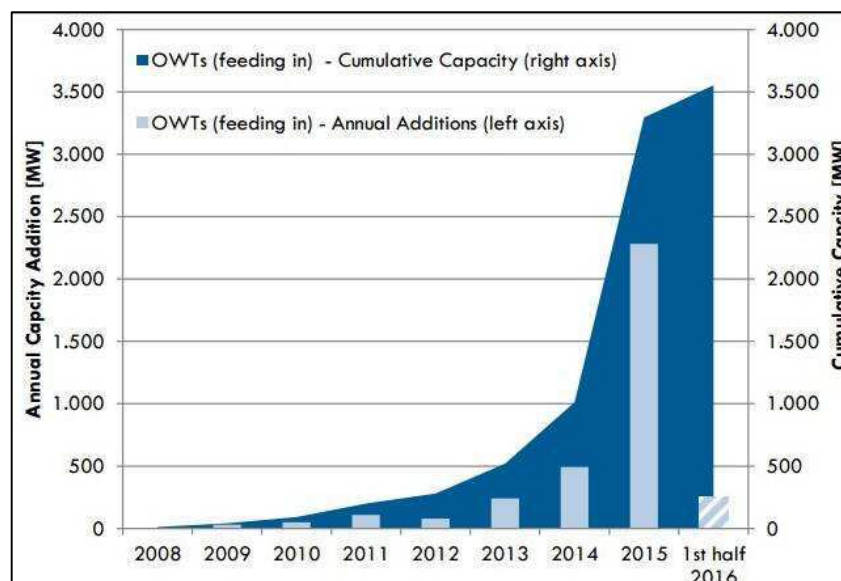
Segundo a WNA, a Alemanha, maior economia europeia, decidiu erradicar o uso de fonte nuclear para geração de energia elétrica desde 2011, apesar de dominarem essa tecnologia e serem fornecedores de reatores. Atualmente, a fonte nuclear é responsável por 16% da geração total de energia elétrica do país, fornecida a partir de oito reatores. O custo para tentar substituir a energia nuclear por energias renováveis foi estimado pelo governo em aproximadamente € 1.000 bilhões, sem qualquer garantia de um resultado confiável, e com o aumento da dependência do carvão, que hoje já é responsável por quase 50% da geração de eletricidade do país.

A Alemanha bateu um recorde em crescimento de eólica *offshore* em 2015, sendo o país que mais instalou e conectou projetos *offshore*, foram 546 turbinas conectadas com uma capacidade total de 2,282 GW, triplicando o seu valor acumulado até o ano de 2014, onde tinham uma capacidade de 1,012 GW.

De acordo com a BWE, a indústria eólica *offshore* justifica esse nível de expansão recorde devido a problemas atrás com a conclusão de conexões a rede desde 2013, que só puderam ser sancionados ano passado.

Até o primeiro semestre de 2016 a Alemanha acumula cerca de 835 turbinas ligadas a rede, com uma capacidade instalada de 3,552 GW, onde esse crescimento pode ser representado na Figura 27. Os pontos definidos pelo setor alemão *offshore* estabelece uma meta de expansão de 11 GW até 2025, ou seja, um crescimento anual média de 700 MW.

Figura 27 – Capacidade cumulativa de energia eólica *offshore* – Alemanha – 2008 – 2016.



Fonte: www.windguard.com

As informações da Figura 27, juntamente com a descrição de turbinas eólicas *offshore*, conectadas ou não à rede, são melhores representadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Desenvolvimento da energia eólica *offshore* – Alemanha - 2016

	Status do Desenvolvimento da Energia Eólica <i>offshore</i>	Capacidade (MW)	Número de Turbinas
Novas instalações – Primeiro semestre 2016	Turbinas <i>offshore</i> conectadas	258	43
	Turbinas <i>offshore</i> não-conectadas	312	52
	Novas fundações	-	76
Capacidades Cumulativas	Turbinas <i>offshore</i> conectadas	3.555,22	835
	Turbinas <i>offshore</i> não-conectadas	324,00	54
	Novas fundações	-	142

Fonte: www.windguard.com

A Alemanha foi o país que mais instalou e conectou projetos *offshore* em 2015, além disso, estão em construção mais 142 turbinas eólicas para serem instaladas até o final de 2016. O tamanho médio de uma turbina eólica *offshore* na Alemanha até o primeiro semestre de 2016 teve uma capacidade de 4,2 MW, um diâmetro do rotor de 154m, 25% a mais que em 2015, e uma altura de 110m, 24% maior.

Dados da GWEC refletem que a Alemanha investiu cerca de € 4 bilhões (US\$ 4,5 bilhões) nos últimos anos. Além disso, exportações de turbinas, fundações e de tecnologia de conexão de redes representaram cerca de um bilhão de euros. Isso mostra a importância industrial de energia eólica *offshore* no país, empregando cerca de 20.000 pessoas.

3.2.3 CHINA

A China é um país de grande dependência do carvão, assim como a indústria de geração de energia elétrica. O país é atualmente o maior alvo da indústria eólica mundial. Empresas como GE, Vestas e o principal fabricante mundial de pás, a LM (Dinamarca), têm fábricas na China para atender à demanda e ao índice de nacionalização exigido.

Em 2004 foi aprovada a Lei de Energias Renováveis que prevê um sistema de aquisição de energia por preço pré-estabelecido, o que dá condição de serem estabelecidos por meio de contratos de compras de energia a longo prazo (*Power Purchase Agreement* – PPA). Também em 2004, o governo Chinês estabeleceu um programa para o setor eólico (Projeto de Concessões em Energia Eólica). O programa terá 20 anos de vigência, seu principal objetivo é

reduzir o custo de produção da energia eólica por meio da constituição de parques eólicos de grande porte, resultando em economia de escala. Cada parque eólico constituído sob o auxílio do programa deverá ter no mínimo 100 MW. As concessões ocorrem sob a modalidade “*bidding competition*”, ou seja, os empreendedores concorrem em leilões onde vence quem oferecer o menor custo de tarifa a ser paga pela companhia estatal de distribuição de energia, que comprará, por meio de contratos a longo prazo de aquisição de energia (*Power Purchase Agreement – PPA*), os quais cobrem todo prazo de vida útil dos projetos.

É importante salientar que o governo chinês deu uma forte contribuição para o mercado. Do lado da oferta, criou condições favoráveis para a entrada de fabricantes estrangeiros de turbinas eólicas, porém, também incentivou o crescimento da indústria eólica nacional. Do lado da demanda, o governo obrigou as distribuidoras de energia a adquirirem um nível mínimo de energia eólica por meio de contratos a longo prazo com os produtores.

A Academia Chinesa de Ciências Meteorológicas estimou o potencial *onshore* do país como sendo de 235 GW e o potencial *offshore* como sendo de 750 GW. Na China, os melhores parques *offshore* se encontram bem próximos a importantes centros de carga no litoral do país.

De acordo com a GWEC, a China foi o terceiro país no ranking de novas capacidades eólicas *offshore* instaladas no ano de 2015, depois do Alemanha e do Reino Unido. O país instalou 360.5 MW de novas instalações eólicas *offshore* em 2015, um crescimento de 57% em relação a 2014, totalizando uma capacidade cumulativa de 1,014 GW, como representado na Tabela 12. A maioria dos projetos eólicos *offshore* estão localizados em águas rasas, próximos a costa continental, onde o mar seca (ou quase isso) na maré baixa. A maioria dos projetos em águas profundas estão em desenvolvimento ou estão no início da construção.

A China é o principal gerador mundial de eletricidade a partir de turbinas eólicas, com 145 GW de capacidade instalada, mas a maior parte deste é *onshore*. O impulso para expandir no exterior tem se dado pelo fato de que muitos de seus principais polos econômicos estão perto da costa. Mas a China está muito aquém do seu objetivo de aumentar a capacidade de energia eólica *offshore* devido a problemas técnicos e custos elevados, além da forte intensidade do tráfego marítimo para o comércio. Desenvolvimento tem, porém, diminuído desde então, a meta de atingir 5 GW em 2015 não foi alcançada, contudo mantém uma visão conservadora, e projeta o desenvolvimento de 10 GW até 2020.

Tabela 12 – Capacidade cumulativa de energia eólica *offshore* – China – 2007 – 2015

Ano	Capacidade Instalada (MW)	Capacidade Acumulada (MW)
2007	1,5	1,5
2009	14	15,5
2010	135,5	151
2011	109,58	260,58
2012	127,0	387,58
2013	39,0	426,58
2014	227,6	654,18
2015	360,5	1.014,68

Fonte: GWEC.

3.2.4 BRASIL

Até o momento não existem instalações eólicas *offshore* no Brasil, apesar disso, como mostrado no Capítulo 2.3, o Brasil possui um potencial eólico continental estimado em 143,5 GW, que segundo o AERODYN, é o 3º maior potencial de energia *offshore* do mundo. Um estudo realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, demonstra que o potencial *offshore* na Zona Econômica Exclusiva Brasileira, ZEE, é cerca de 12 vezes maior que o potencial *onshore*, o que conclui que a costa brasileira apresenta um grande potencial para geração eólica.

3.3 TIPOS DE FUNDAÇÕES

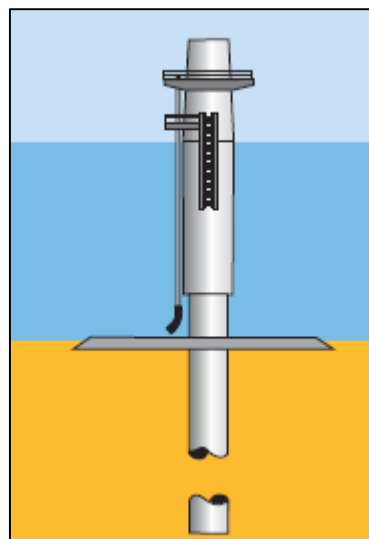
A fundação é o elemento construtivo que vai fazer a ligação entre o conjunto da torre e o solo. Irá suportar assim todas as cargas estáticas – como o peso próprio – e as dinâmicas – como o vento e os sismos.

A maior diferença entre as concepções de turbinas para instalação em terra e *offshore* são as fundações. Enquanto as turbinas eólicas em terra necessitam de grandes estruturas de fundações em estacas de betão, as turbinas eólicas *offshore* necessitam de diferentes tipos de estruturas de fundações, dependendo da profundidade e das características do fundo do mar.

3.3.1 MONOPILAR (*MONOPILE*)

Atualmente, o modelo mais popular de fundação para turbinas *offshore* é o de monopilar, com cerca de 80,1% (EWEA) (Figura 28). Tem um design simples, que consiste em um tubo cilíndrico com uma estrutura sub-transicional que conecta à estaca na torre da turbina, de forma eficiente, desde a parte mais alta da torre até abaixo da superfície da água no fundo oceânico. A monopilar é impulsionada ou batida no solo oceânico até a profundidade desejada, usam-se para solos com características geotécnicas fracas.

Figura 28 – Fundação monopilar.

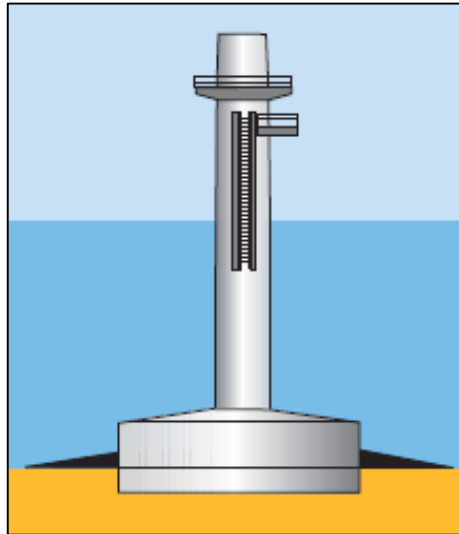


Fonte: <http://www.renewablegreenenergypower.com/offshore-wind-turbines-substructures/>

3.3.2 FUNDAÇÃO DE GRAVIDADE (*GRAVITY FOUNDATION*)

Fundações do tipo gravidade (Figura 29), consistem em um grande bloco de concreto onde a torre da turbina eólica é fixada. Fundações de gravidade já são utilizadas para fundações de pilares de pontes e em alguns parques eólicos europeus, em lâmina d'água até 10 m. Esse tipo é muito útil para solos oceânicos rochosos, tendo um custo-benefício maior nesse solo do que os outros tipos de fundações, representa cerca de 9,1%. (EWEA).

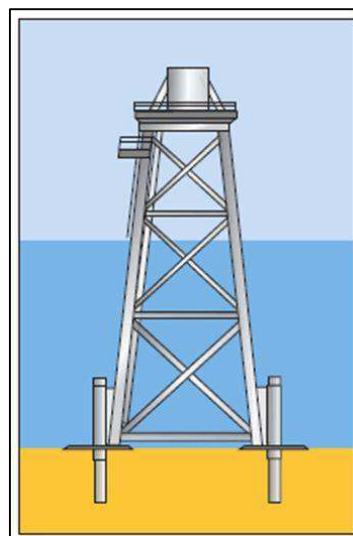
Figura 29 – Fundação de gravidade.



Fonte: <http://www.renewablegreenenergypower.com/offshore-wind-turbines-substructures/>

3.3.3 FUNDAÇÃO *JACKET*

A fundação do tipo *Jacket* (Figura 30) é de uma estrutura semelhante a um poste de eletricidade de alta tensão. Com quatro estacas extras, a *Jacket* é fixada ao leito oceânico. Este tipo é mais utilizado em fundos oceânicos arenosos, facilitando sua instalação, representa cerca de 5,4% (EWEA) das fundações.

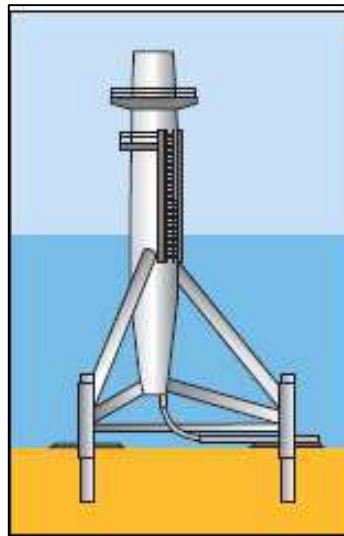
Figura 30 – Fundação *Jacket*.

Fonte: <http://www.renewablegreenenergypower.com/offshore-wind-turbines-substructures/>

3.3.4 FUNDAÇÃO TRIPÉ (*TRIPOD*)

A fundação do tipo tripé (Figura 31) é composta de uma estrutura de aço com três pernas que apoiam a estaca principal. Para a sua instalação, é necessário aprofundar a estaca principal e subsequentemente as laterais até a profundidade desejada. A desvantagem deste tipo é a de que não pode ser usada em um leito oceânico rochoso. Conta com cerca de 3,6% (EWEA) das fundações.

Figura 31 – Fundação tripé

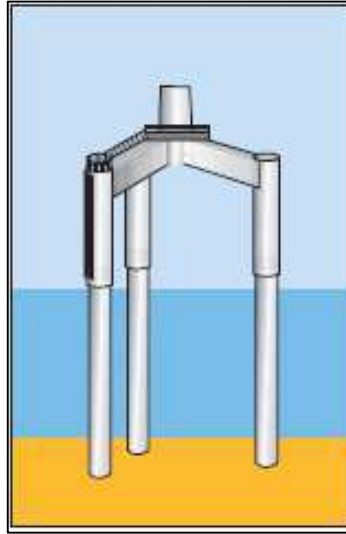


Fonte: <http://www.renewablegreenenergypower.com/offshore-wind-turbines-substructures/>

3.3.5 FUNDAÇÃO TRIPILAR (*TRIPILE*)

A fundação do tipo tripilar (Figura 32) consiste em três pilares de aço que são encaixados em uma estrutura de três estacas acima do nível do mar. De acordo com os fabricantes de tri-estacas, elas podem ser utilizadas em profundidades entre 25 e 50 m. Só pode ser utilizado em sedimentos arenosos. Conta com 1,7% das fundações.

Figura 32 – Fundação tripilar.



Fonte: <http://www.renewablegreenenergypower.com/offshore-wind-turbines-substructures/>

4 ESTUDO DE CASO DO PARQUE EÓLICO HORNS REV 1

Este Capítulo aborda o estudo específico do Parque Eólico Horns Rev 1, localizado a aproximadamente 15 km da costa de Blavands Huk no Mar do Norte Dinamarca, tratando dos recursos eólicos da região, a geração eólica no país, as empresas proprietárias do negócio, a tecnologia usada nos aerogeradores e maiores detalhes estruturais do parque.

4.1 DINAMARCA

4.1.1 HISTÓRIA

Liderado pelo cientista dinamarquês Poul La Coure, a Dinamarca foi pioneira na fabricação de aerogeradores. Após o choque petrolífero, e junto às preocupações com o aquecimento global, as atividades de investimento e desenvolvimento intensificaram-se, as fontes renováveis foram ganhando destaque no cenário dinamarquês, que buscava diminuir a dependência de outros países, assim como reduzir a emissão de dióxido de carbono devido as centrais elétricas a carvão. Em 1985 a Dinamarca aprovou a lei proibindo a construção de usinas nucleares, fato que se consuma até os dias atuais.

Após ser pioneira na fabricação de aerogeradores, a primeira turbina eólica comercial ligada à rede pública aconteceu também na Dinamarca, assim como o primeiro parque eólico *offshore*, além de possuir o segundo maior fabricante de aerogeradores, a Vestas, a Dinamarca se destaca como referência na geração de energia a partir de fontes eólicas.

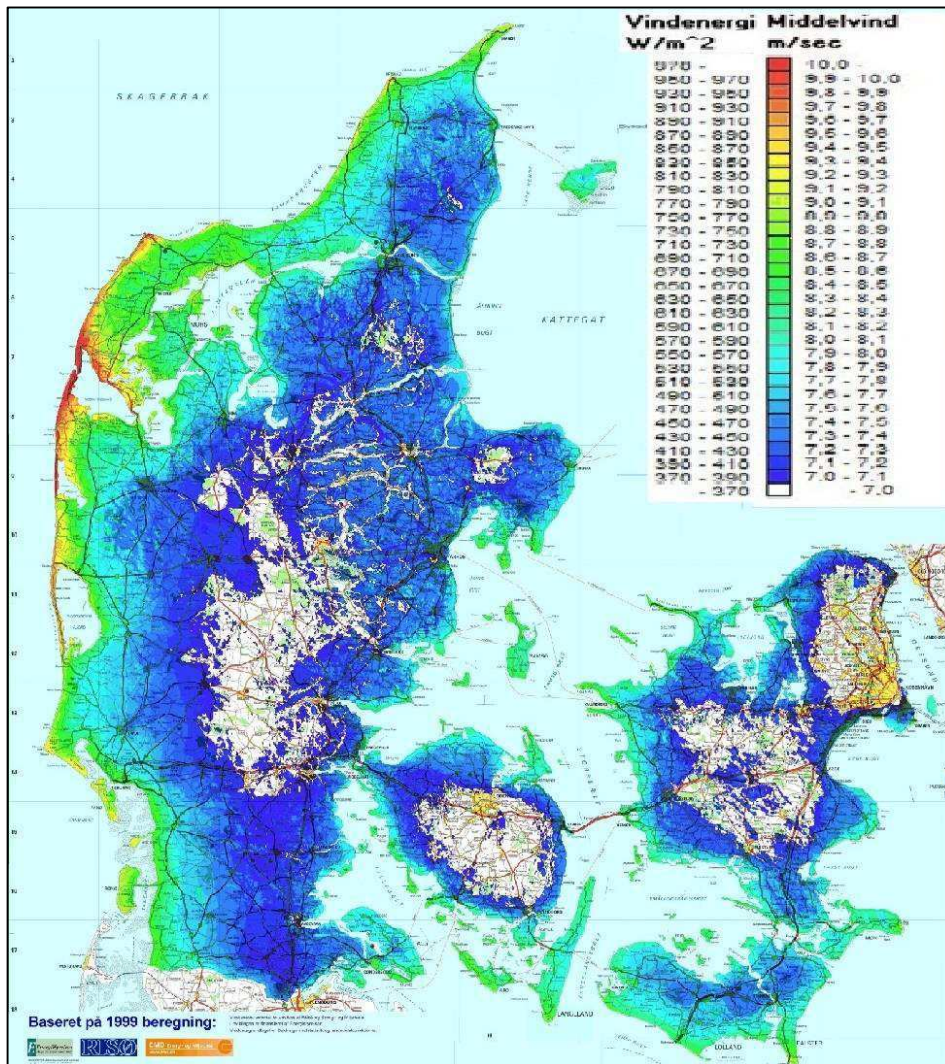
O sistema dinamarquês custeou parte dos investimentos iniciais para o desenvolvimento da geração de energia eólica. Os esforços realizados no país fizeram com que esse tipo de energia renovável conseguisse contribuir no cenário de geração de energia elétrica.

4.1.2 RECURSOS EÓLICOS

Com 43.094 km² e 7.314 km de costa, a Dinamarca conta com umas das melhores condições de vento do mundo, medida a uma altura de 10 m da terra, a velocidade média anual do vento fica em torno de 5,6 m/s medido a nível do solo, 7,1 m/s a 45 m e 8,5 m/s a 100m de

altura. O país também apresenta grande recurso *offshore*, a costa apresenta velocidades de vento mais elevadas, cerca de 9 a 10 m/s. O recurso eólico na Dinamarca foi mapeado em 1999 por *EMD International A/S*. A Figura 33 representa o atlas eólica na Dinamarca medido a 100 m de altura do solo.

Figura 33 – Atlas eólico a 100 m do solo – Dinamarca.



Fonte: <http://www.emd.dk/>

4.1.3 GERAÇÃO EÓLICA

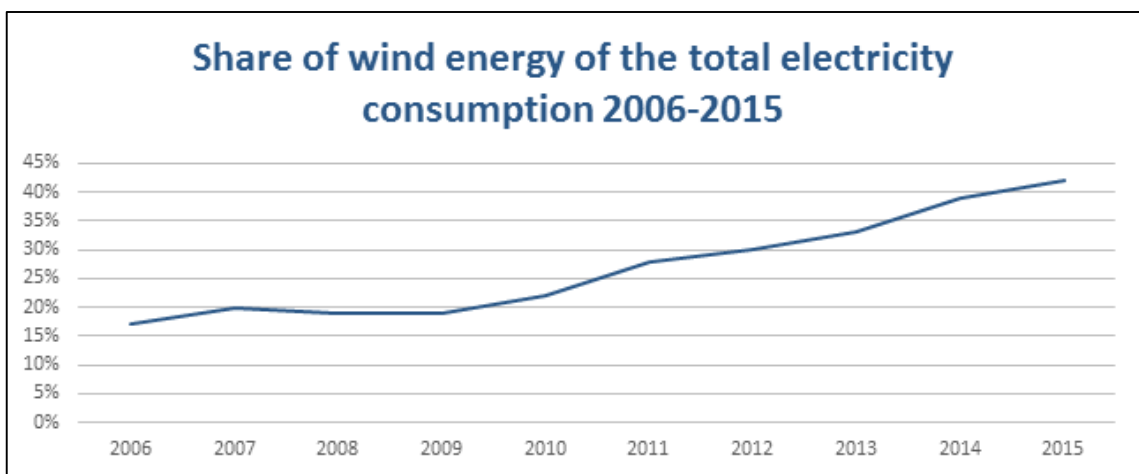
A Dinamarca bateu mais um recorde em 2015, alcançando uma taxa de 42% no fornecimento de energia a partir de turbinas eólicas, essa é a maior proporção em termos de consumo do mundo, batendo seu próprio recorde que era de 39% em 2014 e com objetivo de alcançar os 50% até 2020. Atualmente o país possui capacidade instalada de 5.070 MW, sendo

3.799 MW de geração *onshore* e 1.271 MW *offshore*, e um fator de capacidade médio de 31%. A Tabela 13 representa a evolução anual da capacidade cumulativa.

O crescimento de geração eólica mostra que a Dinamarca está buscando cada vez mais a independência na geração de energia elétrica, visto que o país já conta com 3 projetos de parques eólicos offshore, no qual acrescentarão em 1,35 GW a capacidade instalada, e devem entrar em operação até 2020.

A Figura 34 representa a evolução do consumo a partir da geração eólica.

Figura 34 - Produção de energia eólica em porcentagem de consumo – Dinamarca – 2006 – 2015.



Fonte: DWIA.

Tabela 13 - Capacidade cumulativa anual instalada – Dinamarca – 2006 – 2015.

Ano	<i>Onshore</i> (MW)	<i>Offshore</i> (MW)	Total (MW)
2006	2.713	423	3.136
2007	2.701	423	3.124
2008	2.748	423	3.171
2009	2.831	661	3.492
2010	2.934	868	3.802
2011	3.096	871	3.968
2012	3.247	922	4.169
2013	3.548	1.271	4.819
2014	3.616	1.271	4.887
2015	3.799	1.271	5.070

Fonte: DWIA.

4.1.4 VESTAS

A Vestas Wind Systems S/A é uma empresa dinamarquesa voltada exclusivamente ao mercado de energia eólica, dedicando ao desenvolvimento, manufatura, venda e manutenção de aerogeradores. A empresa opera países com a Dinamarca, Alemanha, Índia, Itália, Roménia, Reino Unido, Espanha, Suécia, Noruega, Austrália, China e Estados Unidos, é líder no mercado de geração com 76 GW de potência eólica instalados e emprega mais de 21.000 pessoas no mundo.

Foi eleita sétima coloca em 2016 pela Clean200, relatório que classifica as empresas de capital aberto no mundo inteiro por suas receitas totais de energia limpa, para se classificar, as empresas devem ter uma capitalização de pelo menos US\$ 1 bilhão no mercado e gerar ao menos 10% das suas receitas a partir de fontes limpas.

4.2 A EMPRESA PROPRIETÁRIA

O parque eólico de Horns Rev 1, construído em 2002 pela Dong Energy, atualmente é de propriedade de duas grandes empresas, a Vattenfall (60%) e a Dong Energy (40%), desde de 2005 o parque é operado apenas pela Vattenfall.

A Dong Energy, um dos maiores grupos líderes de energia da Europa, fundada com o nome atual em 2006, tem sede em Fredericia na Dinamarca. O principal foco da empresa é a aquisição, produção, distribuição e comercialização de energia. A empresa é a líder em construções de parques eólicos *offshore* do mundo,

A Vattenfall AB é uma empresa estatal sueca, fundada em 1909, e com sede em Estocolmo na Suécia. A empresa tem como principais serviços a produção, distribuição e comercialização de energia elétrica e gás. Além da Suécia, a empresa gera energia na Dinamarca, Finlândia, Alemanha, Holanda, Polónia e Reino Unido.

O Parque Eólico de Horns Rev 1 teve um investimento de € 270 milhões, na época da construção foi o maior projeto eólico *offshore* do mundo. O complexo tem 160 MW de capacidade instalada e um total de 80 turbinas eólicas em operação, com fundações do tipo monopilar, suficiente para abastecer 150 mil residências, o que equivale a 2% do consumo no país. A geografia privilegiada da Dinamarca, a presença de indústrias construtoras de aerogeradores no País e os estímulos ao investimento privado oferecidos pelo Governo da Dinamarca foram determinantes para o sucesso do empreendimento.

4.3 O LEIAUTE DO PARQUE EÓLICO

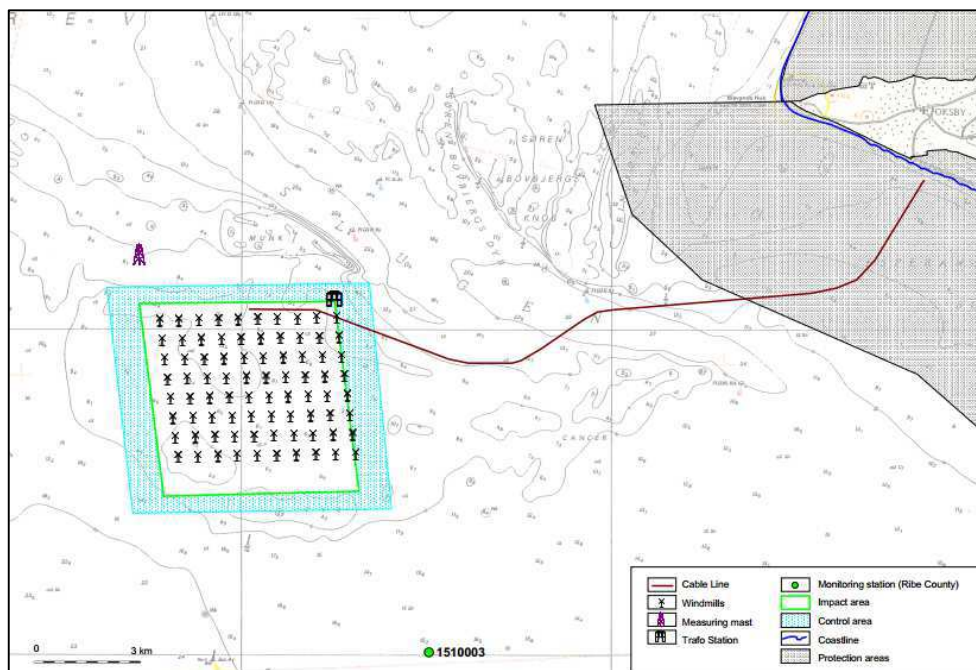
O parque possui uma geografia privilegiada, os recursos eólicos na Dinamarca são bastantes elevados, com ventos acima da média, de acordo com Atlas Eólico da Dinamarca, e está localizado a aproximadamente 15 km da costa de Blavands Huk no Mar do Norte. As Figuras 35 e 36 representam a disposição dos aerogeradores no parque.

Figura 35 – Disposição dos aerogeradores do parque eólico Horns Rev 1.



Fonte: <http://www.offshorewind.biz/2016/08/22/vattenfall-needs-air-support/>

Figura 36 – Leiaute do parque eólico Horns Rev 1.



Fonte: Vattenfall.

O parque eólico tem uma área de 20 km², com 560 m entre cada turbina. Antes de sua aprovação, final foi feito um estudo de impacto ambiental (EIA – *Environment Impact Assessment*) de acordo com a diretrizes da agência de energia dinamarquesa (*Danish Energy Agency*). A média anual de ventos na região, segundo o Atlas Eólico da Dinamarca, medido a 100m, de 9 m/s, o que favorece a geração de energia em grande escala.

4.4 AEROGERADOR VESTAS V80/2.0 MW

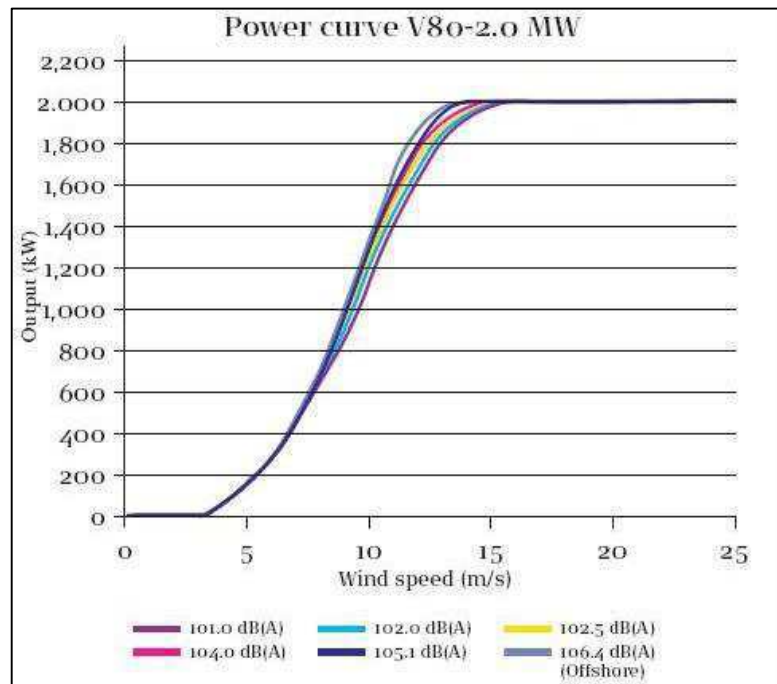
No parque eólico Horns Rev 1, o sistema de conversão eólico-elétrico é feito por aerogeradores cujo modelo é o Vestas V80/2.0 MW. O rotor tem um diâmetro de 80m, as torres alcançam até 110m de altura, onde são instaladas três pás, e conta com 2 MW de potência. A caixa multiplicadora de voltas converte uma única revolução em 16,7 revoluções na saída da caixa de engrenagem, que por sua vez, aciona um gerador de indução produzindo assim energia elétrica na tensão de 690 V.

Algumas características operacionais são listadas abaixo:

- Velocidade mínima de operação: 4 m/s
- Velocidade nominal de operação (2 MW): 15 m/s
- Velocidade máxima de operação: 25 m/s

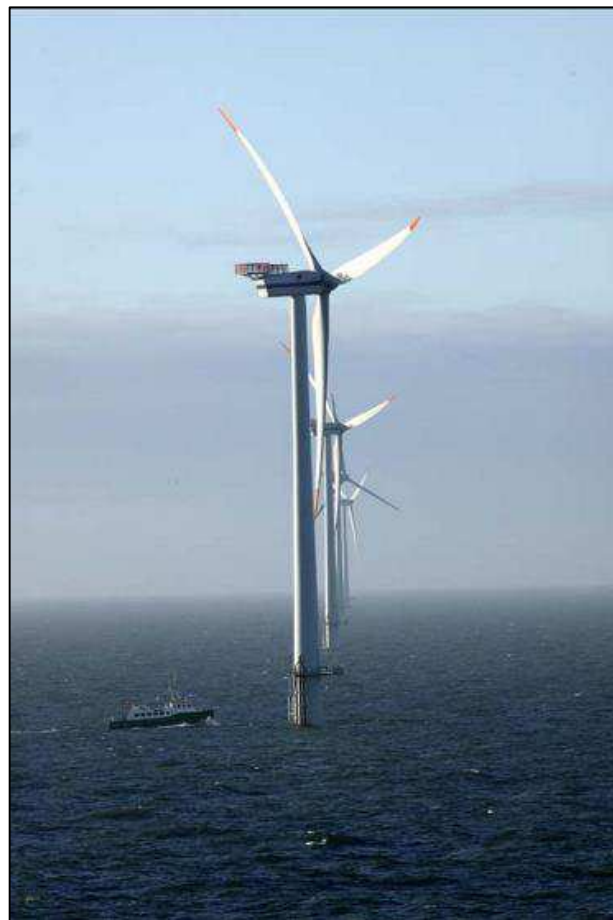
De acordo com Atlas Eólico da Dinamarca, no local do parque eólico possuímos um vento médio de 9 m/s, logo, fazendo uma análise a curva de operação do aerogerador, como representado na Figura 37, tem-se que o mesmo pode apresentar uma capacidade de geração de aproximadamente 800 kW.

Figura 37 – Curva de geração da turbina vestas V80/2000.



Fonte: Catálogo vestas (*General Specifications V80-2.0 MW*)

Figura 38 - Turbina Eólica Vestas V80/2.0 MW.



Fonte: http://www.volkswind.us/uploads/pics/Weltgroesste_02.jpg

4.5 A SUBESTAÇÃO

O parque eólico apresenta uma plataforma de subestação *offshore* elevadora de tensão 36/150 kV (Figura 39), com transformado de 160 MVA, além dos equipamentos elétricos que constituem uma subestação. As 80 turbinas estão ligadas através de cabos submarinos com tensão de 36 kV, fixados ao fundo do mar, que percorrem até a instalação da subestação.

Figura 39 – Subestação *offshore* Horns Rev 1.



Fonte: <http://www.4coffshore.com/windfarms/substation-horns-rev-1-substation-sid109.html>

A produção de energia é coletada *offshore* e transmitida através de cabos submersos com 19,2 cm de diâmetro e com 21km de extensão até a rede de transmissão *onshore*.

5 CONCLUSÃO

O crescimento elevado da demanda de energia nos últimos tempos face a busca por fontes renováveis de energia sinalizam que a geração de energia eólica será a fonte de energia com grande crescimento no futuro. As potências mundiais estão investindo cada vez mais nesse recurso.

Percebe-se que com a evolução da geração de energia eólica, uma das áreas que vem ganhando destaque mundialmente é a geração eólica em meio marítimo. O potencial eólico *offshore* mundial é enorme, ainda pouco aproveitado, tendo em vista uma previsão de avanço bastante promissora, mas que já mostra um certo avanço onde grandes economias mundiais vêm investindo na geração *offshore*.

Neste contexto, este trabalho objetivou o estudo de um parque eólico, enfatizando desde o panorama geral da energia eólica no mundo a dados estatísticos mais recentes sobre o crescimento dessa fonte de energia no mundo todo, com destaque para geração *offshore*.

Foi observado que o parque eólico Horns Rev 1 é um empreendimento de muita importância para a Dinamarca, uns dos pioneiros em grande capacidade de geração, que se junta aos demais parques no país e trazem a Dinamarca para referência em geração eólica no mundo.

Evidencia-se o fato da necessidade de investimentos na criação dos mapas eólicos de forma que se possam oferecer estudos mais consistentes de levantamento de velocidades e condições de vento para alocar as turbinas nos parques eólicos. Assim, podemos evitar o sobredimensionamento das turbinas e, conseqüentemente, reduzir custos desnecessários.

Conclui-se que, apesar do crescimento nos últimos anos, a potência das turbinas eólicas ainda está abaixo de um padrão considerado comparada com as máquinas térmicas e hidráulicas convencionais, o que gera um ponto negativo na inserção da energia eólica na matriz energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

4COFFSHORE. *Horns Rev 1 Substation*. Disponível em: <<http://www.4coffshore.com/windfarms/substation-horns-rev-1-substation-sid109.html>>.

Acesso em 10 out. 2016.

ABEEOLICA. *Boletim anual de geração eólica*. Disponível em: <http://www.portalabeeolica.org.br/pdf-encontro/Abeeolica_BOLETIM-2015_low.pdf>.

Acesso em 10 out. 2016.

AMMONIT. *Energia Eólica*. Disponível em: <<http://www.ammonit.com/pt/energia-eolica/energia-eolica>>. Acesso em 10 set. 2016.

ANEEL. *Agência Nacional de Energia Elétrica*. Disponível em: <www.aneel.gov.br/>.

Acesso em 5 out. 2016.

AWEA. *2016 U.S. Wind Industry Market Reports*. Disponível em: <<http://www.awea.org/Resources/Content.aspx?ItemNumber=8812>>. Acesso em 5 out. 2016.

BWE. *German Wind Energy Association*. Disponível em: <<https://www.wind-energie.de/en>>.

Acesso em: 09 out. 2016.

CASTRO, R. M. G. *Energias Renováveis e Produção Descentralizada: Introdução à Energia Eólica*. Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico (ISL), DEEC/Secção de Energia, 2003.

CLEAN200. Disponível em: <<http://www.clean200.org/>>. Acesso em 09 out. 2016.

CRESESB. *Atlas do potencial eólico brasileiro*. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>.

Acesso em 15 set. 2016.

DENMARK. *The Official Website of Denmark*. Disponível em: <<http://denmark.dk/en/green-living/wind-energy/>>. Acesso em 17 set. 2016.

DEWI. *Statistics*. Disponível em: <http://www.dewi.de/dewi_res/index.php?id=23>. Acesso em 12 set. 2016.

DONG ENERGY. Disponível em: <<http://www.dongenergy.com/en>>. Acesso em 10 out. 2016.

DWIA. *Danish Wind Industry Association*. Disponível em: <<http://www.windpower.org/en>>. Acesso em 17 set. 2016.

EIA. *Total Electric Power Industry Summary Statistics, 2014 and 2013*. Disponível em: <http://www.eia.gov/electricity/annual/html/epa_01_01.html>. Acesso em 09 out. 2016.

ELSAM. *Horns Rev Offshore Wind Farm*. Disponível em: <http://www.mumm.ac.be/Common/Windmills/SPE/Bijlage/1%20%20Horns_Rev_brochure.pdf>. Acesso em: 19 out. 2016.

ENERGY. *Wind Technologies Market Report*. Disponível em: <<http://energy.gov/sites/prod/files/2016/08/f33/2015-Wind-Technologies-Market-Report-08162016.pdf>>. Acesso em 16 out. 2016.

EWEA. *Wind in Power 2015 European Statistics*. Disponível em: <<https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2015.pdf>>. Acesso em 22 set. 2016.

GWEC. Global Wind Energy Council. Disponível em: <<http://www.gwec.net/>>. Acesso em 1 out. 2016.

MELO, M. S. M. *Energia Eólica: Aspectos Técnicos e Econômicos*. Rio de Janeiro, 2012. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MME. *Ministério de Minas e Energia: Proinfa*. Disponível em: <<http://www.mmegovbr/programas/proinfa/>> Acesso em: 03 out. 2016.

OFFSHOREWIND. Disponível em: <<http://www.offshorewind.biz/2016/01/18/playing-catch-up-leads-germany-to-ow-turbine-installation-record/>>. Acesso em: 01 out. 2016.

ORTIZ, G. P.; KAMPEL, M. Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE. **Potencial de Energia Eólica *Offshore* na Margem do Brasil**. Santos, 2011.

POWER TECHNOLOGY. *Horns Rev Offshore Wind Farm, Denmark*. Disponível em: <<http://www.power-technology.com/projects/hornsreefwind/>>. Acesso em: 17 out. 2016.

RENEWABLEUK. *Wind Energy Statistics*. Disponível em: <<http://www.renewableuk.com/page/UKWEDhome>>. Acesso em: 08 out. 2016.

SCIENTIFIC AMERICAN. *China Blows Past the U.S. in Wind Power*. Disponível em: <<https://www.scientificamerican.com/article/china-blows-past-the-u-s-in-wind-power/>>. Acesso em: 06 out. 2016.

THE WIND POWER. Disponível em: <<http://www.thewindpower.net/index.php>>. Acesso em 26 set. 2016.

VATTENFALL. Disponível em: <<https://www.vattenfall.de/>>. Acesso em 10 out. 2016.

VESTAS. Disponível em: <<https://www.vestas.com/>>. Acesso em 06 out. 2016.

VESTAS. **V80-2.0 MW**. Disponível em: <<http://pdf.directindustry.com/pdf/vestas/v80-20-mw-brochure/20680-53605.html>>. Acesso em: 16 out. 2016.

VIRTEBO, J. C. **Geração de Energia Elétrica a partir da Fonte Eólica *Offshore***. São Paulo, 2008. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

WIND EUROPE. Disponível em: <<https://windeurope.org/>>. Acesso em 19 set. 2016.

WWEA. World Wind Energy Association. Disponível em: <<http://www.wwindea.org/>>. Acesso em 25 set. 2016