

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MATEUS FELIPE GOETTEMS

CONSTRUÇÃO DE UMA ENGRENAGEM MAGNÉTICA COAXIAL

**Bagé
2017**

MATEUS FELIPE GOETTEMS

CONSTRUÇÃO DE UMA ENGRENAGEM MAGNÉTICA COAXIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Marchesan

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Guilherme Costa Neves

**Bagé
2017**

G599c Goettems, Mateus Felipe
Construção de uma Engrenagem Magnética Coaxial /
Mateus Felipe Goettems.
42 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIA,
2017.

"Orientação: Gustavo Marchesan".

1. engrenagens-magnéticas. 2. relação de
transmissão. 3. moduladores. 4. ímãs permanentes. 5.
geração eólica. I. Título.

MATEUS FELIPE GOETTEMS

CONSTRUÇÃO DE UMA ENGRENAGEM MAGNÉTICA COAXIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 08, dezembro de 2017.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Gustavo Marchesan
Orientador
Universidade Federal do Pampa

Prof. Dr. Carlos Guilherme Costa Neves
Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Martin Cruz Rodríguez Paz
Universidade Federal do Pampa

“A mente que se abre a uma nova
ideia jamais voltará ao seu tamanho
original.”

Albert Einstein.

RESUMO

As engrenagens mecânicas são amplamente utilizadas em praticamente qualquer sistema que envolva uma máquina rotativa e uma carga, sendo de importância vital para os processos nos quais estão inseridas, principalmente em Geração Eólica para aproximar a velocidade da turbina a velocidade do gerador. A engrenagem magnética à ímãs permanentes no qual este trabalho se baseia, transmite torque sem contato mecânico, logo os problemas devido ao atrito são solucionados bem como as complicações decorrentes da operação em altas velocidades. Também apresentam durabilidade e confiabilidade maiores, além da proteção inerente em caso de sobrecarga. Para que a transmissão de torque de um rotor para outro seja possível e ótima, os rotores devem possuir o mesmo número de pólos. Contudo, para obtermos relações de transmissão não unitárias, devemos ter uma quantidade diferente de pólos nos dois rotores (externo e interno). Com isso faz-se necessária a utilização dos moduladores cujo papel é permitir que em certas partes do entreferro o fluxo seja maior e em outras partes o fluxo seja bastante atenuado. A escolha adequada do número de moduladores garante que neste campo distorcido no entreferro haja uma harmônica de campo com o mesmo número de pólos do outro rotor possibilitando assim o acoplamento magnético. Esta engrenagem magnética utiliza ímãs permanentes, portanto a relação das velocidades dos eixos é constante, sendo determinada pela divisão entre o número de polos dos rotores externos e internos. Foram utilizados modelos analíticos e numéricos, mais especificadamente, o Método de Elementos Finitos Computacional (usando o programa *ANSYS Maxwell*) para compreensão dos fenômenos físicos envolvidos e dimensionamento de protótipos.

Palavras-Chave: engrenagens-magnéticas, relação de transmissão, moduladores, ímãs permanentes, geração eólica.

ABSTRACT

Mechanical gears are widely used in virtually any system involving a rotating machine and a load, are of vital importance for the processes in which they are inserted, mainly in Wind Generation to approximate the speed of the turbine the speed of the generator. The magnetic gear to the permanent magnets on which this work is based, transmits torque without mechanical contact, so the problems due to friction are solved as well as the complications arising from the operation at high speeds. They also have greater durability and reliability, as well as the inherent protection in case of overload. In order for the torque transmission from one rotor to another to be possible and optimal, the rotors must have the same number of poles. However, in order to obtain non-unitary transmission ratios, we must have a different number of poles in the two rotors (external and internal). This makes it necessary to use the modulators whose role is to allow in certain parts of the air gap the flow is greater and in other parts the flow is greatly attenuated. The proper choice of the number of modulators ensures that in this distorted field in the air gap there is a field harmonic with the same number of poles of the other rotor thus enabling the magnetic coupling. This magnetic gear uses permanent magnets, so the ratio of the shaft speeds is constant, being determined by the division between the number of poles of the external and internal rotors. Analytical and numerical models, more specifically, Computational Finite Element Method (using the Maxwell ANSYS program) were used to understand the physical phenomena involved and the design of prototypes

Keywords: gears-magnetic, gear ratio, modulators, permanent magnets, wind generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquemas de engrenagens magnéticas não-coaxial e coaxial, respectivamente.	13
Figura 2 – Engrenagem magnética.	16
Figura 3 – Diagrama básico da engrenagem magnética coaxial proposta.	17
Figura 4 – Comparação entre as relações de transmissão e velocidade.	17
Figura 5 - Comparação da eficiência.	18
Figura 6 – Fenômeno estático de modulação em duas dimensões, corte transversal.	19
Figura 7 - Vista explodida da engrenagem magnética coaxial em 3 configurações diferentes: a) Moduladores fixos. b) Rotor externo fixo. c) Rotor interno fixo.	21
Figura 8 - Vista explodida da engrenagem magnética no SolidWorks.	22
Figura 9 – Modelo 2D construído no Ansys Maxwell e dimensões dos componentes.	22
Figura 10 – Linhas equipotenciais do campo magnético.	23
Figura 11 – Velocidades nos rotores interno e externo.	24
Figura 12 – Torques nos rotores interno e externo.	24
Figura 13 - Processo de fabricação do eixo de alta velocidade e a peça finalizada.	25
Figura 14 – Eixo de alta velocidade montado.	26
Figura 15 – Lâminas cortadas no tamanho especificado, molde e suporte para os moduladores.	27
Figura 16 – Moduladores finalizados.	27
Figura 17 – Rotor externo com entalhes e as partes que compõem a engrenagem magnética.	28
Figura 18 – Engrenagem magnética na bancada de testes.	29
Figura 19 - Engrenagem magnética na bancada de testes.	29
Figura 20 – Velocidade medida com a luz estroboscópica.	30
Figura 21 – Freio de Proni.	31
Figura 22 – Face frontal do rotor externo.	36
Figura 23 – Face lateral do rotor externo.	36
Figura 24 – Vista isométrica do rotor externo.	37
Figura 25 – Dimensões dos moduladores.	37
Figura 26 – Dimensões do eixo em mm do rotor interno.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados para construção do protótipo.....	23
Tabela 2 – Dados de velocidade.....	30
Tabela 3 – Dados de torque.....	32
Tabela 4 – Dados de torque.....	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IP – Ímas Permanentes
EM – Engrenagem Magnética
NdFeB – Neodímio Ferro Boro
EMC – Engrenagem Magnética Coaxial
 G_r – Relação de Transmissão
 P_h – Pares de Polos do Rotor Interno
 P_l – Pares de Polos do Rotor Externo
 N_s – Número de Moduladores
 W_h – Velocidade Angular do Rotor Interno
 W_l – Velocidade Angular do Rotor Externo
 W_p – Velocidade Angular dos Moduladores
 T_l – Torque no Rotor Externo
 T_h – Torque no Rotor Interno
Nm – Newton Metro
RPM – Rotações por Minuto
ms – Milissegundo
GO – Grão Orientado
SAE – Sociedade de Engenheiros Automotivos
t2b – Espessura externa
t1b – Espessura interna
R2s – Diâmetro com imas
R1s – Diâmetro sem imas
R2d – Diâmetro interno carcaça
R1d – Diâmetro interno carcaça com imãs
g – Air gap
L – Comprimento dos imas
Br – Remanência
Hc – Campo coercivo
 μ_0 – Permeabilidade do ar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Considerações Gerais.....	12
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivos Gerais	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
1.3 Justificativa.....	14
1.4 Metodologia.....	14
1.5 Estrutura do trabalho.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Engrenagens Magnéticas	15
2.2 Princípio do fenômeno de modulação.....	18
2.3 Relações de engrenagens magnéticas coaxiais	19
3 MODELO COMPUTACIONAL DE UMA ENGRENAGEM MAGNÉTICA.....	22
4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS	25
4.1 Rotor interno	25
4.2 Moduladores	26
4.3 Rotor externo	28
4.4 Montagem final	28
4.5 Análise de dados e resultados	30
4.6 Velocidade	30
4.7 Torque	31
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
REFERÊNCIAS.....	34
APÊNDICE A.....	36
APÊNDICE B.....	38

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

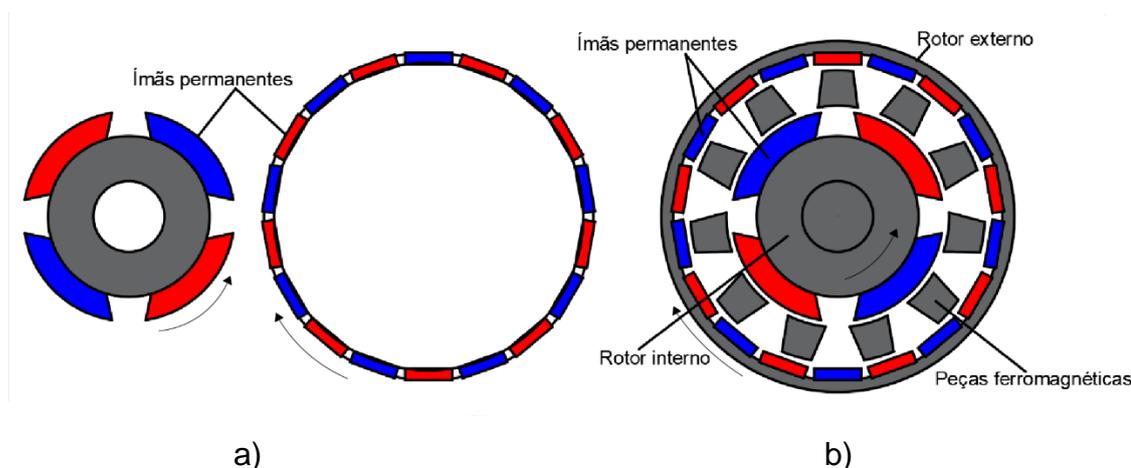
As caixas de engrenagens mecânicas são utilizadas extensivamente para corresponder à velocidade de funcionamento dos motores primários com as exigências de suas cargas, tanto para aumentar a velocidade de rotação (turbinas eólicas) como para diminuir a velocidade (propulsão de navios) (Atallah & Howe, 2001).

Embora as caixas de engrenagens mecânicas possuam altas densidades de torque, normalmente requerem lubrificação e arrefecimento, além de produzirem ruído acústico. As engrenagens magnéticas oferecem várias vantagens potenciais, como (Neves & Filho, 2017).

- Manutenção reduzida e maior confiabilidade.
- Capacidade precisa de transmissão de torque e proteção contra sobrecargas.
- Isolamento físico entre os eixos de entrada e saída.
- Rendimento superior as engrenagens mecânicas.
- Baixo ruído acústico.

Contudo, apesar destas vantagens, as engrenagens magnéticas receberam pouca atenção no passado recente, devido à relativa complexidade e baixa densidade de torque obtida devido a topologia não-coaxial utilizada, e aos ímãs permanentes (IP) de baixa remanência aplicados. As engrenagens magnéticas não coaxiais, mostradas na Figura 1(a), são caracterizadas por um circuito magnético pobre, na qual, em qualquer instante apenas uma fração dos IP contribui para a transmissão do torque. Já a engrenagem magnética coaxial (EMC), mostrada na Figura 1(b), possui alta densidade de torque, pois todos os ímãs contribuem para a produção de torque (Wu & Jian, 2013).

Figura 1 – Esquemas de engrenagens magnéticas a) não-coaxial e b) coaxial.



Fonte: O Autor, 2017.

O modelo proposto neste trabalho emprega ímãs permanentes de ferrite no rotor interno e no rotor externo, e tem peças de material ferromagnético, denominados moduladores, entre os dois rotores.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

O objetivo deste trabalho é modelar e construir um protótipo de EM para realização de ensaios, afim de obter dados relevantes de sua eficiência. Sendo assim, este trabalho busca a validação experimental do modelo proposto.

1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho descreve as etapas de construção e modelagem de uma EMC. Delimitou-se os seguintes objetivos específicos para que os objetivos gerais fossem alcançados, são eles:

- Aplicação de equações para obter dados teóricos;
- Modelagem computacional do protótipo;
- Desenhos técnicos para usinagem das peças da engrenagem;
- Construção e obtenção de dados de eficiência.

1.3 Justificativa

Muitas turbinas rotativas de baixa velocidade, como sistemas de conversão de energia eólica, exigem caixas de engrenagem para aumentar suas velocidades para um nível que permita o processo eficiente de conversão de energia (Kucuk e Mousavi, 2017).

Até hoje, as engrenagens mecânicas desempenham um papel predominante para este propósito, uma vez que são fáceis de fabricar e têm baixo custo. No entanto, elas sofrem de ruído acústico e vibração devido ao mecanismo de contato e requerem lubrificação regular (Jian *et al.*, 2010). Atallah e Howe, 2001, afirmam que as engrenagens mecânicas podem causar problemas significativos de confiabilidade.

Em vez disso, as engrenagens magnéticas oferecem muitas vantagens em relação às engrenagens mecânicas, como manutenção reduzida, menos ruído acústico, alta confiabilidade e proteção contra sobrecarga (Kucuk e Mousavi, 2017). Lubin, 2010, constatou que uma EM pode ter uma densidade de torque de 100 kNm/m³, que é comparável à das engrenagens mecânicas.

1.4 Metodologia

O presente trabalho está fundamentado em uma pesquisa bibliográfica a respeito das engrenagens magnéticas propostas na literatura, a partir da qual se decidiu pela modelagem, construção e testes de uma engrenagem magnética coaxial. A modelagem computacional será utilizada para obter as dimensões para construção, além de levantar os dados de velocidade e torque para comparação dos dados teóricos e práticos, para isso, utilizou-se o *programa Ansys Maxwell*. Os desenhos técnicos, com as dimensões do protótipo foram reproduzidos no *programa Solidworks*, para posteriormente ser enviados a empresa Barbieri usinagem de peças, localizada em Bagé-RS.

As peças ferromagnéticas serão fabricadas manualmente, pois os altos custos dos orçamentos para corte a laser inviabilizaram o projeto. Para isso, o corte das lâminas metálicas para confecção dos moduladores será feito com tesoura para corte de metais, uma a uma. O material utilizado foi retirado de transformadores danificados, compostos por aço silício de grão orientado (GO).

A sustentação dos moduladores deve ser de material não magnético, para não influenciar no fenômeno de modulação. Para isso, será fabricado em madeira e resina por um profissional especializado neste tipo de material.

Após os processos descritos, a montagem da EM será extremamente delicada, pois cada parte tem influência na eficiência final da engrenagem.

1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho estrutura-se em cinco capítulos assim divididos: neste primeiro capítulo teve-se a introdução ao tema abordado, justificativa e delimitação dos objetivos a serem alcançados. No próximo capítulo têm-se a revisão bibliográfica das engrenagens magnéticas e um panorama geral sobre os diferentes tipos. No terceiro capítulo encontra-se a modelagem computacional de uma EM a fim de alcançar os objetivos propostos. No capítulo quatro serão apresentados os resultados obtidos, as discussões sobre o protótipo e resultados. E por fim, no quinto capítulo as considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

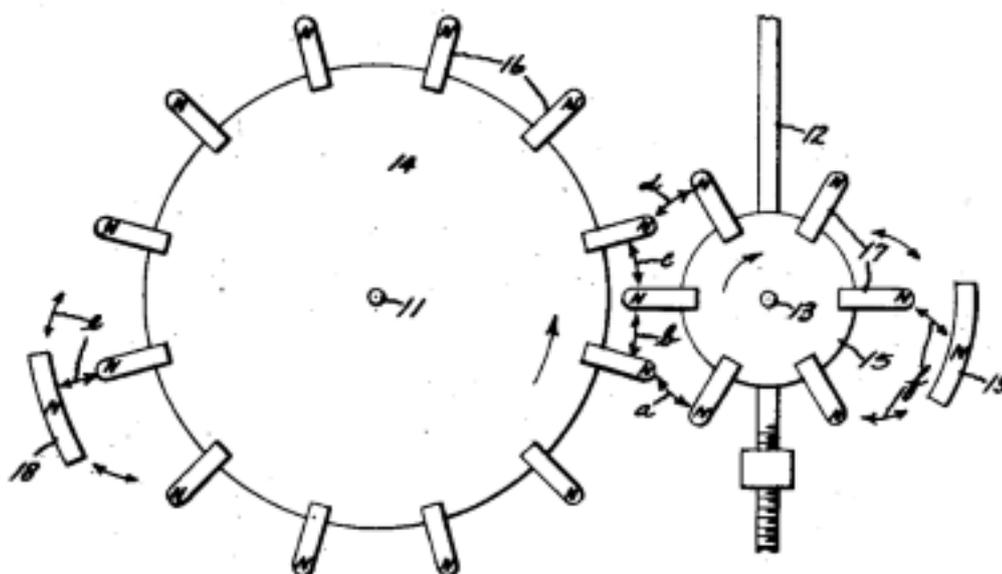
2.1 Engrenagens Magnéticas

A ideia de EM pode ser datada desde o início do século XX. Neuland em 1915, fez um pedido de patente nos Estados Unidos descrevendo uma engrenagem eletromagnética que deu início a este tipo de topologia. A patente descreve uma engrenagem eletromagnética constituídas por dois eixos rotativos com pólos de aço salientes. Mesmo que a topologia de engrenagem da patente pareça bastante eficaz, aparentemente nada foi feito para utilizar a ideia em aplicações comerciais (Rasmussen *et al.*, 2005).

Mais tarde, em 1940, uma topologia de EM bastante semelhante a uma engrenagem mecânica foi proposta por Faus. A Figura 2 descreve uma EM baseada em dois discos com diferentes diâmetros e diferentes números de IP. No entanto, a baixa utilização e o mau desempenho do material de IP de ferrite tornaram quase impossível ser amplamente utilizada pela indústria. Porém, quando o material de alto desempenho, neodímio ferro boro (NdFeB), foi descoberto na década de 1980, a

pesquisa sobre EMs despertou grandes interesses, pois a força por unidade de volume é cerca de dez vezes daquilo que se pode esperar dos ímãs de ferrite (Neves *et al.*, 2017).

Figura 2 – Engrenagem magnética.



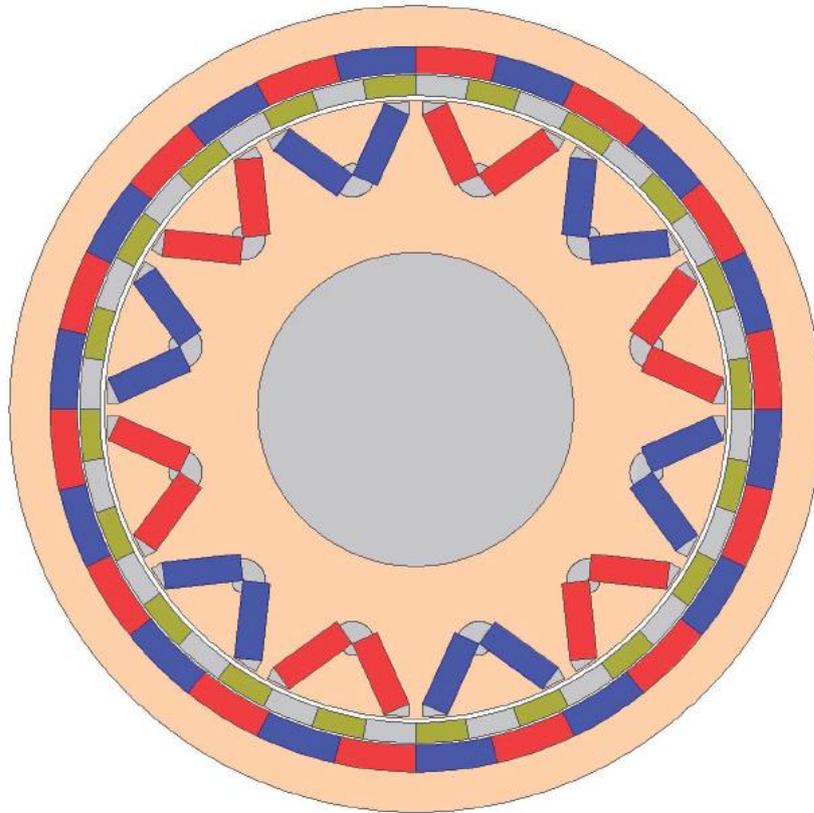
Fonte: FAUS, H. T. 1940.

Attalla & Howe (2001) propuseram uma topologia de EMC com alto desempenho, cujo princípio de operação foi baseado na modulação magnética produzida por dois conjuntos de ímãs permanentes concêntricos através de peças ferromagnéticas, a qual este trabalho se baseia.

Kucuk & Mousavi (2017) sugeriram uma EMC onde os polos do rotor interno estão posicionados em formato diferente da topologia clássica, como mostra a Figura 3.

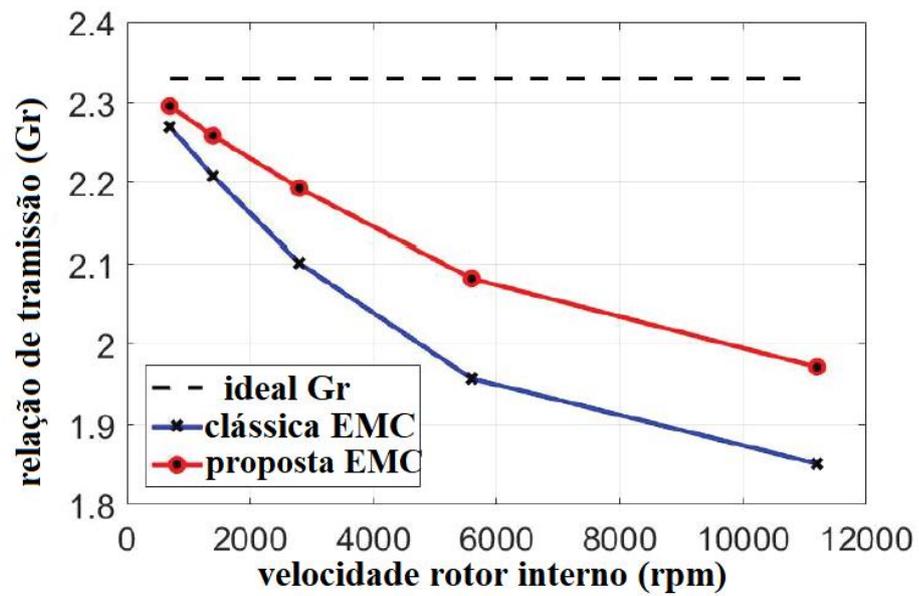
Os autores, através da análise de elementos finitos, compararam os dados levantados com a EMC clássica. Conclui-se que o torque desenvolvido é ligeiramente mais baixo que a EMC clássica, porém obtiveram dados satisfatórios no caso em que a velocidade do rotor externo da EM aumenta. O gráfico da Figura 4, demonstra os resultados da relação de transmissão *versus* velocidade do rotor interno e a Figura 5, a eficiência. A relação de transmissão (G_r), é a relação entre a velocidade de saída e entrada.

Figura 3 – Diagrama básico da engrenagem magnética coaxial proposta.



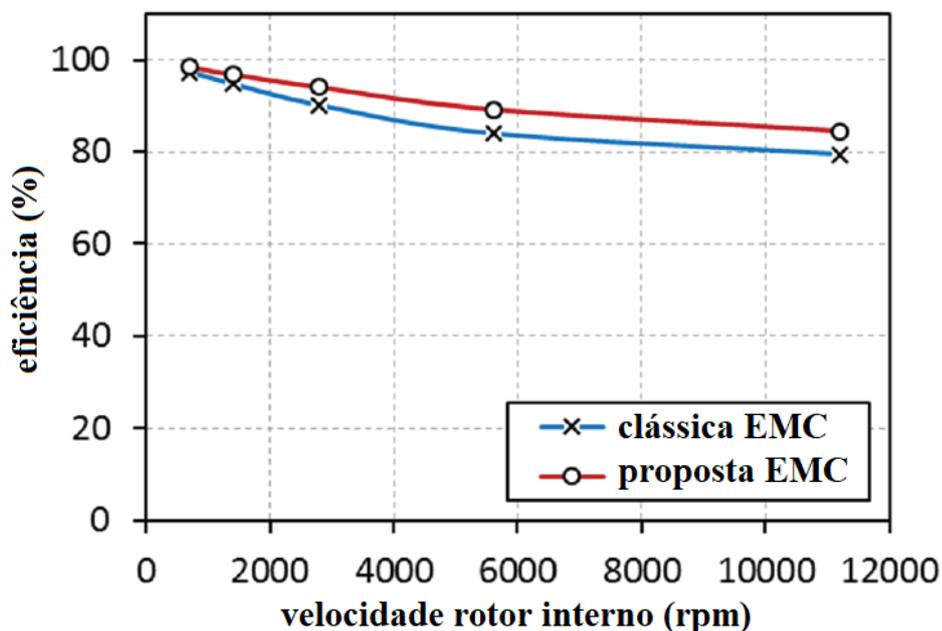
Fonte: Kucuk & Mousavi, 2017.

Figura 4 – Comparação entre as relações de transmissão e velocidade.



Fonte: Kucuk & Mousavi, 2017.

Figura 5 - Comparação da eficiência.



Fonte: Kucuk & Mousavi, 2017.

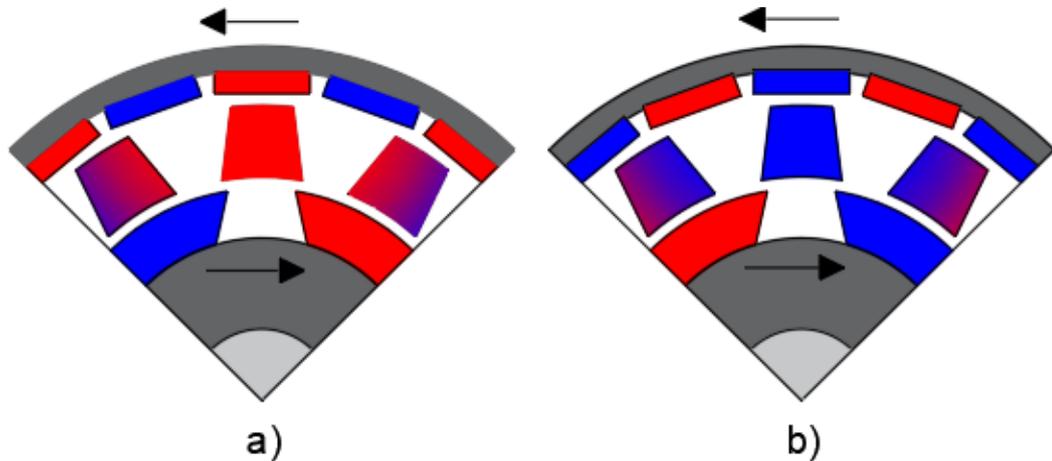
2.2 Princípio do fenômeno de modulação

O princípio de operação da modulação do fluxo magnético pode ser explicado através da Figura 6, a qual é uma simplificação do rotor externo e interno composto por polos magnéticos, interagindo com as peças ferromagnéticas.

A Figura 6 representa um corte transversal da engrenagem que se encontra estática, as flechas indicam o sentido do movimento de cada rotor. As cores dos moduladores representam o polo norte ou sul produzido por modulação do fluxo do rotor externo com a qual o rotor interno irá interagir (Neves & Filho, 2017).

Na Figura 6(a), as peças ferromagnéticas produzirão um maior fluxo magnético norte, porque a face dos moduladores está alinhada mais ao norte do rotor externo, entretanto uma pequena parcela do fluxo magnético produzido é sul. Sendo assim, o fluxo produzido atrai o polo sul do rotor interno. Na Figura 6(b), as peças ferromagnéticas produzirão um maior fluxo magnético sul, porque a face dos moduladores está alinhada mais ao sul do rotor externo, entretanto uma pequena parcela do fluxo magnético produzido é norte. Sendo assim, o fluxo produzido atrai o polo norte do rotor interno (Neves & Filho, 2015).

Figura 6 – Fenômeno estático de modulação em duas dimensões, corte transversal.



Fonte: O Autor, 2017.

2.3 Relações de engrenagens magnéticas coaxiais

Segundo Kucuk & Mousavi 2017, as relações ideais entre as partes da EM obedecem a seguinte equação:

$$P_h + P_l = N_s \quad (1)$$

Onde, P_h é o número de polos do rotor interno, P_l do rotor externo e N_s é o número de moduladores.

Se cada termo de (1) é multiplicado por sua respectiva velocidade angular, obtém-se a seguinte expressão:

$$w_h P_h + w_l P_l = w_s N_s \quad (2)$$

Onde, w_h é a velocidade do eixo interno, w_l do eixo externo e w_s a velocidade dos moduladores. Quando um dos componentes da engrenagem é fixo, ou seja, não gira, haverá uma relação de transmissão G_r entre a velocidade das outras duas partes (Neves & Filho, 2015). Por exemplo, quando os moduladores estão fixos ($w_s=0$), de acordo com a equação (2), a G_r pode ser determinada por:

$$G_r = \frac{w_h}{w_l} = -\frac{P_l}{P_h} \quad (3)$$

Portanto, a relação entre as velocidades é inversamente proporcional à relação entre os números de pares de pólos e os rotores giram em direções opostas. Considerando que não há perdas, a potência no rotor interno é igual à potência no rotor externo, então:

$$\frac{T_l}{T_h} = \frac{w_h}{w_l} = -\frac{P_l}{P_h} = G_r \quad (4)$$

Onde T_l é o torque do rotor externo e T_l do rotor interno, assim a relação de torque é diretamente proporcional à relação de pares de pólos.

Alternativamente, quando o rotor externo é estacionário ($w_l = 0$), a partir da equação (1), a G_r pode ser determinada por:

$$G_r = \frac{w_h}{w_s} = \frac{N_s}{P_h} \quad (5)$$

Portanto, a relação entre as velocidades é inversamente proporcional à relação entre os moduladores e números de pares de pólos do rotor interno, e ambos os rotores giram na mesma direção. Se considerado que não há perdas, a potência no rotor interno é igual à potência nos moduladores, então:

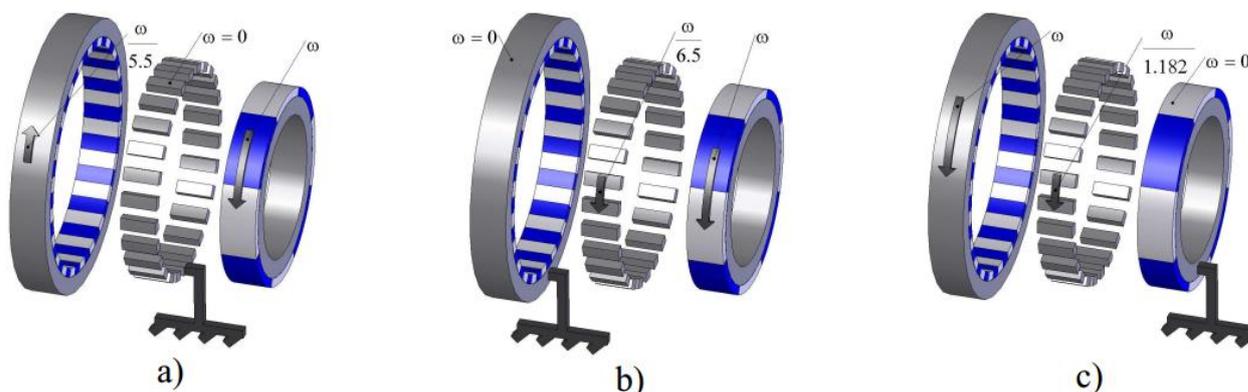
$$G_r = \frac{w_h}{w_s} = \frac{N_s}{P_h} = \frac{T_p}{T_h} \quad (6)$$

Sendo assim, a relação de torque é diretamente proporcional ao número de pares de pólos (Neves & Filho, 2017).

Exemplificando, a Figura 6 demonstra três configurações diferentes de engrenagens magnéticas. O rotor externo tem 22 pares de pólos, o rotor interno tem 4 pares de pólos e o anel interno 26 moduladores. Em cada caso, uma das partes é estacionária. Assim, para moduladores fixos, a partir da equação (3), $-22/4=-5,5$, para rotor externo fixo, $26/4=6,5$ e para o rotor interno fixo, $G_r=26/22=1,182$, através da

equação (5) como mostrados na Figura 6(a), Figura 6(b) e Figura 6(c), respectivamente (Jorgensen, 2010).

Figura 7 - Vista explodida da engrenagem magnética coaxial em 3 configurações diferentes: a) Moduladores fixos. b) Rotor externo fixo. c) Rotor interno fixo.



Fonte: JORGENSEN, F. T. 2010.

A configuração utilizada neste trabalho é mostrada na Figura 6(a), a partir da equação (3) a relação de engrenagem pode ser calculada assim como a velocidade angular do rotor interno ou externo.

A relação de torque nominal para esta configuração pode ser calculada a partir da equação (4), se a EM está funcionando a uma velocidade angular constante e não há perda, onde T_1 é o torque do rotor externo:

$$\frac{T_1}{T_h} = \frac{w_h}{w_l} = -\frac{P_l}{P_h} = G_r \quad (7)$$

$$\frac{T_1}{T_h} = G_r \quad (8)$$

$$T_1 = G_r * T_h \quad (9)$$

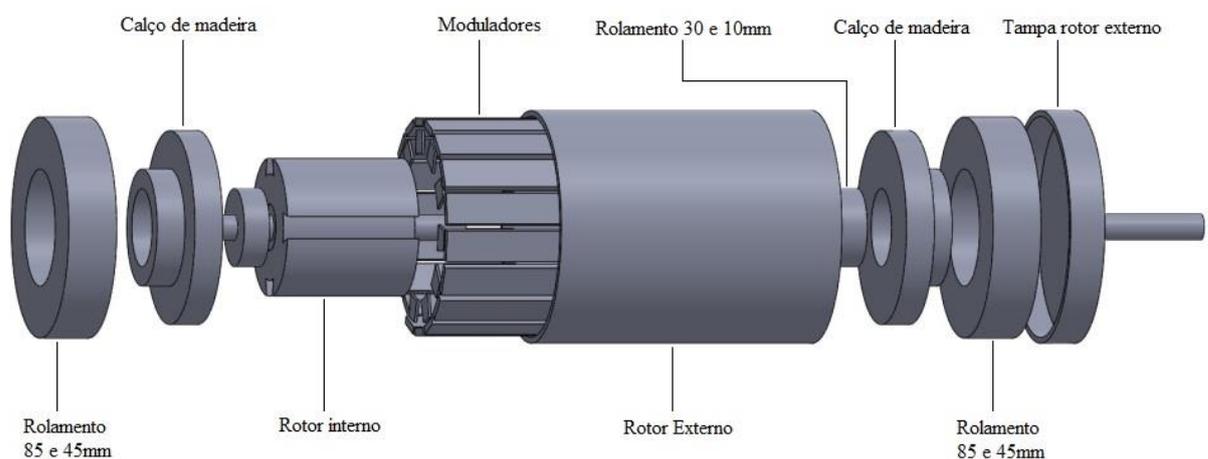
Esta pode ser a disposição operacional preferida uma vez que simplifica o desenho mecânico global da engrenagem. Além disso, permite que seja transmitido um torque mais elevado, dependendo do aumento da relação de transmissão (Atallah & Howe, 2001).

3 MODELO COMPUTACIONAL DE UMA ENGRENAGEM MAGNÉTICA

O protótipo da EMC tem um diâmetro ativo de 85 mm, comprimento axial de 48 mm e emprega ímãs permanentes composto por ferrite de estrôncio anisotrópico com uma remanência de 400mT, os demais dados estão listados na Tabela 1. O modelo da EMC foi desenhado no programa *SolidWorks*, como mostra Figura 7, e após importada para o programa *Ansys Maxwell* a fim de realizar a modelagem. A Figura 8(a) mostra o modelo da engrenagem no ambiente do *Maxwell* e a Figura 8(b) as dimensões e parâmetros físicos.

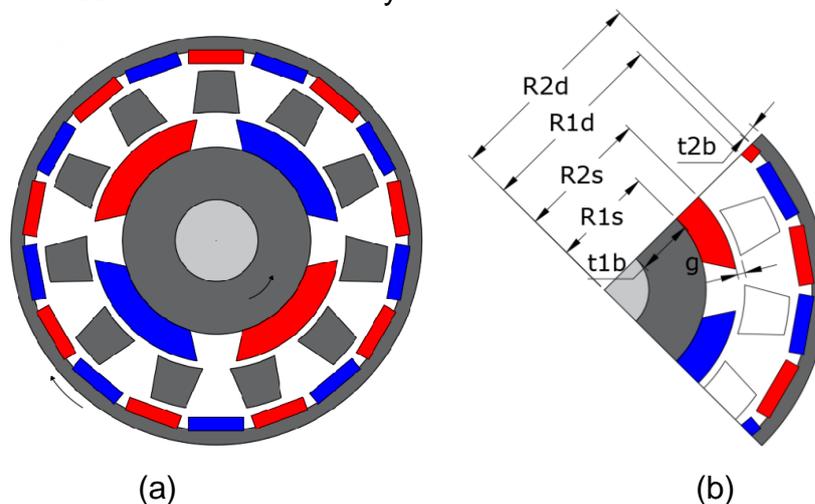
As linhas equipotenciais do campo magnético são mostradas na Figura 9.

Figura 8 - Vista explodida da engrenagem magnética no SolidWorks.



Fonte: O Autor, 2017.

Figura 9 – Modelo 2D construído no Ansys Maxwell e dimensões dos componentes.

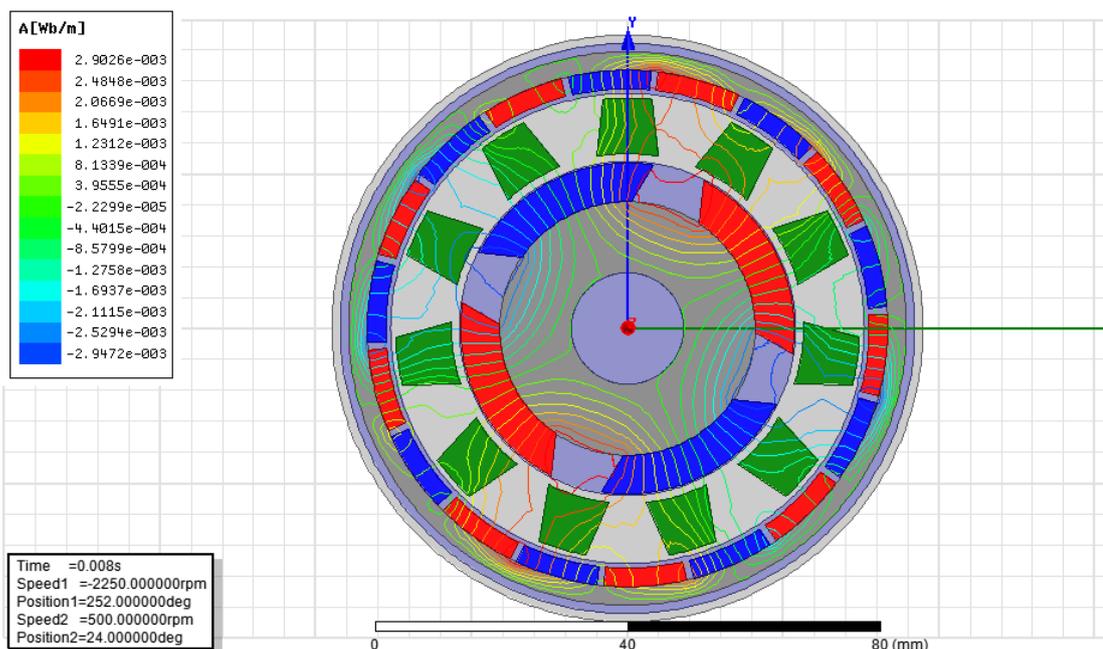


Fonte: O Autor, 2017.

Tabela 1 – Dados para construção do protótipo.

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
t2b	Espessura externa	5	[mm]
t1b	Espessura interna	30	[mm]
R2s	Diâmetro com imas	53,5	[mm]
R1s	Diâmetro sem imas	43,5	[mm]
R2d	Diâmetro interno carcaça	85	[mm]
R1d	Diâmetro interno carcaça com imãs	73,5	[mm]
g	<i>Air gap</i>	1	[mm]
L	Comprimento dos imas	48	[mm]
Br	Remanência	400	[mT]
Hc	Campo coercivo	247	[KA/m]
μ_0	Permeabilidade do ar	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	[Tm/A]
Pl	Pólos do rotor externo	18	Unidades
Ph	Pólos do rotor interno	4	Unidades
Ns	Moduladores	11	Unidades

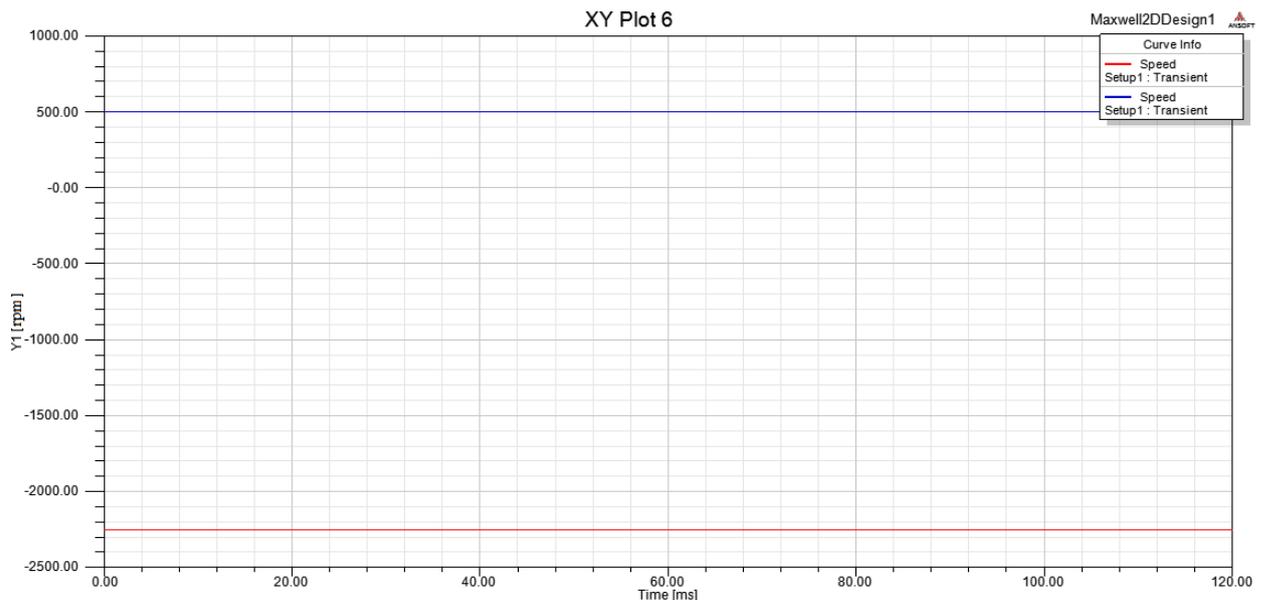
Figura 10 – Linhas equipotenciais do campo magnético.



Fonte: O Autor, 2017.

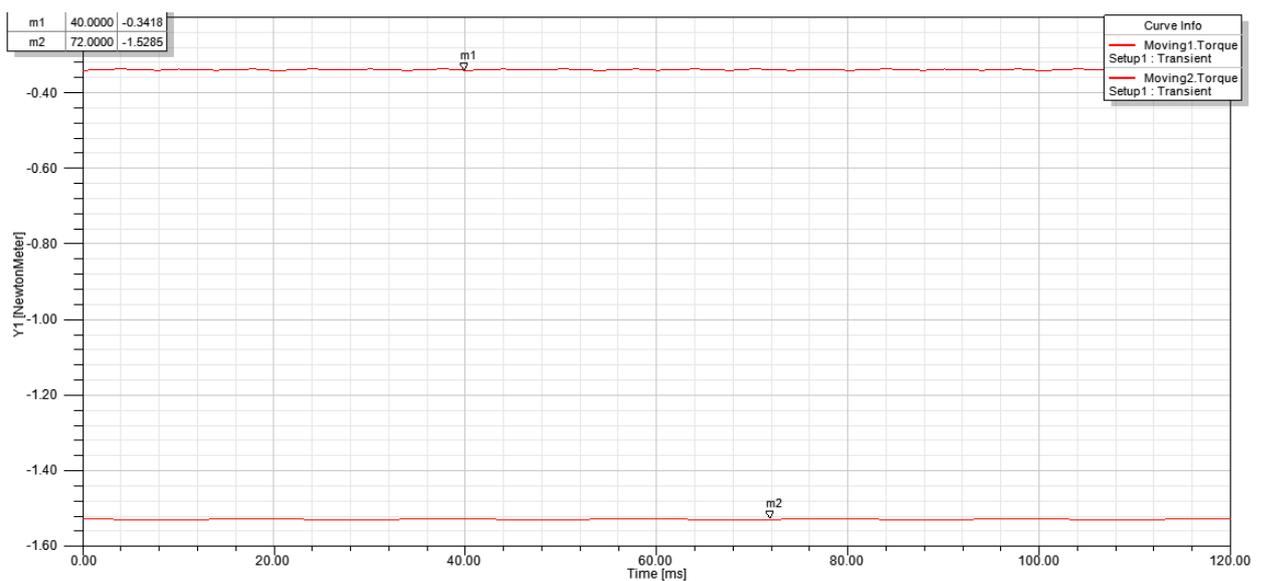
As velocidades dos rotores externo e interno, são de 500rpm e 2250rpm, como é mostrado na Figura 10. Nota-se que a relação de engrenagem $Gr=4,5$ se confirma. O método aplicado para calcular o torque do rotor externo é o *Tensor de Maxwell*. O torque de saída (rotor interno) calculado é 0,34 Nm e o torque de entrada (rotor externo) é de 1,53 Nm, cuja relação é de 4.5, conforme esperado.

Figura 11 – Velocidades nos rotores interno e externo.



Fonte: O Autor, 2017.

Figura 12 – Torques nos rotores interno e externo.



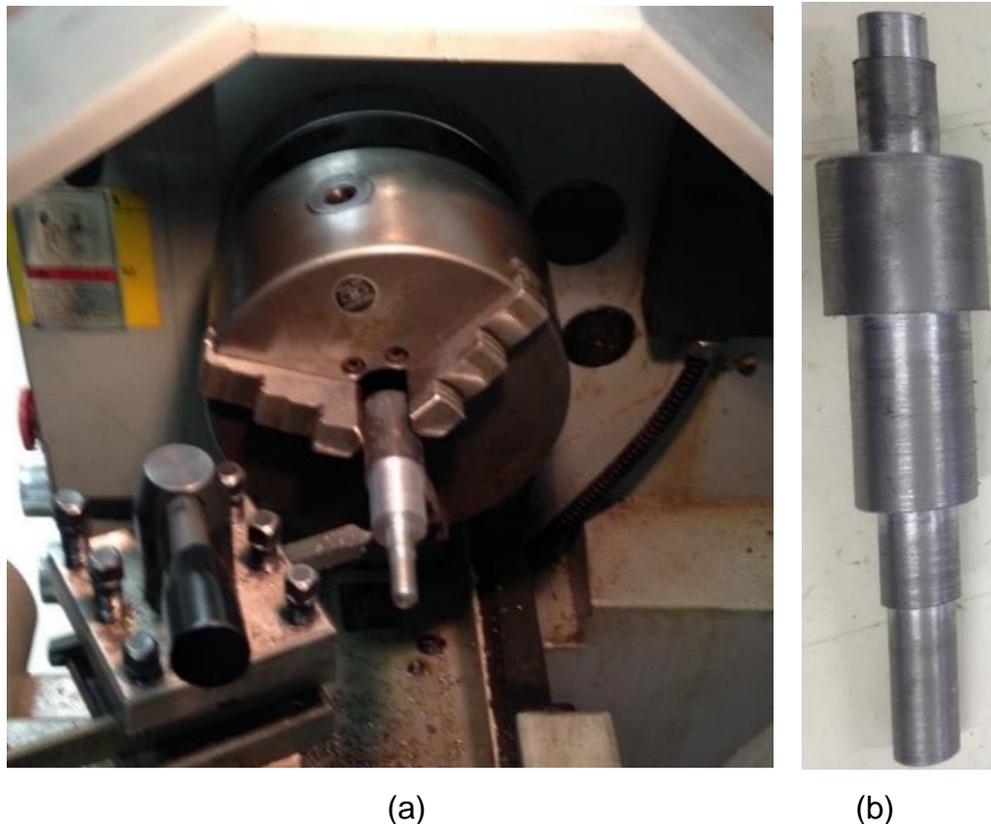
Fonte: O Autor, 2017.

4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Rotor interno

O rotor interno da EM foi o único componente que não foi confeccionado pois pertencia a uma máquina de corrente contínua existente. Porém, seu eixo foi produzido no Laboratório de Processos de Fabricação-LaFa do curso de Engenharia de Produção. A Figura 12(a), mostra a usinagem do eixo, o material utilizado foi o Aço SAE 1020. Na Figura 12(b) é mostrado a peça finalizada.

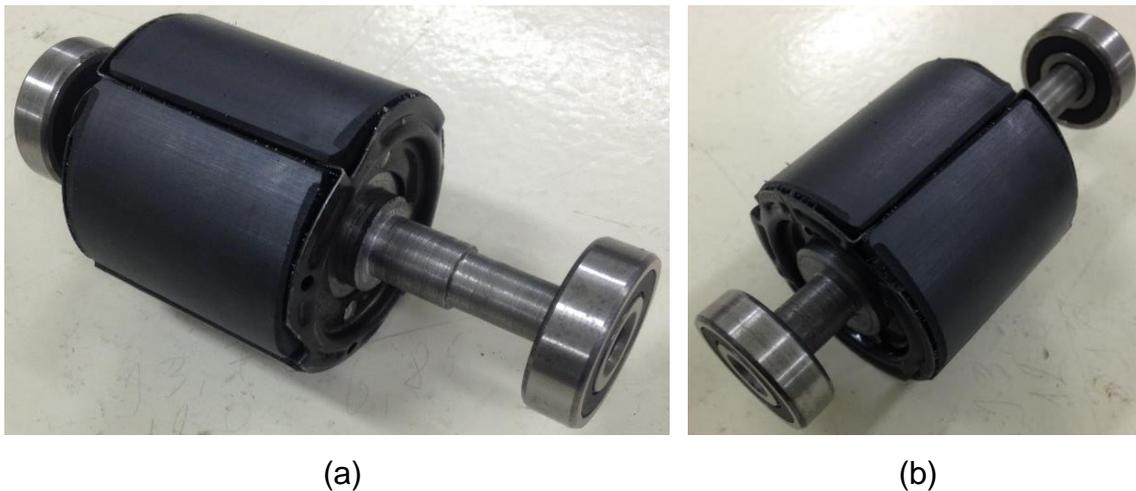
Figura 13 - Processo de fabricação do eixo de alta velocidade e a peça finalizada.



Fonte: O Autor, 2017.

Foi adicionado em cada ponta do eixo um rolamento com 10mm de diâmetro interno e 30mm de diâmetro externo, os ímãs do rotor interno, foram posicionados e assim a montagem final do eixo de alta velocidade pode ser vista na Figura 13.

Figura 14 – Eixo de alta velocidade montado.



Fonte: O Autor, 2017.

4.2 Moduladores

Durante o projeto mecânico e fabricação, foi dada especial atenção às peças que compõe os moduladores, pois, são submetidas a campos magnéticos que variam no tempo. Por conseguinte, para evitar uma perda excessiva por correntes parasitas (correntes de *Foucault*). Optou-se por utilizar lâminas de transformadores compostas por aço silício de grão orientado (GO) com espessura de 0,5mm. O comprimento ativo da engrenagem é de 48mm, portanto, foi utilizado 1056 peças como mostra a Figura 14(a).

Para manter os moduladores nas suas posições relativas e dar rigidez a estrutura utilizou-se resina epóxi que apresenta permeabilidade magnética próxima do vácuo e que desta forma não vai prejudicar o processo de modulação. A estrutura formada precisa ser forte o suficiente para suportar os esforços provocados pela variação do campo magnético no entreferro. Na confecção do molde foram utilizados dois canos de pvc concêntricos, as lâminas cortadas (moduladores) foram posicionadas, como mostrado na Figura 14(b), e após adicionado a resina epóxi conforme mostrado na Figura 15. Para que o conjunto de moduladores não se desloque relativamente entre o rotor interno e externo foram usados calços de madeira que mantêm os moduladores estáticos enquanto os rotores giram, conforme mostrado na Figura 14(c).

Figura 15 – Lâminas cortadas no tamanho especificado, molde e suporte para os moduladores.



(a)

(b)



(c)

Fonte: O Autor, 2017.

Figura 16 – Moduladores finalizados



Fonte: O Autor, 2017.

4.3 Rotor externo

Para produção do rotor externo fez-se um cilindro de aço *SAE 1020*, com espessura de 5mm, onde foram feitos 18 entalhes para ajudar na colagem dos ímãs que o compõe, como mostra a Figura 16. Como o rotor externo é uma peça móvel foram adicionados rolamentos, conforme Figura 14(c), com 85mm e 45mm de diâmetro externo e interno, respectivamente.

Figura 17 – Rotor externo com entalhes e as partes que compõem a engrenagem magnética.



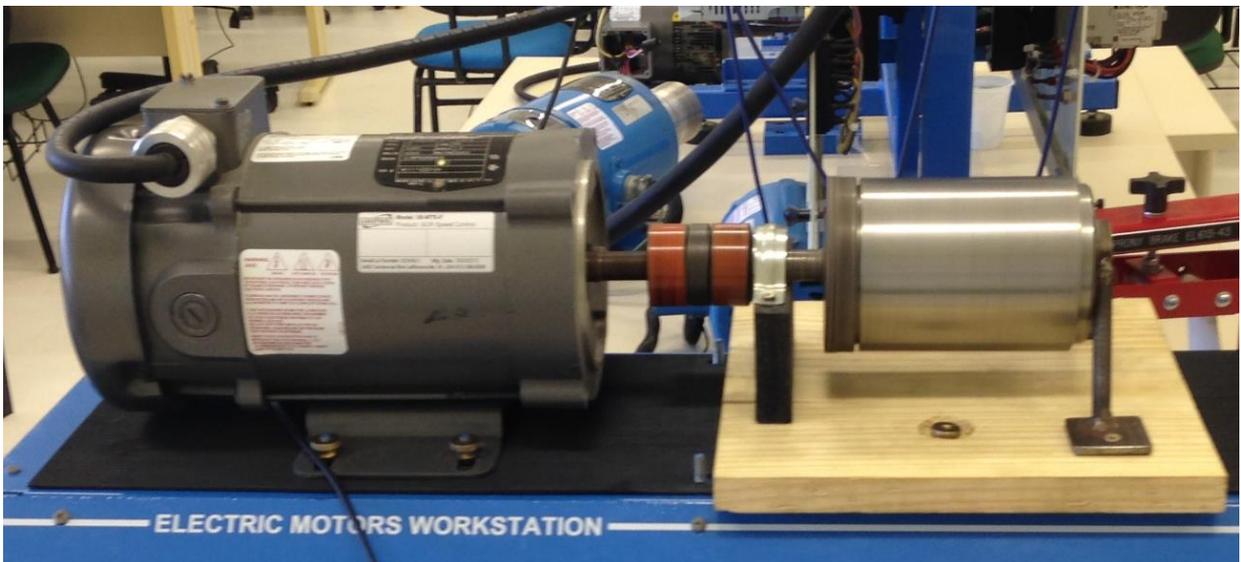
Fonte: O Autor, 2017.

4.4 Montagem final

Após a montagem de todas as peças produzidas anteriormente, o resultado final do protótipo da EM é apresentado na Figura 17 e 18. Foi utilizado uma base de madeira e outros dois suportes para sustentação da engrenagem, assim como um

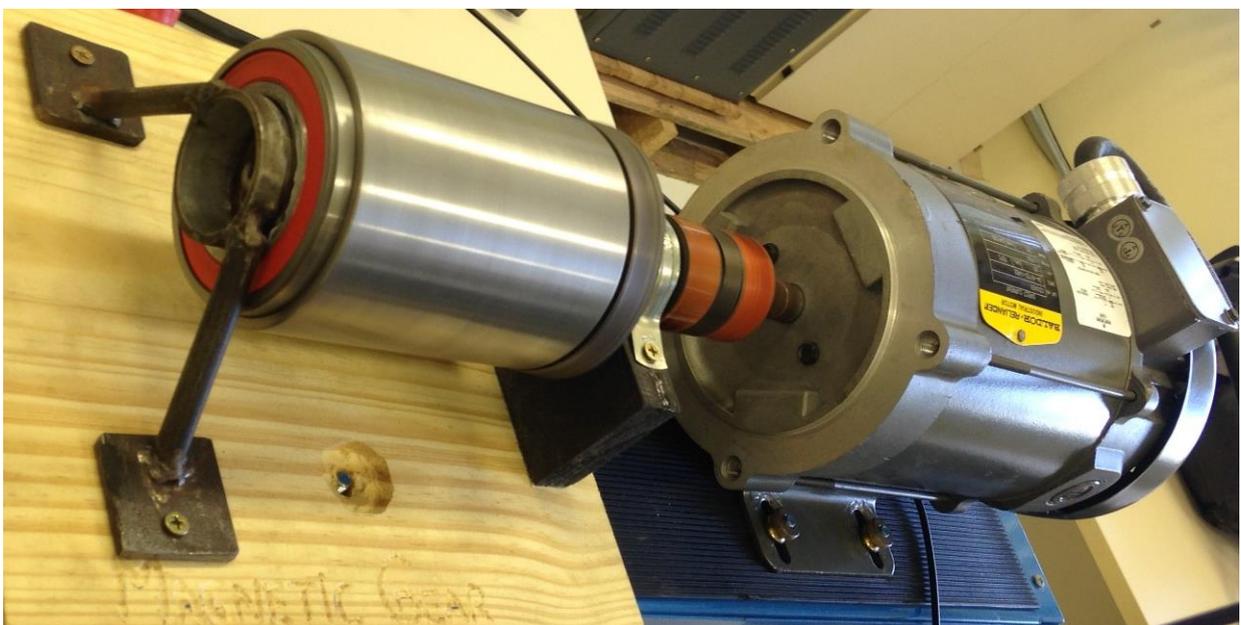
motor de corrente contínua acoplado ao rotor externo para aciona-la e realizar os testes necessários.

Figura 18 – Engrenagem magnética na bancada de testes.



Fonte: O Autor, 2017.

Figura 19 - Engrenagem magnética na bancada de testes.



Fonte: O Autor, 2017.

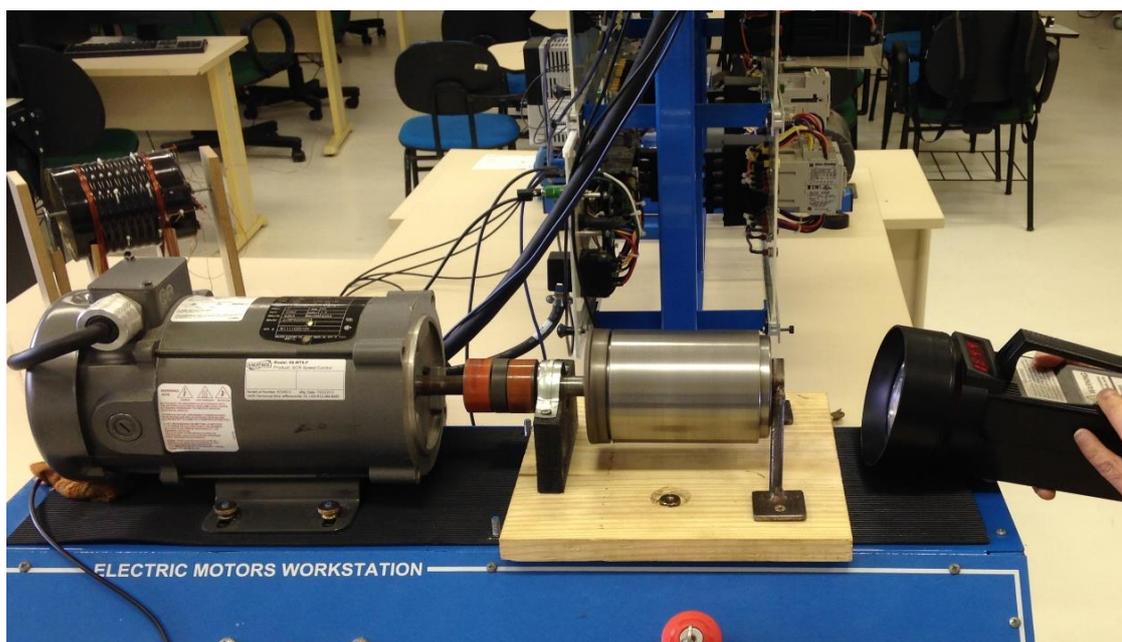
4.5 Análise de dados e resultados

O ensaio para aquisição de dados foi realizado no laboratório de eólica do curso de engenharia de energia, onde foi possível acoplar a EM ao motor de corrente contínua. Os testes feitos foram com o auxílio do medidor de velocidade, luz estroboscópica, Freio de Proni e a bancada de teste de motores.

4.6 Velocidade

A velocidade do motor foi ajustada em 500rpm e posteriormente conectou-se a EM ao eixo do motor. Com a luz estroboscópica foi realizada a leitura como mostra a Figura 19 e na Tabela 2 pode-se verificar o resultado.

Figura 20 – Velocidade medida com a luz estroboscópica.



Fonte: O Autor, 2017.

Tabela 2 – Dados de velocidade.

	Velocidade entrada	Velocidade saída
Teórico	500rpm	2250rpm
Simulado	500rpm	2250rpm
Medido	500rpm	2155rpm ($\pm 0.05\%rdg + 1$ dígito)

É importante ressaltar que a velocidade do motor iniciou em 500rpm, o que por poucos segundos resultou em um giro em falso do rotor de alta velocidade da EM, com isso a característica de proteção contra sobre carga foi confirmada.

O erro (10) de velocidade pode ser determinada pela divisão da velocidade de saída medida pela velocidade de saída teórica.

$$e = \left(1 - \frac{2155}{2250}\right) * 100 = 4.23\% \quad (10)$$

4.7 Torque

Um ensaio de torque transmitido pela EM foi realizado com o Freio de Proni Figura 20, no Laboratório de Eólica do curso de Engenharia de Energia. O equipamento possui um braço de alavanca com 0,155 m de comprimento e uma cinta que envolve o eixo da máquina a ser medida. Na Tabela 3 e 4 encontram-se os valores adquiridos na realização do ensaio. A tensão e corrente do motor que aciona o eixo de entrada da engrenagem foram medidas através de dois multímetros, sendo que, a tensão 124V e corrente 2.09A. Quando o motor está em vazio, corrente 0,64A e tensão 124V.

Figura 21 – Freio de Proni.



Fonte: O Autor, 2017.

Tabela 3 – Dados de torque.

Ensaio 1	Rotação (rpm)	
	Entrada	Saída
Sem torque no eixo	500	2155
Torque máximo	490	2095
Medida do Freio de Proni	x	200 g
Torque simulado	1,53 Nm	0,34 Nm
Torque medido	1.85 Nm	0,30411 Nm

Tabela 4 – Dados de torque.

Ensaio 2	Rotação (rpm)	
	Entrada	Saída
Sem torque no eixo	504	2173
Torque máximo	493	2120
Medida do Freio de Proni	x	200 g
Torque simulado	1,53 Nm	0,34 Nm
Torque medido	1.85 Nm	0,30411 Nm

O erro (11) de torque pode ser determinado pela divisão do torque de saída medido pelo torque de saída teórico.

$$e = \left(1 - \frac{0,30411}{0,34}\right) * 100 = 10,55\% \quad (11)$$

A eficiência (13) da EM pode ser calculada pela relação da potência mecânica de entrada e saída. A potência mecânica é a multiplicação do torque e a velocidade angular.

$$\eta (\%) = \left(\frac{T_h w_h}{T_l w_l}\right) * 100 \quad (12)$$

$$\eta (\%) = \left(\frac{0,30411 * 2155}{1,85 * 500}\right) * 100 = 70,84\% \quad (13)$$

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi feita uma revisão bibliográfica sobre EM, pode-se observar que apesar de terem sido descobertas no início do século, somente por volta da década de 1980 começaram a despertar mais interesse devido ao surgimento de novos materiais. Nos anos 2000, uma topologia de EMC de alto desempenho foi proposta e com transmissão de torque comparada a engrenagens mecânicas.

Na modelagem computacional, os tipos de materiais e dimensões foram adicionados ao *Ansys Maxwell*, assim como, a velocidade do rotor externo a qual o motor de corrente contínua aciona. Com isso, os dados de velocidade de saída e torque foram obtidos após a simulação e posteriormente comparados aos dados experimentais.

A construção da EM foi extremamente cuidadosa, pois cada peça foi usinada para um encaixe justo. Foi necessária atenção especial para o corte e colagem das peças ferromagnética pois, são submetidos a campos magnéticos que variam no tempo.

Os dados adquiridos pelo protótipo apresentado foram satisfatórios, uma vez que o erro de velocidade foi menor que 5% e o erro de torque 11%. A causa da alta inércia no início do movimento da EM pode ser atribuída a espessura do rotor externo, na qual foi proposto pela empresa de usinagem o valor mínimo de 5mm, assim como, o fato de que os moduladores cortados manualmente também contribuíram para a eficiência da EM que atingiu 70%.

Portanto, fica claro que esse tipo de engrenagem se torna atrativo devido as inúmeras vantagens e aplicações. A tecnologia de EM ainda é relativamente nova, essa é provavelmente a razão pela qual as empresas hesitam em implementá-las nos seus produtos.

REFERÊNCIAS

ATALLAH, K.; HOWE, D. **A novel High-Performance Magnetic Gear**. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 37, no. 4, July 2001.

FAUS, H. T., **Magnet gearing**. U.S. Patent 2 243 555, 1940.

FUJITA, T.; ANDO, Y.; NAGAYA, K.; OKA, M.; TODAKA, T.; ENOKIZONO, M.; SUGIURA, K. **Surface Magnet Gears with a New Magnet Arrangement and Optimal Shape of Stationary Pole Pieces**. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2013, 5, 243-249.

JORGENSEN, Frank Thorleif. **Design and construction of permanent magnetic gears**. Aalborg Universitet, 2010.

KUCUK, Fuat; MOUSAVI, Sadra. **Development of a Novel Coaxial Magnetic Gear**. 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 2017.

NEULAND, A. H. **Apparatus for transmitting power**. U. S. Patent 171 351, 1915.

NEVES, Carlos Guilherme C.; FILHO, Aly Flores. **Magnetic Gearing Electromagnetic Concepts**. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 16, No. 1, 2017.

NEVES, Carlos Guilherme C.; FILHO, Aly Flores. **Coaxial Magnetic Gear: A Pedagogic Approach**. XVII International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, 2015.

NEVES, Carlos Guilherme C.; GOETTEMS, Mateus Felipe; FILHO, Aly Flores. **Construction of a Coaxial Magnetic Gear**. 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, 2017.

RASMUSSEN, Peter Omand; ANDERSEN, Torben Ole; JORGENSEN, Frank T.; NIELSEN Orla. **Development of a High-Performance Magnetic Gear**. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 3, 2005.

WU, Yi-Chang; JIAN, Bo-Syuan. **Finite-Element Analysis of the Magnetic Field in a Magnetic Gear Mechanism**. Applied Mechanics and Materials, vol. 479-480, 2014.

APÊNDICE A – Desenhos técnicos para usinagem das peças.

Figura 22 – Face frontal do rotor externo.

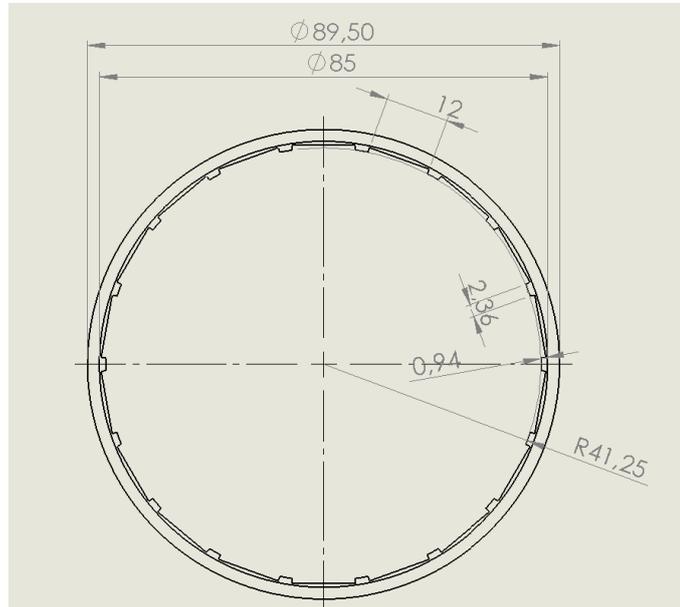


Figura 23 – Face lateral do rotor externo.

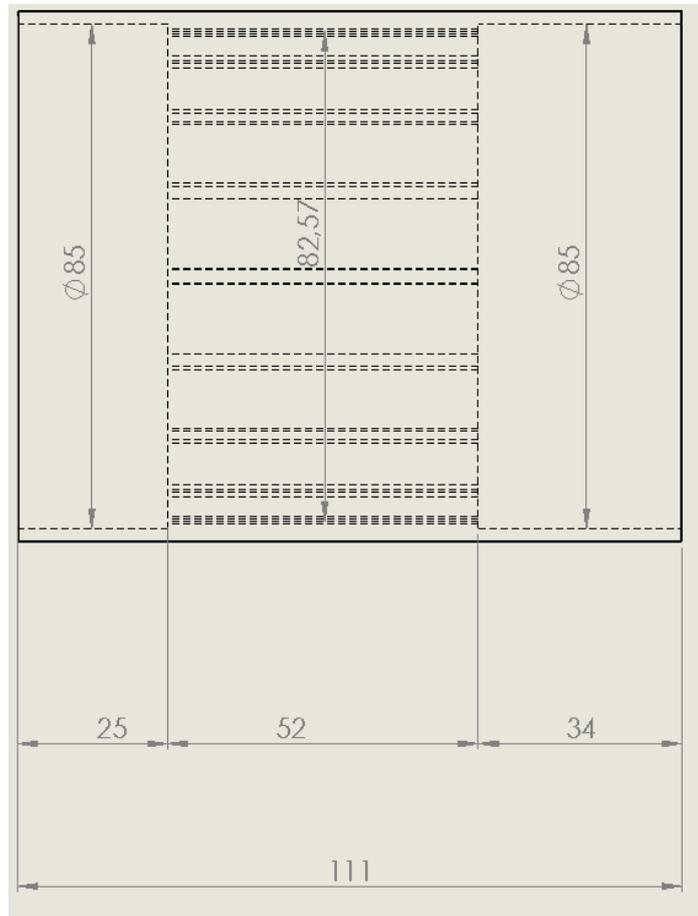


Figura 24 – Vista isométrica do rotor externo.

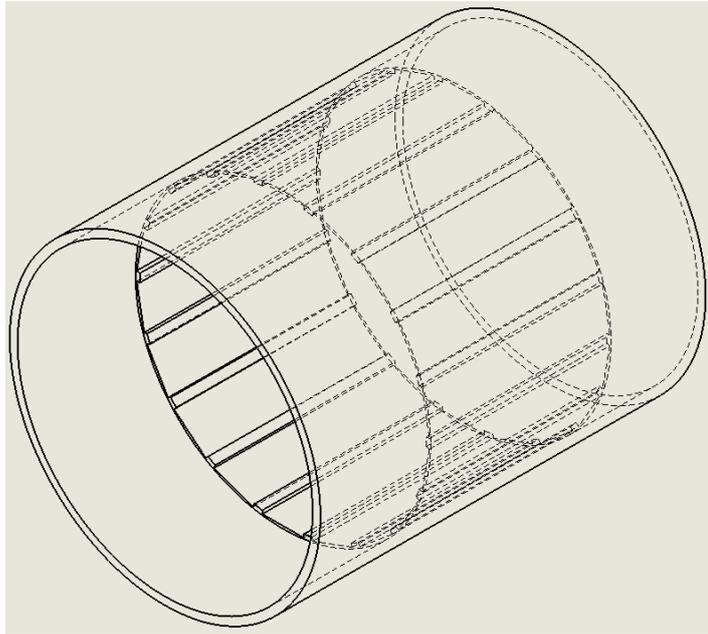


Figura 25 – Dimensões dos moduladores.

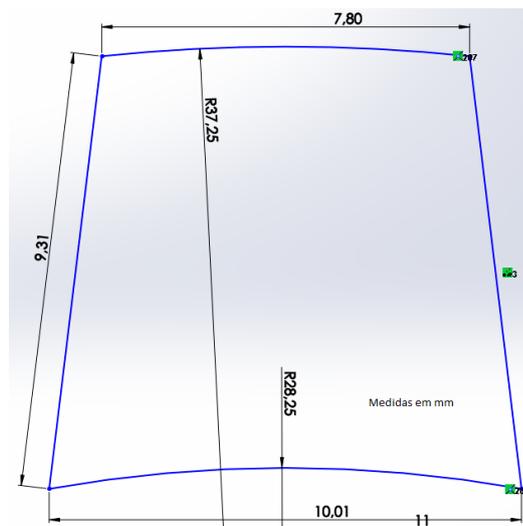
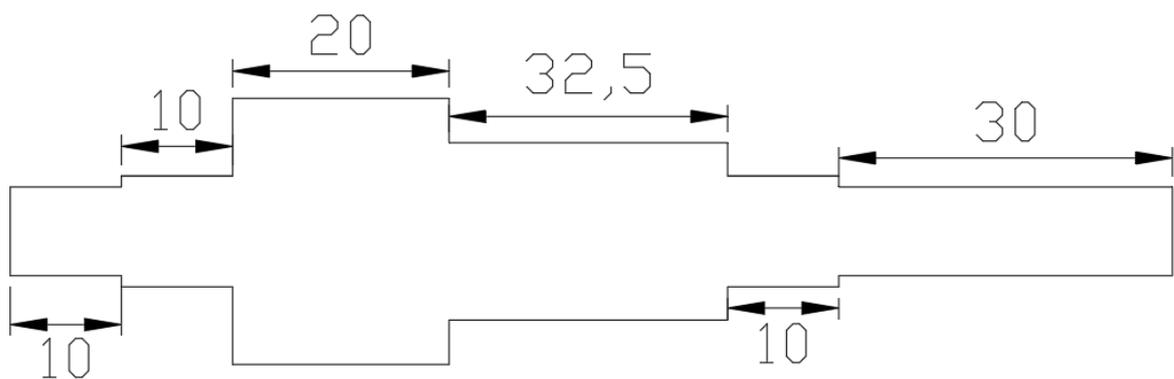


Figura 26 – Dimensões do eixo em mm do rotor interno.



APÊNDICE B – Artigo publicado no *18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering 2017*.



Technical Program – ISEF'2017

Thursday 14th September

18:00 - 19:15

Poster Session (P2-B)

CHAIRMAN: Daniel Roger, Do-Kwan Hong, Leszek Szycha

TITLE: Electrical machines, transformers, actuators, micromachines

Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi, Hirofumi Asai, Masahide Shibata, Naotaka Toida, Tomoyasu Furukawa, Hiroshi Kawano
Interbar Current Analysis of Skewed Squirrel-cage Induction Motor Using 3-D Parallel Finite Element Method

Peyman Naderi

Double Cage Induction Machines Modeling by Magnetic Equivalent Circuit

C. G. C. Neves; A. F. F. Filho

Pseudo Direct Drive Simulation and Analysis

Marcos Susin; Marilia A. da Silveira; Aly F. Flores Filho; David G. Dorrell

Modeling, Design and Testing of a Planar Actuator with an Ironless Armature and Orthogonal Windings

C. G. C. Neves; M. F. Goettems; A. F. F. Filho

Construction of a Coaxial Magnetic Gear

A. Zanatta; B. Boff; P. R. Eckert; A. F. Flores Filho; D. G. Dorrell

Tubular Linear Permanent Magnet Synchronous Machine Applied to Semi-Active Suspension Systems

Akira Kohara, Katsuhiko Hirata, Noboru Niguchi, and Kazuaki Takahara

AC/DC Current Ratio in a Current Superimposition Variable Flux Reluctance Machine

N. Naoe and A. Imazawa

Experimental Research of a Core-less Linear Generator with Applied Halbach Magnet Array

Kazumi Kurihara, Naoki Kurihara, and Tomotsugu Kubota

Energy-Saving Operation of the Hysteresis Motor Utilizing Overexcitation Phenomenon

Kassem Roumani and Benedikt Schmuelling

Performance Comparison of Internal Magnet and Inset Surface Magnet Low Voltage PMSM for In-Wheel Direct-Drive Application

Mirosław Wcislik, Karol Suchenia

Energy Effectivity of Switchable Reluctance Motor

Bourahla Kheireddine, Belli Zoubida, Tarik Hacib and Imad Achoui

Improvements of Bat Algorithm Using Crossover Technique and Hybridization with Nelder Mead Simplex Method

Christian Heister, Markus Henke

A Fast Analytical Calculation Methodology for Topology Studies of Flux Reversal Machines

Krzysztof Majer

Magnetizing Currents of Transformers Operating with Submagnetizing of DC Flux

Emile DEVILLERS, Jean LE BESNERAIS, Michel HECQUET, Jean-Philippe LECOINTE

Effect of the load angle on radial and tangential magnetic forces in SPMSM

D. Kamińska, T. Sapiński, M. Kucharczyk-Pośpiech, M. Wilczyński, N. Aitken, A. Della Rocca, R. Wietsma

Virtual Reality as a Tool in Mechatronics Education

Mais informações: <http://isef.p.lodz.pl/program-online/>

Construction of a Coaxial Magnetic Gear

C. G. C. Neves^{1*}, M. F. Goettems², A. F. Flores Filho³

^{1*}CENG/Universidade Federal de Pelotas, Brazil

carlos.neves@ufpel.edu.br

²Curso de Eng. de Energia/Universidade Federal do Pampa, Brazil

goettems@icloud.com

³DELET/ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brazil

aly.flores@ufrgs.br

Abstract—In this paper, the assembly manufacturing steps and materials applied in a construction of a Coaxial Magnetic Gear are presented. By means of the resulting prototype, tests were carried out and the results are compared with simulated ones.

Keywords—Magnetic gear, permanent magnet, modulators, bearings, test-bed.

I. INTRODUCTION

The idea of MGs can be tracked down to the beginning of the 20th century. In 1913, a US Patent Application described an electromagnetic gearing which should be the original topology [4], but almost no one was interested in it at that time. After a MG topology quite similar to a mechanical spur gear was proposed by Fausin 1941 [5], people gradually started to pay more attention to MGs. However, low utilization and poor performance of ferrite permanent magnet (PM) material made it hardly possible to be widely used by the industry. When the high-performance neodymium iron boron (NdFeB) PM material was conceived in the 1980s, the research on MGs aroused great interests again. Naturally, the earlier MG topologies were converted from mechanical gear topologies. These converted MGs simply replaced the slots and teeth of iron core by N-poles and S-poles of PMs, respectively. The low utilization of PMs was the key problem which caused poor torque density. In 2001, Attalla and Howe proposed a high-performance Magnetic Gear named as Coaxial Magnetic Gear (CMG), whose principle of operation was based on the magnetic modulation produced by two concentric permanent magnet arrays via the ferromagnetic pieces or modulators [1, 2]. The CMG comprises three components as shown on Fig. 1: an inner permanent magnets array (IPMA) or high speed rotor with p_h pole pairs; an outer rotor permanent magnets array (OPMA) or low speed rotor comprehending p_l pole pairs. The inner ferromagnetic array (IAR) or static modulators putted between the two rotors, with (n_p) components.

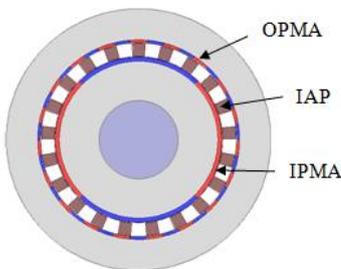


Fig. 1. Coaxial Magnetic Gear.

II. MAGNETIC GEAR AIR GAP FLUX DISTRIBUTION

Flux harmonics are essential for the operation of a geared machine. The flux distribution in the outer air gap as function of time will be mathematically expressed when the OPMA is removed and only the IPMA and IAR remain. The magneto motive force (MMF) of the IPMA and the permeance of the IAR are mathematically expressed by (1) and (2), respectively

$$F_r(\omega) = \sum_{h=1}^{\infty} \frac{A}{(2h-1)} \sin\{(2h-1)p_h(\omega - \dot{S}_h t)\} \quad (1)$$

$$P_r(\omega) = P_0 + \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{B}{(2\ell-1)} \sin\{(2\ell-1)n_p(\omega - \dot{S}_p t)\} \quad (2)$$

Where A is the permanent magnet MMF amplitude, B is the modulators permeance amplitude, P_0 is the permeance of vacuum and the respective rotation velocities of the IPMA and IAR are given as \dot{S}_h and \dot{S}_p .

The product of (1) and (2) yields the outer air gap flux distribution:

$$w_r(\omega) = \sum_{h=1}^{\infty} \frac{AP_0}{(2h-1)} \sin(C_1 \omega - \dot{S}_h t) + \frac{1}{2} C_0 \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} \cos(C_2 - C_1) \left(\omega - \frac{C_2 \dot{S}_p - C_1 \dot{S}_h}{C_2 - C_1} t \right) \\ - \cos(C_2 + C_1) \left(\omega - \frac{C_2 \dot{S}_p + C_1 \dot{S}_h}{C_2 + C_1} t \right) \end{array} \right\} \quad (3)$$

Where $C_0 = \frac{AB}{(2h-1)(2\ell-1)}$, $C_1 = (2h-1)p_h$ and $C_2 = (2\ell-1)n_p$.

From (3), it can be seen that flux density distribution consists of three main components: one fundamental component and two harmonic components $C_2 \mp C_1$. The fundamental component (FC) depends only of $F_r(\omega)$, given by Eq. (1) which depends on the spatial harmonic number C_1 and on the rotation speed \dot{S}_h , that is exactly the same speed of $F_r(\omega)$. The other two harmonic components (called H1 and H2) exist due to the permeance of the IAR pole-pieces which modulates $F_r(\omega)$. Also, from (3) it can be seen that the angular velocities of H1 and H2 are different from that of the MMF. This means that when the IPMA is rotated, the fundamental (FC) follows the IPMA, but H1 and H2 do not follow it. This is

the main point of the operating principle of a magnetic gear. Either H1 or H2 can be chosen to create a magnetic gear, but usually H1 is chosen due to its higher flux density. Figure 2(a) shows the computed flux distribution in the outer rotor at $t=0$ sec using FEM for a magnetic gear shown in Fig. 1, and its harmonic analysis is shown in Fig. 2(b). The dominant components are 4, 10, and 24, and each corresponds to FC, H1 and H2, respectively, since $p_h = 4$ and $np = 14$, when $h = \ell = 1$ in Eq. 3.

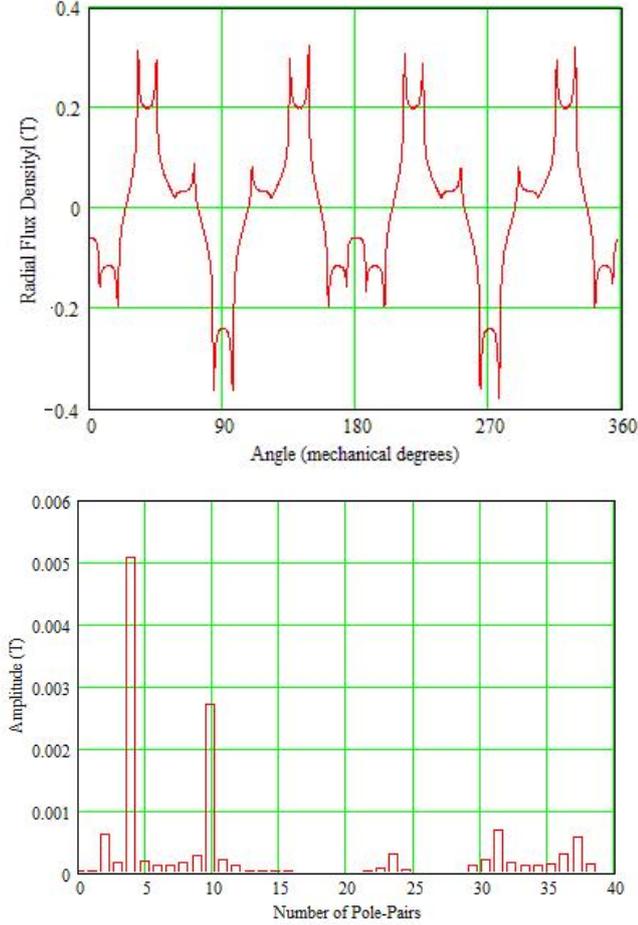


Fig. 2. (a) Radial field density at outer air-gap due to the inner magnets only, with modulating rotor. (b) Radial field density harmonic content at outer air-gap due to the inner magnets only, with modulating rotor.

Since H1 has much higher flux density than H2, p_l must be equal to 10 ($n_p - p_h = 10$). Taking this as general rule, the following generic poles relation is adopted:

$$p_h + p_l = n_p \quad (4)$$

III. MAGNETIC GEARED MACHINES GEAR RELATIONS

If each term of (4) is multiplied by its respective speed, it gets the following expression:

$$p_h \dot{S}_h + p_l \dot{S}_l = n_p \dot{S}_p \quad (5)$$

Where, \dot{S}_h is speed of inner rotor, \dot{S}_l is speed of the outer rotor and \dot{S}_p is the speed of modulator. When one of the three parts of the gear is stationary, there will be a constant relation or *gear ratio* (G_r) between the speeds of other two parts. For example when the modulators are stationary ($\dot{S}_p = 0$) the machine works as mechanical gear, G_r equal to 2.5 since $p_l = 10$ and $p_h = 4$:

$$G_r = \frac{\dot{S}_h}{\dot{S}_l} = -\frac{p_l}{p_h} \quad (6)$$

Therefore, the relation between the speeds is inversely proportional to the ratio between the numbers of pole pairs, and rotors run in opposite directions. If it is considered there are no losses, the power in inner rotor is equal to power in outer rotor, then:

$$\frac{T_h}{T_l} = -\frac{\dot{S}_l}{\dot{S}_h} = -\frac{p_h}{p_l} = \frac{1}{G_r} \quad (7)$$

Therefore, the ratio between the torques is directly proportional to ratio between the numbers of pole pairs. Alternatively, when the outer magnet array is held stationary ($\dot{S}_l = 0$), and the modulators are driven by a turbine, the machine works as magnetic geared generator, and the gear ratio becomes:

$$G_r = \frac{\dot{S}_h}{\dot{S}_p} = \frac{np}{p_h} \quad (8)$$

Therefore, the relation between the speeds is inversely proportional to the ratio between the modulators and numbers of pole pairs of inner array, and both rotors run in the same direction. If it is considered there are no losses, the power in inner rotor is equal to power in the modulators, then:

$$\frac{T_p}{T_h} = \frac{\dot{S}_h}{\dot{S}_p} = \frac{np}{p_h} = G_r \quad (9)$$

As both shafts are now rotating in the same direction, a higher gear ratio of 5.5 is obtained since $np = 14$ and $p_h = 4$.

IV. MAGNETIC GEAR ASSEMBLY

Figure 3 shows the exploded view of the magnetic gear with an external diameter of 140 mm and Fig.4 shows its transversal section.



Fig. 3. CGM exploded view.

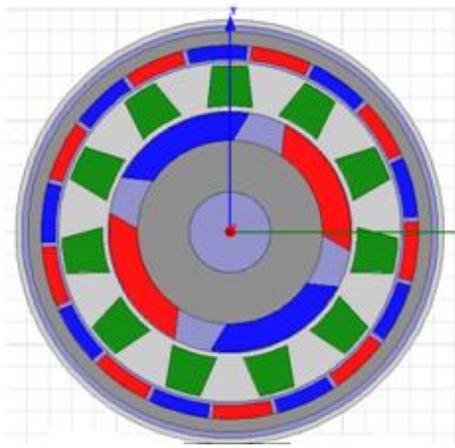


Fig. 4. (a) Transversal section of the coaxial magnetic gear.

The outer rotor comprises a 1020 steel cylinder where 18 slots were punched, as shown on Fig. 5, to receive the 400 mT – strontium ferrite permanent magnets.



Fig. 5. Steel Cylinder

In order to reduce cost, each modulator was cut from silicon-iron laminations belonged to an old electric transformer. The axial length of the gear is 48mm and the thickness of each modulator lamination is 0.5 mm, so 1056 units were employed to assembly the 11 modulators as shown in Fig. 6.



Fig. 6. Modulators units.

To keep the modulators in their correct positions a mold was made, as shown on Fig. 7(a). To give stiffness to the structure, the mold was filled with Epoxy resin as shown in Fig. 7(b).



Fig. 7. Modulators. (a) Mold. (b) Mold with Epoxy resin.

The internal rotor belonged to a Permanent Magnet Direct Current (PMDC) motor and only the shaft was manufactured. Figure 8 shows the internal rotor plus shaft and the corresponding bearings (45 mm diameter each).



Fig. 8. PMDC rotor, shaft and 45 mm bearings.

Figure 9 shows the internal rotor plus wooden cylinders, which are used to avoid the modulators axial movement and the bearings (85 mm diameter each) that support the external rotor.



Fig. 9. PMDC rotor, 85 mm bearings and wooden cylinder.

V. SPEED MEASUREMENT TEST-BED

Figure 10 shows the internal rotor of CMG connected to the drive motor through a mechanical coupling. The output speed was measured at the external rotor through a stroboscopic meter which marked 2250 rpm. Since the drive motor speed was set to 500 rpm, the measured gear ratio gives 4.5 according (6). Since this magnet gear has a low speed rotor comprehending 9 pole pairs and high speed rotor comprehending 2 pole pairs the pole-pairs relation gives 4.5 according to (6) as well. Table I summaries these results. Then, one can conclude that the constructed magnetic gear works properly.

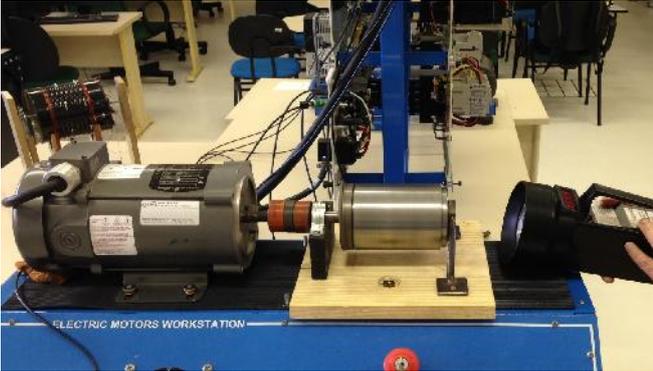


Fig. 10. Output speed measurement through a Stroboscopic meter.

TABLE I. GEAR RATIO COMPARISON

<i>Measured Speed (rpm)</i>		<i>Pole-pairs</i>	
2250	500	9	2
4.5		4.5	

VI. CONCLUSION

In this paper, the assembly manufacturing steps and materials applied in a construction of a Coaxial Magnetic Gear were demonstrated. The CGM was tested and worked properly, since the measured gear relation has agreed with the theory.

REFERENCES

- [1] Atallah, K.; Howe, D., "A novel high-performance magnetic gear," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, No. 4, 2844-2846, 2001.
- [2] Atallah, K., Calverley, S. D., Howe, D., "Design, analysis and realization of a high-performance magnetic gear," IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 151, No. 2, 135-143, 2004.
- [3] Neves, C.G.C.; Flores, A.F.F. "Magnetic Gearing Electromagnetic Concepts. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications", Vol. 16, 108-119, 2017.
- [4] Neuland, A. H., "Apparatus for transmitting power," U.S. Patent 1 71 351, 1916.
- [5] Faus, H. T., "Magnet gearing," U.S. Patent 2 243 555, 1941. A.E. Eiben and J.E. Smith, Introduction to Evolutionary Computing, Springer, 2003.