



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

Diêgo Menezes Campos

Utilização de tecnologia de transmissão magnética em aerogeradores

Fortaleza, 01 de Setembro de 2021

DIÉGO MENEZES CAMPOS

**UTILIZAÇÃO DE TECNOLOGIA DE TRANSMISSÃO
MAGNÉTICA EM AEROGERADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Universidade Federal do
Ceará como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Elétrica, sob a
orientação do Professor Dr. Raphael
Amaral Câmara.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Amaral
Câmara

Fortaleza

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C211u Campos, Diêgo Menezes.
Utilização de tecnologia de transmissão magnética em aerogeradores / Diêgo Menezes Campos. – 2021.
51 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara.

1. Transmissão magnética. 2. Aerogeradores. 3. Energia eolioelétrica. 4. Engrenagens magnéticas. I.
Título.

CDD 621.3

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Raphael Amaral Câmara (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng.^a M.^a Dayse Benevides de Queiroz
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho à minha mãe, Claudia Menezes,
e à minha vó, Raimunda Menezes,
que sempre me apoiaram incondicionalmente em tudo que eu fiz.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho só foi possível devido a todo o suporte que tive ao longo desses anos de jornada acadêmica, agradecendo em especial:

À Universidade Federal do Ceará, pelos anos de educação providos com deusas excelência;

À minha banca examinadora, pela oportunidade de apresentar e aprimorar meu trabalho de conclusão de curso;

À meus colegas de curso, por todas as madrugadas que passamos juntos e todas as centenas de horas de estudo que compartilhamos ao longo dessa árdua caminhada, com as esporádicas conversas e risadas no “quadrado” do lado do bloco 707;

À minha família, por ter me dado todo o apoio necessário para que eu não desistisse e cuidasse com carinho da minha vida acadêmica e da minha saúde mental;

Ao meu orientador, Prof. Raphael Amaral Câmara, por ser compreensivo com a minha situação e ter me direcionado bem na escrita deste TCC;

À Ambev e à todo o time de logística do CDD Fortaleza, por me acolherem na cultura da empresa e me darem um ambiente onde pude verdadeiramente me desenvolver como profissional e indivíduo;

E aos meus dois grandes amigos, Caio e Artur, por serem uma constante em uma vida permeada de variáveis.

“Quando eu era uma criança, minha mãe disse à mim, ‘Se você se tornar um soldado, será um general. Se você se tornar um monge, será o papa.’ Ao invés disso eu me tornei um pintor e virei Picasso.”

- Pablo Picasso

“Se estiver passando pelo inferno, continue caminhando.”

- Winston Churchill

RESUMO

O presente trabalho visa, por meio do estudo e da análise de diversos artigos, fazer uma revisão bibliográfica à respeito da utilização de engrenagens magnéticas como uma parte integral da transmissão de aerogeradores (particularmente os de grande escala), eventualmente integrando um sistema único de direct drive entre gerador e transmissão. Para o tal, serão apresentados artigos e estudos sobre os mais diversos tipos de topologias de engrenagens magnéticas e seu funcionamento será detalhado. A maior parte dos artigos analisados no presente documento são de cunho teórico e experimental e serão analisados afim de desenvolver um arcabouço teórico necessário para a compreensão de sistemas M-CVT e *Direct Drive*.

Em seguida, serão apresentadas conclusões, baseadas em aplicações reais e testes em laboratórios realizados pelos artigos analisados e por dois grandes projetos (InnWind e DemoWind) financiados pela União Europeia, acerca do questionamento se engrenagens magnéticas realmente são viáveis para aplicações de geração eólicoelétrica e se é possível obter redução significativa de custos à longo prazo a ponto de justificar o investimento que já foi e ainda deve ser feito em R&D nessa tecnologia.

Palavras-chave: Transmissão magnética; Aerogeradores; Energia eólicoelétrica; Engrenagens magnéticas; Direct Drive; M-CVT.

ABSTRACT

This work seeks, through the study and analysis of a variety of articles, to make a bibliographic review about the utilization of magnetic gears as an integral part of aerogenerator transmissions (particularly the large scale ones), eventually integrating a direct drive system between generator and transmission. To do such, studies and articles will be presented about a variety of magnetic gear topologies and their detailed functioning. Most of the analysed articles on this document are theoretical and experimental and will be analysed as to develop the necessary theoretical framework to comprehend M-CVT and Direct Drive.

Then, conclusions will be presented, based on real applications, lab tests made by the aforementioned articles and two big projects (InnWind and DemoWind), so that it will be possible to conclude whether or not magnetic gears are actually viable for Wind energy applications and if it is possible to significantly reduce long term costs as to justify the investment in R&D that has been and still is being done on this technology.

Key-words: Magnetic Transmission; Aerogenerators; Wind energy; Magnetic Gears; Direct Drive; M-CVT.

Lista de Figuras

Figura 1 - Esquema da circulação atmosférica geral da Terra.....	17
Figura 2 – Estrutura básica de um aerogerador	18
Figura 3 – Componentes típicos de uma caixa de engrenagem.....	22
Figura 4 – Turbina de transmissão direta sendo testada na Universidade de Clemson, na Carolina do Sul	25
Figura 5 – Seção em corte de uma transmissão magnética concêntrica	27
Figura 6 – TMC sem o anel interno	28
Figura 7 – a) Topologia proposta de uma TMH; b) TMH com $p_w = 2$; c) TMH com $p_w = 3$	30
Figura 8 – Transmissão planetária mecânica.....	31
Figura 9 – Transmissão planetária magnética	33
Figura 10 – a) Topologia de engrenagens magnéticas concêntricas tradicional; b) Topologia proposta de M-CVT	37
Figura 11 – a) MDDM em uma Nacele; b) Topologia de uma MDDM.....	38
Figura 12 – Estrutura proposta de uma PDD.....	39
Figura 13 – a) Componentes de uma transmissão magnética concêntrica; b) Componentes de um gerador de ímãs permanentes convencional	40
Figura 14 – Cronograma de desenvolvimento e lançamento da tecnologia PDD	43
Figura 15 - Enrolamentos de cobre sendo instalados no estator do PDD do projeto CHEG	44
Figura 16 – Gerador CHEG finalizado	45

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Densidade de torque de diferentes engrenagens magnéticas	34
Tabela 2 – Custos comparativos de um gerador PDD e geradores convencionais.....	42
Tabela 3 – Resultados finais em porcentagem da aplicação de um PDD.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

R&D - *Research and Development*

PDD - *Pseudo Direct Drive*

RPM - *Rotações por Minuto*

PMG - *Permanent Magnet Generator*

EESG - *Electrically Excited Synchronous Generator*

MG - *Magnetic Gear*

TMC - *Transmissão Magnética Concêntrica*

TMH - *Transmissão Magnética Harmônica*

M-CVT - *Magnetic Continuously Variable Transmission*

DDM - *Direct Drive Machine*

MDDM - *Magnetic Direct Drive Machine*

LCOE - *Levelized Cost of Energy*

CAPEX - *Capital Expenditure*

CF - *Capacity Factor*

CHEG - *Compact High Efficiency Generator*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	15
1.2 Estruturação	15
2. TURBINAS EÓLICAS: PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO	17
2.1 Energia Eólica	17
2.2 Aeroogeradores	18
3. TRANSMISSÃO: PROBLEMAS E SOLUÇÕES	21
3.1 Manutenção	21
3.2 Transmissão x Transmissão Direta	23
3.3 A transmissão magnética	26
4. TRANSMISSÃO MAGNÉTICA: TOPOLOGIAS	27
4.1 Topologia concêntrica	27
4.2 Topologia Harmônica	29
4.3 Topologia planetária	30
4.3.1 Transmissão planetária mecânica	31
4.3.2 Transmissão planetária magnética	32
4.4 Comparação	34
5. TRANSMISSÕES MAGNÉTICAS CONTINUAMENTE VARIÁVEIS (M-CVT) E MÁQUINAS COM MODULAÇÃO DE FLUXO MAGNÉTICO	35
5.1 M-CVT	35
5.2 Máquinas elétricas com modulação de fluxo magnético	37
5.2.1 Pseudo Direct Drive (PDD)	38
6. PROJETOS	41
6.1 InnWind	41
6.2 DemoWind	44

7. CONCLUSÕES.....	46
8. REFERÊNCIAS.....	47

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da necessidade de energia elétrica, o mundo passa, cada vez mais, a recorrer à novas tecnologias para melhorar os processos já existentes de geração de energia elétrica. Com a mudança dos paradigmas de geração, impulsionados pelo conceito de desenvolvimento sustentável e pela insustentabilidade do uso de combustíveis fósseis no longo prazo, é visto um uso cada vez maior de fontes alternativas de energia nas matrizes energéticas mundiais. Dentre as mais diversas fontes de energia renovável, uma das que mais crescem é a energia eólica. Impulsionado pela redução de custos e pela capacidade de geração que essa fonte oferece, o mercado está investindo em energia eólica nos mais diversos países do mundo. Desafios globais de energia e preocupações ambientais fazem com que o mundo, mais do que nunca, foque em energias renováveis.

Energia eólica foi identificada como uma das mais promissoras fontes naturais de energia, principalmente pelo seu caráter renovável (Sanches, 2015). A capacidade de geração de energia eólica global está crescendo de forma exponencial, duplicando a capacidade a cada 3 anos (Ackermann & Söder, 2000), com a Europa ainda sendo a líder global de energia eólica. Na Dinamarca, energia eólica já provém mais de 47% do total de energia gerada (Jaganmohan, 2021).

Com cerca de 5% do mercado global de energia (C2ES, 2018), essa fonte de energia tem visto uma aceleração na pesquisa e no desenvolvimento de novas tecnologias que visam aumentar sua eficiência e produtividade e diminuir seus custos operacionais. É nesse contexto que o presente trabalho irá tratar de uma de suas principais partes: a caixa de engrenagens, parte do sistema de transmissão mecânico. Essencial para o funcionamento de um aerogerador, a caixa de engrenagens transmite a velocidade do eixo de rotação principal do aerogerador para o gerador, normalmente possuindo uma relação de transmissão afim de elevar a velocidade a níveis aceitáveis de geração. Por fazer elevações da ordem de até 120x (Ragheb & Ragheb, 2010), esse componente fica submetido à grandes estresses mecânicos e é uma das partes que mais falham e mais necessitam de manutenção do aerogerador.

Com isso em mente, desde 2011 (Zero-e, 2016) vêm tomando força a ideia de engrenagens magnéticas, atrativas devido ao fato de que não necessitam de manutenção (Fryer, 2016). Tradicionalmente utilizadas para aplicações de baixo torque, essa tecnologia vem sendo estudada, por diversos autores, para aplicação em geradores de até 20 MW de potência (InnWind.eu, 2017) através de inovações como o *Pseudo Direct Drive*, que dão maior

densidade de torque às engrenagens. Com sua eficácia comprovada, transmissões magnéticas revolucionarão o campo da geração eólicoelétrica e se tornarão o novo padrão para aerogeradores de alta potência.

1.1 Objetivos

Principal: Apresentar e analisar o funcionamento de engrenagens magnéticas em geração eólicoelétrica, utilizando-se de extensa teoria de artigos científicos e testes em escala real feitos por diversas empresas afim de corroborar com sua viabilidade.

Específicos:

- Esclarecer o contexto de desenvolvimento dessa tecnologia e os principais motivos para diversos países como Dinamarca, Alemanha, França e China e investirem em *R&D* no setor eólico;
- Mostrar os principais desafios eletromecânicos de manutenção de usinas eólicas e demonstrar o impacto que a transmissão mecânica tem no orçamento de projetos;
- Criar um arcabouço teórico robusto acerca de engrenagens magnéticas e explicar os principais expoentes dessa tecnologia através de uma revisão bibliográfica detalhada que compara tecnologias em potencial e argumenta à favor de uma solução específica;
- Analisar os resultados experimentais de projetos como o InnWind e o Demowind.

1.2 Estruturação

O trabalho em questão está estruturado da seguinte maneira:

- No capítulo 1, é apresentada uma ideia do tema e da necessidade de uma solução para o problema da transmissão mecânica, explicando como o resto do trabalho será estruturado;
- O capítulo 2 traz o funcionamento básico de um aerogerador, desde a captação da energia cinética dos ventos até a sua transmissão à concessionária local na forma de energia elétrica, expondo os principais componentes e suas funções específicas;
- O capítulo 3 discorre à respeito da transmissão de um aerogerador e como seu funcionamento, por mais que seja essencial, acaba acarretando uma série de

custos relacionados à manutenção, além de comparar as vantagens e desvantagens de um sistema com e sem transmissão;

- No capítulo 4, a tecnologia de engrenagens magnéticas é exposta como uma solução para os problemas apresentados no capítulo 3. Seu princípio de funcionamento é descrito de forma detalhada e topologias de engrenagens magnéticas no contexto de transmissões de aerogeradores são expostas. Por fim, os modelos são comparados, afim de se chegar a uma solução ótima para se adotar;
- O capítulo 5 se aprofunda mais nos modelos de estado da arte de transmissão magnética, adotando a solução do capítulo 4, e desenvolve o contexto no qual se insere a tecnologia de transmissão magnética mais adotada no mercado, o *Pseudo Direct Drive* (PDD);
- O capítulo 6 contempla os trabalhos realizados até o momento em que a tecnologia em questão foi aplicada em larga escala, atraindo investimentos multimilionários advindos da União Europeia e China. O capítulo tem o intuito de comparar os resultados reais de testes feitos por empresas e sua aplicabilidade futura;
- Por fim, o capítulo 7 apresenta conclusões com base em todos os estudos apresentados até então, revisita os objetivos do trabalho e discorre acerca do futuro dessa tecnologia e da sua viabilidade no contexto de energia eólica mundial.

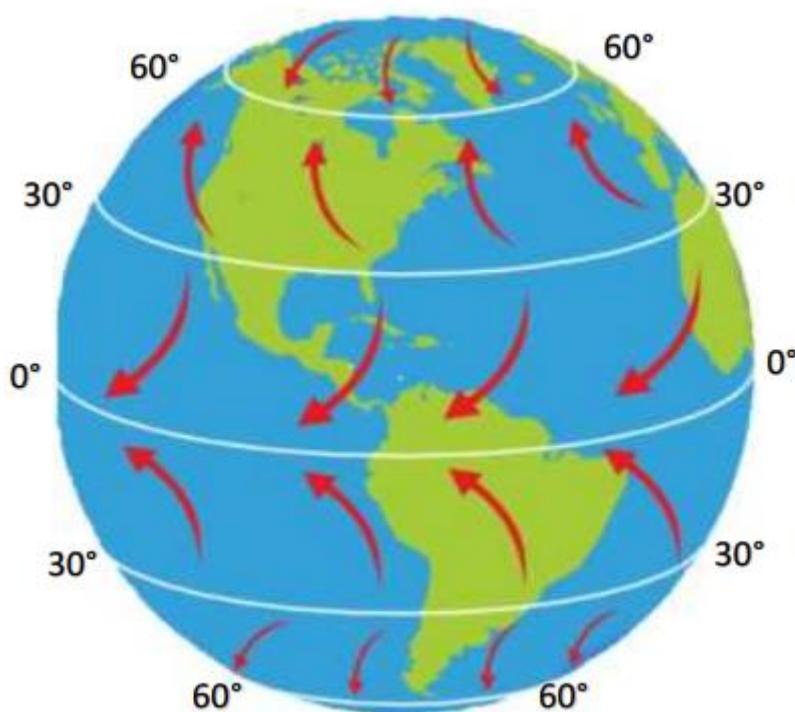
2. TURBINAS EÓLICAS: PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Antes de adentrar no assunto de engrenagens magnéticas, é essencial ter uma visão geral de como a energia eólica é produzida e como a sua principal fonte de captação (aerogerador) funciona.

2.1 Energia Eólica

A energia eólica é a energia produzida a partir da energia cinética do vento, resultado do aquecimento eletromagnético do sol de forma não uniforme no planeta (Baglee, Knowles, Kinnunen, & Galar, 2015) devido à rotação da terra (SÁ *et al*, 2001). Esses fenômenos criam uma rotação da massa de ar global, o que dá origem ao vento (o ar em movimento), como é ilustrado na figura 1.

Figura 1 - Esquema da circulação atmosférica geral da Terra



(Ferreira, 2010)

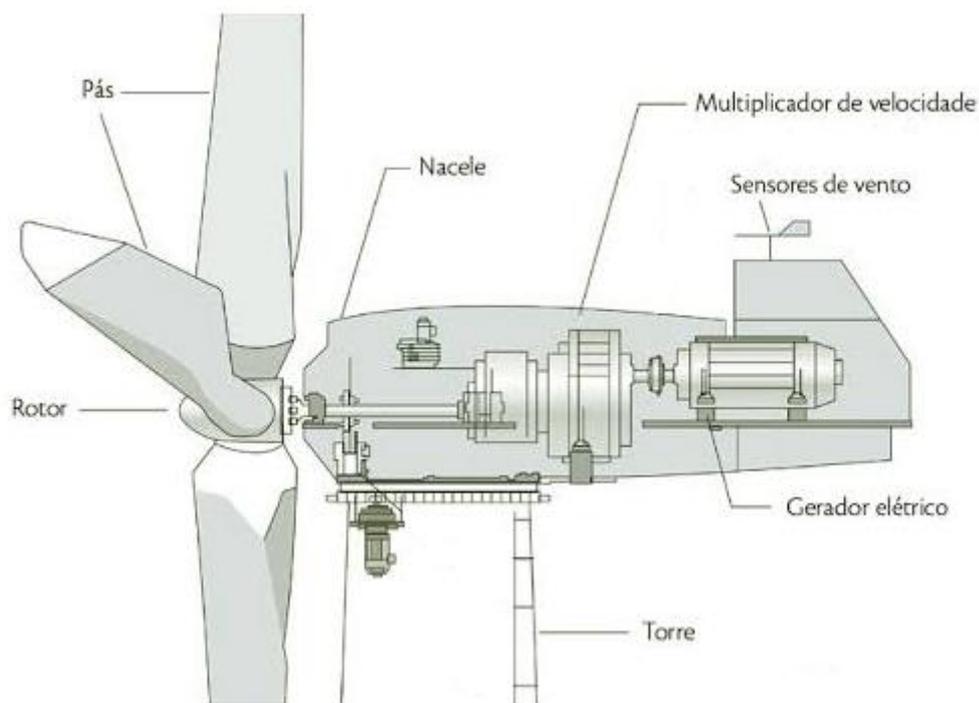
A utilização dessa energia se dá pela conversão de energia cinética dos ventos em energia mecânica, através de uma turbina eólica. Posteriormente, essa energia mecânica é repassada para um gerador através do movimento de rotação de pás mecânicas. Tal conversão

se torna viável em lugares com ventos acima de 5 m/s (Pinto, 2019), possibilitando a instalação de turbinas em diversas regiões.

2.2 Aero geradores

Todo esse processo de conversão moderno só é possível pela utilização de aerogeradores, que são geradores integrados a um sistema de rotação com eixo central movido através da força dos ventos. Essas turbinas eólicas produzem, com o movimento da hélice, um campo magnético. A figura 2 mostra um aerogerador do tipo horizontal, o mais utilizado no mercado.

Figura 2 – Estrutura básica de um aerogerador



(WindBox, 2020)

Existem diversas topologias com variações eletromecânicas entre si, sendo a da imagem em questão a mais comum e genérica, servindo de base para o entendimento de como esse equipamento funciona. Podemos dividir, então, o aerogerador em 7 partes:

Torre: É o corpo do aerogerador e corresponde ao seu maior volume. Essa parte é responsável pela sustentação da estrutura como um todo, servindo de base de apoio para a nacelle. Geralmente, essas partes são feitas em formato cônico (de aço ou concreto) ou na forma de treliças (aço galvanizado) e variam de 50 a 150 metros, já que a velocidade do vento aumenta com a altura. (Pinto, 2019)

Rotor: Componente destinado a captar energia cinética dos ventos, através da rotação, e convertê-la em energia mecânica através do eixo central, que por sua vez mantém contato com a caixa de transmissão. É composto pelas pás (geralmente três) do equipamento e o cubo (peça que une as pás). Na maioria dos casos, o rotor tem de 60 a 150 metros de diâmetro e conta com um sistema hidráulico que possibilita captar ventos de alta velocidade. Suas pás não são maciças (Pinto, 2019), elas são ocas e feitas de um material composto, feito para ser leve e resistente.

Nacele: É a parte mais pesada da estrutura, chegando a mais de 100 toneladas em alguns casos. Por esse motivo, a logística de transporte desse componente é fundamental na hora de avaliar a viabilidade de um projeto eólico, não só pela dificuldade de seu transporte para áreas remotas, como também pelo carregamento dele em cima da torre. Dentro da Nacele é onde encontramos várias partes essenciais do aerogerador, como a caixa de transmissão, o transformador e o gerador. Ela funciona como uma estação de operação e manutenção onde os funcionários entram e realizam algumas correções no funcionamento eletromecânico operacional.

Caixa de transmissão: Também chamada de caixa de transmissão ou multiplicador, esse componente é utilizado no aerogerador para aumentar a velocidade rotacional do eixo de baixa velocidade (vindo do rotor) para o eixo de alta (indo para o gerador). Por conseguirem elevar a velocidade de rotação em até 120 vezes, engrenagens em um aerogerador estão sujeitas as severas cargas cíclicas por conta da variação estocástica por natureza da intensidade e da direção do vento. Por ter que aguentar tamanho estresse mecânico, esse componente possui uma alta taxa de falhas e necessita de constante manutenção mecânica. (Ragheb & Ragheb, 2010)

Gerador: É o dispositivo responsável pela conversão da energia mecânica de rotação do eixo em energia elétrica, consistem basicamente de rotores que rodam dentro de uma armadura estacionária chamada de “estator”. Podem ser de dois tipos: síncrono e assíncrono.

Geradores síncronos são os geradores cuja frequência da corrente elétrica gerada está diretamente relacionada (sincronizada) com a frequência de rotação do rotor. Aqui, temos o rotor como uma fonte de campo magnético variável, podendo este ser um eletroímã ou ímã permanente. O estator consiste em três bobinas de fio colocadas para interceptar o campo magnético do rotor, igualmente espaçadas ao redor da circunferência e separadas por 120° cada. Ao girar com a frequência angular de entrada (determinada pela quantidade de polos e pela frequência necessária da rede), o rotor irá induzir corrente nas bobinas do estator com frequência elétrica proporcional à frequência mecânica. (Fitzgerald & Kingsley, 2003) Apesar

de pequenos geradores síncronos conseguirem criar campos magnéticos com rotores de ímãs permanentes, quase todos os aerogeradores que utilizam geradores síncronos criam o campo fluindo uma corrente DC pelo enrolamento do rotor.

Geradores assíncronos utilizam o mesmo princípio de motores assíncronos (também chamados de motores de indução). Nesse modelo, o campo girante é criado nos enrolamentos do estator, e a corrente induzida irá ser originada nos enrolamentos do rotor através do campo do estator. Como o estator cria um campo magnético girante que induz corrente alternada no rotor, não há sincronismo entre o fluxo da armadura e o rotor, o que gera um conjugado (torque) eletromecânico, isto é, existe um escorregamento entre rotor e estator da máquina que irá definir se esta funcionará como motor ou gerador. As correntes induzidas e o torque são consequências da presença desse escorregamento entre as partes. A maior parte dos aerogeradores utilizados comercialmente utilizam geradores assíncronos. (Pinto, 2019)

Biruta e Anemômetro: A biruta é o equipamento utilizado para fazer medições da velocidade média do vento no local, ficando posicionado na Nacele afim de captar com maior fidelidade os ventos que chegam até o rotor do aerogerador. Já a biruta fica junto do anemômetro e seu papel é mensurar qual a direção do vento, auxiliando no giro da Nacele para que a mesma esteja apontada para onde o vento mais incide. Com os dados do anemômetro, é possível gerar gráficos da curva de potência de turbinas e realizar estudos de produção de parques, tendo a operação dos aerogeradores direcionada da melhor forma possível pela biruta.

3. TRANSMISSÃO: PROBLEMAS E SOLUÇÕES

Agora que os princípios de operação básicos de um aerogerador foram descritos, faz-se necessário entender o porquê da transmissão ser tão problemática e como normalmente é feita a sua manutenção.

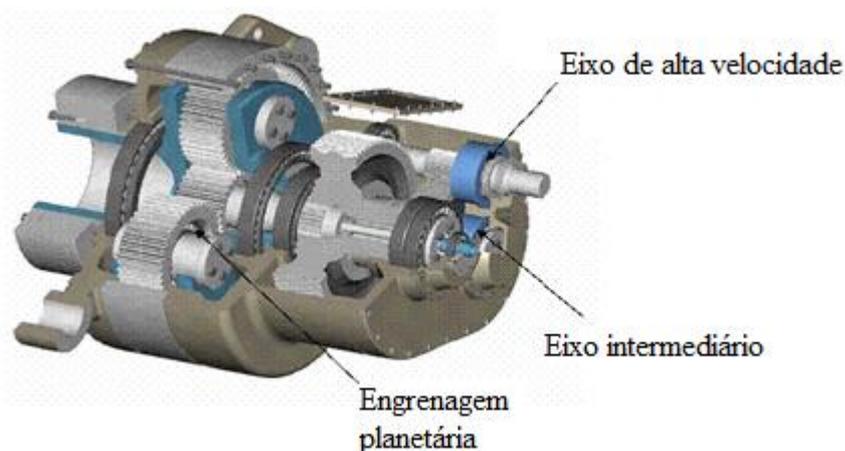
3.1 Manutenção

A experiência operacional de caixas de engrenagens utilizadas em turbinas eólicas de potência na ordem de MW mostra que as mesmas são o elo mais frágil do sistema. Pequenas turbinas que operam na ordem de kW não precisam de transmissão, já que seus rotores giram a velocidades significativamente maiores que as necessárias para geração e podem ser acoplados diretamente aos geradores, mas esse não é o caso para grandes operações.

A vida útil típica de um aerogerador é de cerca de 20 anos, mas as transmissões, que convertem velocidades rotacionais de 5 a 22 RPM para velocidades requeridas por geradores da ordem de 1000 a 1600 rpm, comumente falham em um período operacional de cerca de 5 anos, tendo que ser substituídas. As falhas são tão comuns que várias empresas de seguro estão incluindo nos seus acordos de manutenção a obrigatoriedade da substituição de componentes vulneráveis como caixas de transmissão a cada 5 anos. O custo da substituição de uma transmissão pode chegar a até 10% do custo original de construção do projeto, impactando significativamente na rentabilidade do mesmo. (Ragheb & Ragheb, 2010)

A maioria das turbinas de hoje possuem transmissão de três estágios. Isso significa que vários pares de engrenagens são conectados consecutivamente, afim de se aumentar a relação de transmissão através da multiplicação da relação de cada estágio. Isso é necessário porque uma engrenagem reta de um único estágio só faz sentido até a relação de aproximadamente 10:1. Como é preciso, muitas vezes, aumentar a velocidade de rotação em até 120x, faz-se o uso de uma transmissão multiestágio.

Figura 3 – Componentes típicos de uma caixa de engrenagem



(Baglee, Knowles, Kinnunen, & Galar, 2015)

Essa transmissão de três estágios é usualmente composta de um estágio planetário e dois estágios paralelos. Isso significa que um estágio é concêntrico, composto de engrenagens internas e da engrenagem solar, e dois estágios são paralelos, seguindo o modelo clássico de transmissões multiestágios. Essa configuração ajuda a manter a densidade do torque e, devido a sua compacticidade, é capaz de caber dentro da Nacele, tudo isso enquanto aguenta as duras condições de cargas impostas pelas pás. Tais condições incluem variações na velocidade do vento e na direção do mesmo, temperaturas extremas, vibração e umidade, causando uma série de problemas como arranhões e corrosão por micro pites (forma de corrosão extremamente localizada que leva à geração de pequenos furos no metal).

Um dos itens de manutenção mais importantes é a saúde do óleo da transmissão. Ele existe para lubrificar e reduzir o atrito, mas também mantém a caixa de engrenagens limpa e protege da corrosão. Óleos sintéticos possuem melhor reputação que óleos naturais, com base em minerais, além de possuírem alta taxa de viscosidade (taxa usada para caracterizar a temperatura de viscosidade e o seu comportamento), ou seja, sua viscosidade muda menos com a temperatura quando comparado com a do óleo mineral.

A deterioração do óleo está associada com a oxidação devido ao calor, contaminação e exaustão aditiva. O pior contaminante é a água: enquanto objetos sólidos e pequenas partículas são facilmente removíveis, dificilmente a água consegue ser filtrada, normalmente é necessária a troca completa do óleo.

O óleo de uma transmissão deve ser trocado depois das primeiras 500 horas de operação. Depois de um ano de operação, uma amostra do óleo deve ser recolhida para análise, e após dois anos, o óleo necessita ser trocado, mesmo que esteja em boas condições. (May, 2019)

A manutenção preditiva é fundamental para prevenir os problemas citados anteriormente, diminuindo futuros custos de substituição de peças e detectando possíveis falhas que causariam a parada da operação por tempo indeterminado. Ainda com todos esses cuidados, a transmissão continua sendo uma parte custosa e delicada da Nacele, o que impulsionou o avanço, nos últimos anos, de diversas tecnologias que visam dar mais confiabilidade e eficiência a essa etapa do processo de geração de energia.

3.2 Transmissão x Transmissão Direta

Como mencionado anteriormente neste trabalho, a transmissão é importante porque geradores necessitam de altas velocidades em RPM para fornecerem energia elétrica de qualidade, mas desde 1991 (Kaa, Ek, Kamp, & Rezaei, 2020), fabricantes de turbinas tem utilizado cada vez mais tecnologias de aerogeradores com transmissão direta. Neste tipo de configuração, o rotor é diretamente conectado ao gerador, ou seja, a velocidade de ambos é a mesma.

Para produzir energia AC em 50 e 60 Hz (frequências utilizadas na Europa e nas Américas, respectivamente), um gerador de 4 polos precisa de uma velocidade rotacional nominal de aproximadamente 1500 rpm, enquanto que um gerador de 6 polos conseguiria operar com cerca de 1000 rpm. Conforme o número de polos aumenta, a rpm requerida para operação diminui de forma linear (Fitzgerald & Kingsley, 2003):

$$\omega_{gerador} = 100 * \left(\frac{f}{N}\right) \quad (1)$$

Em que:

$\omega_{gerador}$ = Rotação do gerador em rpm;

f = Frequência da rede em Hertz;

N = Número de pares de polos do gerador.

Assim, para a frequência brasileira de 60 Hz, a Eq. 1 nos diz que:

$$\omega_{gerador} = \left(\frac{6000}{N}\right) \text{ rpm}$$

Isso mostra que um gerador de 8 polos só precisa operar em aproximadamente 750 rpm, e um de 200 polos somente a 30 rpm para produzir uma corrente elétrica de 60 hz. A relação de transmissão G entre o gerador e o rotor pode ser definida como:

$$G = \left(\frac{\omega_{gerador}}{\omega_{rotor}}\right) \quad (2)$$

Em que:

$\omega_{gerador}$ = Rotação do gerador em rpm;

ω_{rotor} = Rotação do rotor em rpm;

G = Taxa de transmissão entre rotor e gerador;

Um gerador de 4 polos operando a 1500 rpm, com as pás do rotor girando a uma velocidade de 20 rpm precisa de uma transmissão com uma relação de transmissão G de cerca de 75, enquanto que um gerador de 200 polos operando à 30 rpm com pás do rotor operando a 30 rpm nos dá um G de 1, o que exclui a necessidade de uma transmissão.

Nesse tipo de operação, existem dois tipos de geradores diferentes: Geradores de Ímã Permanente (do inglês, *Permanent Magnet Generators*, ou PMG) e Geradores Síncronos Eletricamente Excitados (do inglês, *Electrically Excited Synchronous Generators*, ou EESGs). EESGs não possuem ímãs permanentes, que normalmente vem de materiais raros, como o neodímio, o que reduz seu custo e diminui seu impacto ambiental, considerando que esse material raro iria se extraído de do meio ambiente. No entanto, PMGs possuem várias vantagens, como alta eficiência (cerca de 97%) devido à eliminação de perda de campo e um tamanho mais compacto se comparado aos EESGs, além de ser mais leve. (Osmanbasic, 2020)

Por necessitarem produzir energia elétrica em baixas velocidades, o formato desses geradores teve que ser alterado do tradicional formato cilíndrico para o formato de um toro, típico de PMGs em geral. Porém, para atingirem alto torque, a rotação eficaz do ímã permanente tem que aumentar, o que significa que o gerador vai precisar de um diâmetro mais largo, como mostrado na figura 4, em que é possível ver uma turbina de transmissão direta.

Figura 4 – Turbina de transmissão direta sendo testada na Universidade de Clemson, na Carolina do Sul



(Osmanbasic, 2020)

Uma outra vantagem das turbinas de transmissão direta é a alta eficiência dos PMGs. Devido à inconsistência dos ventos, essas turbinas normalmente operam com cargas parciais, dificilmente em velocidade nominal. Porém, a eficiência do gerador de ímã permanente se torna superior mesmo nessas condições porque ele continua a operar próximo de valores nominais. (Osmanbasic, 2020)

Historicamente, devido ao maior peso de turbinas de transmissão direta, além do maior custo associado à sua produção, esse tipo de turbina estava limitada à aplicações *off-shore*, devido à baixa necessidade de manutenção. Porém, nos últimos anos, várias pesquisas estão sendo feitas na área afim de aumentar a competitividade entre os dois modelos de turbinas. As turbinas de transmissão direta estão ficando mais leves e mais baratas, principalmente com uma queda no preço dos ímãs utilizados nas mesmas, e o seu potencial é ainda enorme. Segundo (Osmanbasic, 2020), especialistas afirmam que a transmissão direta será o futuro de turbinas eólicas devido ao maior potencial para ganho de eficiência nesse tipo de operação, tendo em vista que turbinas de transmissão já estão próximas de atingirem sua eficiência máxima.

3.3 A transmissão magnética

É nesse contexto de disputa de eficiência entre dois modelos de turbinas eólicas que surgem as turbinas de transmissão magnética. A ideia básica de uma transmissão magnética (em inglês, *Magnetic Gear*, ou MG) tem suas origens no início do século XX (Estados Unidos da América Patente N° US687292A, 1900). Transmissões magnéticas são dispositivos que se caracterizam por não haver contato mecânico entre os eixos de entrada e de saída. Os eixos são conectados a rotores contendo ímãs montados em geometria circular em torno do eixo de rotação, com polos magnéticos orientados ao longo do eixo, possibilitando a transmissão de movimentos mecânicos rotativos sem que haja contato físico. O aspecto mais importante de transmissões magnéticas é que elas funcionam com base na modulação de campo do *air-gap* (Zhu, Li, Deodhar, Pride, & Sasaki, 2018). Porém, devido à relativa complexidade e baixa densidade de torque dos circuitos magnéticos propostos até o início do século XX, a ideia recebeu pouca atenção. Os avanços e interesses recentes em transmissões magnéticas podem ser atribuídos à maior disponibilidade no mercado de ímãs permanentes de alta densidade de energia e novas topologias de alta densidade de torque. (Rens, Atallah, Calverley, & Howe, 2007)

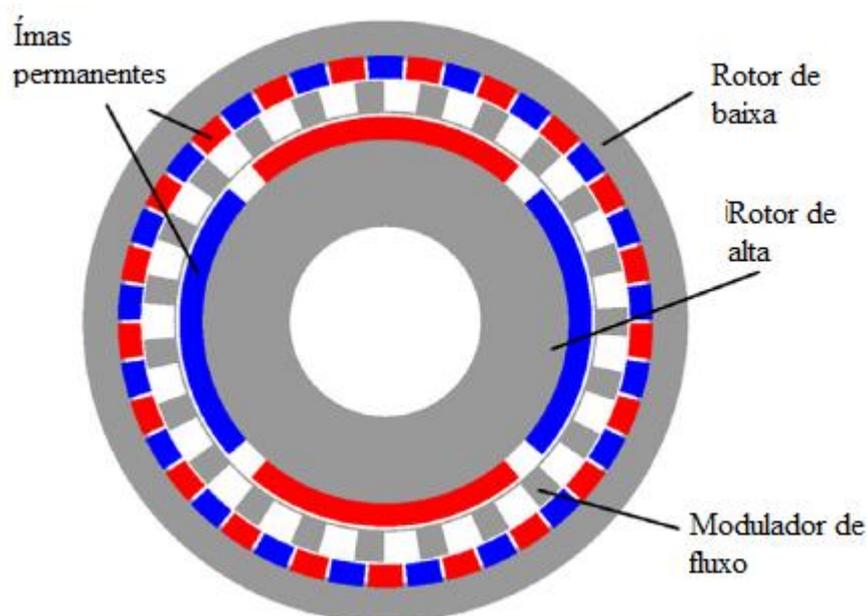
4. TRANSMISSÃO MAGNÉTICA: TOPOLOGIAS

Dentre as topologias mais promissoras de transmissões magnéticas, é possível citar três principais: concêntricas, harmônicas e planetárias.

4.1 Topologia concêntrica

Na figura 5, pode-se observar a topologia básica de uma Transmissão Magnética Concêntrica (sigla TMC): como toda transmissão, temos dois eixos rotacionais, um de alta velocidade (*high speed rotor*), situado no centro e outro de baixa velocidade (*low speed rotor*), situado na extremidade. De dentro para fora, existe uma ordem de camadas que começa pelo rotor de alta velocidade, passa pelo anel interno, que é composto de ímãs permanentes de polos opostos e alternados entre si e está fisicamente conectado ao rotor de alta velocidade, continua pelo modulador de fluxo (uma estrutura composta de hastes metálicas encapsuladas em uma estrutura mecânica), passa pelo anel externo, que é semelhante ao anel interno, só que com um número maior de polos, e termina no rotor de baixa velocidade.

Figura 5 – Seção em corte de uma transmissão magnética concêntrica

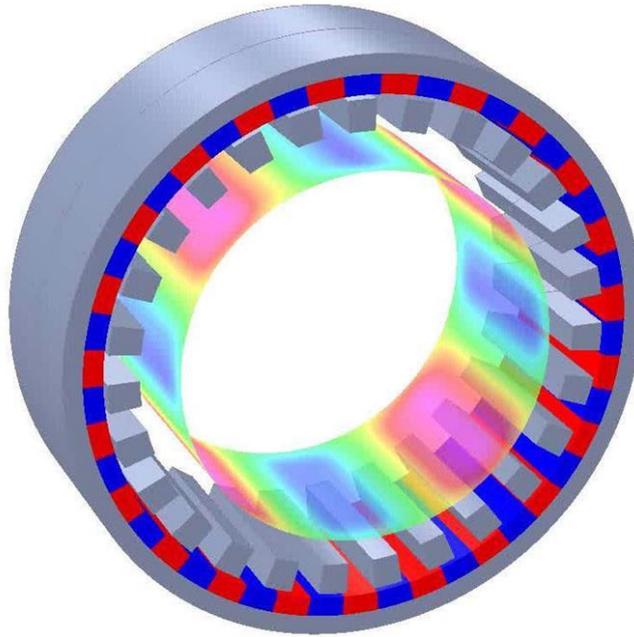


(Wang & Gerber, 2014)

O princípio básico de operação de uma TMC é de que os ímãs permanentes situados entre os rotores internos e externos modulam o campo magnético de modo que cada rotor “vê”

uma harmônica espacial correspondendo ao seu próprio número de polos. Esse fenômeno é visualizado na figura 6.

Figura 6 – TMC sem o anel interno



(Fryer, 2016)

Na figura 6, é feita uma representação de uma situação hipotética em que o anel interno é removido completamente da topologia e conseguimos ver as linhas de fluxo do campo magnético. É possível observar, nesse caso, que no espaço em que deveríamos ter os dois polos positivos e dois polos negativos, temos 2 campos diferentes com orientações similares a dos polos que deveriam estar lá, campos esses causados pelo giro do anel externo. Assim, um anel concêntrico de ímãs permanentes de 4 polos iria girar no mesmo sentido e na mesma velocidade que esse campo.

O número de polos pares do anel interno de alta velocidade p_h e o número de polos pares do anel externo de baixa velocidade p_l , além do número de segmentos modulares (hastes no modulador de fluxo) q_m são relacionados através da seguinte equação (Atallah, 2004):

$$q_m = p_l + p_h \quad (3)$$

Com um modulador de fluxo estático, a relação de transmissão G pode ser definida como:

$$G = \frac{p_l}{p_h} = \frac{q_m - p_h}{p_h} = \frac{q_m}{p_h} - 1 = \left(-\frac{w_h}{w_l} \right) \quad (4)$$

Em que w_h e w_l são a velocidade angular dos rotores de alta e baixa velocidade, respectivamente. O “menos” significa que os dois rotores rodam em direções opostas. Se o rotor externo for segurado no lugar, a relação de transmissão entre o rotor de alta velocidade e o modulador de fluxo girante é (Atallah, 2004):

$$G = \frac{q_m}{p_h} = \frac{w_h}{w_m} \quad (5)$$

em que ambos os rotores estão rotando na mesma direção e uma relação de transmissão G um pouco maior pode ser obtida.

4.2 Topologia Harmônica

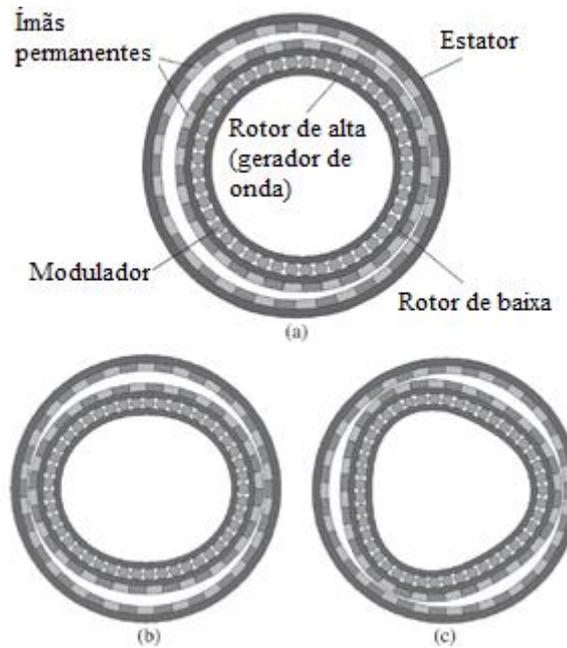
A transmissão magnética harmônica (TMH) opera sob o mesmo princípio da transmissão mecânica harmônica. Sua operação se baseia em um mecanismo que produz uma variação temporal e senoidal do *air-gap* entre um rotor de ímãs permanentes e um estator rígido de ímãs permanentes. Para isso, é necessário um rotor de altas velocidades, o que é equivalente ao gerador de ondas em uma transmissão mecânica harmônica. Ele deforma o rotor flexível de baixa velocidade usando um contato deslizante de forma que o rotor de baixa velocidade rode de forma independente, mas de forma similar. (Rens J. , Atallah, Calverley, & Howe, 2007)

As vantagens intrínsecas associadas à TMHs são a capacidade de operar com alta relação de transformação, alta densidade de torque e transmissão suave de torque. (Rens J. , Atallah, Calverley, & Howe, 2010) A relação de transmissão de uma TMH pode ser descrita pela seguinte equação (Rens J. , Atallah, Calverley, & Howe, 2007):

$$G = (-1)^{k+1} * \frac{p_w}{p_l} \quad (6)$$

Em que p_l é o número de polos pares no rotor de baixa velocidade e p_w é o número de ciclos senoidais entre o rotor de baixa velocidade e o estator. A figura 7 ilustra diferentes modelos de TMH.

Figura 7 – a) Topologia proposta de uma TMH; b) TMH com $p_w = 2$; c) TMH com $p_w = 3$.



(Rens J. , Atallah, Calverley, & Howe, 2007)

O número de polos pares no estator deve ser $p \pm p_w$ para transferência máxima de torque.

A implementação prática de uma TMH é complicada pela necessidade de um rotor de ímãs permanentes de baixa velocidade flexível e um acoplamento que faça interface com a carga externa via eixo principal. Enquanto que um rotor flexível pode ser usado utilizando a mesma tecnologia presente em transmissões mecânicas harmônicas, a necessidade de um acoplamento para essa estrutura flexível e o eixo principal pode ser dispensada se uma TMH de 2 estágios for implementada (Rens J. , Atallah, Calverley, & Howe, 2007), porém, essa solução não resolve o principal problema desse tipo de topologia, que é a sua complexidade estrutural. Isso dificulta a implementação da topologia e desacelera as pesquisas a respeito da mesma.

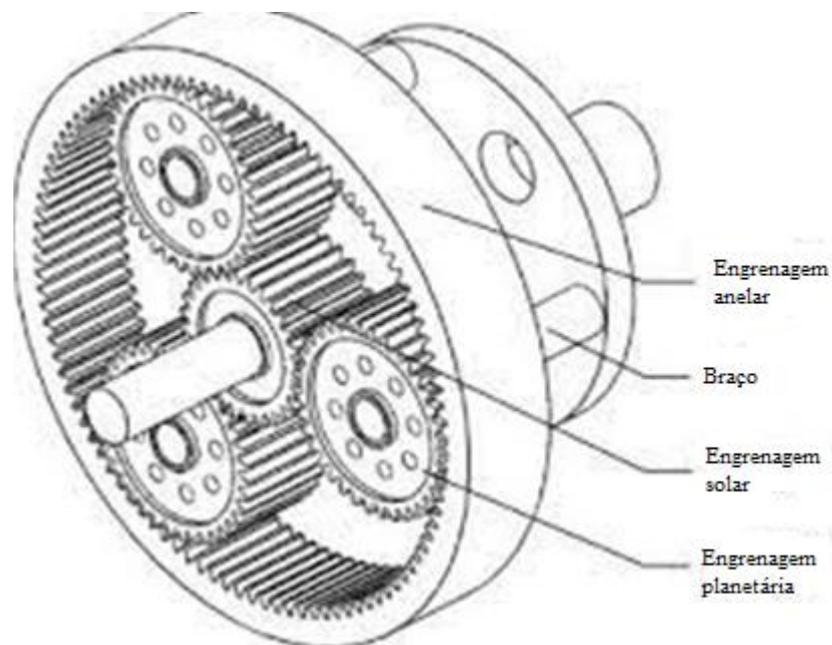
4.3 Topologia planetária

Para entendermos como uma transmissão magnética planetária funciona, é essencial entendermos como sua contraparte mecânica opera.

4.3.1 Transmissão planetária mecânica

A transmissão planetária, também conhecida como “transmissão epicíclica”, é um dos tipos de transmissão mais utilizadas na atualidade, especialmente para aplicações de alta variação de velocidade. Normalmente presentes em veículos automotivos como uma parte vital da transmissão automática, esse tipo de transmissão possui 4 partes principais, como visto na figura 8: engrenagem solar, engrenagem planetária, engrenagem anelar e braço.

Figura 8 – Transmissão planetária mecânica



(Mansano & Barreto, 2014)

Um princípio básico que deve ser entendido de engrenagens é o de que, se duas engrenagens estão conectadas e em movimento, elas devem mover-se na mesma velocidade, porém em direções opostas. Pelo *layout* da transmissão planetária, temos três engrenagens planetárias que deverão girar ao redor da engrenagem solar. Estas três engrenagens menores transmitem, por conta da rotação da engrenagem exterior (engrenagem anelar), movimento em certa velocidade à engrenagem interior central e única. Normalmente, a engrenagem central e concêntrica, movida pelas três engrenagens planetárias, é que manda movimento para as rodas de um automóvel.

Existem diferentes configurações de giro nesse tipo de transmissão. Se mantivermos a engrenagem anelar parada e rotacionarmos somente a engrenagem solar, as engrenagens planetárias deverão mover-se na mesma velocidade. Porém, como isso é possível, considerando que as engrenagens planetárias deverão manter a mesma velocidade na interface entre engrenagem anelar (que está parada) e engrenagem solar (que está em movimento)?

A resposta é que as engrenagens planetárias, além de rodarem em torno do próprio eixo, irão rodar em torno da engrenagem solar. A rotação em torno do próprio eixo irá produzir velocidades de direções opostas no contato com as engrenagens solar e anelar, enquanto que a rotação em torno da engrenagem solar irá produzir velocidades unidirecionais nesses mesmos contatos. No topo, essas velocidades estarão em direções opostas, de forma que a velocidade resultante nesse ponto é 0, enquanto que em baixo, estarão na mesma direção. O resultado dessa condição é que, como as engrenagens planetárias estão ligadas ao braço, o mesmo irá girar junto das mesmas.

Outra configuração possível é a da engrenagem solar estacionária enquanto a rotação de entrada vai para a engrenagem anelar, o exato oposto do caso anterior. Nesse caso, as engrenagens planetárias irão rotacionar da mesma maneira que no caso anterior, só que como a parte rotativa da transmissão agora é a externa, e sabemos que $V = \omega.R$, temos que a velocidade angular à qual as engrenagens planetárias estarão sujeitas é maior, ou seja, elas irão girar com maior velocidade, a custo de certo torque. Por último, é possível fazer a transmissão girar em sentido contrário fazendo com que o braço fique parado enquanto que o giro de entrada vem do eixo principal conectado à engrenagem solar. Como as engrenagens planetárias não poderão fazer o movimento de rotação em torno do eixo principal, elas irão transmitir à engrenagem anelar um giro no sentido oposto ao giro de entrada da engrenagem solar.

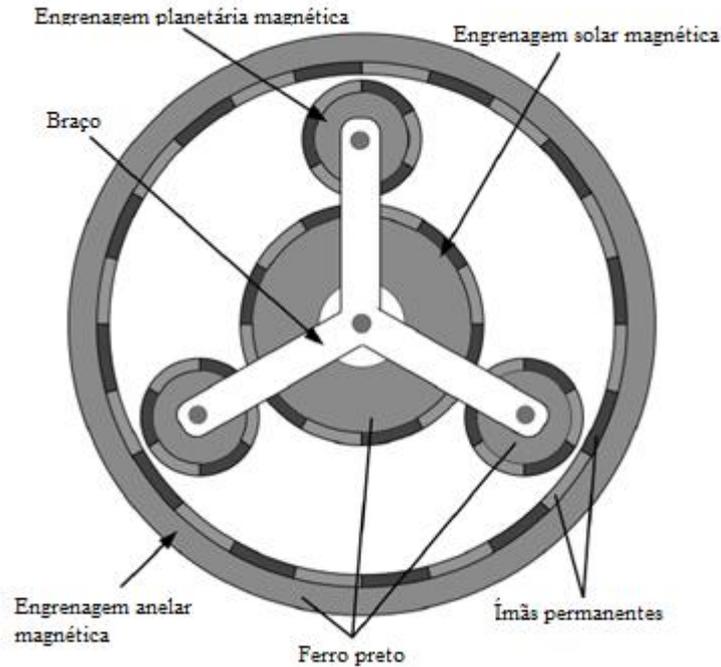
As três configurações descritas acima são a base de uma transmissão automotiva: com elas, é possível obtermos uma marcha de menor velocidade e maior torque (engrenagem anelar parada), de maior velocidade e menor torque (engrenagem solar estacionária) ou de ré (braço parado). Associando diferentes transmissões planetárias, conseguimos mais marchas.

4.3.2 Transmissão planetária magnética

A figura 9 ilustra a topologia de uma transmissão planetária magnética. Como pode ser observado, ela assemelha-se bastante à sua contraparte mecânica, com operação similar. Ambas possuem engrenagens anelares, engrenagens planetárias, engrenagens solares e braços, e ambas

possuem três modos de transmissão (engrenagem solar estacionária, engrenagem anelar estacionária e braço estacionário), além de possuírem também alta durabilidade.

Figura 9 – Transmissão planetária magnética



(Huang, Tsai, Dorrell, & Lin, 2008)

A relação de transmissão dessa topologia obedece a seguinte equação:

$$G = \frac{p_s}{p_l + p_r} \quad (7)$$

Em que:

G = Relação de transmissão;

p_s = Pares de polos da engrenagem solar;

p_r = Pares de polos da engrenagem anelar;

A relação entre pares de polos da engrenagem anelar, engrenagem solar e engrenagem planetária pode ser descrita pela equação (8):

$$p_s + 2p_p = p_r \quad (8)$$

Essa topologia consegue suportar torques de até 100 kNm/m³ (Huang, Tsai, Dorrell, & Lin, 2008) e possui todas as outras vantagens associadas a engrenagens magnéticas (arranjo simples e a não necessidade de contato entre peças). Além disso, pode ser fabricada em linhas

de montagem automáticas, reduzindo os custos de produção, e possui a vantagem de permitir o uso de marchas diferentes, configurando um sistema de transmissão variável.

4.4 Comparação

A tabela 1 compara a densidade de torque de várias tecnologias de engrenagens magnéticas com as suas contrapartes mecânicas.

Tabela 1 – Densidade de torque de diferentes engrenagens magnéticas

Tipo de engrenagem	Densidade de torque (kNm/m³)
Engrenagem dentada mecânica	100 - 200
Engrenagem helicoidal mecânica	50 - 150
Engrenagem de rosca sem fim magnética	< 2
Engrenagem cônica magnética	< 5
Engrenagem dentada magnética	10 - 20
Engrenagem magnética harmônica (1G)	140 - 180
Engrenagem magnética harmônica (2G)	75
Engrenagem magnética harmônica (26)	≅ 100
Engrenagem magnética concêntrica	70 - 150

(Tlali, Gerber, & Wang, 2014)

Através desses dados, fica claro que engrenagens magnéticas podem ser competitivas e que as limitações anteriores a respeito dessa tecnologia estão aos poucos se tornando menos relevantes. Dentre as três topologias de transmissão magnética apresentadas anteriormente, ficou claro que a TMC é a que apresenta a menor complexidade mecânica. Além disso, a sua geometria concêntrica oferece vantagens estruturais, partindo do ponto de vista eletromecânico e de integração de máquina – engrenagem. Esse fator pode explicar o porquê do tipo concêntrico ser o foco dos estudos e desenvolvimentos mais recentes. (Tlali, Gerber, & Wang, 2014)

5. TRANSMISSÕES MAGNÉTICAS CONTINUAMENTE VARIÁVEIS (M-CVT) E MÁQUINAS COM MODULAÇÃO DE FLUXO MAGNÉTICO

Após o amadurecimento da tecnologia de TMC, outras duas extensões desse mesmo princípio, já presentes em transmissões mecânicas em outras indústrias, vem ganhando força no meio acadêmico: o M-CVT e o PDD.

5.1 M-CVT

CVTs (*Continuously Variable Transmission* ou transmissão continuamente variável) são sistemas mecânicos que podem alterar a relação de transmissão de acordo com algum feedback externo e tem uso extensivo na indústria automobilística, normalmente sendo utilizadas para o sistema de transmissão de carros automáticos. Elas funcionam com um cascadeamento de transmissões planetárias mecânicas, que tem sua operação regulada por um complexo sistema que conecta e desconecta as diferentes engrenagens do motor via um conversor de torque. As engrenagens planetárias, solares e anelares tem sua operação regulada por embreagens de fricção, que engatam as engrenagens e as fazem girar, e ligas que as seguram no lugar quando necessário, sendo tudo isso operado por pinos e válvulas que são ativados por um fluido de transmissão pressurizado (McIntosh, 2019).

O sistema descrito acima, apesar de funcionar no âmbito da indústria automobilística, principalmente no desenvolvimento de novos veículos elétricos (Čavić, Penčić, & Zlokolica, 2016) tem visto pouco uso na geração eólioelétrica. Esse fato ocorre, muito provavelmente, porque CVTs tradicionais não são indicadas para aplicações com exigências severas de uso, devido à baixa confiabilidade, alto custo de manutenção, vibração e eficiência limitada. Vários autores propuseram sistemas de variação contínua que tivessem como base engrenagens magnéticas, desenvolvendo até protótipos que resultaram em uso comercial (Magnomatics, 2010). Em (Wang, Atallah, & Carvley, 2011), é apresentada a configuração de uma M-CVT presente na nacela do aerogerador, acoplada a um gerador síncrono e dispensando a necessidade de inversores e compensadores de alta potência.

Similarmente à engrenagens planetárias mecânicas, a relação de transmissão de TMCs pode ser variada se o elemento estacionário começar a girar (Jian & Chau, 2010). Em uma M-CVT, haverá a rotação de três campos magnéticos girantes concêntricos. Essas rotações,

representadas por ω_1 , ω_2 e ω_3 , são relacionadas pela equação (9), exposta a seguir (Neves, Filho, & Dorrell, 2016):

$$n_1\omega_1 + n_2\omega_2 = n_3\omega_3 \quad (9)$$

Em que:

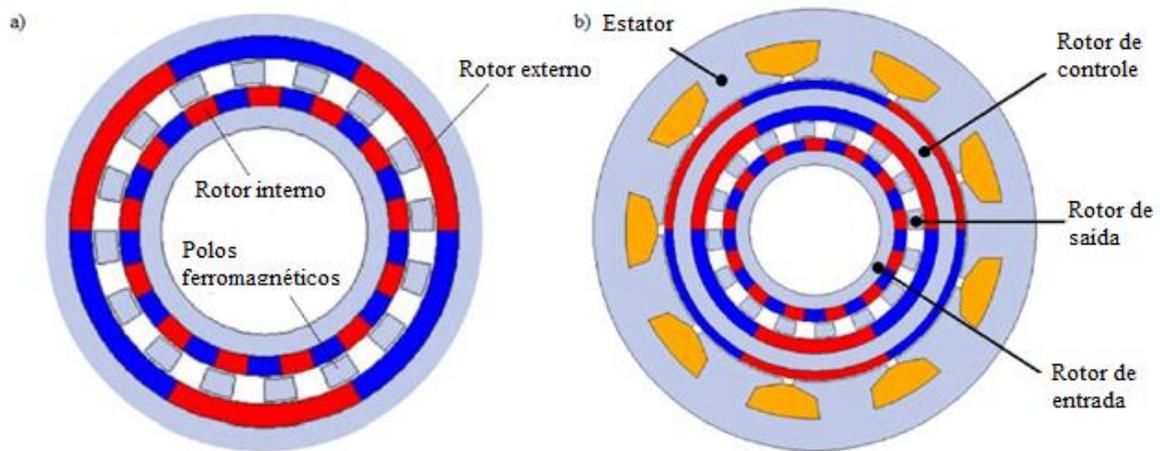
ω_1 , ω_2 e ω_3 = Rotação dos rotores 1, 2 e 3, respectivamente;

n_1 , n_2 e n_3 = Número de polos dos rotores 1, 2 e 3, respectivamente.

O mecanismo de controle de campo magnético e rotação é derivado dessa fórmula. Se, por exemplo ω_1 é estacionário, existirá uma relação de transmissão constante entre os outros dois rotores, relação essa em que as velocidades são inversamente proporcionais à relação entre números de polos pares. Assim, estabelecido o controle sobre a rotação de um desses campos, está definido o controle da relação de transmissão entre os dois outros. Esse controle pode ser feito de inúmeras maneiras, o presente trabalho optou pela maneira proposta por (Wang, Atallah, & Carvley, 2011), em que existe um estator com bobinas através das quais é possível estabelecer a rotação desejada para o rotor de controle, e assim estabelecer a relação de transmissão entre o rotor de barras e o rotor interno.

A figura 10 a) mostra a topologia clássica de engrenagens magnéticas exposta previamente: os anéis internos e externos são rotores compostos por ímãs permanentes de polos alternados e o rotor intermediário é feito de peças ferromagnéticas. Com base nesse princípio, a figura 10 b) foi proposta como uma maneira de mudar, através do magnetismo, diferentes relações de transmissão e de torque. Ela consiste em um estator, que acomoda um enrolamento trifásico, e três rotores concêntricos: o rotor de controle, o rotor de entrada e o rotor de saída. O rotor de controle possui um número de polos-pares p_i em suas superfícies internas e um número p_c em sua superfície externa. Os ímãs na superfície externa do rotor de controle interagem com as correntes no estator trifásico para produzir torque da mesma maneira que em uma máquina de ímãs permanentes convencional. O rotor de entrada é localizado mais à dentro e possui um número p_h de polos pares enquanto que o rotor de saída está no meio e consiste de um número n_s de polos ferromagnéticos. A interação do campo magnético devido aos ímãs na camada interna do rotor de controle com o campo magnético resultante dos ímãs no rotor de entrada sendo modulados pelos polos ferromagnéticos do rotor de saída gera movimento das engrenagens (Atallah, 2004).

Figura 10 – a) Topologia de engrenagens magnéticas concêntricas tradicional; b) Topologia proposta de M-CVT



(Wang, Atallah, & Carvley, 2011)

Assim, controlando a velocidade do rotor de controle, a relação de transmissão entre rotor de saída e rotor de entrada pode ser variada. A maior parte dos exemplos apresentados mostra o eixo das pás, que tem baixa rotação, ligado ao rotor de barras e o rotor interno, por ter maior rotação, fica ligado ao gerador. (Udalov, et al., 2018)

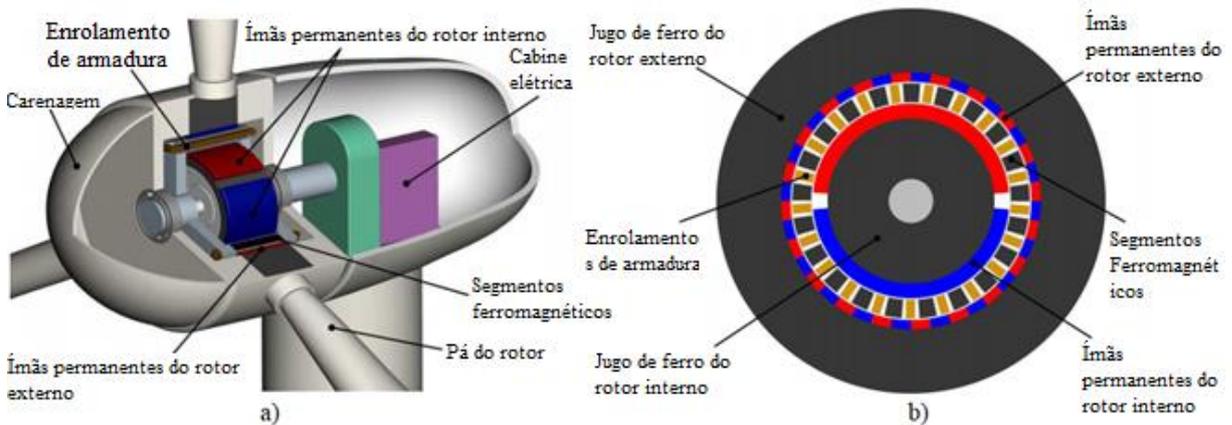
5.2 Máquinas elétricas com modulação de fluxo magnético

Paralelamente ao desenvolvimento das tecnologias mencionadas anteriormente, ganha força no mercado a ideia de integração de transmissão e gerador. Essas são as máquinas com acionamento direto ou direct drive (em inglês, *Direct Drive Machine*, ou DDM). Para engrenagens magnéticas, esse mecanismo funciona através da modulação de fluxo magnético, em que o equipamento possui entrada representada pelo eixo de baixa, sendo essa a rotação bruta e a saída, representada pelo eixo de alta, é um gerador síncrono de ímãs permanentes (Yin, Fang, Huang, & Pfister, 2016). As DDMs que operam com engrenagens magnéticas são chamadas MDDMs (*Magnetic Direct Drive Machines*).

A figura 11 – b) ilustra a vista em corte da MDDM proposta por (Jian, et al., 2011). Ela possui as três partes principais de uma transmissão magnética (rotor interno, rotor externo e polos ferromagnéticos), com a adição de uma quarta parte, que são os enrolamentos de armadura localizados entre as peças ferromagnéticas. Sua operação é simples: quando temos o rotor interno de alta velocidade rodando, é gerado um campo eletromagnético que, interagindo

com o campo eletromagnético criado pelo enrolamento de armadura, converte de forma estável energia eletromecânica. Como demonstrado em (Jian, et al., 2011), como o rotor externo possui um número diferente de polos pares do enrolamento de armadura, a rotação do rotor externo terá pouco impacto na energia elétrica gerada. Isso é demonstrado utilizando o método de elementos finitos.

Figura 11 – a) MDDM em uma Nacele; b) Topologia de uma MDDM



(Jian, et al., 2011)

Em suma, do ponto de vista da conversão de energia, a energia eólica é transmitida do rotor externo (de baixa velocidade) para o rotor interno (de alta velocidade), para então efetuar a conversão eletromecânica de energia através da interação do rotor interno e dos enrolamentos de armadura.

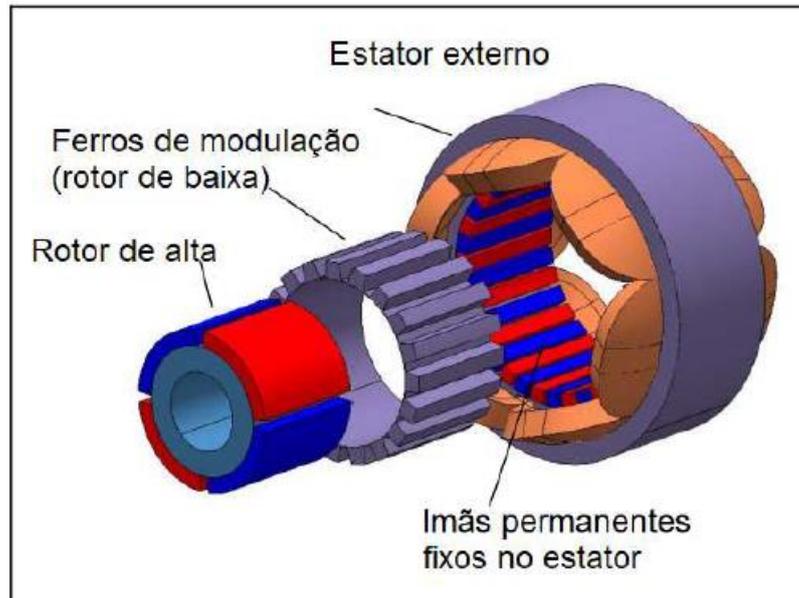
Como tal equipamento iria requerer uma grande quantidade de polos (já demonstrado previamente através da equação (2)), seu peso e tamanho são demasiadamente grandes e isso inviabiliza sua implementação prática. Para contornar o problema de direct drive machines (DDM) ocupando um espaço muito grande na nacele e encarecendo o projeto, várias topologias diferentes de *Direct Drive* foram propostas ao longo do tempo. A seguir, será apresentada a mais promissora e de uso comercial.

5.2.1 Pseudo Direct Drive (PDD)

Procurando resolver o problema do peso e pensando em alternativas para aumentar a eficiência e a viabilidade de topologias que utilizam engrenagens magnéticas, alguns estudos (Neves C. G., Filho, Goettems, & Borges, 2018) e (Neves, Filho, & Dorrell, 2016)) propuseram

uma topologia que tirava os enrolamentos do estator dos segmentos ferromagnéticos e os colocava ao redor do anel exterior.

Figura 12 – Estrutura proposta de uma PDD

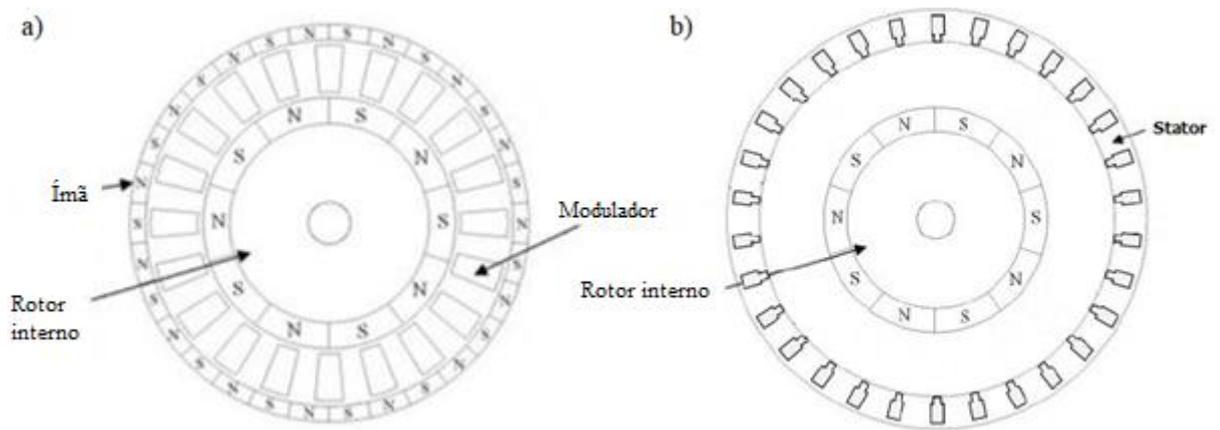


(Wang, Qin, & Pfister, 2018)

O princípio de funcionamento dessa máquina é idêntico ao de transmissões com engrenagens magnéticas concêntricas, com uma pequena diferença. Como visto anteriormente, o anel modulador pode ser acoplado ao eixo de rotação das pás eólicas (configurando o rotor de baixa), e seu giro vai “curto-circuitar” os pares de polos Norte – Sul do rotor externo, o que vai gerar uma onda de fluxo eletromagnético modulada através dos *air-gaps* contidos nos próprios anéis moduladores. Ou seja, o modulador controla o campo de ambos anéis de ímãs permanentes e permite que o campo de um se “prenda” ao outro produzindo uma harmônica assíncrona com o padrão de polos correto (Neves, Filho, & Dorrell, 2016). Essa modulação vai criar um campo principal que interage com os enrolamentos do estator para induzir tensões AC.

Uma maneira alternativa de entender o funcionamento deste dispositivo é encará-lo como uma junção prática de um gerador síncrono de ímã permanente e uma transmissão magnética concêntrica. Observando a figura 13, é possível enxergar como ambos os equipamentos citados anteriormente estão presentes na topologia central do PDD: na figura 13 a), temos uma transmissão magnética tradicional que trabalha como descrito anteriormente, já na figura 13 b) temos um gerador de ímãs permanentes clássico. Assim, o PDD é basicamente a junção desses dois equipamentos em uma única máquina.

Figura 13 – a) Componentes de uma transmissão magnética concêntrica; b) Componentes de um gerador de ímãs permanentes convencional



(Neves, Filho, & Dorrell, 2016)

6. PROJETOS

Muitos dos artigos que foram apresentados até então são puramente teóricos, baseando-se principalmente em simulações e cálculos numéricos. Alguns, principalmente os que tiveram patrocínio direto do governo chinês, trabalharam com protótipos em baixa escala para fins de testagem e comprovação das simulações. No campo da aplicação em larga escala, alguns projetos financiados pela União Européia tem se mostrado promissores no longo prazo e tendo conclusões satisfatórias sobre a aplicabilidade de engrenagens magnéticas em aerogeradores.

6.1 InnWind

No contexto de projetos financiados pela União Européia, o *InnWind* foi um dos mais promissores. Começando em 2012 e tendo seu último relatório publicado em 2017, o projeto, com origem na Dinamarca (um dos principais expoentes de energia eólica offshore do mundo), tinha um orçamento de cerca de 20 milhões de Euros e contava com 28 parceiros divididos entre multinacionais e governos. (Andersone, 2017)

Seus objetivos incluíam o design conceitual de turbinas eólicas *offshore* de última geração na faixa de 10 – 20 MW de potência, além de demonstrações de hardware de seus componentes críticos. No projeto, foi calculado que, se um aerogerador de 20 MW fosse feito com a tecnologia existente na época do começo do projeto, somente sua nacele pesaria cerca de 1100 toneladas, a massa de 11 baleias azuis.

De acordo com o relatório final publicado em 2017 (InnWind.eu, 2017), o projeto cumpriu todos os objetivos alvejados em seu início, obtendo reduções de custo de até 7% associados à implementação das principais tecnologias utilizadas em usinas eólicas. O relatório expõe e compara o uso de diversas tecnologias inovadoras, que vão desde a utilização de rotores de baixa indução aliados à técnicas de controle avançadas até o design de plataformas (a torre de aerogeradores) com menor peso e maior carga suportada.

Uma das inovações estudadas no projeto foi o uso prático de um *Pseudo Direct Drive* (PDD) na nacele do aerogerador. A tabela 2 expõe os resultados comparativos presentes no relatório:

Tabela 2 – Custos comparativos de um gerador PDD e geradores convencionais

Transmissão & Nacele	Massa de componente (tn)	Custo do componente (k€)	CAPEX total (k€)	FC da Turbina	FC do parque eólico	O&M (€/MWh)	LCOE (€/MWh)
RWT - 10 MW	338	4 515	30 650	0,507	0,425	34,81	98,56
RWT - 20 MW	914	11 300	64 550	0,508	0,508	28,08	93,22
Gerador PDD 20 MW	950	10 500	63 200	0,513	0,513	28,08	91,35

(InnWind.eu, 2017)

A tabela compara um gerador PDD de 20 MW com geradores de referência (RWT – *Reference Wind Turbines*) genéricos. Como pode ser observado, o PDD obteve uma redução de CAPEX (dinheiro gasto na aquisição de bens de capital) e LCOE. De maneira simplificada, essa variável mede a receita média por unidade de eletricidade gerada que seria necessária para recuperar os custos de construção e operação de uma usina durante um ciclo de vida assumido para a mesma (Ebenhoch, Matha, Marathe, Muñoz, & Molins, 2015). A fórmula básica de cálculo é representada pela equação (10):

$$LCOE = \frac{\text{soma de custos no tempo de vida da usina}}{\text{soma da energia elétrica produzida durante o tempo de vida da usina}} \quad (10)$$

Foi observado um pequeno aumento na massa do equipamento. Vale salientar que, por mais que a massa do gerador em si tenha aumentado, o projeto completo é uma soma de melhorias que, entre outras vantagens, deixam a estrutura da nacele e das torres mais leve, o que acaba balanceando o aumento de peso.

Tabela 3 – Resultados finais em porcentagem da aplicação de um PDD

Transmissão & Nacele	Massa de componente ($\Delta\%$)	Custo do componente ($\Delta\%$)	CAPEX total ($\Delta\%$)	FC da Turbina ($\Delta\%$)	FC do parque eólico ($\Delta\%$)	O&M ($\Delta\%$)	LCOE ($\Delta\%$)
Gerador PDD 20 MW	3,90%	-7,10%	-2,10%	1,00%	1,10%	0,00%	-2,00%

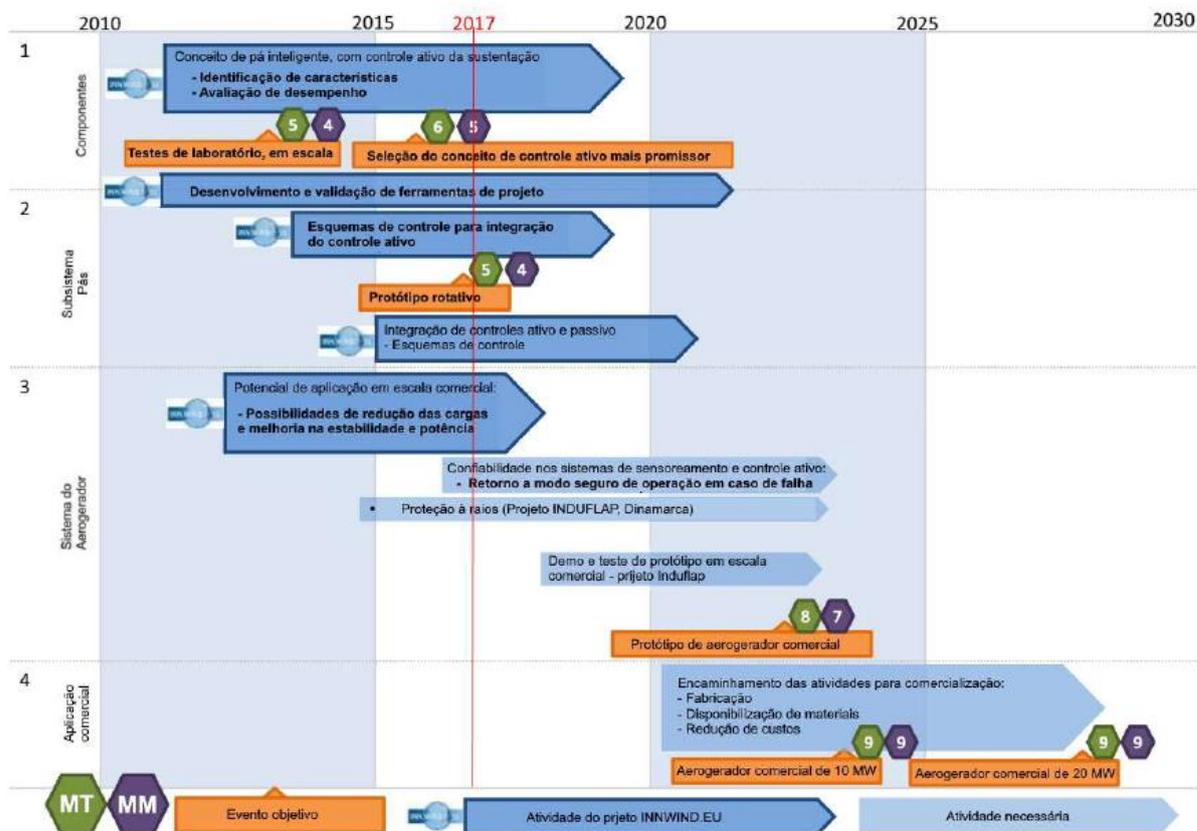
(InnWind.eu, 2017)

De acordo com as conclusões finais à respeito da aplicação de um gerador PDD de 20 MW, o mesmo necessita de um controle à base de eletrônica de potência altamente eficiente, porém, promete uma boa performance de LCOE (diminuição de 2% em relação à referência) e proporciona uma redução combinada de custo da nacele e do sistema de *drive train* (conjunto de eixo de entrada, transmissão e eixo de saída) de 7%. Isso é possível porque, ao juntar

transmissão com gerador, não só diminuimos o tamanho do *drive train* como compactamos a Nacele e temos uma redução em seu custo total. A massa total aumenta em cerca de 4%, mas o fator de capacidade (FC, uma relação entre geração média de energia e geração nominal máxima) também aumenta, só que na ordem de 1,1%, sendo esse o principal motivo para a redução de LCOE. O motivo do aumento de CF é a extrema eficiência do PDD, cerca de 98,5% em carga máxima.

Com esses resultados, o relatório apresenta, ainda, um cronograma estimativo de maturação, desenvolvimento e comercialização da tecnologia PDD. O cronograma, mostrado na figura 15, conta com o desenvolvimento de outras tecnologias auxiliares para pleno funcionamento do PDD, como o *InduFlap*, iniciativa de pás mais aerodinâmicas e feitas de materiais especiais que ainda se encontra em fase de prototipagem. De acordo com a mesma figura, o primeiro aerogerador comercial de larga escala utilizando tecnologia PDD deve ser comercializado próximo à 2024.

Figura 144 – Cronograma de desenvolvimento e lançamento da tecnologia PDD



(InnWind.eu, 2017)

O relatório termina afirmando que PDDs são competitivos em termos de custo e performance, mas são vulneráveis aos preços de materiais magnéticos.

6.2 DemoWind

Similarmente ao projeto *InnWind*, o *DemoWind* é um projeto financiado pela União Europeia que visa unir organizações que tem como objetivo em comum a pesquisa e a inovação no ramo de energia eólica offshore. Com uma série de projetos financiados, um deles, encabeçado pelas empresas Magnomatics e EnerOcean S.L, visava construir um protótipo de Gerador utilizando tecnologia PDD com capacidade de torque de 200 kNm e potência de 500 kW. No processo de construção, também seria construída a maior engrenagem magnética já feita.

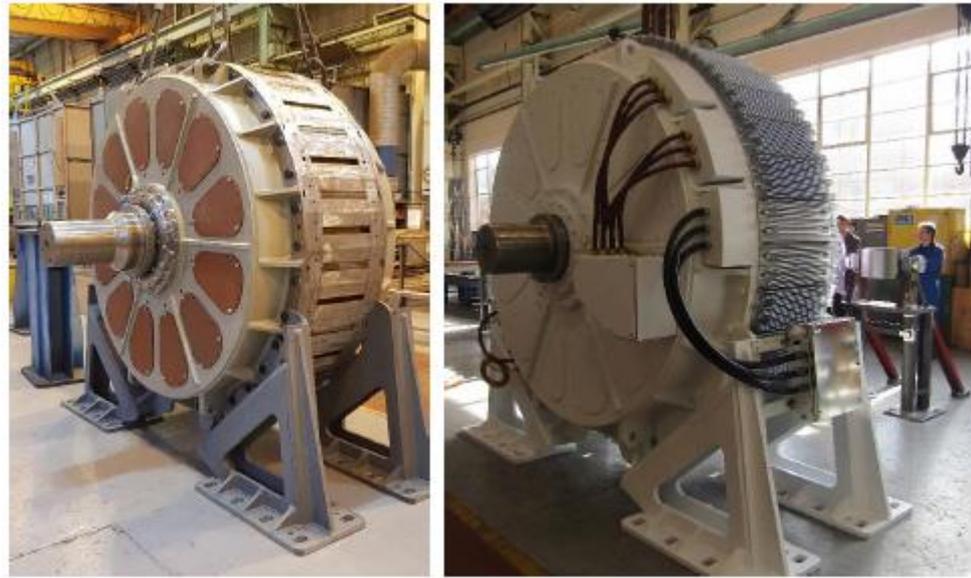
O nome do projeto é *Compact High Efficiency Generator* (CHEG), traduzindo, seria um Gerador Compacto de Alta Eficiência. Diferentemente do projeto *InnWind*, o CHEG focou nos desafios eletromecânicos de construção de um equipamento tão grande, necessitando da integração de parceiros no âmbito de design, construção e testes e desenvolvendo diversos estudos adicionais ao longo do caminho. (MAGNOMATICS, 2018) As figuras 15 e 16 mostram um pouco da construção do CHEG.

Figura 155 - Enrolamentos de cobre sendo instalados no estator do PDD do projeto CHEG



(MAGNOMATICS, 2018)

Figura 166 – Gerador CHEG finalizado



(MAGNOMATICS, 2018)

A montagem do equipamento ocorreu através de uma parceria entre a Magnomatics e uma empresa fabricante de máquinas elétricas chamada ATB. Ambas possuem certificação de qualidade ISO 9001:2015, o que as dá credibilidade provada por procedimentos e práticas reais. A montagem do gerador ocorreu com sucesso em uma instalação de construção de máquinas elétricas, com alguns equipamentos extras sendo necessários para manusear os ímãs dos rotores.

O gerador foi testado com sucesso através de um dinamômetro de 1MW. Além do gerador ter passado em todos os testes sem apresentar falhas e com baixos níveis de vibração, a testagem foi presenciada por vários players importantes da indústria eólica, e como resultado, a tecnologia agora está sendo cotada para ser utilizada em geradores de 2 – 3 MW e para aerogeradores offshore de 10 MW +. De acordo com o estudo de caso publicado pela própria empresa: “A empresa BVG Associates conduziu uma validação independente dos benefícios da tecnologia PDD da Magnomatics para grandes turbinas eólicas e concluiu que, em uma escala de 10 MW, o PDD oferece uma redução de LCOE de cerca de 2,6%” (MAGNOMATICS, 2018).

A iniciativa *DemoWind*, que obteve dezenas de parcerias diferentes e financiou vários projetos de energia eólica, foi considerada um sucesso. Após o seu término, a União Europeia criou o *DemoWind 2* (DemoWind 2, 2018), sucessor do primeiro, com o mesmo intuito de instigar inovação e desenvolvimento no ramo de energia eólica.

7. CONCLUSÕES

Através do trabalho apresentado, foi possível entender o funcionamento de engrenagens magnéticas e o seu espaço dentro ambiente de geração eólicoelétrica. Diversos artigos foram analisados e contextualizados afim de entender o principal problema de manutenção de aerogeradores e buscar respostas para esse desafio. Após a análise de todos esses artigos, foi constatado que a Transmissão Magnética Concêntrica é a topologia mais promissora para se desenvolver, devido à sua montagem eletromecânica ser concêntrica e mais facilmente acoplável à geradores, além de seu princípio de funcionamento ser o mais simples, o que facilita sua modelação em *softwares*. Apesar da literatura acadêmica a respeito do assunto ser extensa, com décadas de pesquisa, ele ainda necessita de contínuos investimentos para se solidificar no mercado já que o interesse por esse tipo de tecnologia aumentou somente desde 2011 devido à baixa do preço de Neodímio e outros materiais magnéticos.

Empresas como a Magnomatics e a Siemens, através de parcerias com grandes universidades e governos, estão aos poucos aplicando a tecnologia de transmissão magnética na vida real, criando protótipos em escalas cada vez maiores. O projeto Demowind demonstrou que a construção de um PDD é viável, conseguindo construir uma máquina de 200 kNm/m³ de torque e 500 kW e assinando futuros projetos de construção de máquinas ainda maiores, da ordem de 3 a 4 MW.

Os projetos aqui apresentados foram capazes de concluir, com sucesso, que a tecnologia é viável e, no ramo de geração eólicoelétrica, possui aplicabilidade principalmente em energia *offshore*, devido à baixa necessidade de manutenção, que se torna custosa em alto mar. Nos relatórios do InnWind, a tecnologia conseguiu ser, em média, 3,8% mais barata que os modelos padrões no mercado atualmente, com sua principal vantagem sendo a redução de 7,1% no preço de aquisição de componentes.

Assim, futuras empresas com interesse na tecnologia podem utilizar este trabalho como referência teórica e se aprofundar nas soluções comerciais mais aplicáveis no momento, tendo dados empíricos de redução de até 2% em LCOE e cronogramas detalhados que preveem um PDD de 10 MW até 2023 e outro de 20 MW até 2027. Ideal para aerogeradores de vários Mega Watts de potência, transmissões magnéticas tem se mostrado um expoente promissor no ramo da geração eólicoelétrica e prometem ser uma excelente alternativa ao modelo clássico de transmissão mecânica, dados os devidos investimentos em *R&D* necessários.

8. REFERÊNCIAS

Ackermann, T., & Söder, L. (Dezembro de 2000). Wind energy technology and current status: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 315 - 374.

Andersone, N. (2017). *INNOVATIVE WIND CONVERSION SYSTEMS (10-20MW) FOR OFFSHORE APPLICATIONS*. Fonte: InnWind.eu: <http://www.innwind.eu/about-innwind>

Armstrong, C. G. (1900). *Estados Unidos da América Patente N° US687292A*.

Atallah, K. (Abril de 2004). Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, pp. 135 - 143. doi:10.1049/ip-epa:20040224

Baglee, D., Knowles, M., Kinnunen, S.-K., & Galar, D. (Setembro de 2015). A proposed maintenance strategy for a wind turbine. *Int. J. Process Management and Benchmarking*, VI(3^a), pp. 387 - 403.

Čavić, M., Penčić, M., & Zlokolica, M. (Agosto de 2016). ADAPTIVE CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION USED FOR MAINTAINING STATIONARY REGIME OF DRIVING MACHINE. *THERMAL SCIENCE: Year 2016*, XX(2), pp. 525 - 536. doi:10.2298/TSCII151004035C

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL. (2017). *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. Rio de Janeiro: CEPEL.

C2ES. (2018). *Renewable Energy*. Fonte: Center for Climate and Energy Solutions: <https://www.c2es.org/content/renewable-energy/>

DemoWind 2. (27 de Março de 2018). *DemoWind 2*. Acesso em 08 de Agosto de 2021, disponível em ERA Learn: <https://www.era-learn.eu/network-information/networks/demowind-2>

Ebenhoch, R., Matha, D., Marathe, S., Muñoz, P. C., & Molins, C. (2015). Comparative Levelized Cost of Energy Analysis. *Deep Sea Offshore Wind R&D Conference, XII*, pp. 108 - 123.

Fitzgerald, A., & Kingsley, C. J. (2003). *Electric Machinery* (6^a ed.). McGraw-Hill Publishing Company.

Fryer, T. (13 de Maio de 2016). *High efficiency, low wear, little maintenance: Three reasons to be attracted by the possibilities of magnetic gears*. Fonte: Eureka!: <https://www.eurekamagazine.co.uk/design-engineering-features/technology/high-efficiency-low-wear-little-maintenance-three-reasons-to-be-attracted-by-the-possibilities-of-magnetic-gears/119156/>

Huang, C.-C., Tsai, M.-C., Dorrell, D. G., & Lin, B.-J. (Março de 2008). Development of a Magnetic Planetary Gearbox. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, XLIV*(3), pp. 403 - 412.

InnWind.eu. (2017). *LCOE reduction for the next generation offshore wind turbines*. União Européia: European Community's Seventh Framework Programme.

Jaganmohan, M. (27 de Janeiro de 2021). *Number of active wind power turbines in Denmark from 2010 to 2020*. Acesso em 13 de Agosto de 2021, disponível em Statista: <https://www.statista.com/statistics/990723/number-of-active-wind-power-turbines-in-denmark/>

Jian, L., & Chau, K. T. (2010). DESIGN AND ANALYSIS OF A MAGNETIC-GEARED ELECTRONICA-CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION SYSTEM USING FINITE ELEMENT METHOD. *Progress In Electromagnetics Research, I*, pp. 47 - 61.

Jian, L., Xu, G., Gong, Y., Song, J., Liang, J., & Chang, M. (2011). ELECTROMAGNETIC DESIGN AND ANALYSIS OF A NOVEL MAGNETIC-GEAR-INTEGRATED WIND POWER GENERATOR USING TIME-STEPPING FINITE ELEMENT METHOD. *Progress In Electromagnetics Research*, pp. 351 - 367.

Kaa, G. v., Ek, M. v., Kamp, L. M., & Rezaei, J. (2020). Wind turbine technology battles: Gearbox versus direct drive - opening up the black box of technology characteristics. *Technological Forecasting & Social Change*.

Lai, C. S., & McCulloch, M. D. (2018). Levelized Cost of Electricity for Solar Photovoltaic and Electrical Energy Storage . *Energy and Power Group*, pp. 1 - 15.

Lai, C. S., Locatelli, G., Pimm, A., Tao, Y., Li, X., & Lai, L. L. (2019). A financial model for lithium-ion storage in a photovoltaic and biogas energy system. *Applied Energy*, pp. 1 - 16.

Lopes, M. T. (2016). *Concepção, Modelagem e Simulação de uma Usina Eólica em Escala*. Rio de Janeiro.

Magnomatics. (07 de Janeiro de 2010). *MAGNOMATICS' MAGNETIC GEAR AND PDD® MOTOR/GENERATOR*. Acesso em 22 de Julho de 2021, disponível em Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=EAELukfr2oY>

MAGNOMATICS. (2018). *Case Study - CHEG (Compact High Efficiency Generator) for Wind Turbines*. Sheffield.

Mansano, A. d., & Barreto, M. A. (2014). ESTUDO DA DINÂMICA DOS SISTEMAS DE ENGRENAGENS PLANETÁRIAS.

May, F. (11 de Janeiro de 2019). *How to maintain wind-turbine gearbox & oil health*. (GlobeCore GmbH) Fonte: Windpower Engineering & Development: <https://www.windpowerengineering.com/how-to-maintain-wind-turbine-gearbox-oil-health/>

McIntosh, J. (07 de Fevereiro de 2019). *How It Works: Automatic transmissions*. Acesso em 08 de Agosto de 2021, disponível em Driving: <https://driving.ca/auto-news/news/how-it-works-automatic-transmissions>

NASA. (29 de Outubro de 2009). *NASA Image Gallery*. Fonte: NASA.gov: <https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/index.html>

Neves, C. G., Filho, A. F., & Dorrell, D. G. (Agosto de 2016). Design of a Pseudo Direct Drive for Wind Power Applications. *International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (ICAUMS)*, pp. 50 - 55.

Neves, C. G., Filho, A. F., Goettems, M. F., & Borges, P. A. (2018). Pseudo direct drive simulation and analysis. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 37(5), pp. 1722 - 1731. doi:<https://doi.org/10.1108/COMPEL-01-2018-0008>

Osmanbasic, E. (07 de Abril de 2020). *The Future of Wind Turbines: Comparing Direct Drive and Gearbox*. Acesso em 20 de Julho de 2021, disponível em Engineering.com: <https://www.engineering.com/story/the-future-of-wind-turbines-comparing-direct-drive-and-gearbox>

Pinto, M. d. (2019). *Energia eólica: Princípios e Operação*. Brasil: érica.

Ragheb, A., & Ragheb, M. (21 - 24 de Março de 2010). WIND TURBINE GEARBOX TECHNOLOGIES. *2010 1st International Nuclear & Renewable Energy Conference (INREC)*.

Rens, J., Atallah, K., Calverley, S. D., & Howe, D. (2007). A novel magnetic harmonic gear. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*. Antalya, Turquia.

Rens, J., Atallah, K., Calverley, S. D., & Howe, D. (Fevereiro de 2010). A Novel Magnetic Harmonic Gear. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 46(1). doi:10.1109/TIA.2009.2036507

Rens, J., Atallah, K., Calverley, S., & Howe, D. (2007). A novel magnetic harmonic gear. *IEEE Int. Electric Machines Drive Conference (IEMDC)*, pp. 698-703. doi:10.1109/IEMDC.2007.382752

Sanches, C. B. (24 de Julho de 2015). *Energia Eólica*. Fonte: Unesp - Universidade Estadual Paulista: <https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/eco2/fontes-de-energia/eolica/>

Tlali, P. M., Gerber, S., & Wang, R.-J. (Setembro de 2014). Magnetic gear technologies: A review. *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 544 - 550. doi:10.1109/ICELMACH.2014.6960233

Udalov, S. N., Achitaev, A. A., Pristup, A. G., Bochenkov, B. M., Pankratz, Y., & Tarbill, R. D. (2018). Increasing the regulating ability of a wind turbine in a local power system using magnetic continuous variable transmission. *Wind Engineering*, pp. 1 - 25.

Wang, J., Atallah, K., & Carvley, S. D. (Outubro de 2011). A Magnetic Continuously Variable Transmission Device. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, XLVII(10), pp. 2815 - 2818.

Wang, Q., Qin, X., & Pfister, P.-D. (2018). A Vernier Pseudo- Direct-Drive Permanent-Magnet Machine. *IEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers*.

Wang, R.-J., & Gerber, S. (08 de Agosto de 2014). Magnetically geared wind generator technologies: Opportunities and Challenges. *Applied Energy Journal*.

WindBox. (03 de Janeiro de 2020). *Componentes dos aerogeradores*. Acesso em 12 de Julho de 2021, disponível em Windbox - Eficiência em gestão operacional de parques eólicos: <https://windbox.com.br/blog/componentes-dos-aerogeradores/>

Yin, X., Fang, Y., Huang, X., & Pfister, P.-D. (13 - 16 de Novembro de 2016). Analytical Modeling of a Novel Vernier Pseudo-Direct-Drive Permanent-Magnet Machine. *IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, p. 1.

Zhu, Z. Q., Li, H. Y., Deodhar, R., Pride, A., & Sasaki, T. (Março de 2018). Recent Developments and Comparative Study of. *CES TRANSACTIONS ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS, II(1)*.

Zero-e. (14 de Junho de 2016). *THE FUTURE AVAILABILITY & PRICE OF RARE EARTH PERMANENT MAGNETS*. Fonte: Zero-e tech: <http://www.zeroetech.com/blog/2016/6/14/the-future-availability-price-of-rare-earth-permanent-magnets>