

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - ESCOLA POLITÉCNICA DA USP
PECE - PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DE ENGENHARIA



Tecnologias de Caixas de Velocidades e Geradores Elétricos de Aerogeradores de grande Porte.

GABRIEL MORENO CAPARROZ SOARES

São Paulo

2017

GABRIEL MORENO CAPARROZ SOARES

Monografia para conclusão de curso de
Especialização em Energias Renováveis,
Geração Distribuída e Eficiência Energética
da Escola Politécnica da USP.

Orientador: Prof. Demétrio Cornílio Zachariadis

São Paulo

2017

RESUMO

Devido à grande pressão da comunidade internacional diante da escassez das fontes energéticas não renováveis, aos danos ambientais causados pela produção de energia elétrica oriundas de combustíveis fósseis e, por considerar que a produção de energia elétrica está ligada diretamente a questões de segurança nacional de um país, as instalações de parques eólicos crescem a uma taxa vertiginosa de 13,9% aa, considerando os últimos 06 anos em todo o mundo (Fonte: GWEC - 2016). Com base nestas informações, há um esforço conjunto resultante das expectativas dos consumidores, dos responsáveis por políticas públicas e, principalmente, dos operadores de energia elétrica, para que seja cada vez mais possível manter ao máximo a disponibilidade física dos sistemas eólicos.

Levando-se em conta este cenário, a confiabilidade e robustez dos equipamentos adotados é cada vez mais fundamental para garantir a produção elétrica com menor tempo de paradas de manutenção e, consequentemente, menor custo de operação. Para atender a esta expectativa, o mercado eólico deve estar em continuo desenvolvimento, tanto em aperfeiçoamento dos sistemas existentes, quanto na adoção de novas tecnologias que para estabelecer um custo de operação semelhante ou inferior aos sistemas tradicionais, como por exemplo, de geração hidráulica que, inclusive, a geração eólica é considerada complementar.

Este estudo se baseou em uma análise geral do mercado, dos fornecedores da tecnologia eólica, dos artigos e fontes primária relacionadas para entender o cenário atual. Dados oficiais dos organismos competentes permitem projetar, até certo ponto, os próximos passos para este mercado. A partir desta análise, foi possível relacionar a principal barreira enfrentada pela tecnologia eólica, além de apresentar possíveis alternativas e tendências de arranjos que, de certa forma, serão fundamentais para a sobrevivência da tecnologia eólica a longo prazo, garantido assim a sua liderança frente às outras alternativas de origem renovável.

Palavra-Chave: Aerogeradores, Operação, Manutenção, Eólica, Direct Drive, CVT, GearBox, Supercondutores.

ABSTRACT

Due to the great pressure from the international community in the face of the scarcity of nonrenewable energy sources, the environmental damage caused by the production of electricity from fossil fuels, and considering that the production of electricity is directly linked to national security issues of a country, wind farm facilities are growing at a vertiginous rate of 13.9% per year, considering the last 6 years worldwide (Source: GWEC, 2016). On the basis of this information, there is a joint effort resulting from the expectations of consumers, public policy makers and, above all, electricity operators, so that the physical availability of wind power systems is increasingly possible.

Taking into account this scenario, the reliability and robustness of the adopted equipment is increasingly fundamental to guarantee the electrical production with less time of maintenance stops and, consequently, lower operation cost. In order to meet this expectation, the wind energy market must be in continuous development, both in the improvement of existing systems and in the adoption of new technologies to establish a similar or lower operating cost for traditional systems, such as hydraulic generation, including wind power generation is considered complementary.

This study was based on a general analysis of the market, suppliers of wind technology, articles and related primary sources to understand the current scenario. Official data from the relevant bodies allow us to project, to some extent, the next steps for this market. From this analysis, it was possible to relate the main barrier faced by wind technology, as well as to present possible alternatives and tendencies of arrangements that, in a certain way, will be fundamental for the survival of wind technology in the long term, thus guaranteeing its leadership against the other alternatives of renewable origin.

Keyword: Wind Turbines, Operation, Maintenance, Wind, Direct Drive, CVT, GearBox, Superconductors.

Lista de abreviaturas e siglas

IRENA - Agência Internacional de Energia Renovável

WEC - World Energy Council

GWEC - Global World Energy Council

NREL - National Renewable Energy Laboratory

REN21 - Renewable Energy Policy Network for The 21st Century

ABDI - Agencia Brasileira de Desenvolvimento Industrial

IEA - International Energy Agency

BEN - Balanço Energético Nacional

CERN - Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

CO₂ - Dióxido de Carbono

CVT - Continuously Variable Transmission

DD - Direct Drive

DFIG - Doubly Fed Induction Generator

kW - kiloWatts

MW - MegaWatts

PCH - Pequena Central Hidrelétrica

PMSG - Permanent Magnet Synchronous Generator

RPM - Rotações por Minuto

SGE - Sistema Gerador Eólico

USA - Estados Unidos da América

HTS - High Temperature Semiconductor

EESG - Electrically Excited Synchronous Generator

Índice de Figuras

Figura 1-1 - Produção de Energia Eólica no Mundo - Capacidade Instalada Acumulada.	12
Figura 1-2 - Previsão do mercado eólico.....	12
Figura 1-3 - Capacidade eólica por Estado brasileiro - Destaque para RN, BA, RS e CE.	13
Figura 1-4 - Participação das fontes de geração na capacidade instalada em 12/2024.	14
Figura 2-1 - Produção Elétrica Mundial em 2016.	15
Figura 2-2 - Fator de capacidade médio Brasileiro 2015-2016.....	16
Figura 2-3 - Produção elétrica Brasileira por fonte.	16
Figura 2-4 - Usina Nuclear de Fukushima-Japão.	17
Figura 2-5 - Resumo das metas brasileiras na COP-21 de Paris - 2015.....	19
Figura 3-1 - Exemplo de Curva de Potência típica de um aerogerador.....	22
Figura 3-2 - Codificação de arranjos de aerogeradores e drivetrains de mercado	24
Figura 3-3 - Evolução de Arranjos aerogeradores no mercado mundial.	25
Figura 3-4 - Total de arranjos aerogeradores por tipo e fabricante - 2016 (%). 26	
Figura 3-5 - Visão interna de um gerador DFIG.	27
Figura 3-6 - Configuração DFIG com conversor de energia.....	28
Figura 3-7 - Componentes de uma Caixa de Velocidades típica.....	28
Figura 3-8 - Principais componentes danificados em caixas de velocidades. ...	29
Figura 3-9 - Número de falhas anuais de uma turbina eólica por componente. 30	
Figura 3-10 - Cerca de 42% do tempo de uma turbina parada por manutenção, teve como causa problemas na caixa de velocidade.	31
Figura 3-11 - Desgastes em rolamentos de uma caixa de velocidade.	31
Figura 3-12 - Desgaste em engrenagem de uma caixa de velocidades. A esquerda, impurezas observadas no óleo lubrificante de uma caixa de velocidades.	32
Figura 3-13 - Incêndio em uma torre eólica.....	32
Figura 3-14 - Aerogerador PMSG-DD de 6MW.....	33
Figura 3-15 - Configuração de um gerador síncrono com conversor total.	34
Figura 5-1 - Primeiras Turbinas OffShore instaladas na Dinamarca -Total de 11 turbinas de 450kW cada.....	40
Figura 5-2 - Crescimento da capacidade acumulada OffShore de 15,41% em relação a 2015.....	42
Figura 6-1 - Evolução dos pontos de Instalação de Turbinas OffShore	43
Figura 6-2 - Estimativa de crescimento eólico/ano.....	44
Figura 7-1 - Sistema de Torque Distribuído.....	46
Figura 7-2 - DriveTrain Split para 04 geradores Quantum Drive™.....	47
Figura 7-3 - Sistema de CVT de polia de diâmetro variável.	48

Figura 7-4 - Eficiência de uma Turbina Eólica equipada com CVT operando em ventos variáveis.....	49
Figura 7-5 - Funcionamento do sistema de velocidade variável por esferas....	50
Figura 7-6 - Temperaturas Críticas de materiais com propriedades supercondutoras.....	52
Figura 7-7 - Pioneiros da supercondutividade (da esquerda para a direita) Heike Kamerlingh Onnes, J. Georg Bednorz e K. Alex Müller. Quem será o próximo?	52
Figura 7-8 - Comparativo de dimensões de cabos elétricos utilizados no CERN.	53
Figura 7-9 - Exemplo de um Gerador HTS (Supercondutor de Alta Temperatura).....	55
Figura 7-10 - Projeto turbina eólica HTS composta por nove organizações Europeias.	56
Figura 7-11 - Turbina Eólica HTS EcoSwing™	57
Figura 7-12 - Turbina Eólica HTS SeaTitan™.	58
Figura 7-13 - Comparação das massas dos aerogeradores.	59
Figura 8-1 - Arranjos de sistemas aerogeradores por potência.....	61

Índice de Tabelas

Tabela 1- Classes de Turbinas Eólicas.....	21
Tabela 2 - Crescimento das Turbinas Eólicas - Rotor x Potência.....	23
Tabela 3 - Características de Aerogeradores de Mercado.....	33
Tabela 4 - Turbinas em Operação e Construção por País.....	44

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 - Energia Eólica - Líder em Renováveis	11
1.2 - Produção Eólioelétrica - Mundo	11
1.3 - Previsão de crescimento Eólioelétrica - Mundo	12
1.4 - Produção Eólioelétrica - Brasil	13
1.5 - Previsão de crescimento Eólioelétrico - Brasil	13
2. MOTIVAÇÕES PARA CRESCIMENTO DO MERCADO EÓLICO	15
2.1 - Crescente demanda elétrica mundial	15
2.2 - Fonte Complementar.....	16
2.3 - Catástrofes Ambientais	17
2.4 - Redução de Emissão de CO ₂	18
2.5 - Independência energética - Segurança Nacional.....	20
3. TIPOS DE ARRANJOS DE AEROGERADORES	21
3.1 - Classificação dos Aerogeradores.....	21
3.2 - Curva de Potência.....	22
3.3 - Cronologia de Potências	23
3.4 - Topologias dos aerogeradores.....	24
3.4.1 - DFIG (Gerador de Indução Duplamente Alimentado).....	27
3.4.2 - Gearbox (Caixa de Velocidades).....	28
3.4.3 - PMSG-DD (Gerador Síncrono de Ímãs permanentes - DirectDrive) .	33
3.5 - DriveTrain.....	34
3.6 - Principais Arranjos Aerogeradores.....	36
4. COMPARATIVO ENTRE OS PRINCIPAIS ARRANJOS DE MERCADO..	38
4.1 - DFIG com GearBox.....	38

4.2 - PMSG com DirectDrive	38
5. INSTALAÇÕES OFFSHORE	40
6. AUMENTO DE POTÊNCIA POR TORRE.....	42
7. TENDÊNCIAS DE ARRANJOS.....	45
7.1 - Split Generator	45
7.2 - CVT (Transmissão Contínua Variável).....	48
7.3 - Geradores HTS (Supercondutor de Alta Temperatura).....	51
7.4 - Principais frentes de desenvolvimento de aerogeradores HTS (Supercondutor de Alta Temperatura)	54
8. CONCLUSÃO	61
9. REFERÊNCIAS.....	64

1. Introdução

1.1 - Energia Eólica - Líder em Renováveis

As primeiras turbinas eólicas para finalidade elétrica datam do final do Século XIX, em instalações de arranjos primitivos ocorridas nos EUA e Dinamarca. Um século depois, quando a eletricidade já era fortemente provida por combustíveis fósseis, ocorre a crise do petróleo de 1973, levando países como os EUA a apoiar, entre outras fontes, a pesquisa e desenvolvimento da energia eólica (TOLMASQUIM, et al, 2016).

Hoje, instalações de fazendas eólicas não estão polarizados entre EUA e Europa, mas sim, difundidos em todo o mundo. Na Ásia, a China desponta como a grande líder em geração elétrica e já possui sistemas e arranjos eólicos de tecnologia própria (TOLMASQUIM, et al, 2016). Na América Latina, o Brasil lidera tanto em capacidade instalada, quanto em energia elétrica produzida (GWEC, 2016).

1.2 - Produção Eólioelétrica - Mundo

Com os dados oficiais de produção elétrica de 2016, podemos observar o crescimento desta tecnologia em todo o mundo. A maior parte da geração se deve a instalações em terra (Onshore), porém vários parques têm sido implantados no mar (Offshore) devido à diminuição de locais apropriados em terra para novos empreendimentos (notadamente na Europa) e pelo grande potencial dos ventos, apesar de apresentarem maiores custos (GWEC, 2016).

De acordo com o último levantamento do GWEC/2016 (Figura 1-1), foram gerados novos 54.642MW. Isso corresponde a um acumulado total de 486.790MW. Levando em conta o ano de 2010, a cada 05 anos a produção de energia elétrica através dos ventos é dobrada.

Podemos considerar que este crescimento se deu de forma extremamente rápida, considerando os desafios tecnológicos empregados na produção elétrica através de uma nova fonte de energia.

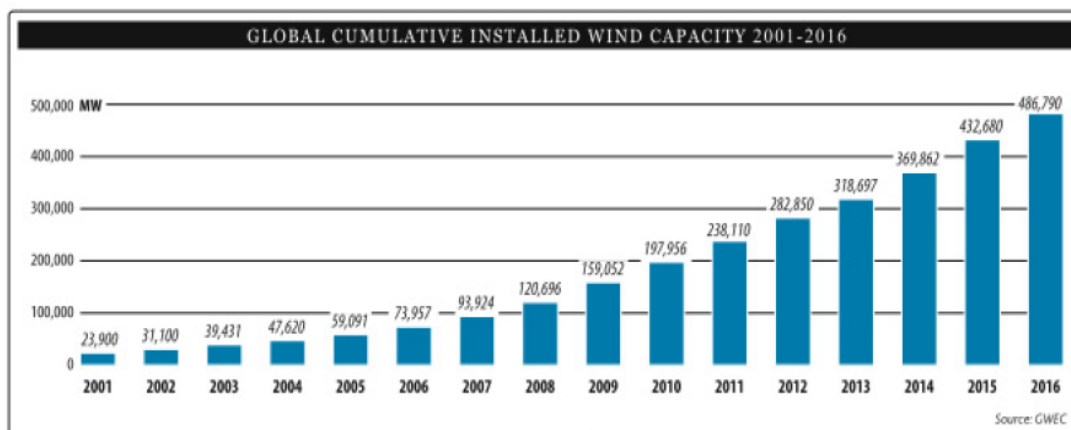


Figura 1-1 - Produção de Energia Eólica no Mundo - Capacidade Instalada Acumulada.

Fonte: Global Wind Report, 2016.

1.3 - Previsão de crescimento Eólioelétrica - Mundo

A previsão média de crescimento para o setor em relação a capacidade anual instalada é de 6,6% de 2017 até 2021. O Crescimento da capacidade acumulada prevista é de 13,5% (GWEC,2016).

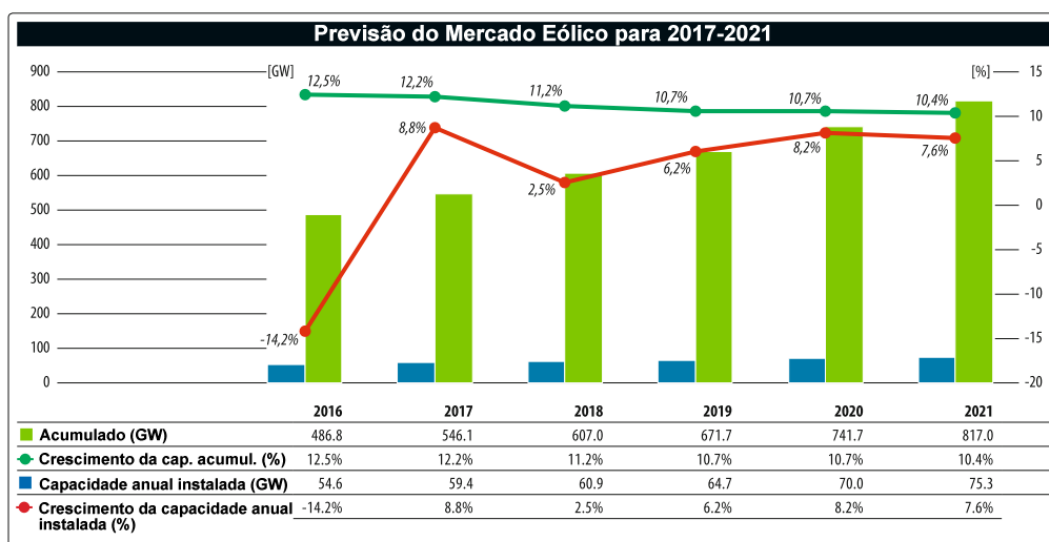


Figura 1-2 - Previsão do mercado eólico.

Fonte: GWEC,2016.

1.4 - Produção Eólioelétrica - Brasil

No Brasil, houve um aumento de 2.014MW, representando uma participação mundial de 3,7%. O país ocupa a 9ª Posição (subiu 01 posição no ranking em relação à 2015) num total acumulado de 10.740 MW (GWEC,2016).

A geração elétrica predominante no Brasil ainda é, basicamente, hídrica. Somando a produção das usinas hidrelétricas e PCH, correspondem a um total de 68,1% do total da matriz elétrica brasileira (EPE,2016). De acordo com a ABEEOLICA, a participação na matriz elétrica nacional chegou a 7,2% em Abril/2017.

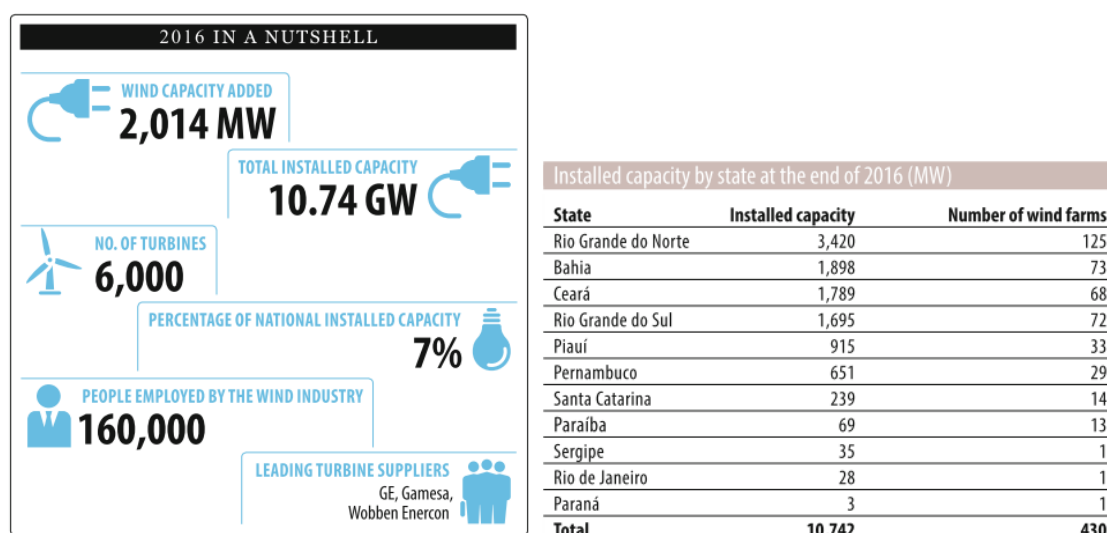


Figura 1-3 - Capacidade eólica por Estado brasileiro - Destaque para RN, BA, RS e CE.

Fonte: GWEC,2016.

1.5 - Previsão de crescimento Elioelétrico - Brasil

De acordo com o EPE - Empresa de Pesquisa Energética, o plano de expansão elétrico nacional priorizará a participação renovável para atender o crescimento no consumo interno (plano decenal de expansão 2024), unindo a condição estrutural elétrica mínima para o crescimento econômico do país aliado ao compromisso de produzir energia elétrica provenientes de fontes limpas (Figura 1-4).

No caso da energia eólica, a previsão de participação é de 11,6% na matriz energética nacional.

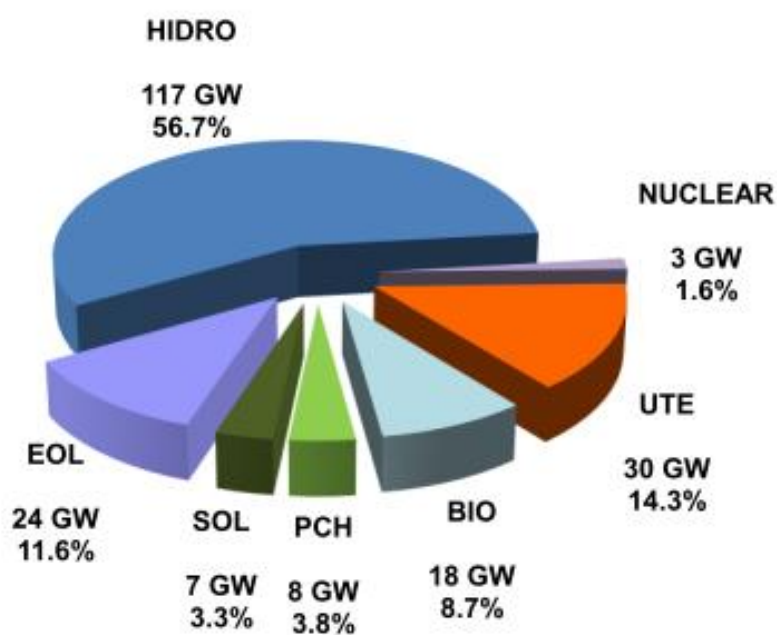


Figura 1-4 - Participação das fontes de geração na capacidade instalada em 12/2024.

Fonte: EPE, 2016.

2. Motivações para crescimento do mercado Eólico

O aperfeiçoamento da tecnologia é contínuo para que seja possível manter-se não apenas economicamente viável frente às tecnologias de geração tradicionais, mas também para se manter competitivo frente a outras alternativas renováveis. O desenvolvimento do setor para redução dos custos de Operação e Manutenção é induzido basicamente pelo aumento anual de instalações, pela pressão dos leilões de energia promovidos pelo governo (buscando tarifa cada vez menor) e pelos operadores de energia, que sofrem anualmente com a redução gradativa dos incentivos fiscais, conhecidas como *Feed-in*¹. Em sequência, destacam-se as principais motivações para a expansão das instalações eólicas para geração elétrica.

2.1 - Crescente demanda elétrica mundial

O consumo mundial de eletricidade dos 20 países mais ricos do mundo (G-20) em 2016 foi de 20.800 TWh, correspondendo a +64% em relação a 2000, cuja produção foi de 13.300TWh (ENERDATA,2017).

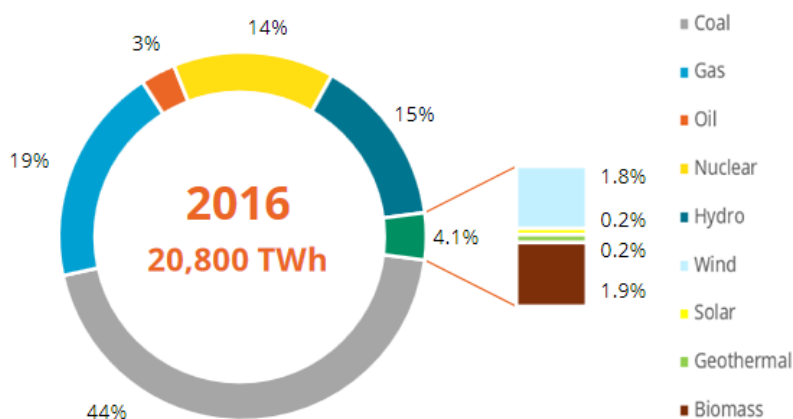


Figura 2-1 - Produção Elétrica Mundial em 2016.

Fonte: ENERDATA,2017.

¹Feed-in é uma forma de subsidiar, por um determinado período, a produção elétrica gerada através de uma fonte renovável, com o intuito de desenvolver a tecnologia e viabilizar o seu uso frente as fontes tradicionais que, normalmente, possuem custos mais baixos.

2.2 - Fonte Complementar

No Brasil, a energia eólica é considerada complementar a hidráulica, pois em períodos de escassez hídrica, (normalmente inverno), o fator de capacidade eólica aumenta.

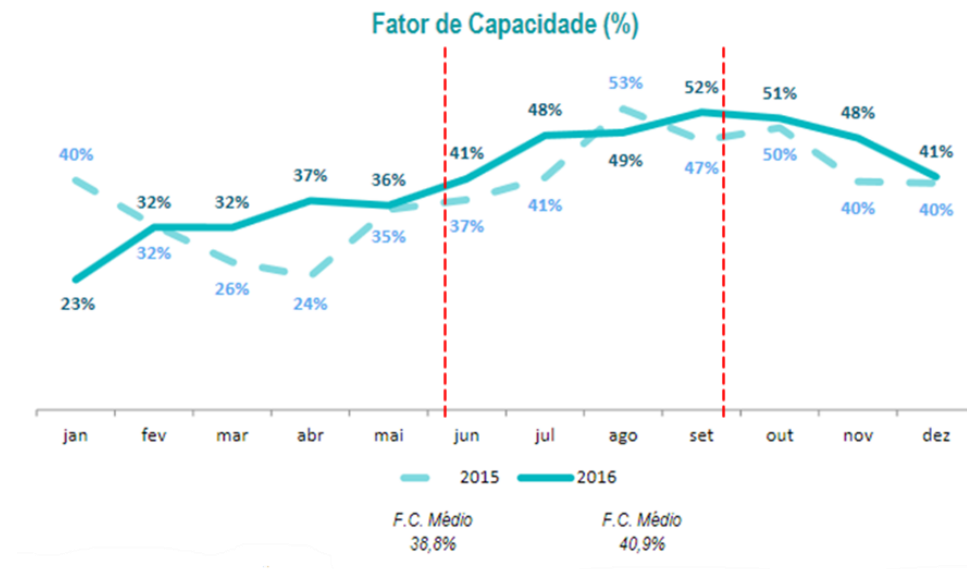


Figura 2-2 - Fator de capacidade médio Brasileiro 2015-2016.

Fonte: ABEEÓLICA,2017.

Em 2016, a estiagem sofrida no país impulsionou o despacho da energia eólica na matriz energética pelo SIN (Sistema Interligado Nacional).

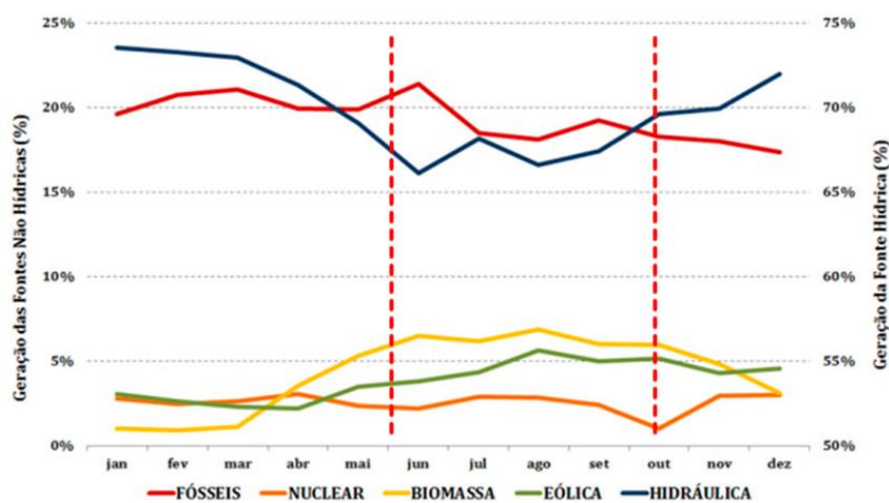


Figura 2-3 - Produção elétrica Brasileira por fonte.

Fonte: EPE,2016.

2.3 - Redução de Energia Nuclear

Antes do desastre de Fukushima em 2011, a geração elétrica de fonte nuclear detinha 13% da participação mundial. No ano seguinte ao acidente, os países que mantiveram esta fonte, totalizaram 10,6% da produção, uma queda de 2,4%. Em resposta ao acidente, quase 80% do público apoiou a eliminação da energia nuclear em março de 2012, e as energias renováveis agora são amplamente vistas como uma fonte de energia crítica para o futuro. Embora a opinião e sentimento público possa mudar ao longo do tempo, o apoio às energias renováveis é considerado irreversível devido ao aumento da consciência pública sobre os riscos da energia nuclear (REN21,2012).

USINA NUCLEAR DE FUKUSHIMA



Capacidade de produção energética

- Instalada: 4,696 MW
- Máxima: 7,456 MW
- Anual: 25,806 GW-h

Inauguração: 26 de março de 1971



Figura 2-4 - Usina Nuclear de Fukushima-Japão.

Fonte: folha.com.

Além do Japão, este acidente desencadeou um acalorado debate sobre a segurança da energia nuclear e a reorientação da futura política energética em muitos países. Em maio de 2011, o governo suíço decidiu eliminar a produção elétrica através da energia nuclear até 2034. Em junho de 2011, uma esmagadora maioria (mais de 94% dos eleitores italianos) aprovou um referendo para cancelar planos para novos reatores nucleares. Na Bélgica, foi tomada a decisão de fechar os três reatores mais antigos até 2015, além de encerrar a produção completamente até 2025, desde que fontes alternativas

possam atender às demandas para evitar a falta de energia. Na campanha eleitoral, o recém-eleito presidente da França, François Hollande, solicitou a redução da participação da energia nuclear na matriz energética do país de 75% para 50% até 2025 (REN21, 2012).

A pressão exercida pelos ambientalistas e comunidade internacional, desencadeou uma queda abrupta e reduziu a participação nos anos seguintes. Esta lacuna foi preenchida por outras fontes, em especial a eólica que já era, desde então, considerada segura, limpa e consolidada no mercado de geração elétrica.

2.4 - Redução de Emissão de CO₂

Políticas Públicas de redução de uso de combustíveis fósseis viabilizaram os projetos eólicos, como as adotadas na União Europeia (European Parliament e Council of the European Union, 2001, 2009) e a implementação de vários mecanismos de apoio, como o corte de impostos para renováveis, facilidade no financiamento de equipamentos, criação do mercado de crédito de carbono, implantação de taxas de carbono e, em alguns países, sistemas de preços bonificados para subsidiar as tarifas elétricas praticadas (TOLMASQUIM, et al, 2016). Pactos de redução de emissão de CO₂, como a COP21 (Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas), ocorrida em Paris no ano de 2015, contribuíram para o aumento em instalações de energias renováveis, em especial eólica.

Um exemplo são as metas propostas pelo Brasil que favorecem o crescimento da energia renovável no país:

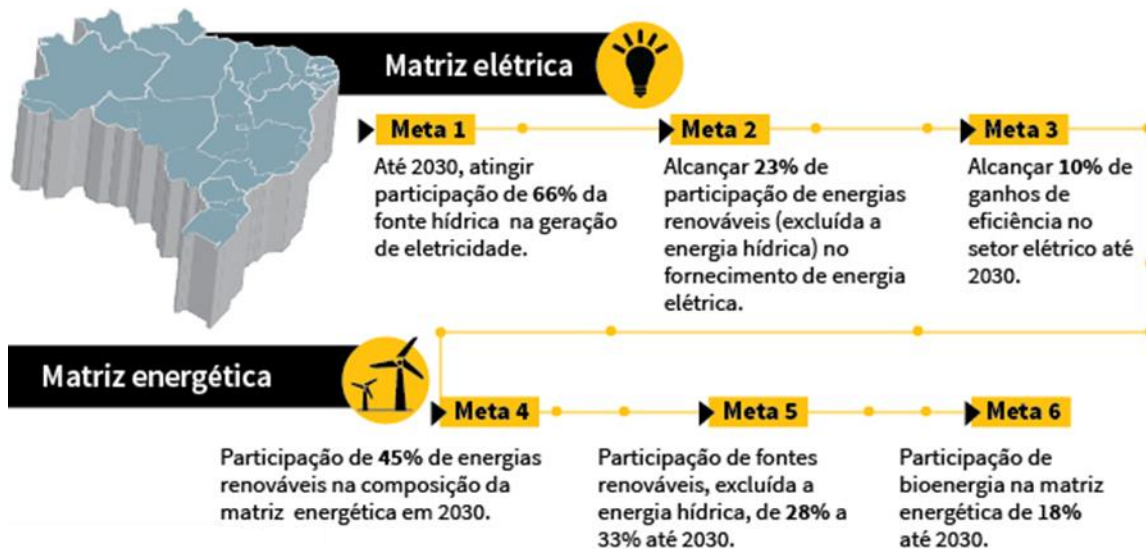


Figura 2-5 - Resumo das metas brasileiras na COP-21 de Paris - 2015.

Fonte: MME - Ministério das Minas e Energia, 2015.

A Geração Eólica em termos de fonte, por si só, é extremamente competitiva. Em comparação a uma termoeletrica, cujo combustível (GN ou Diesel) é responsável por cerca de 40% do custo do kW produzido, sem contar com as emissões de CO₂ na geração, o combustível de um gerador eólico é simplesmente o vento - sustentável, natural e, sobretudo, gratuito (IRENA,2012).

Em 2016, a energia eólica evitou globalmente mais de 637 milhões de toneladas de emissões de CO₂ (GWEC,2016) e 387 milhões de metros cúbicos de água foram evitados pela energia eólica até o final de 2016 na União Européia, equivalente ao uso anual médio de água familiar de quase 7 milhões de cidadãos (GWEC,2016).

Países como França e Inglaterra já anunciam metas de proibição de fabricação de carros movidos a gasolina e diesel a partir de 2040. Estes veículos utilizarão a eletricidade como combustível e empresas como a Volvo já noticiaram que, em 02 anos, produzirá apenas carros híbridos ou totalmente elétricos. Outras nações anunciam metas mais ambiciosas. A Noruega estima que banirá a venda de veículos de combustíveis fósseis à partir de 2025. Isso aumentará ainda mais a demanda elétrica mundial por fontes renováveis (afinal não

haverá sentido utilizar fontes fósseis), principalmente se for acompanhada por outros países. A longo prazo, a energia elétrica ocupará a posição do petróleo para transporte de passageiros.

2.5 - Independência energética - Segurança Nacional

Somente após a crise do petróleo de 1973, com a explosão mundial dos preços do precioso líquido energético é que países despertaram para o início do desenvolvimento e incentivo a exploração comercial das chamadas fontes renováveis de energia, dentre as principais, a força do vento. Estas experiências negativas, onde um determinado país detinha o controle das fontes energéticas de outros, forçaram os países a criarem Políticas Públicas que favorecessem as alternativas renováveis para produção elétrica em função das suas necessidades e características regionais (perfil de demanda, condições climáticas, entre outros).

No caso da Alemanha, um dos principais caminhos foi o investimento em pesquisa e desenvolvimento da energia Eólica, projetando a autossuficiência elétrica necessária para a segurança de investimento do mercado interno em conjunto com o compromisso das metas sustentáveis, ou seja, reduzindo gradativamente o uso de fontes fósseis no país, principalmente, das fontes importadas de outros países.

3. Tipos de Arranjos de aerogeradores

3.1 - Classificação dos Aerogeradores

A fonte eólica é em recurso de natureza variável e dependente de condições climatológicas e geográficas e, para cada localidade, pode apresentar regimes de ventos bastante distintos. Esses regimes podem significar presença de velocidades de vento altas e turbulência intensa. Estes dois fatores são fortemente ligados aos esforços submetidos aos aerogeradores ao longo do tempo de sua vida útil, portanto, as turbinas eólicas são projetadas para atender as condições específicas de cada localidade (ABDI,2014).

Como forma de garantir a integridade dos aerogeradores, a norma internacional IEC 61400-1 define quatro classes de projeto, I, II, III e S, onde a primeira classe é associada a maior velocidade de vento, indicando aderência do projeto de aerogerador ao regime de ventos de um determinado local. Cada classe ainda deve ser associada a uma de três categorias de turbulência diferentes, A, B e C, definidas pelo valor da intensidade de turbulência. A Tabela abaixo mostra as características das Classes de aerogeradores de acordo com a norma IEC 61400-1 (ABDI,2014).

Tabela 1 - Classes de Turbinas Eólicas.

Classes de Turbinas (IEC 61400-1)				
Classe	I	II	III	S
V_{ref} (m/s)	50	42,5	37,5	Definido pelo fabricante
$A I_{ref}$ (-)	0,16			
$B I_{ref}$ (-)	0,14			
$C I_{ref}$ (-)	0,12			

Fonte: ABDI,2014.

Na Tabela acima, **V_{ref}** é a velocidade de referência. A turbina deve ser projetada de forma que resista a climas onde o extremo da velocidade média (medida para o local) de 10 minutos, em um período de recorrência de 50 anos, seja menor ou igual à **V_{ref}** . **I_{ref}** é a intensidade de turbulência de referência.

Esta é calculada pela divisão do desvio padrão da velocidade pela média de velocidade (ABDI,2014).

3.2 - Curva de Potência

A curva de potência de um aerogerador caracteriza a potência gerada em função da velocidade do vento exercida nas pás eólicas (ver figura 3-1). Esta condição é analisada por um conjunto de fatores, desde o design das pás, torre e nacele, até o trem de potência utilizado no sistema de geração. Em geral, a curva de potência é fundamental para a escolha da turbina correta para um determinado local de instalação. A curva de potência real da turbina eólica ilustra três características da velocidade do vento.

- **Velocidade Cut in:** Velocidade do vento em que a turbina começa a gerar eletricidade;
- **Velocidade Nominal:** Velocidade do vento a partir da qual a turbina gera energia em sua potência nominal. Frequentemente, mas nem sempre, trata-se da máxima potência;
- **Velocidade Cut out:** Velocidade do vento mediante a qual a turbina é desligada para proteção das cargas e do gerador elétrico e para manter a integridade física da turbina dentro dos limites de danos aos diversos componentes da turbina (Fadigas,et al,2017).

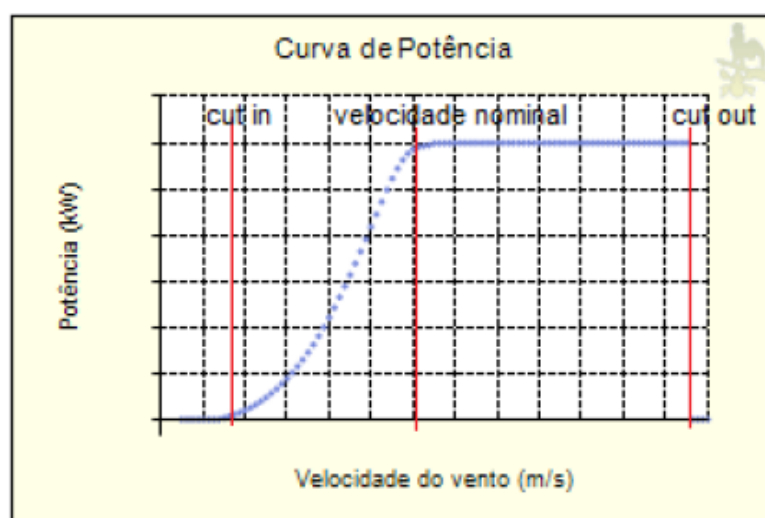


Figura 3-1 - Exemplo de Curva de Potência típica de um aerogerador.

Fonte: EPE,2016

As informações disponibilizadas pelos fabricantes na curva de potencia de um aerogerador revelam a potencia gerada em cada velocidade do vento aplicado nas pás do aerogerador. A potência máxima extraída de uma turbina eólica é expressa abaixo:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot 0,59 \quad [\text{W/m}^2]$$

Sendo:

ρ : 1,25 kg/m^3 , massa do ar, nas condições normais de temperatura e de pressão ao nível do mar.

A: Área referente ao ar turbinado pelas pás, em m^2 .

V: Velocidade do vento em m/s

0,59: Limite de Betz

3.3 - Cronologia de Potências

No início dos anos 80, a potência típica de uma turbina eólica era de 100kW. Em 1993, a potência tinha crescido para 500kW. Em 1995, as turbinas eram tipicamente de 750kW a 1.000kW, dobrando a sua capacidade em poucos anos. Em 2001, potência entre 2.000kW a 2.500 kW eram comuns. Hoje, alguns arranjos de turbinas eólicas ultrapassam a 8.000 kW e a tendência é chegar a 12.000kW em 2020 (Herberta, et al, 2005).

Tabela 2 - Crescimento das turbinas eólicas - Diâmetro do Rotor x Potência

Ano	Potência Média	Diâmetro do Rotor
1989	300kW	25m
1993	500kW	45m
1995	1.300kW	60m
1997	1.600kW	80m
1999	2.000kW	100m
2003	3.500kW	112m
2005	5.000kW	126m
2010	7.500kW	160mm
2016	10.000kW	190m
Futuro	12.000kW	250m

Fonte: IRENA, 2012.

3.4 - Topologias dos aerogeradores

De acordo com a velocidade de rotação e o tipo de trem de acionamento (Drivetrain), os aerogeradores podem ser classificados nas seguintes topologias (CHEN,2008):

- De velocidade fixa e caixa de engrenagem de múltiplo estágio;
- De velocidade variável limitada e caixa de engrenagem de múltiplo estágio;
- De velocidade variável e caixa de engrenagem de múltiplo estágio (DFIG);
- De acionamento direto e velocidade variável (EESG/PMSG);
- De velocidade variável e caixa de engrenagem de único estágio;

3.4.1 - Codificação de Aerogeradores e Drivetrains

Aerogeradores e Drivetrains são codificados conforme seu arranjo (Figura 3-2).

Tipos de Arranjos Aerogeradores e DriveTrains	
Tipo	Configuração
A	Gerador Assíncrono de alta velocidade - Gaiola de Esquilo com caixa de engrenagens
B	Gerador Assíncrono de alta velocidade de rotor liso com caixa de engrenagens
C	Gerador de Indução duplamente alimentado com caixa de velocidade
D.EE	Gerador síncrono eletricamente excitado com acionamento direto
D.PM	Gerador síncrono de ímãs Permanentes com acionamento direto
E.EE	Gerador síncrono eletricamente excitado de média/alta velocidade
E.PM	Gerador síncrono de ímãs Permanentes de média/alta velocidade
F	Gerador Assíncrono de alta velocidade com conversor de potência total

Figura 3-2 - Codificação de arranjos de aerogeradores e drivetrains de mercado

Fonte: JRC Wind Energy, 2016

A evolução dos arranjos ocorreu de acordo com os desafios enfrentados por cada ponto de instalação. Na Europa, a escassez dos pontos de instalação em terra forçou uma solução para instalação longe da costa. A dificuldade em manutenção despertou a utilização de sistemas diretos, porém, esse modelo de

arranjo se desenvolveu mais na Ásia, devido a abundância em matérias-primas para fabricação dos superímãs. Na figura 3-3 é possível verificar a evolução dos arranjos distribuídos por localidades.

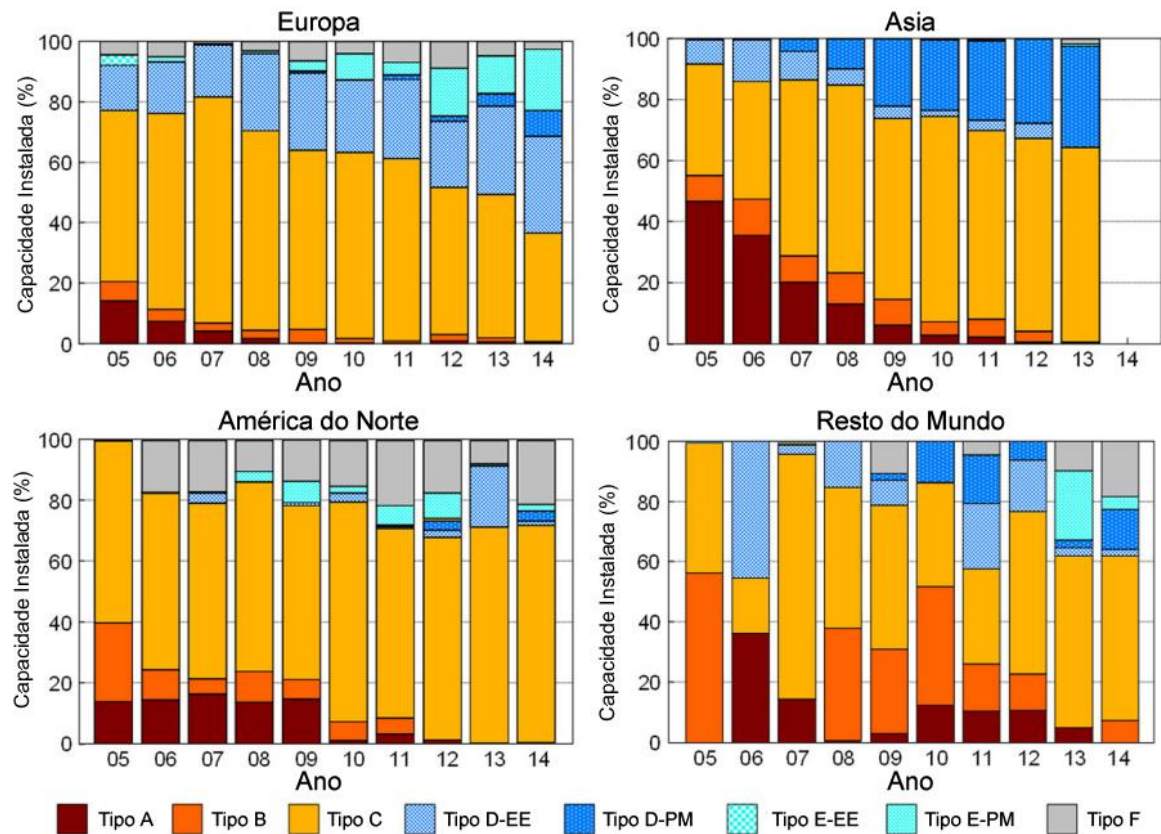


Figura 3-3 - Evolução de Arranjos aerogeradores no mercado mundial.

Fonte: GONZALEZ;ARANTEGUIR,2016.

O mercado global de vento é dominado por turbinas DFIG de alta velocidade, seguidas de PMSG/EESG Direct Drive de baixa velocidade com conversores de potência completos (Ver Figura 3-4). A configuração do aerogerador e drivetrain é dependente da potência nominal das turbinas eólicas. Por exemplo, a maioria das turbinas eólicas abaixo de 2MW usam configuração DFIG de alta velocidade, enquanto que este arranjo perde a participação de mercado à medida que a potencia nominal da turbina eólica aumenta.

Enquanto isso, em categorias de turbinas eólicas acima de 3MW, a configuração mais utilizada é o PMSG de alta velocidade com um conversor de potência total (JRC WindEnergy, et al, 2016).

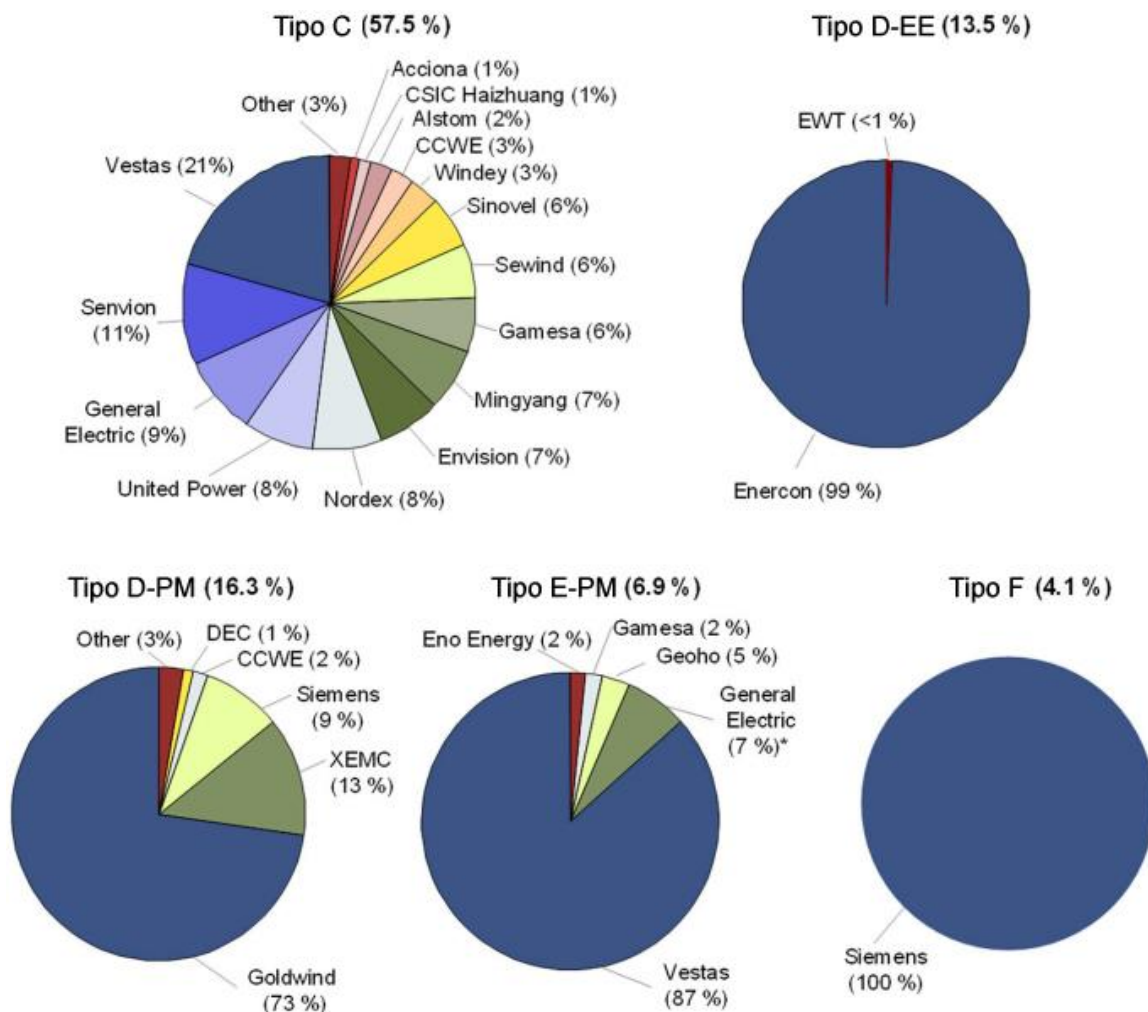


Figura 3-4 - Total de arranjos aerogeradores por tipo e fabricante - 2016 (%).

Fonte: GONZALEZ;ARANTEGUIR,2016.

Conforme figura 3-4, veremos os arranjos mais utilizados no mercado atualmente: DFIG (Gerador Assíncrono duplamente alimentado), com 57,5% do mercado, seguido de 16,3% do arranjo que mais vem crescendo em instalações de grandes capacidades: PMSG (Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes) com acionamento direto.

3. 4.2 - DFIG (Gerador de Indução Duplamente Alimentado)

O conceito DFIG corresponde a uma configuração de turbina eólica de velocidade variável e um conversor de energia de escala parcial no circuito do rotor. O estator está diretamente conectado a rede, enquanto o rotor está conectado através de um conversor eletrônico de potência. O conversor de potência controla a frequência do rotor e, portanto, a velocidade do rotor. Este conceito oferece suporte a uma ampla operação de alcance de velocidade, dependendo do tamanho do conversor de frequência. Normalmente, o intervalo de velocidade variável é +30% em torno da velocidade síncrona. A classificação do conversor eletrônico de energia é apenas 25-30% da capacidade do gerador, o que torna este conceito atrativo e popular do ponto de vista econômico. O conceito é usado por muitos fabricantes, como Vestas, Gamesa, GE, Repower, Nordex, etc (Chen,et al,2008).

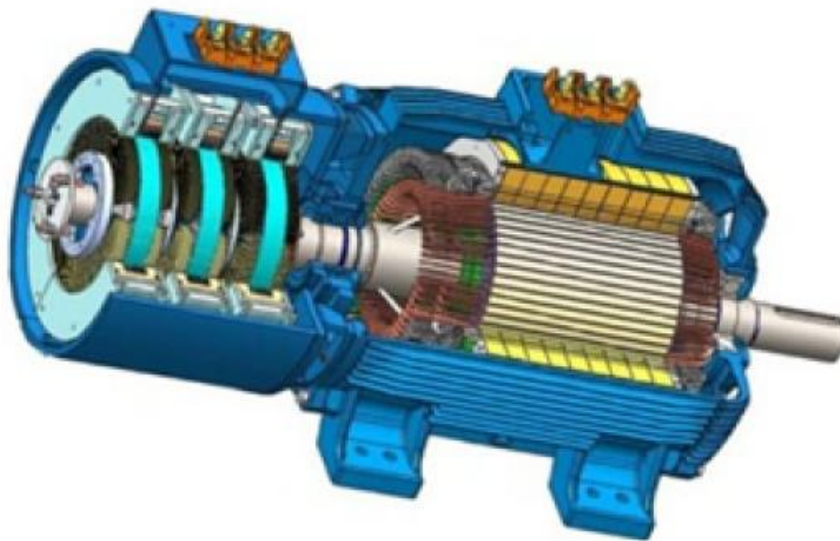


Figura 3-5 - Visão interna de um gerador DFIG.

Fonte: Wenping, Ying e Zheng,2012.

Em um DFIG, o giro consideravelmente lento do rotor oriundo das pás (10-20RPM) é direcionado a uma caixa de engrenagens, cujo eixo de saída chega a altas rotações e que, por sua vez, é conectado ao gerador DFIG. Em um DFIG, tanto o rotor como o estator usam enrolamentos de cobre excitados eletricamente para criar campos magnéticos. À medida que o rotor gira, a interação entre estes campos gera a eletricidade.

Geradores DFIG devem girar a 750-1800 RPM para operar, portanto, eles são restritos a aplicações de alta velocidade.

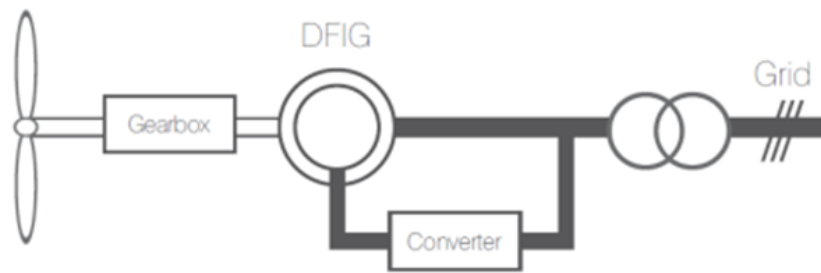


Figura 3-6 - Configuração DFIG com conversor de energia.

Fonte: ABDI,2014

3.4.3 - Gearbox (Caixa de Velocidades)

A caixa de velocidade, por concentrar várias engrenagens, rolamentos e, entre outras peças girantes, é considerado o ponto crítico de uma turbina eólica. Uma das razões das falhas nas caixas multiplicadoras está no fato de que este componente recebe alto torque oriundo do rotor das pás, podendo alcançar a 2.000CV, dependendo da turbulência geradas pelo vento na turbina. Outro fator agravante, está no fato de que este tipo de indústria é consideravelmente menos desenvolvida em relação aos outros componentes do SGE (Sistema Gerador Eólico). Isto é explicado pela dificuldade em que esta indústria possui em acompanhar o ritmo crescente de aerogeradores desenvolvidos para maiores potências. A deficiência na estimativa precisa das cargas e vibrações exercidas em relação ao local instalado também contribui consideravelmente para ampliar este problema.



Figura 3-7 - Componentes de uma Caixa de Velocidades típica.

Fonte: SHENG,2008.

As falhas das caixas de velocidades das turbinas eólicas podem ser atribuídas a natureza aleatória do vento. Mesmo a menor rajada irá criar uma carga desigual sobre as pás eólicas conectadas ao rotor que, conseqüentemente, irá gerar um torque desforme sobre o eixo e que, por sua vez, irá carregar de forma desigual os rolamentos. Este fenômeno provoca um desgaste prematuro nas engrenagens e rolamentos, causando potenciais falhas, principalmente, na parte traseira do componente onde são localizadas as engrenagens de alta velocidade da caixa de câmbio.

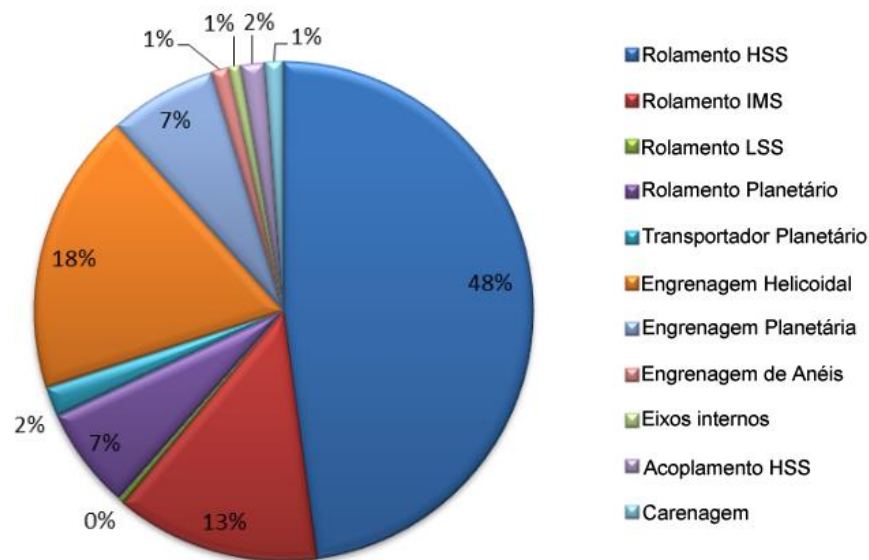


Figura 3-8 - Principais componentes danificados em caixas de velocidades.

HSS (Eixo de alta velocidade)

IMS (Eixos de velocidade intermediária)

LSS (Eixos de baixa velocidade)

Fonte: SHENG, 2008.

Contudo, avanços vem sendo observados graças a esforços de organizações e fabricantes, como a NREL (National Renewable Energy Laboratory), que possui programas de estudo compartilhado (Gearbox Reliability Collaborative), responsável por identificar as fraquezas e ineficiências do design, concentrando seus esforços nas melhorias dos projetos iniciais. O projeto identifica falhas de equipamentos que são comuns em toda a indústria e aborda deficiências no processo de produção e materiais, contribuindo para as melhorias neste componente.

3. 4.3.1 - Ponto de vista Econômico

A subestimativa das cargas operacionais e as deficiências inerentes ao projeto da caixa de engrenagens resultaram em caixas de transmissão de turbinas eólicas pouco confiáveis. A falta de contabilidade completa das cargas críticas de projeto, a não-linearidade ou imprevisibilidade da transferência de cargas entre o trem de acionamento e seu dispositivo de montagem são fatores identificados pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) como principais causadores para a redução da vida útil das caixas de velocidades (MUSIAL,et al,2010).

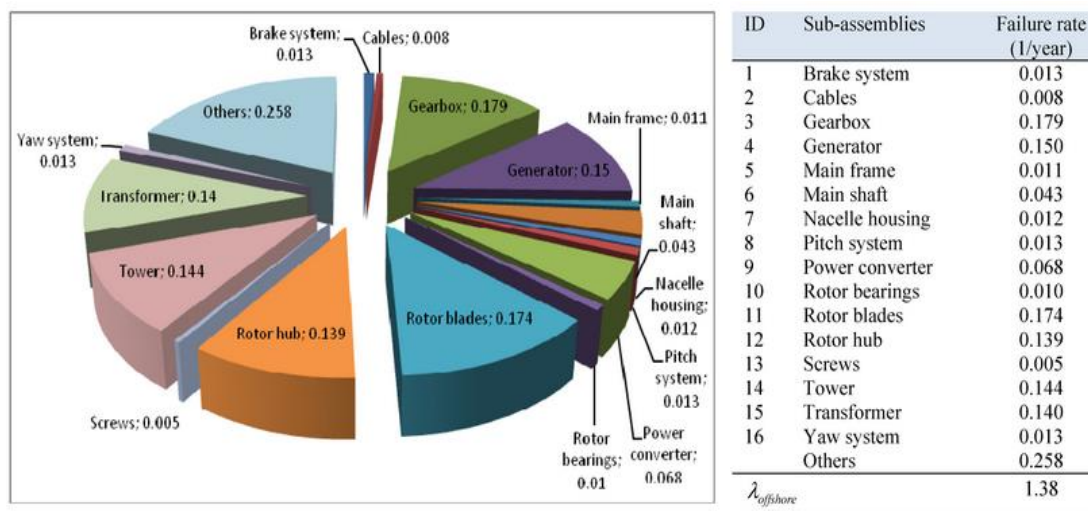


Figura 3-9 - Número de falhas anuais de uma turbina eólica por componente.

Fonte: SHAFIEE;DINMOHAMMADI,2014

Podemos observar na figura 3-7 que o componente mais afetado por desgaste corresponde a caixa de velocidades de um sistema aerogerador.

$$\text{Gearbox} = 0,179 \times 5,6 = 1,00$$

Isso significa que a cada 5,6 anos substitui-se 01 Gearbox.

A vida útil de uma turbina eólica operando de 20 a 22 horas/dia é de, aproximadamente, 20 anos. A vida útil de uma Caixa de Velocidades é de pouco mais de 5 anos.

As manutenções periódicas realizadas nas caixas de velocidades são semestrais.

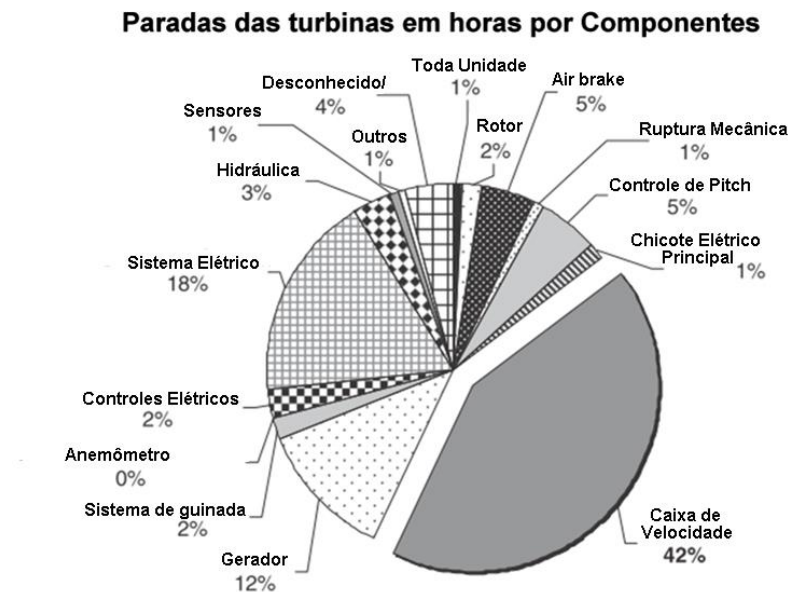


Figura 3-10 - Cerca de 42% do tempo de uma turbina parada por manutenção, teve como causa problemas na caixa de velocidade.

Fonte: Lewis,2010.

Durante a vida útil de uma turbina eólica são reparadas, ou até mesmo substituídas, 04 caixas de velocidades (Urban,et al,2010).



Figura 3-11 - Desgastes em rolamentos de uma caixa de velocidade.

Fonte: Urban,2010.

Os problemas observados no óleo das caixas de velocidade são, sobretudo, contaminações por impurezas provocadas por desgaste das engrenagens submetidas às vibrações turbulentas do vento.

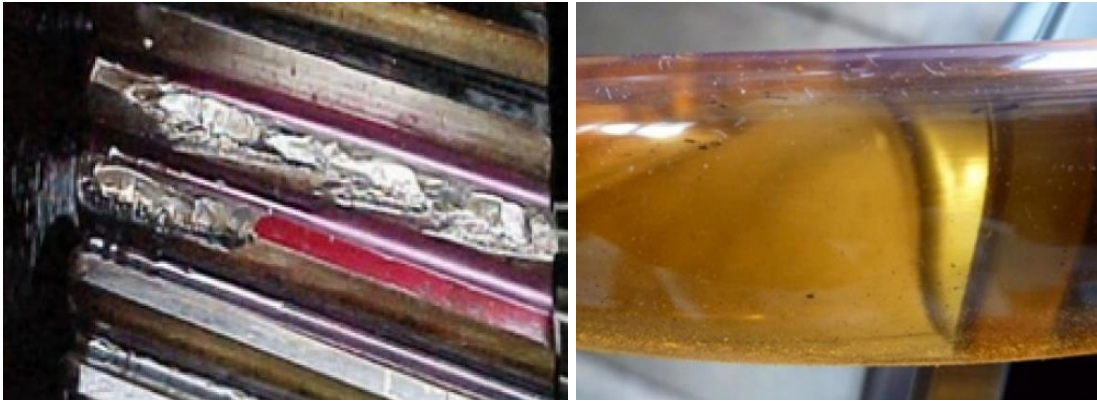


Figura 3-12 - Desgaste em engrenagem de uma caixa de velocidades. A esquerda, impurezas observadas no óleo lubrificante de uma caixa de velocidades.

Fonte: portalenergia.com.

3.4.3.2 - Ponto de vista Ambiental

Além de armazenar os contaminantes do gearbox, um dos maiores causadores de incêndios em SGE's são originados pelo superaquecimento e combustão do óleo das caixas de velocidade. Cerca de 700 litros podem ser utilizados na lubrificação de uma única gearbox. Como agravante, este óleo, se desprendido do sistema, pode contaminar e ampliar os danos, seja em instalações em solo ou em mar.



Figura 3-13 - Incêndio em uma torre eólica.

Fonte: wind-watch.org

3.4.4 - PMSG-DD (Gerador Síncrono de Ímãs permanentes - DirectDrive)

Devido ao grande número de polos, o diâmetro e peso deste tipo de gerador é relativamente grande. Os geradores de transmissão direta em turbinas eólicas são frequentemente usados em conjunto com conversores eletrônicos de maior potência, já que este tipo de gerador precisa ser convertido integralmente antes de ser conectado à rede.

A caixa de velocidades é eliminada à custa de um tamanho e peso avantajado do gerador.



Figura 3-14 - Aerogerador PMSG-DD de 6MW.

Fonte: Alstom.

Geradores PMSG empregam ímãs no rotor ao invés de enrolamentos para criar o campo magnético necessário. Isso significa que não há anéis de deslizamento ou escovas, e assim a manutenção é reduzida proporcionando maior disponibilidade do equipamento.

Além disso, a alta densidade de energia de ímãs permanentes ajuda a fornecer uma unidade mais leve e mais compacta, já que um segmento de 15 mm de espessura de ímãs permanentes pode gerar o mesmo campo magnético de uma seção de 10-15 cm de bobinas de cobre.

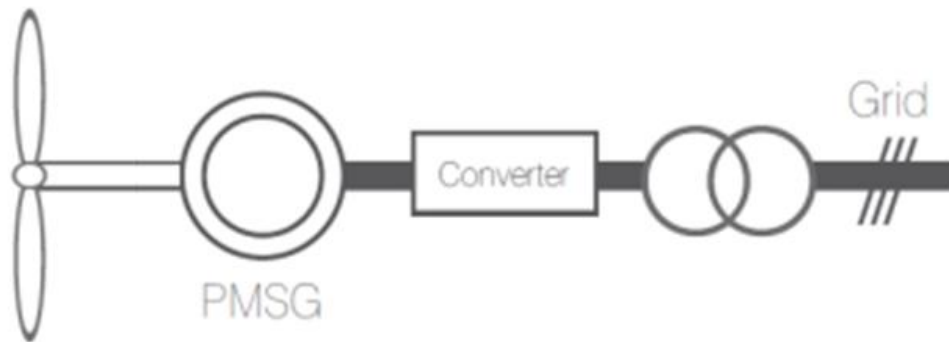


Figura 3-15 - Configuração de um gerador síncrono com conversor total.

Fonte: ABDI, 2014.

Um conversor de potência total permite desacoplar o gerador da frequência da rede, de modo que a frequência (e conseqüentemente a velocidade de rotação) do gerador pode ser totalmente controlada. Neste arranjo, a utilização de uma caixa de velocidades pode ser evitada. A empresa alemã Enercon é a maior fabricante de turbinas eólicas de transmissão direta baseadas em geradores síncronos eletricamente excitados (EESG) enquanto que a Chinesa Goldwin fabricou a maioria das turbinas eólicas no mercado que emprega acionamento direto combinado com geradores síncronos de ímã permanente (PMSG).

3.5 - Tipos de DriveTrain

Trata-se de um componente complexo do sistema, que inicia no eixo de transmissão de força do rotor das pás, conectada à caixa de velocidades até o gerador elétrico (ver figura 3-15). Para sistemas sem caixa de velocidade o drivetrain é menor, pois o rotor das pás é conectado diretamente ao eixo do rotor do gerador elétrico. Por este motivo, drivetrains possuem diferentes tamanhos dependendo do arranjo empregado na turbina eólica.

Em geral, quanto maior o drivetrain, maior será o peso e volume do sistema de geração, o que potencializa as vibrações indesejadas que culminam em desgastes nos componentes de um aerogerador (DOE, 2016).

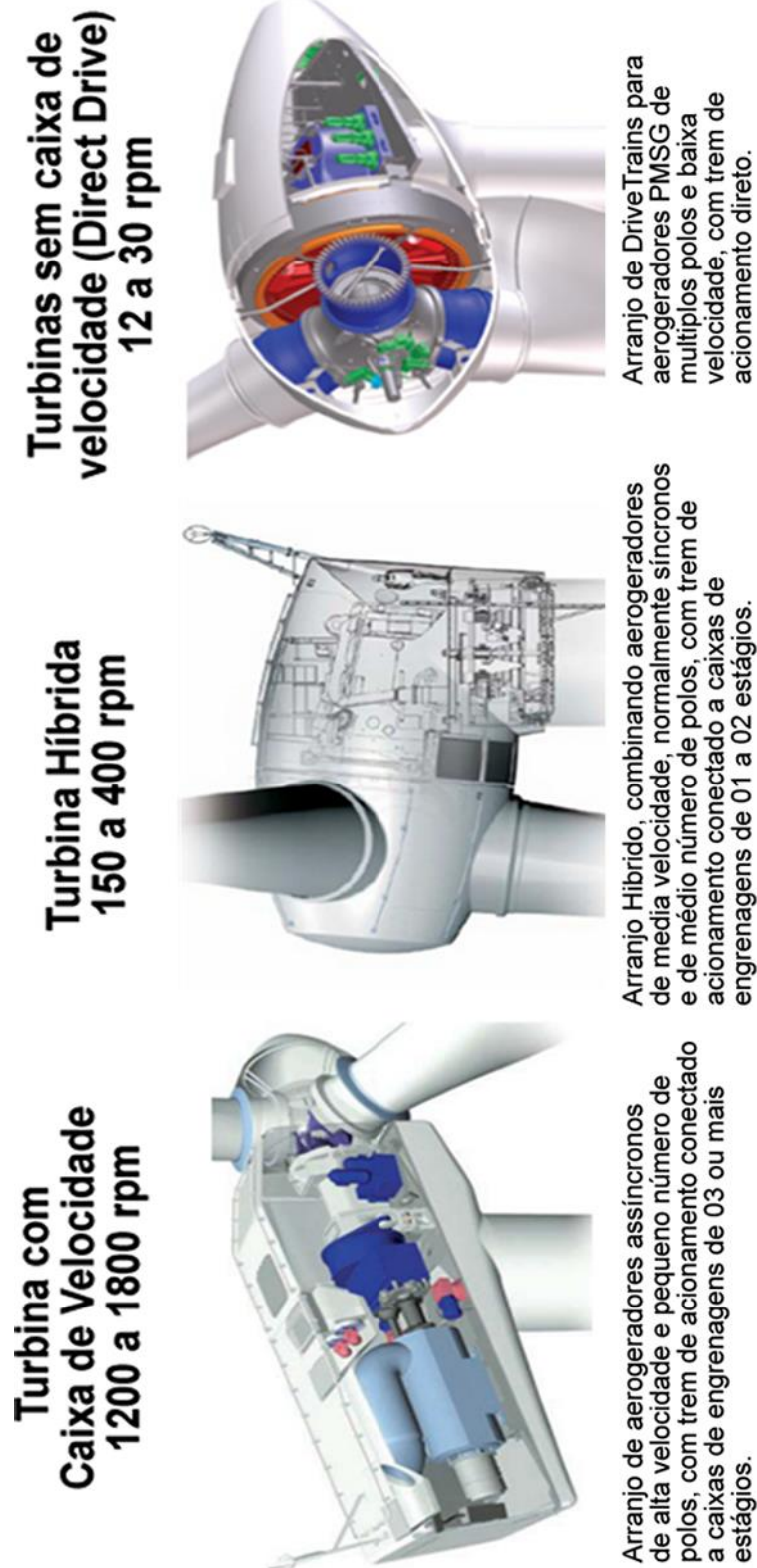
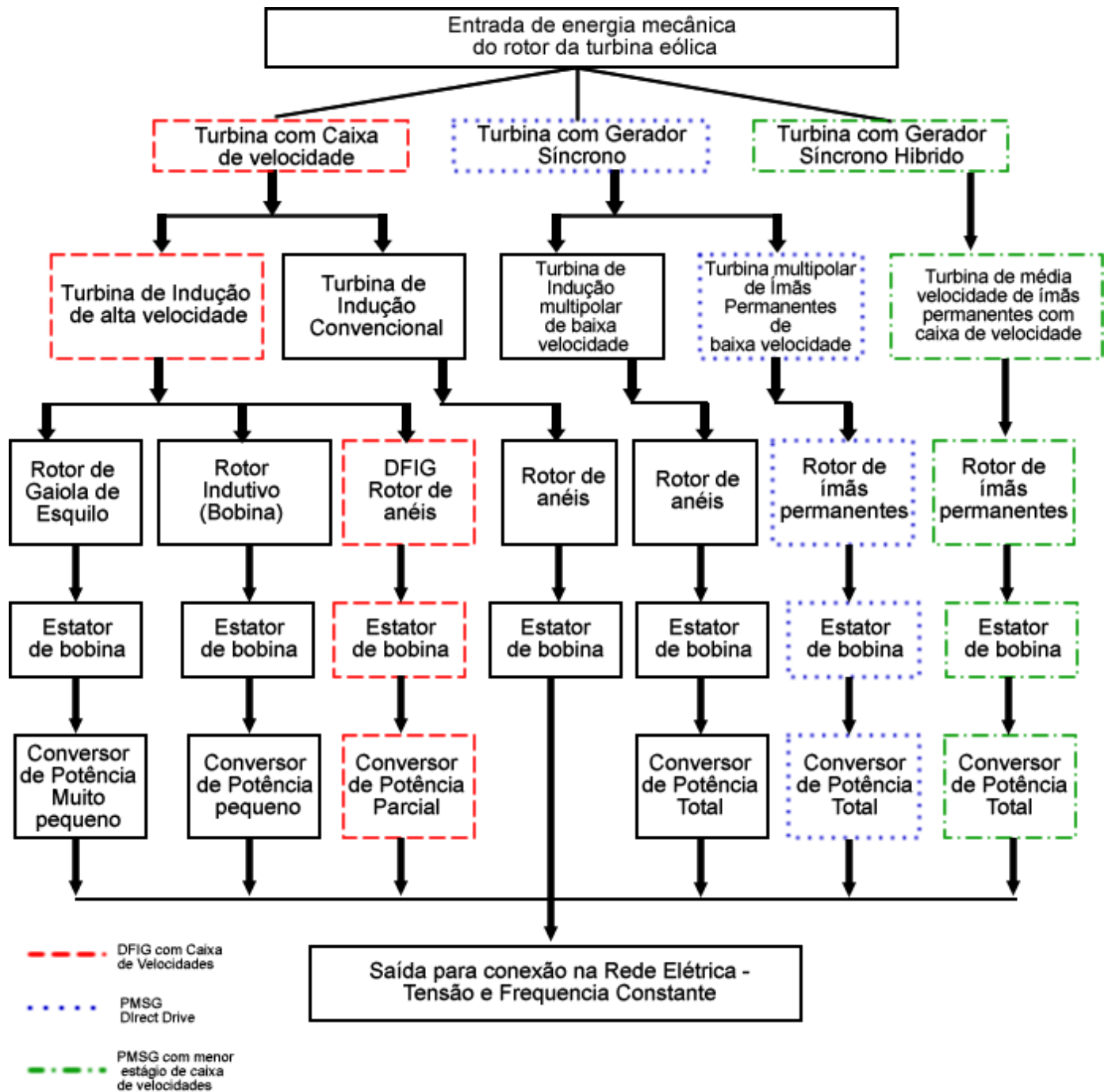


Figura 3-15 - Exemplos de Drivetrain.
Fonte: Urban, 2010.

3.6 - Principais Arranjos Aerogeradores

Abaixo o fluxo de componentes de arranjos aerogeradores, com destaque para os mais utilizados no mercado:



Fonte: Chen, 2008.

Tabela 3 - Características de Aerogeradores de Mercado

Marca	Modelo	IEC Classe	Potência Nominal	Diâmetro do rotor	Velocidade Nominal	Cut-in	Cut-out	Gerador	Gearbox	Óleo Gearbox	Lubrificação Gearbox	Voltagem	Frequência	Instalação
AMSC	WT10000dd	NI	10000kW	190m	11,5m/s	4m/s	30m/s	HTS Sincrono	NA	NA	NA	690V	50/60Hz	OffShore
ENVISION	2.1-110	S	2100kW	110m	9,5m/s	3m/s	20m/s	DFIG	NI	NI	NI	690V	50Hz	Onshore
ENVISION	2.3-103	IA	2300kW	103m	10,5m/s	4m/s	25m/s	DFIG	NI	NI	NI	690V	50Hz	Onshore
ENVISION	2.3-115	IIIA	2300kW	115m	9,5m/s	3m/s	20m/s	DFIG	NI	NI	NI	690V	50Hz	Onshore
ENVISION	3.6 PP 2B	IIIA	3600kW	128m	NI	3m/s	25m/s	PMSG	NA	NA	NA	730V	50Hz	OffShore
ENVISION	4.0-136	S	4000kW	136m	10m/s	3m/s	30m/s	EESG	NA	NA	NA	690V	50Hz	OffShore
GAMESA	G114-2.0	IIIA	2000kW	114m	10m/s	3m/s	25m/s	DFIG	2 Estágios	NI	NI	690V	50/60Hz	NI
GAMESA	G132-5.0	IIA	5000kW	132m	10m/s	3m/s	25m/s	DFIG	2 Estágios	NI	NI	690V	50/60Hz	NI
GE	1.6-82.5	IIB	1500kW	82,5m	8,5m/s	3,5m/s	25m/s	DFIG	3 Estágios	NI	NI	NI	50/60Hz	OnShore
GE	1.7-103	S	1700kW	103m	10m/s	3m/s	23m/s	DFIG	3 Estágios	NI	NI	NI	50/60Hz	NI
GE	2.5-103	IIIA	2500kW	103m	12m/s	3m/s	25m/s	DFIG	NI	NI	NI	NI	50/60Hz	NI
GE	4.0-110	IB	4000kW	110m	14m/s	3m/s	25m/s	PMSG	NA	NA	NA	NI	50/60Hz	OffShore
GE	HALLADE 150-6	IB	4200kW	151m	NI	3m/s	25m/s	PMSG	NA	NA	NA	900V	50/60Hz	NI
SIEMENS	SWT-4.0-120	IA	4000kW	120m	11m/s	3m/s	32m/s	DFIG	3 Estágios	750l	Forçada e Refrigerada	690V	50Hz	OffShore
SIEMENS	SWT-4.0-130	IB	4000kW	130m	11m/s	3m/s	32m/s	DFIG	3 Estágios	750l	Forçada e Refrigerada	690V	50Hz	OffShore
SIEMENS	SWT-6.0-154	IA	6000kW	154m	12m/s	3m/s	25m/s	PMSG	NA	NA	NA	690V	50Hz	OffShore
SIEMENS	SWT-7.0-154	IB	7000kW	154m	13m/s	3m/s	25m/s	PMSG	NA	NA	NA	690V	50Hz	OffShore
SIEMENS	SWT-8.0-154	IB	8000kW	154m	13m/s	3m/s	25m/s	PMSG	NA	NA	NA	690V	50Hz	OffShore
VESTAS	V105-3.45	IA	3450kW	105m	12m/s	3m/s	25m/s	DFIG	2 Estágios	NI	NI	NI	50/60Hz	NI
VESTAS	V150-4.2 MW	IIIB/S	4000kW	150m	12m/s	3m/s	22,5m/s	DFIG	2 Estágios	NI	NI	NI	NI	NI
VESTAS	V117-4.2	IB/IIA/S	4200kW	117m	12m/s	3m/s	25m/s	DFIG	2 Estágios	NI	NI	NI	50/60Hz	NI
WEG	AGW 110 / 2.1	S	2100kW	110m	11m/s	3m/s	20m/s	PMSG	NA	NA	NA	690V	50/60Hz	NI

Fonte: Catálogo dos Fabricantes

NI: Não Informado

NA: Não se Aplica

4. Comparativo entre os principais arranjos de Mercado

4.1 - DFIG com GearBox

Vantagem

A grande vantagem do DFIG é que ele requer apenas um conversor parcial, aproximadamente 30% do conversor de potência total do gerador. A eficiência do DFIG é muito boa, pois pouca energia é perdida através do conversor. Além disso é um gerador mais leve e barato (ABDI, 2014).

Desvantagem

Um gerador DFIG deve girar a 750-1500 RPM para operar, portanto, eles são restritos a aplicações de alta velocidade. As engrenagens e rolamentos em uma caixa de engrenagem sofrem um esforço tremendo por causa da turbulência do vento. Isso faz com que a caixa de câmbio seja a parte mais exigida em manutenções. As caixas de engrenagens em turbinas OffShore, que enfrentam maiores velocidades e turbulências de vento, são ainda mais vulneráveis do que àquelas em turbinas terrestres (Chen,2008).

4.2 - PMSG com DirectDrive

Vantagem

Geradores PMSG empregam ímãs no rotor em vez de enrolamentos para criar o campo magnético necessário. Isso significa que não há anéis de deslizamento ou escovas e, assim, a manutenção é reduzida, proporcionando maior confiabilidade. Se de um lado, o uso de ímãs são considerados caros devido à matéria prima ser considerada rara, o custo adicional é compensada ao mesmo tempo em que se reduz a quantidade de cobre empregada e a redução de manutenção (WENPING,YING,ZHENG,et al,2012). A medida que as turbinas se tornam maiores e mais avançadas, os fornecedores estão cada vez mais optando por este tipo de arranjo, devido ao aumento de confiabilidade e redução de intervenções para manutenção. A utilização de sistemas DD (DirectDrive) reduzem cerca de 2/3 do volume do DriveTrain de um sistema de

geração eólica com caixa de velocidade. Hoje, empresas como Siemens estão aperfeiçoando este arranjo para reduzir o peso do gerador e do sistema de conversão de potência. No geral, a aposta está na arquitetura simplificada, redução de componentes e partes móveis, o que, consequentemente, reduz o custo de manutenção e tempo de reativação de uma turbina eólica. Os geradores de ímãs permanentes (PMSG) são mais eficientes do que os tradicionais DFIG, especialmente operando em cargas parciais. Adicionalmente, estes geradores têm menos partes móveis do que os DFIG, sendo mais robusto e de menor manutenção (SERRANO,ARÁNTGUI,et al,2016).

Desvantagem

Geradores PMSG utilizam ímãs especiais, cuja volatilidade de preços no mercado tem sido grande. Outras questões incluem a susceptibilidade dos íons NdFeB (Neodímio, Ferro e Boro) à corrosão e sua sensibilidade ao calor. Nas condições acima de 80°C há um risco de polaridade invertida ou perda permanente do campo magnético. Alguns fabricantes usam revestimentos especiais para prevenir a corrosão e incorporar sistemas híbridos de resfriamento de ar e líquido especiais em seus projetos de geradores.

Por utilizar acionamento direto, há a necessidade de conversão total da energia gerada para coincidir com a frequência da rede. Devido a isso, a eletrônica do sistema deve lidar com toda a potência elétrica, exigindo conversores maiores que são consideravelmente mais caros do que conversores parciais (cerca de três vezes mais) e que, também, proporcionam maiores perdas elétricas. PMSG-DD compactos são particularmente atraentes, porém, velocidades de rotação menores exigem normalmente geradores de diâmetro muito maior para acomodar o grande número de polos magnéticos (SERRANO,ARÁNTGUI,et al,2016)..

5. Instalações Offshore

O primeiro projeto eólico offshore foi instalado na costa da Dinamarca em 1991 (ver figura 5-1). Compreendeu 11 turbinas de 450 kW e 35m de diâmetro do rotor com uma capacidade total de 4,95 MW. O projeto foi instalado a 2 km da costa, em águas de 4m de profundidade e o parque ainda está operacional. A indústria desenvolveu-se significativamente nos 24 anos desde então e uma única turbina de 5 MW pode agora produzir a energia produzida por todas as 11 turbinas.



Figura 5-1 - Primeiras Turbinas OffShore instaladas na Dinamarca -Total de 11 turbinas de 450kW cada.

Fonte: ewea.org

Desde então, as instalações eólicas offshore de escala comercial operam em águas rasas ao redor do mundo, principalmente na Europa e desenvolvendo cada vez mais nos EUA. Ao mesmo tempo, o desenvolvimento de novas tecnologias de turbinas e fundações permitirá que os projetos de energia eólica sejam construídos em águas mais profundas.

As turbinas eólicas offshore são utilizadas em vários países para aproveitar a energia de ventos fortes e densos que são encontrados em ambiente marinho. Nos Estados Unidos, cerca de 50% da população total do país vive em áreas costeiras. Os custos e demandas de energia podem ser elevados e os recursos

de energia onshore são geralmente limitados. Instalações em ambiente offshore têm o potencial de fornecer imensas quantidades de energia renovável para as grandes metrópolis do país (DOE,2016).

A energia potencial produzida a partir do vento é diretamente proporcional ao cubo da velocidade do vento. Como resultado, o aumento da velocidade do vento de apenas alguns metros por segundo pode produzir uma quantidade significativamente maior de eletricidade. Por exemplo, uma turbina em um local com uma velocidade média de vento de 7,15 m/s produziria 50% mais eletricidade do que em um local com a mesma turbina e velocidade média do vento de 6,26 m/s. Esta é uma das razões pelas quais os fabricantes e operadores estão interessados em buscar, cada vez mais, recursos de energia eólica offshore (BOEM,et al,2007).

Um total de 2.219MW adicional de energia eólica offshore foi instalado em sete mercados em escala mundial em 2016 e, apesar de os números caírem 31% em relação ao recorde do ano passado, o futuro parece promissor. No geral, há 14.384 MW de capacidade de energia eólica offshore instalada ao redor do mundo. No final de 2016, quase 88% (12.631 MW) de todas as instalações eólicas offshore estavam localizadas em águas da costa de dez países europeus. Os 12% restantes da capacidade instalada estão localizados em grande parte na China, seguido pelo Japão, Coreia do Sul e Estados Unidos (GWEC,2016).

O Reino Unido é o maior mercado de vento offshore do mundo e representa pouco menos de 36% da capacidade instalada, seguido pela Alemanha em segundo lugar com 29%. A China passou a Dinamarca em 2016 para atingir o 3º lugar no ranking global offshore com 11%. A Dinamarca agora representa 8,8%, Holanda 7,8%, Bélgica 5% e Suécia 1,4%. Outros mercados, incluindo Finlândia, Irlanda, Espanha, Japão, Coreia do Sul, EUA e Noruega compõem o restante do mercado. No entanto, a grande notícia em 2016 foi a redução dramática dos preços do vento offshore. Começou com o leilão holandês para Borssele 1 e 2 em junho chegando a €72/MWh, muito abaixo das expectativas; seguido de um leilão dinamarquês Nearshore em setembro em €64/MWh. Isto foi seguido em novembro com a oferta vencedora do projeto dinamarquês Krieger chegando a uma impressionante marca de €49,90/MWh; e depois

Borssele 3 e 4 na Holanda chegando a €54,50/MWh em dezembro. Os motivos para os bons resultados são muitos: o amadurecimento da indústria, a melhoria dos projetos, a maturação da tecnologia e sua gestão, a crescente confiança dos investidores e a introdução e implantação de uma nova geração de geradores na faixa de 6-8MW (GWEC,2016).

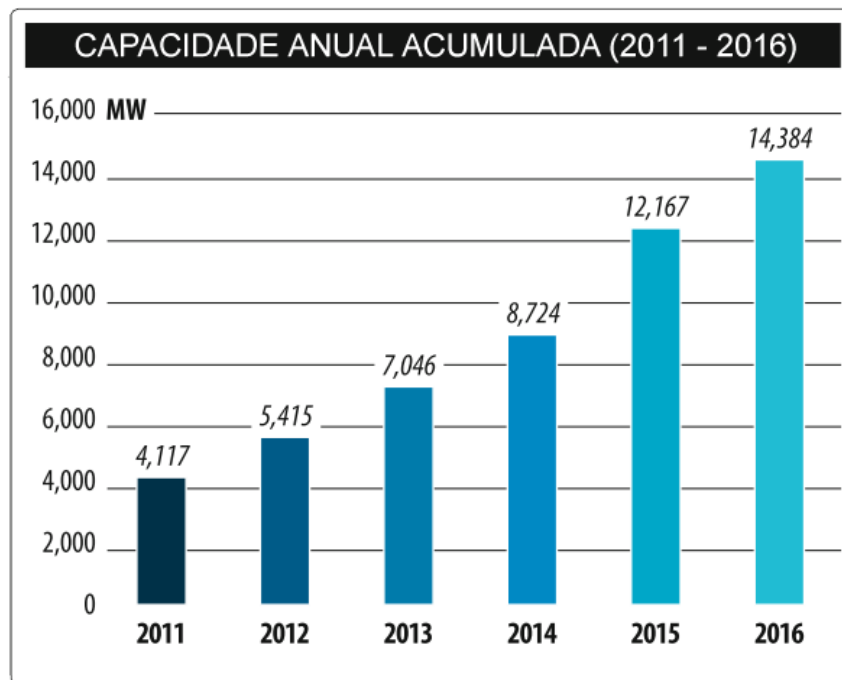


Figura 5-2 - Crescimento da capacidade acumulada OffShore de 15,41% em relação a 2015.

Fonte: GWEC,2016

6. Aumento de Potência por Torre

As reduções de custos de turbinas eólicas nas últimas duas décadas, tanto para turbinas eólicas onshore como offshore, foram alcançadas por economias de escala e efeitos de aprendizagem. O LCOE² do vento foi ainda mais reduzido como resultado de fatores de maior capacidade que vieram do aumento da altura da turbina e do diâmetro do rotor. As turbinas eólicas Onshore geralmente estão na faixa de tamanho de 2 MW a 3 MW. O crescimento no tamanho médio das turbinas terrestres futuramente diminuirá, pois o aumento das alturas dos parques eólicos se tornará cada vez mais difícil. O aumento do tamanho médio das turbinas eólicas offshore continuará à medida que o aumento da altura e do diâmetro do rotor permitirão maiores rendimentos de energia. A razão para esse crescimento é simples; o LCOE²

pode ser reduzida significativamente utilizando-se maiores rotores e alturas maiores. Isto é possível devido ao aproveitamento energético de uma turbina ser aproximadamente proporcional à área varrida dos rotores.

A experiência europeia e os dados de mercado indicam progresso na inovação tecnológica do vento offshore e na redução de custos no mercado. Os projetos operacionais existentes e anunciados até o final de 2016 são utilizados para fornecer uma visão geral do crescimento do mercado offshore. Esses indicadores podem fornecer informações sobre futuros desenvolvimentos do mercado e estratégias de pesquisa e desenvolvimento tecnológico - P&D (DOE,2016).

A indústria continua a impulsionar as turbinas maiores, buscando capacidades nominais superiores a 8 MW em águas cada vez mais afastadas da costa. Na Europa, a profundidade média da água dos parques eólicos offshore, em 2016, foi de 29,2m, um pouco mais do que em 2015 (27,2m). A distância média em relação a costa para esses projetos foi de 43,5 km, um pequeno aumento no anterior ano que ficou em 43,3 km (ver figura 6-1). Isso se deve aos avanços tecnológicos na área de fundações flutuantes (WindEurope,2016).

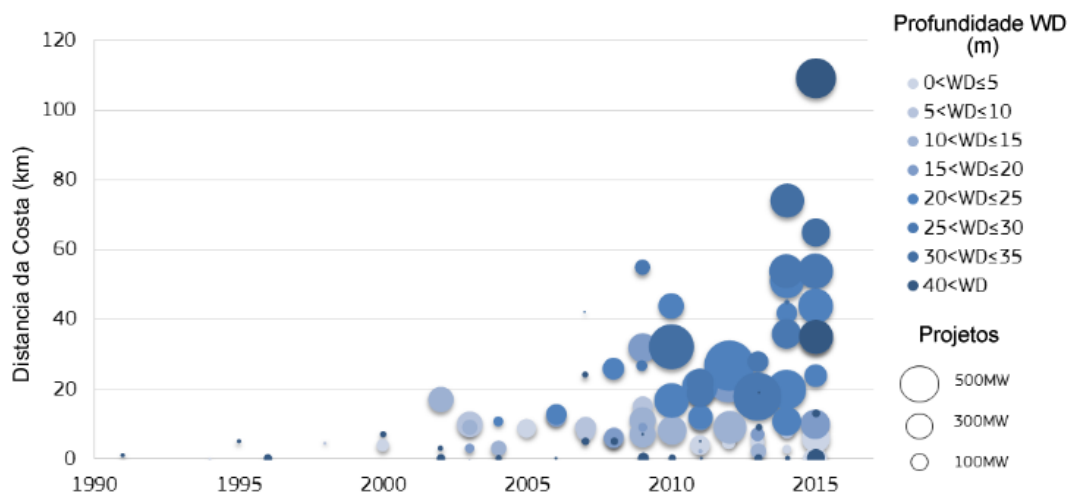


Figura 6-1 - Evolução dos pontos de Instalação de Turbinas OffShore

Fonte: JRC Wind Energy, 2016

²LCOE - Levelized Cost of Electricity, corresponde ao valor médio no qual a energia elétrica custará ao longo da vida útil de uma turbina/parque.

As tendências para desenvolvimento de turbinas eólicas offshore de grande capacidade está em alta. Por exemplo, a conclusão do projeto Burbo Bank Extension (Reino Unido) no início de 2017 foi o primeiro projeto comercial a usar um rotor Vestas de 164 metros, turbina V164 de 8 MW, que foi prototipado pela primeira vez em 2014. Além disso, uma turbina de 9,5 MW foi finalizada neste ano de 2017. Os grandes tamanhos de turbina são geralmente preferidos em aplicações offshore devido a poucas instalações, proporcionando maior controle do parque e menor índice de manutenção.

Além disso, muitos desenvolvedores estão antecipando o crescimento contínuo da turbina, com a expectativa de que os benefícios do aumento do tamanho da turbina continuem a reduzir cada vez mais os custos de operação e manutenção da energia (DOE,2016).



Figura 6-2 - Estimativa de crescimento eólico/ano.

Fonte: DOE,2016

Globalmente, o tamanho médio da turbina para projetos eólicos offshore saltou de 3,4 MW para projetos instalados em 2015, para 4,7 MW em projetos instalados até o final de 2016 (ver figura 6-2). Espera-se que essa tendência continue, com o tamanho médio de turbina que deverá atingir 7,0 MW para projetos instalados em 2020 (DOE,2016).

Em outra análise, a capacidade nominal das turbinas eólicas offshore cresceu 62% na última década. Este valor, em 2016, foi de 4,8 MW. Isso corresponde a um aumento de 15,4% em relação ao ano anterior. Foram instaladas turbinas Offshore de 8 MW refletindo o ritmo acelerado do desenvolvimento tecnológico (WindEurope,2016).

Tabela 4 – Turbinas em Operação e Construção por País

Número de turbinas OffShore em Operação e em Construção por País

	Comissionada no final de 2016(MW)	Em construção no final de 2016(MW)	Total
United Kingdom	5,097	1,966	7,062
Germany	3,877	1,483	5,360
China	1,092	1,994	3,086
Denmark	1,271	0	1,271
Netherlands	520	600	1,120
Belgium	712	165	877
Sweden	202	0	202
Japan	38	12	50
United States	30	0	30
Other	75	80	155
Total	12,913	6,300	19,213

Fonte: DOE,2016

7. Tendências de arranjos

7.1 - Split Generator

A empresa Clipper Windpower em parceria com o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) e o Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL), desenvolveu em 2006 sua Turbina Eólica Liberty™ de 2,5 MW (ver figura 7-1), a maior fabricada nos Estados Unidos até então, com um formato de drivetrains divididos. Trata-se de um sistema que diminui as ocorrências de manutenção não programadas, reduzindo os custos de operação das turbinas eólicas. Isso é possível devido ao arranjo de acionamento distribuído Quantum™ Drive.

Esta tecnologia utiliza um sistema de quatro eixos que divide o torque de suas pás de rotor de 89 a 99 metros uniformemente entre os quatro geradores PMSG instalados em paralelo.

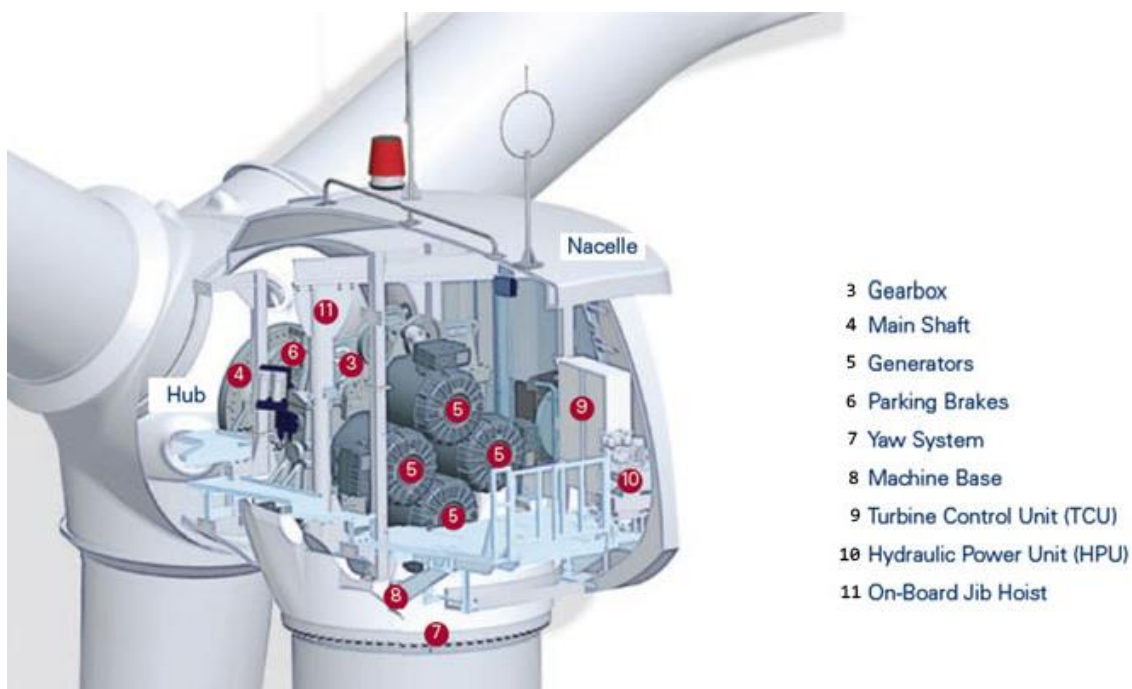


Figura 7-1 - Sistema de Torque Distribuído.

Fonte: clipperwind.com.

O conjunto de engrenagens para cada um dos geradores é projetado em forma de "cartucho" de modo a permitir a substituição sem necessidade de remoção do sistema de distribuição de torque. Além disso, se uma falha ocorresse em um dos geradores ou conjuntos de engrenagens, a capacidade de produção da turbina eólica seria reduzida em apenas 25% até que o problema possa ser corrigido.

A configuração e o controle de quatro geradores permitem que a turbina continue operando mesmo que um ou mais geradores seja removido totalmente para reparo ou que um deles esteja totalmente inoperante.

Os geradores são pequenos e compactos e podem ser substituídos usando uma talha instalada na própria nacele, sem a necessidade de contratação de caros guindastes (Ragheb,Ragheb,et al,2010).



Figura 7-2 - DriveTrain Split para 04 geradores Quantum Drive™.

Fonte: clipperwind.com.

No início de 2011, um total de 375 turbinas Clipper Windpower foram instaladas em 17 projetos em todo os EUA, com uma potência nominal acumulada de 938 MW. A separação do torque parece ser uma alternativa mais barata em relação a caixa de velocidade convencional, embora pareça que o limite viável superior da separação do torque pode estar abaixo da capacidade das máquinas de direção direta (Ragheb,Ragheb,et al,2010).

Por distribuir o torque para os quatro geradores, reduz-se também o potencial de falha prematura de rolamento e diminui-se o tempo e o custo associados ao serviço e reparo do gerador.

7.2 - CVT (Transmissão Contínua Variável)

O projeto de caixas de velocidades CVT³ atingiu produção em massa, inicialmente, em veículos terrestres. As transmissões do tipo CVT são capazes de variar continuamente através de um número indeterminado de relações de engrenagem em contraste ao número limitado de uma caixa de velocidades.

Sistemas CVT utilizam normalmente um par de polias em forma de cone que são acionadas para mudar o raio em superfícies opostas (ver figura 7-3). Comumente utiliza-se polias e correntes para transmitir as forças entre elas. Hoje há sistemas CVT que melhoram a eficiência de transmissão em até 10% em relação à caixas de velocidades tradicionais (Alkan, et al, 2012).

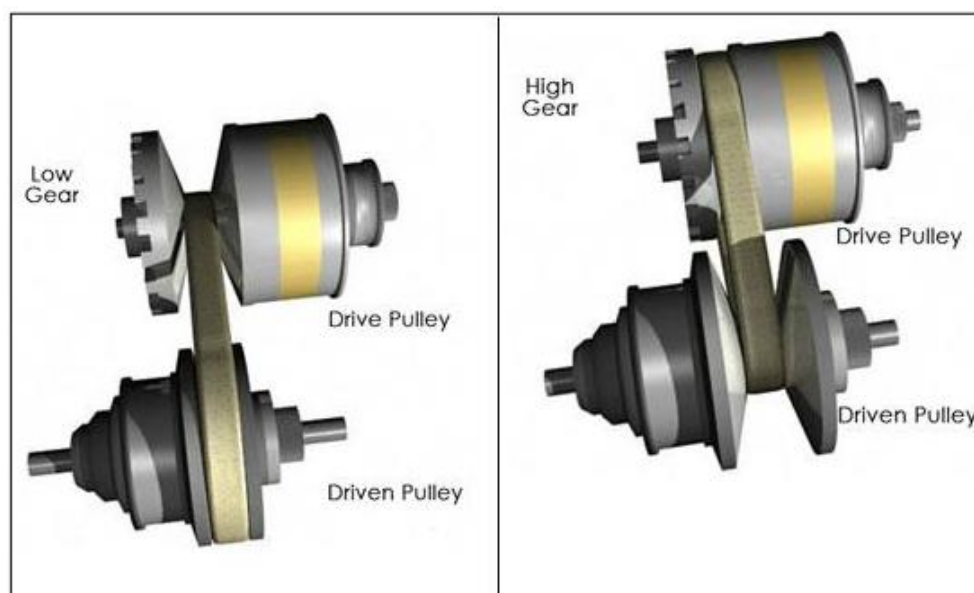


Figura 7-3 - Sistema de CVT de polia de diâmetro variável.

Fonte: Alkan, 2012.

Sistemas CVT possuem a capacidade de extrair melhor a potência do vento nas variações de velocidade. Nestes modelos, a transmissão absorve melhor as potentes rajadas de vento em vez de transmiti-las através do drivetrain, reduzindo a carga em componentes internos, aumentando o tempo entre manutenção e substituições de peças.

Conforme observável no gráfico abaixo, uma turbina eólica equipada com CVT é mais eficiente do que uma turbina eólica com caixa de velocidade

convencional ao extrair a energia do vento em todas as velocidades, exceto uma estreita faixa entre 9 a 10m/s (Ver figura 7-4). Deve notar-se que este é um intervalo bastante estreito e o valor pelo qual a turbina eólica CVT supera o rendimento de uma caixa de velocidade convencional é muito menor quando comparado a seus benefícios sobre a total faixa de velocidades do vento.

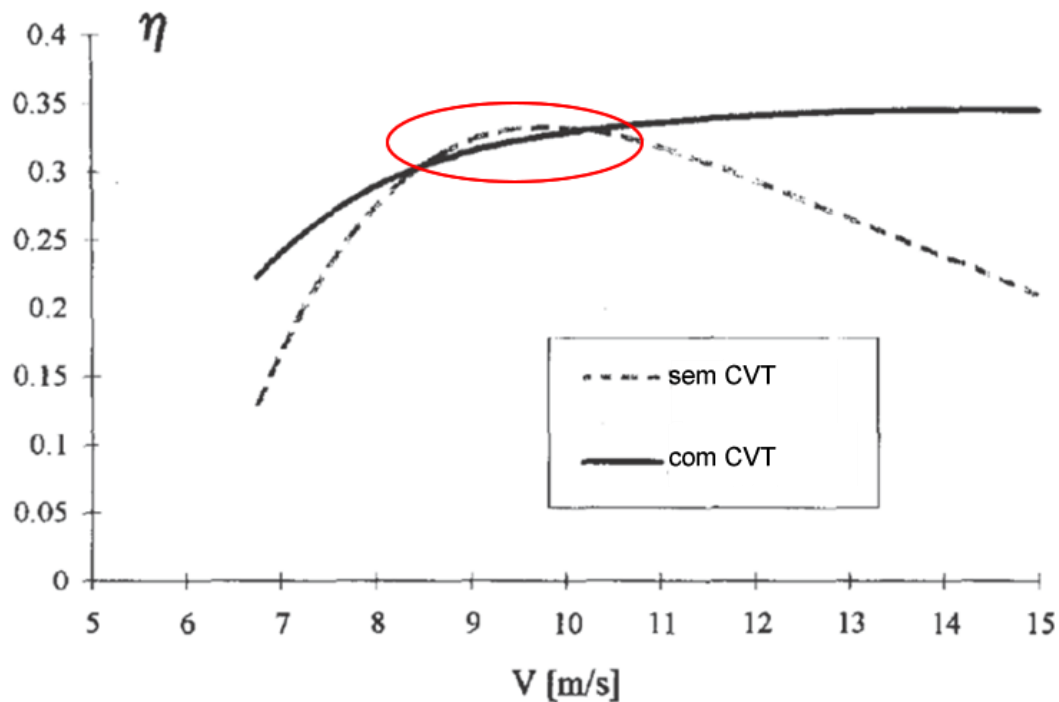


Figura 7-4 - Eficiência de uma Turbina Eólica equipada com CVT operando em ventos variáveis.

Fonte: Ragheb, Ragheb, 2010.

Dentre os principais tipos de sistemas CVT, destaca-se a tecnologia NuVinci™ da americana FallBrooks. Trata-se de um tipo de transmissão de tração de rolamento que utiliza esferas para variar a relação de transmissão (ver figura 7-5). A tecnologia CVT é capaz de realizar mudanças de proporção rápida e absorção de espessura de torque e pode ser diretamente aplicável a projetos de turbinas eólicas de velocidade variável.

Nesta configuração, a relação de transmissão entre o disco interno e externo ocorre em função da distância entre os pontos de contato da esfera em relação ao seu eixo de rotação (Ribeiro, et al, 2010).

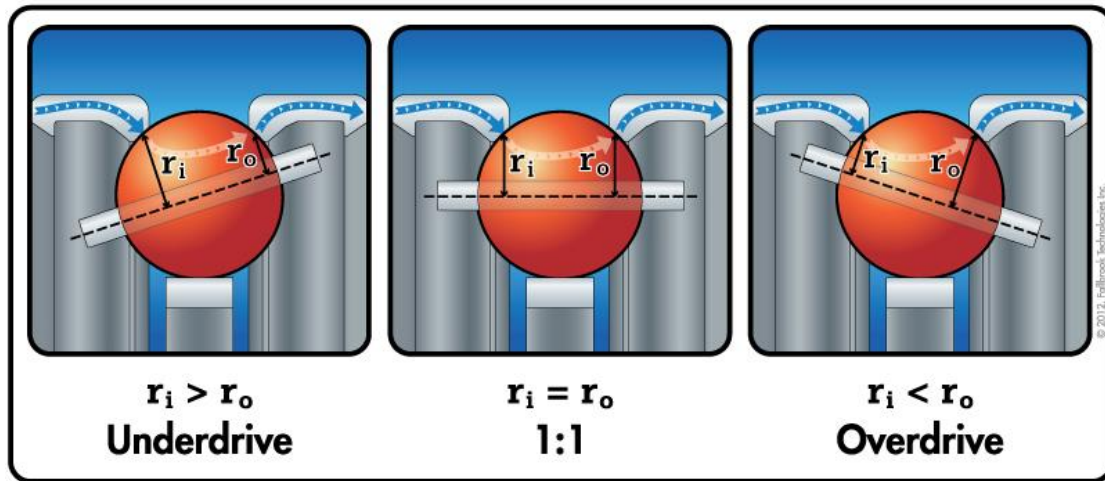


Figura 7-5 - Funcionamento do sistema de velocidade variável por esferas.

Fonte: fallbrooktech.com

A principal vantagem de utilizar CVT em turbinas eólicas é a eficiência apresentada na geração de energia elétrica em relação à solução convencional, com engrenagens. Por exemplo, em uma turbina eólica convencional, a velocidade do rotor da turbina eólica permanece em uma rotação estática até que o vento atinja a sua velocidade nominal. Em seguida, o RPM aumenta linearmente com a velocidade do vento até que a máquina alcance a potência nominal do gerador. De forma resumida, podemos dizer que a variação da rotação é feita em largos degraus. Na caixa CVT, esta alteração é linear e imediata, adequando-se às necessidades instantâneas das variações de vento geradas nas pás. Nestas condições, a produção de energia em velocidades mais baixas pode adicionar cerca de 6% no total gerado em uma turbina. Esta característica potencializa a aplicação do CVT em geradores, seja os síncronos de ímã permanente e os assíncronos de indução, com rotor em gaiola, apresentando benefícios como a redução dos custos de manutenção e operação (Ribeiro, et al, 2010).

Apesar de não haver divulgado maiores resultados, a implementação destes equipamentos é normalmente feita em sistemas de média potência (1,5MW)

devido às limitações físicas dos componentes CVT. Alguns arranjos incluem este tipo de tecnologia para substituir um ou dois estágios das caixas de velocidade tradicionais, principalmente, os primeiros estágios. Sistemas CVT possuem maiores custos em relação às caixas de velocidades tradicionais, principalmente, devido à sua baixa demanda de produção. Diante deste fato, a implementação deste equipamento é, em geral, economicamente viável conectado a geradores assíncronos devido ao seu custo inferior em relação ao gerador síncrono. Ainda, de acordo com um estudo realizado pela NREL (National Renewable Energy Laboratory), a tecnologia CVT pode reduzir o COE (Custo de Energia) entre 3,7% e 7,3% para um trem de velocidade convencional de velocidade variável (Cotrel, et al, 2005).

7.3 - Geradores HTS (Supercondutor de Alta Temperatura)

Desde a descoberta do fenômeno da supercondutividade, há cerca de 105 anos, houve uma euforia contida da comunidade científica em utilizar esse tipo de material para aplicação imediata, já que naquela época, a própria geração, transmissão e distribuição de energia elétrica era uma novidade em todo o mundo. Além disso, este fenômeno ocorre a uma temperatura extremamente baixa, cerca de 4,2° Kelvin ou -269°C.

Inicialmente, esta condição foi alcançada através da liquefação do Hélio transferido ao material supercondutor que, no experimento da descoberta, foi utilizado o Mercúrio.

Até então, materiais com propriedades supercondutoras conhecidas eram basicamente de baixa temperatura crítica, inviabilizando a sua utilização em escala de mercado. Em meados da década de 1980, os Físicos Johannes Bednorz e Karl Müller, prêmio Nobel de Física de 1987, descobriram compostos (YBCO [YBa₂Cu₃O_{7-x}] Óxido de Ítrio Cobre Bário) que apresentavam propriedades supercondutoras em altas temperaturas e que poderiam viabilizar a sua aplicação em larga escala, conhecidos como materiais Supercondutores de Altas Temperaturas.

A temperatura tão esperada de um material supercondutor é a de aproximadamente 300° K (26 °C), ou seja, temperatura ambiente. Isso não é por menos, pois promoveria um enorme salto tecnológico para a humanidade a baixíssimo custo, já que a aplicação deste fenômeno na vida das pessoas é enorme.

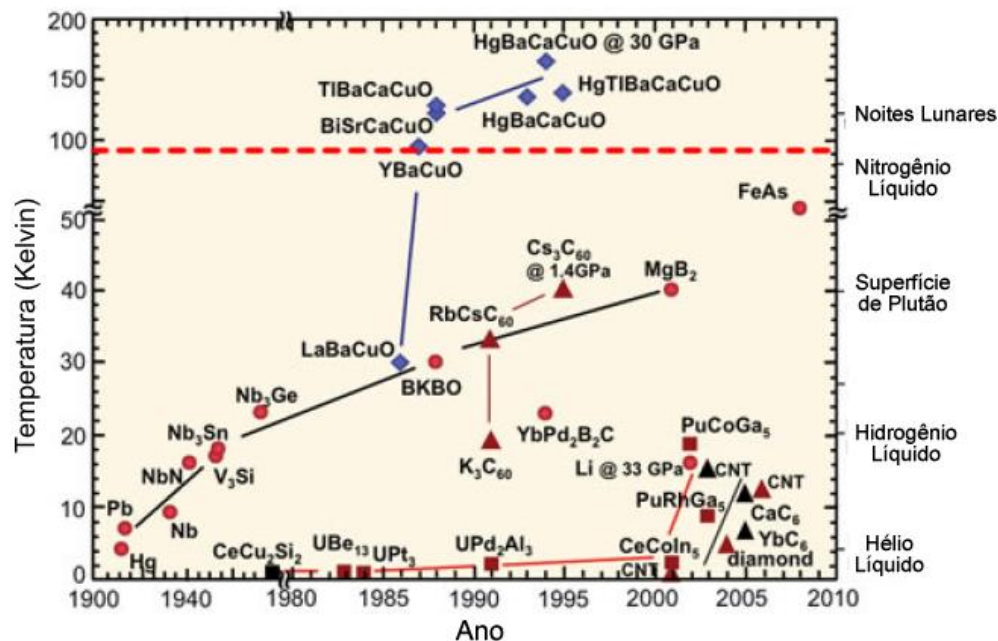


Figura 7-6 - Temperaturas Críticas de materiais com propriedades supercondutoras.

Fonte: MAPLES,HAND,MUSIAL,2010.

Além das vantagens elétricas mencionadas, há grandes aplicações no mercado de transportes e movimentação de cargas devido ao Efeito Meissner³ também observado no fenômeno de um supercondutor.

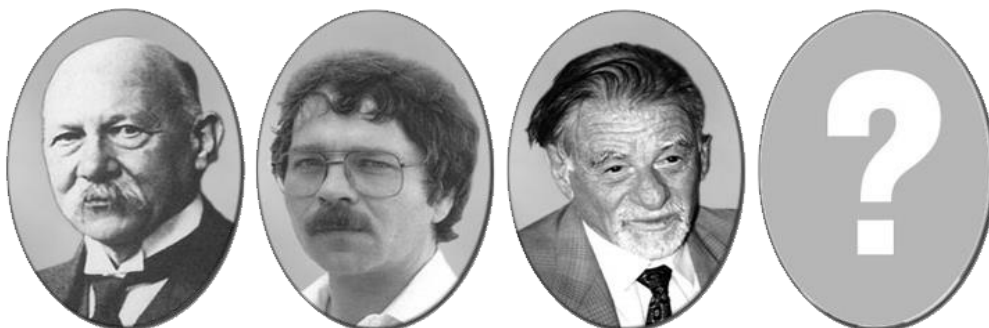


Figura 7-7 - Pioneiros da supercondutividade (da esquerda para a direita) Heike Kamerlingh Onnes, J. Georg Bednorz e K. Alex Müller. Quem será o próximo?

Fonte: The National High Magnetic Field Laboratory

A transmissão de corrente elétrica ao preço de resistência quase zero, ou seja, perdas de cargas elétricas por efeito Joule praticamente nulas, aumenta substancialmente a eficiência dos sistemas e reduz abruptamente a seção, volume e peso dos condutores elétricos.

7.3.1 - Vantagens e aplicação

A supercondutividade chegou ao setor de geração eólica e promete reduzir os custos de produção de energia elétrica em torres de altas capacidades.

Hoje, com a descoberta de materiais do tipo II, normalmente bases cerâmicas, cujo fenômeno supercondutor é observado em altas temperaturas críticas, cada vez mais se demonstra viável comercialmente, tornando este setor como um dos primeiros em geração elétrica a se beneficiar com esta tecnologia revolucionária.

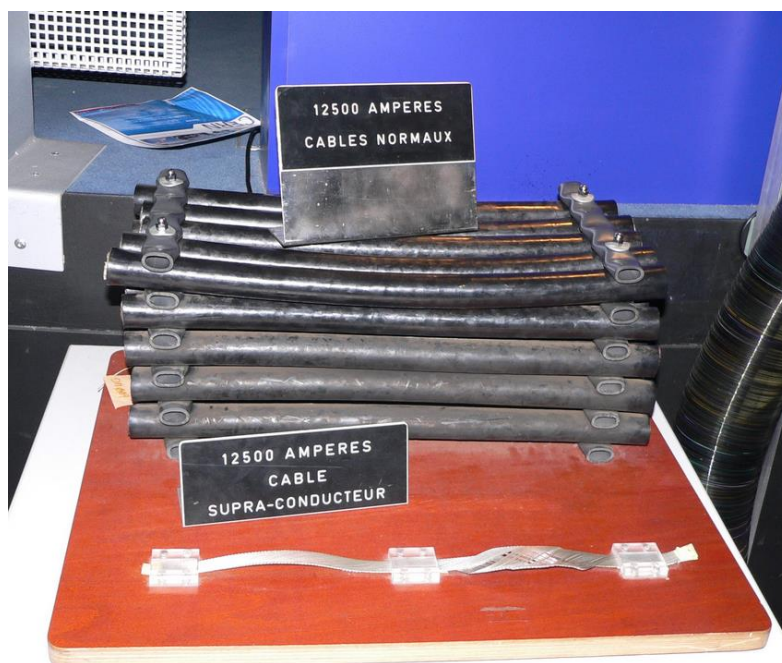


Figura 7-8 - Comparativo de dimensões de cabos elétricos utilizados no CERN.

Fonte: CERN

³Trata-se do Segundo efeito gerado pela supercondutividade, descoberta por W. Meissner e R. Ochsenfel, onde as linhas do campo magnético são impedidas de penetrarem no supercondutor. Dessa forma, o ímã sofre uma repulsão que compensa seu peso e "levita" sobre o supercondutor.

As principais vantagens do uso HTS em aerogeradores:

- Com a menor quantidade de material necessário para produção do gerador, reduz-se também o peso da estrutura, diminuindo as vibrações geradas por ventos turbulentos e, conseqüentemente, o desgaste dos materiais girantes;
- Grande vantagem para as instalações OffShore, pois o custo de fundação da torre reduz significativamente, já que estas estruturas são responsáveis por 22% do valor total de um sistema aerogerador. Pelo mesmo motivo, o custo de transporte das partes da torre, tanto em mar quanto em terra é reduzido;
- Aumento significativo da eficiência da geração, pois devido à propriedade de resistência zero, as perdas por efeito Joule são nulas, chegando a uma eficiência de 98,5% de geração elétrica;
- Redução de componentes empregados, pois os geradores com esta tecnologia são menores e utilizam trem de acionamento diretos, sem caixas de engrenagens. Além disso, por não gerar atrito no rotor do gerador, o ruído também é reduzido.

7.4 - Principais frentes de desenvolvimento de aerogeradores HTS (Supercondutor de Alta Temperatura)

A cada ano, as demandas de produção de energia elétrica aumentam a uma taxa de dois dígitos. Conseqüentemente, as dimensões dos componentes crescem ao ponto em que se tornará inviável a ampliação da potência gerada em cada SGE. É neste ponto que a propriedade supercondutora implantada nos novos geradores atuará, propiciando grandes potências em estruturas de menor dimensão, tornando o objetivo de várias empresas detentoras desta tecnologia.

Desenvolvedores, como Envision e AMSC, já estão em fase comercial de sistemas geradores utilizando supercondutores (MAPLES,HAND,MUSIAL,et al,2010).

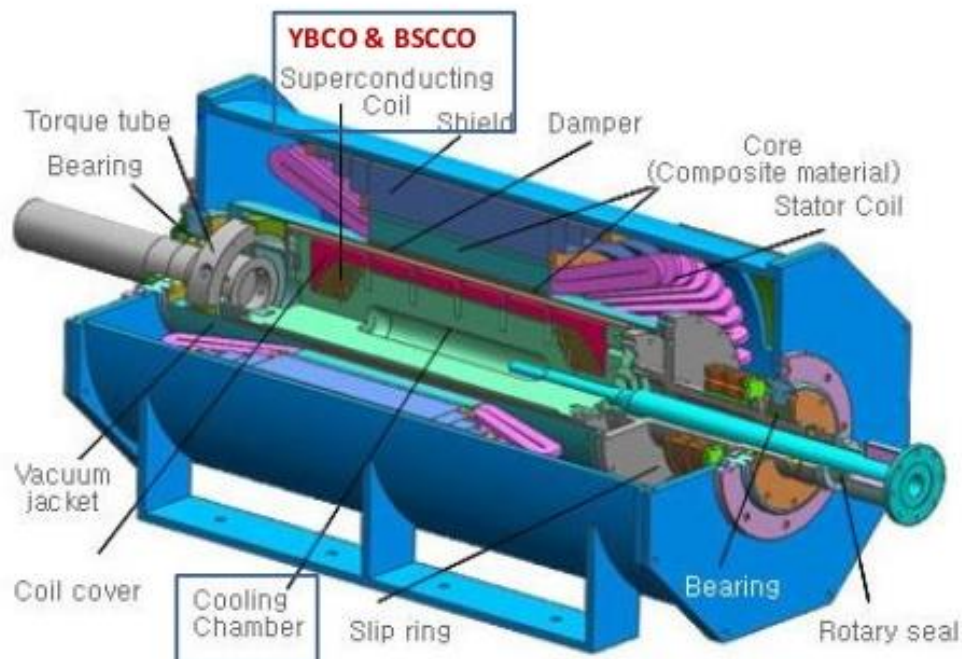


Figura 7-9 - Exemplo de um Gerador HTS (Supercondutor de Alta Temperatura).

Fonte: amlsuperconductivity.com.

O ponto mais complexo deste sistema é, sem dúvida, a manutenção de um sistema a baixas temperaturas em um sistema girante para ocorrer o efeito de supercondução além, é claro, do seu custo. As empresas utilizam coolers criogênicos que resfriam os componentes do sistema em processos de múltiplos estágios a uma temperatura tão baixa que permitem a utilização até mesmo, de materiais dos tipos I e II.

7.4.1 - Frente Europeia de desenvolvimento

Em 2015, após 20 anos de desenvolvimento e pesquisa, a empresa Envision, em conjunto com outras nove empresas da comunidade Europeia anunciaram a instalação da primeira turbina eólica utilizando gerador e cabos supercondutores no formato comercial, chamado projeto EcoSwing™, que substituirá sistemas convencionais de produção superior a 3MW.

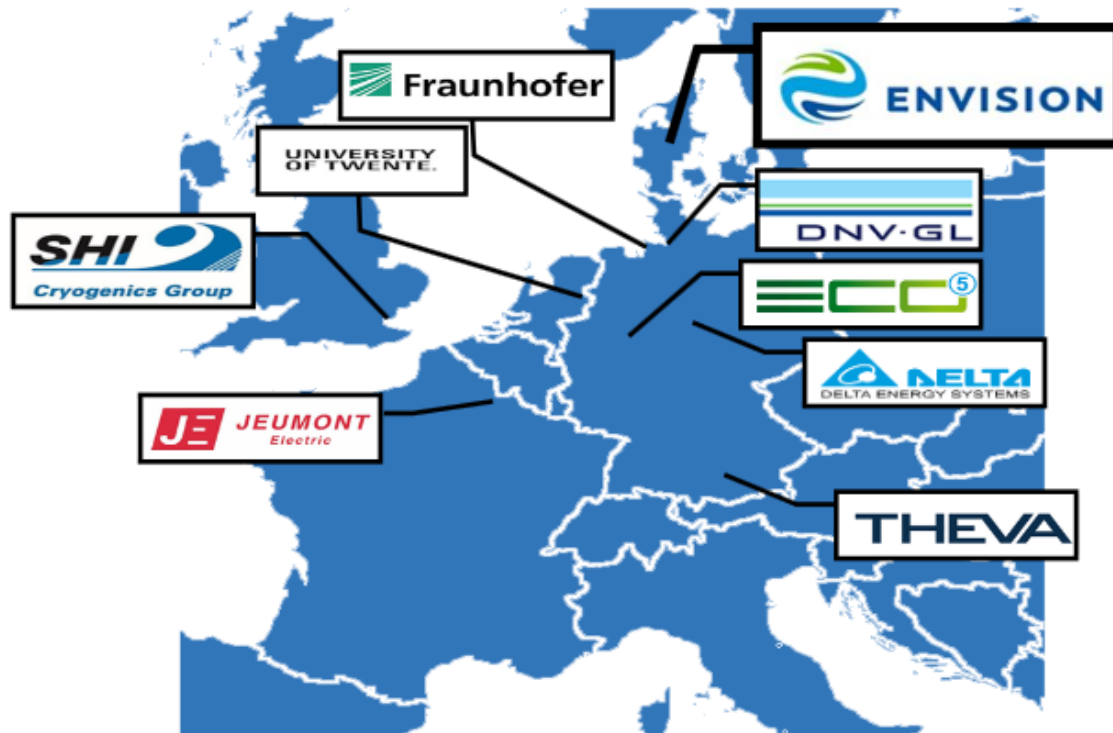


Figura 7-10 - Projeto turbina eólica HTS composta por nove organizações Europeias.

Fonte: ecoswing.eu.

O objetivo deste projeto e de outros que utilizam supercondutores é atuar no setor de grandes potências, já que há um limite de produção conhecido tanto para sistemas que utilizam caixas de velocidades, quanto por DirectDrive em um patamar de 8 a 10MW. Os geradores eólicos supercondutores podem reduzir em até 80% o peso em comparação aos geradores convencionais.

A redução do volume é possível pois supercondutores podem transferir sem perdas até 100x mais corrente do que os condutores de cobre em seções equivalentes. A comissão Europeia que subsidia este projeto investirá cerca de 10,5 Milhões de Euros até 2020 para o desenvolvimento da tecnologia (WindEurope, 2016).



Figura 7-11 - Turbina Eólica HTS EcoSwing™

Fonte: ecoswing.eu.

7.4.2 - Frente Americana de desenvolvimento

A American Superconductor (AMSC) está desenvolvendo o sistema de energia eólica SeaTitan™, combinando a experiência de engenharia de turbinas eólicas da empresa com sua liderança na área dos supercondutores. Os geradores supercondutores utilizados nas turbinas eólicas SeaTitan™ baseiam-se principalmente em motores de propulsão e geradores supercondutores de navios, tecnologia esta desenvolvida pela AMSC para a Marinha dos Estados Unidos. A densidade de material versus potência permitirá que uma turbina eólica SeaTitan™ de 10MW seja similar, em peso e tamanho, a um sistema 5MW convencional.

Essa turbina eólica inovadora reduzirá significativamente os custos de desenvolvimento e manutenção das turbinas eólicas, inicialmente offShore, e criará um caminho para as classificações de potência do gerador eólicos acima de 10MW (MAPLES,HAND,MUSIAL,et al,2010).



Figura 7-12 - Turbina Eólica HTS SeaTitan™.

Fonte: AMSC - American Superconductor.

No cenário atual, as turbinas eólicas que estão sendo empregadas para o mercado OffShore limitam-se a classificações de potência de aproximadamente 8-10MW. Grande parte deste limite corresponde ao fato de que os drivetrains para estas turbinas convencionais são extremamente pesadas, gerando inúmeros problemas envolvidos, seja na fundação necessária para suportar todo o peso da estrutura (Torre, Gerador, Trem, Nacele, etc...), seja no controle da vibração exercida na torre eólica. A turbina eólica SeaTitan adicionalmente incorpora uma série de soluções de design que garantem a redundância de sua operação.

Por exemplo, o sistema de arrefecimento criogênico para o gerador HTS obtém alta confiabilidade empregando $n+1$ refrigeradores modulares de um único estágio e vedações de longa vida em seu acoplamento de transferência de hélio líquido (MAPLES,HAND,MUSIAL,et al,2010).

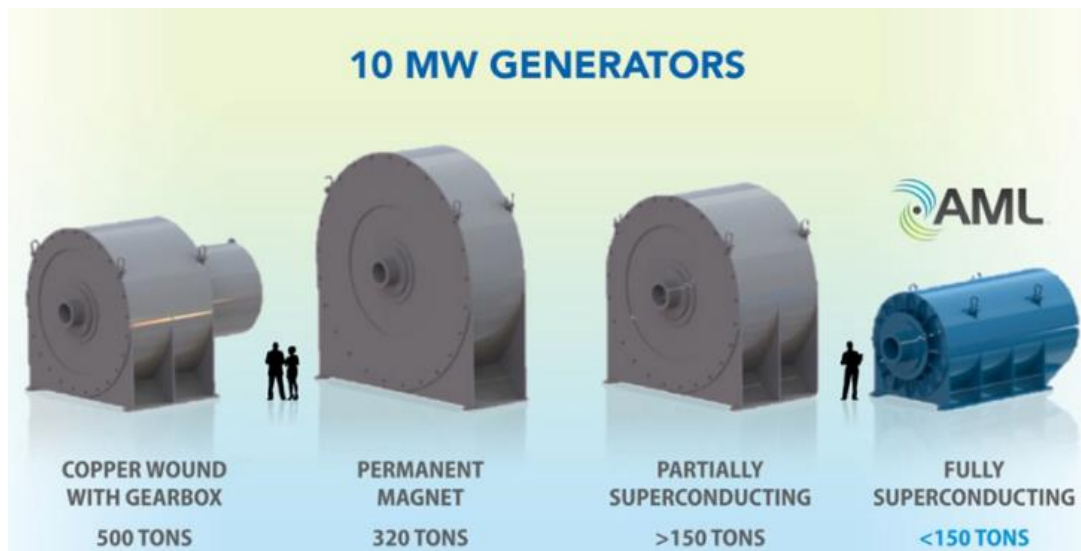


Figura 7-13 - Comparação das massas dos aerogeradores.

Fonte: amlsuperconductivity.com.

Geradores HTS são muito mais leves. Com 10 MW de potência, pesam menos de 150 toneladas, em comparação com 300 toneladas para um gerador de ímã permanente de transmissão direta, traduzindo em redução de custos significativos tanto para o gerador quanto para o equilíbrio dos componentes da turbina eólica. Em última análise, o arranjo geral do sistema tem o objetivo de minimizar a LCOE produzido pelas turbinas eólicas. No Plano Nacional de Estratégia de Vento OffShore para os Estados Unidos, os objetivos do LCOE para energia eólica offShore são de US\$ 0,10/kWh em 2020 e US\$ 0,08/kWh até 2030. A turbina da AMSC, juntamente com outras melhorias tecnológicas em turbinas eólicas, tem potencial para alcançar uma LCOE de US\$ 0,077/kWh para uma turbina de 10MW.

O gerador HTS apresenta um custo maior em relação à máquina PMDD para potências na faixa de 3MW e aproximadamente o mesmo para potências maiores, a partir de 8MW. No entanto, essas curvas podem mudar significativamente se o preço do cobre ou a matéria prima utilizado para a

fabricação dos ímãs usados nos geradores PMDD aumentar substancialmente (devido a instabilidade deste mercado) ou se o custo dos geradores HTS cair, impulsionado pelos avanços nesta tecnologia considerada relativamente nova (MAPLES,HAND,MUSIAL,et al,2010).

8. Conclusão

O mercado dos aerogeradores vem crescendo a cada ano não apenas na diversidade de arranjos mas principalmente na capacidade de geração por torre eólica. Novos locais de instalação que exigem melhor aproveitamento do vento, impulsionam o desenvolvimento de novas tecnologias. Chegaremos a um ponto em que os melhores locais de instalação, principalmente OnShore, se esgotarão (principalmente na Europa) e a saída estará na geração OffShore. Equipamentos mais eficientes e de maior potência deverão ocupar estes espaços, em projetos de atualização (retrofit) ou substituição total de uma torre eólica.

A melhoria continua dos projetos e materiais que compõem os aerogeradores é fundamental, não apenas para redução de custos de instalação, mas também na disponibilidade física do sistema, objetivando a redução das tarifas de energia elétrica. Grande parte dos especialistas concordam que não existe um único modelo que possa ser considerado a melhor solução para todos os casos, porem, é consensual a ideia de que a chave do sucesso deste mercado está na diversidade de tipos, modelos de arranjos e tecnologias de SGE's. Da mesma forma, é unânime a escolha em utilizar sistemas que eliminem ao máximo as parte girantes, impulsionados pela confiabilidade das máquinas e, principalmente, pela redução destes que são considerados "pontos críticos" no sistema eólico.

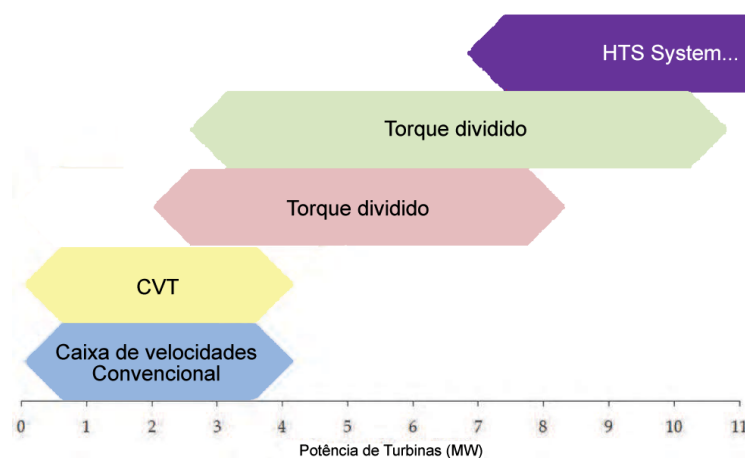


Figura 8-1 - Arranjos de sistemas aerogeradores por potência.

Fonte: Ragheb,A. Ragheb,M., 2010.

A utilização de caixas de velocidades também é um problema do ponto de vista ecológico. A utilização de grandes quantidades de óleos lubrificantes em um sistema eólico podem provocar consideráveis danos ambientais, principalmente, em caso de acidentes. Este problema pode ser de maior ou menor grau, dependendo do local de instalação. Em ambientes OffShore, a contaminação pode comprometer a vida marinha em uma extensa área, já que as correntes podem espalhar rapidamente este contaminante. Em instalações OnShore, o óleo desprendido pode afetar a produtividade do solo, além de atingir o lençol freático. Em casos de incêndio, pode atingir a vegetação, aumentando a proporção do acidente, já que o óleo em determinadas temperaturas se torna altamente inflamável.

Para as tecnologias de arranjos promissoras, como segundo objetivo, é provável, pela análise do mercado, que sistemas geradores utilizando as propriedades supercondutoras dominarão o mercado Offshore de alta capacidade em médio-longo prazo, porém, neste momento, ainda se esbarram nos custos elevados de desenvolvimento desta tecnologia e, principalmente, pela manutenção de um sistema de temperatura criogênica.

Hoje nos deparamos com um limite considerado pela faixa de potência de 8 a 10MW para cada torre em arranjos PMSG-DD (Gerador síncrono de Ímãs Permanentes-DirectDiver). A tecnologia de supercondutores proporcionará maiores potências em menores dimensões e peso, possibilitando não apenas a instalação em ambientes OffShore, mas trazendo esta tecnologia para o ambiente OnShore, ampliando ainda mais a participação na produção elétrica através dos ventos.

O futuro é sem dúvida promissor. Novas ferramentas e softwares simuladores projetarão com maior precisão as falhas que antes não eram amplamente analisadas, além de indicar os melhores compostos e materiais para produção de SGE's. Novas tecnologias que hoje não são economicamente viáveis para a aplicação comercial, estarão em breve no mercado, com um olhar especial para os sistemas supercondutores de alta temperatura. Quando este momento chegar, talvez será possível apontar, com uma certa margem, um único arranjo

e tecnologia para a maioria das aplicações, tanto para instalações terrestres quanto marítimas.

9. Referências

- ABDI, 2014 - **Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial - Mapeamento da cadeia produtiva da Indústria Eólica no Brasil** – [Acessado em 06/08/2017]. Disponível em <http://www.abdi.com.br/Estudo_Backup/Mapeamento%20da%20Cadeia%20Produtiva%20da%20Ind%C3%BAstria%20E%C3%B3lica%20no%20Brasil.pdf>;
- ABEEOLICA, 2017 - **Dados Externos Geração Eólica** – [Acessado em 05/05/2017] – Disponível em <<http://www.abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2017/04/Dados-Mensais-ABEEolica-04.2017.pdf>>;
- ALKAN, D., 2013 - **Investigating CVT as a Transmission System Option for Wind Turbines**;
- BOEM, 2007 - **Bureau of Ocean Energy Management - Offshore Wind Energy**;
- CHEN, H, Z., 2008 - **Overview of different wind generator systems and their comparisons** – [Acessado em 18/06/2017] – Disponível em < http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-rpg_20070044>;
- COTREL, J., 2005 - **Assessing the Potential of a Mechanical Continuously Variable Transmission for Wind Turbines** – [Acessado em 20/07/2017] – Disponível em <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.605.4259&rep=rep1&type=pdf>>;
- DOE, 2016 - **U.S. Department of Energy - Advanced Drivetrain Manufacturing** – [Acessado em 12/07/2017] – Disponível em: <<https://energy.gov/eere/wind/advanced-drivetrain-manufacturing>>;
- DOE, 2008 - **U.S. Department of Energy - 20% Wind Energy by 2030. Increasing Wind Energy's Contribution to U.S. Electricity Supply** – [Acessando em 28/07/2017] – Disponível em <<https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/41869.pdf>>;
- ENERDATA, 2017 - **Global Energy Trends** – [Acessado em 15/07/2017] – Disponível em < <https://www.enerdata.net/system/files/publications/global-energy-trends-2017-publication.pdf>>;
- EPE, 2016 - **Empresa de Pesquisa Energética** – [Acessado em 11/07/2017] – Disponível em <<http://www.epe.gov.br/Paginas/default.aspx>>;
- JRC WIND ENERGY, 2016 - **Wind Energy Status Report 2016 Edition** – [Acessado em 19/07/2017] – Disponível em > https://setis.ec.europa.eu/sites/default/files/reports/wind_energy_status_report_2016.pdf>;

GONZALEZ J.; ARANTEGUIR, 2016 - **Technological evolution of onshore wind turbines** – [Acessado em 25/06/2017] – Disponível em <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/we.1974/full>>;

GWEC, 2016 - **Global Wind Energy Council – Global Wind Report – Annual Market Update** – [Acessado em 05/08/2017] – Disponível em <<http://files.gwec.net/register?file=/files/GWR2016.pdf>>;

HERBERTA,G.;INIYANB,S.;SREEVALSANC,E., 2005 - **A Review of Wind Energy Technologies** – [Acessado em 17/07/2017] – Disponível em <<https://pt.scribd.com/document/61875268/A-Review-of-Wind-Energy-Technologies>>;

IRENA, 2012 - **International Renewable Energy Agency - Renewable energy technologies: cost analysis series** – [Acessado em 20/07/2017] – Disponível em <https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-WIND_POWER.pdf>;

LEWIS,C., 2010 - **Directdrive Superconducting Wind Generators**;

MAPLES,B.; HAND,M.; MUSIAL,W., 2010 - **Comparative Assessment of Direct Drive High Temperature Superconducting Generators in Multi-Megawatt Class Wind Turbines** – [Acessado em 22/07/2017] – Disponível em <<https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/49086.pdf>>;

FADIGAS,E., 2017 - **Energias Renováveis, Geração distribuída e Eficiência Energética** - Edição: 01/2017;

MUSIAL,W., 2010 - **Large-Scale Offshore Wind Power in the United States** – [Acessado em 11/07/2017] – Disponível em <<https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/40745.pdf>>

NREL, 2010 - U.S. Department of Energy - **Advanced Wind Turbine DriveTrains Concepts** – [Acessado em 20/06/2017] – Disponível em <<https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/50043.pdf>>;

POLINDER, H., ABRAHAMSEN, A., ATALLAH,K., 2013 – **Trends in Wind Turbine Generator Systems** – [Acessado em 03/08/2017] – Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/260618957_Trends_in_Wind_Turbine_Generator_Systems>;

RAGHEB,A; RAGHEB,M., 2010 - **Wind Turbine Gearbox Technologies** – [Acessado em 22/07/2017] – Disponível em <<http://www.ragheb.co/Wind%20Power%20Gearbox%20Technologies.pdf>>;

REN21, 2016 - **Global Status Report - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century** – [Acessado em 05/08/2017] – Disponível em <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/05/GSR_2016_Full_Report_lowres.pdf>;

RIBEIRO, F., 2010 - **Estudo da aplicação de transmissão continuamente variável (CVT) em geradores eólicos de médio porte** – [Acessado em 12/07/2017] – Disponível em <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.456.8690&rep=rep1&type=pdf>>;

SHAFIEE, M.; DINMOHAMMADI, F., 2014 - **Based Risk Assessment Approach for Wind Turbine Systems: A Comparative Study of Onshore and Offshore** – [Acessado em 22/07/2017] – Disponível em <<http://www.mdpi.com/1996-1073/7/2/619/htm>>

SERRANO, J.; ARÁNTIGUÍ, R., 2016 - **Technological evolution of onshore wind turbines - market-based analysis** – [Acessado em 03/08/2017] – Disponível em <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/we.1974/pdf>>

SHENG, S., 2014 - **Gearbox Typical Failure Modes, Detection and Mitigation Methods** – [Acessado em 17/06/2017] – Disponível em <<https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60982.pdf>>;

TOLMASQUIM, M., 2016 - EPE - **Energia Renovável, Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceanica** – [Acessado em 24/07/2017] – Disponível em <<http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>>;

URBAN, A., 2010 - **DriveTrain development for wind turbines** – [Acessado em 15/07/2017] – Disponível em <<http://www.skf.com/binary/56-254540/Wind-Capability-brochure-14480-EN.pdf>>;

WENPING, C.; YING, X.; AND ZHENG, T., 2012 - **Wind Turbine Generator Technologies** – [Acessado em 23/07/2017] – Disponível em <<https://www.intechopen.com/books/advances-in-wind-power/wind-turbine-generator-technologie>>.

WIND EUROPE, 2016 - **The European offshore wind industry** – [Acessado em 24/07/2017] – Disponível em <<https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-mid-year-offshore-statistics-2016.pdf>>