

DENNER CEZAR DUARTE
FRANÇOIS DE SOUZA MARTINS

Projeto de um Microaerogerador de Ímãs Permanentes

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos do autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC nº 1204/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de *leitura, impressão e/ou download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG):


FRANÇOIS DE SOUZA MARTINS e DENNER CEZAR DUARTE

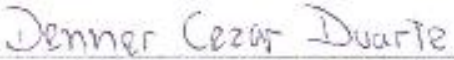
PROJETO DE MICROAEROGERADOR DE ÍMÃS PERMANENTES

2. Informações de acesso ao documento:


Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF do TCCG.


FRANÇOIS DE SOUZA MARTINS


DENNER CEZAR DUARTE

Ciente e de acordo:


GEYVERSON TEIXEIRA DE PAULA

Prof. Dr. Geilverson Teixeira de Paula
Coord. de Estágio e Projeto Final
do Curso de Engenharia
Elétrica EMC/UFG

Data: 14 / 12 / 18

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data do depósito. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

DENNER CEZAR DUARTE
FRANÇOIS DE SOUZA MARTINS

Projeto de um Microaerogerador de Ímãs Permanentes

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola
de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação –
EMC, da Universidade Federal de Goiás.

Curso de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula.

Goiânia
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Martins, François de Souza

Projeto de Microaerogerador de Ímãs Permanentes [manuscrito] /
François de Souza Martins, Denner Cezar Duarte. - 2018.
25 f.: il.

Orientador: Prof. Geyverson Teixeira de Paula.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2018.
Bibliografia. Anexos.

Inclui fotografias, gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista
de tabelas.

1. Máquinas Elétricas. 2. Ímãs Permanentes. 3. Energia Eólica. 4.
Brushless AC. I. Duarte, Denner Cezar. II. Paula, Geyverson Teixeira
de, orient. III. Título.

CDU 621.3



ATA DE AVALIAÇÃO DE PROJETO FINAL

Aos 13 dias do mês de dezembro do ano de 2018,

foi apresentado e defendido o Projeto Final intitulado Projeto de um Micro-aerogerador de Ímãs Permanentes

perante a banca examinadora composta pelos membros:

1. Geoverson Teixeira de Paula, orientador e presidente;
2. Renato Jayme Dias; 3. Igor Kopsch

Após a exposição do trabalho por parte do(s) autor(es), aluno(s) do curso de

Engenharia Elétrica, foram lho(s) atribuídas as seguintes notas pelos membros da

banca:

Aluno(s)	Membro 1	Membro 2	Membro 3
<u>Francois de Souza Martins</u>	<u>10,0</u>	<u>10,0</u>	<u>10,0</u>
<u>Pemner César Duarte</u>	<u>10,0</u>	<u>10,0</u>	<u>10,0</u>

Nada mais havendo a registrar, eu, Igor Kopsch, designado secretário "ad hoc" da banca examinadora, lavrei a presente Ata do ocorrido, a qual, lida e considerada conforme, vai assinada por mim e pelos membros da banca.

Goiânia, 13 de dezembro de 2018.

Paula
Renato Jayme Dias

Dedicatória:

À família e amigos que, de diversas formas, ajudaram na concretização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula pela orientação e apoio de extrema excelência e transmitir valores éticos e profissionais à formação de novos engenheiros.

Aos colegas e amigos de graduação que ao longo da mesma se tornaram não só amigos de profissão como pessoais, tendo uma carga fundamental para conclusão deste trabalho.

A todos profissionais da Universidade Federal de Goiás, por todo apoio e estrutura concedidos para realização e formação profissional ao longo dos cinco anos de graduação.

RESUMO

O trabalho que segue trata do projeto e construção de um microaerogerador *brushless* AC de ímãs permanentes no rotor, a partir do reaproveitamento de um motor de indução, destinado a suprir demandas de pequenas instalações rurais na região de Goiás. Utilizando o método de elementos finitos foi possível obter previsões de desempenho do gerador baseando-se nos parâmetros principais que poderiam ser alterados como o número de espiras, o tipo de enrolamento, o diâmetro do fio de cobre esmaltado usado nas bobinas, as dimensões e materiais do rotor, a quantidade, composição, geometria e produto de energia dos ímãs e outros que serão comentados ao longo deste documento. A comparação entre os resultados práticos dos ensaios realizados no gerador e as simulações geradas pelos *softwares* se mostraram satisfatórias. O gerador é capaz de produzir ondas senoidais trifásicas que possuem alta fidelidade ao ideal, obtendo um $R^2 = 0,9989$ quando comparamos um ciclo de tensão do gerador com uma função seno, além de um espectro de harmônicas onde as mais expressivas (2ª e 3ª harmônicas) representam, respectivamente, 2% e 1,7% da amplitude da fundamental, demonstrando a qualidade do produto final. Nos ensaios com carga obteve-se uma regulação de tensão satisfatória com uma baixa queda de tensão (ver Tabela 6). Devido à alta quantidade de polos, no processo de retificação da corrente foi possível minimizar bastante o *ripple* usando uma baixa capacitância no circuito, isso implica um baixo investimento em bancos de capacitores para disponibilização da energia gerada à rede. O custo da máquina, aliada ao reaproveitamento de peças, propiciou um baixo custo, totalizando R\$ 204,00 ao término de sua construção.

Palavras-chave: Máquinas Elétricas, Ímãs Permanentes, Energia Eólica.

ABSTRACT

This following work deals with the design and construction of a Permanent Magnet AC brushless micro-aerogenerator, based on a preexisting induction motor stator, designed to meet the demands of small rural installations in the region of Goiás. Using the finite element method, it was possible to obtain generator performance predictions based on the main parameters that could be changed such as the number of turns, the type of winding, the diameter of the enameled copper wire used in the coils, dimensions and materials of the rotor, the quantity, composition, geometry and energy product of the magnets and other parameter which will be discussed throughout this document. The comparison between the practical results of the tests performed on the generator and the simulations generated by the software proved to be satisfactory. The generator is capable of producing three-phase sine waves that have high fidelity to the ideal, obtaining a $R^2 = 0.9989$ when comparing a voltage cycle of the generator with a sine function, in addition to a spectrum of harmonics where the most expressive (2nd and 3rd harmonic) represent, respectively, 2% and 1.7% of the fundamental amplitude, demonstrating the quality of the final product. In the load tests a satisfactory voltage regulation was obtained with a low voltage drop (see Table 5). Due to the high number of poles, in the process of rectifying the current it was possible to minimize the ripple using a low capacitance in the circuit, this implies a low investment in capacitor banks to make available the generated energy to the network. The cost of the machine, combined with the reuse of parts, provided a low cost, totaling R \$ 204.00 at the end of its construction. The cost of the machine, combined with the reuse of parts, provided a low cost, totaling R \$ 204.00 at the end of its construction.

Key-Word: Eletric Machines, Permanent Magnet, Wind Energy

ÍNDICES DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz energética de micro e mini geração Brasileira.	15
Figura 2 – Consumo de eletricidade por setores no Brasil em 2016.	15
Figura 3 – Estrutura interna de uma turbina eólica.	18
Figura 4 - Modelo 3D da carcaça obtida.	20
Figura 5 - Modelo 3D do projeto de eixo com rolamentos.	21
Figura 6 – (a) Vista frontal do estator; (b) Detalhe do dente do estator; (c) Vista em perspectiva do estator.....	23
Figura 7 – (a) Estator a ser reaproveitado; (b) Estator a ser reaproveitado sem bobinas e limpo.	24
Figura 8 – (a) vista frontal do rotor; (b) vista em perspectiva do rotor; (c) detalhe do rasgos do rotor;	26
Figura 9 – (a) eixo a ser reaproveitado (ainda encaixado no rotor do tipo gaiola de esquilo); (b) vista em perspectiva do eixo, rotor usinado e rolamento; (c) detalhe da montagem dos ímãs na superfície do rotor.....	27
Figura 10 - Curva de Histerese de um ímã.	28
Figura 11 – Curva de magnetização para ímã neodímio Grade N35.....	29
Figura 12 - Dimensionamento dos enrolamentos no programa Koil 1.1.....	30
Figura 13 - Diagrama dos enrolamentos dispostos por fase.	32
Figura 14 - Diagrama simplificado de geradores.	33
Figura 15 - Projeto da máquina no <i>software</i> FEMM.....	35
Figura 16 - Detalhe dos ímãs e dentes no <i>software</i> FEMM.	35
Figura 17 - Fluxo concatenado projetado sobre a máquina.....	36
Figura 18 – (a) Onda de tensão trifásica; (b) detalhe da fase A;	38
Figura 19 - Representação do fio de cobre usado.....	39
Figura 20 - Bobinadeira feita manualmente.	41
Figura 21 - Enrolamento sendo bobinado com isolamento.....	42
Figura 22 - Enrolamento bobinado nas ranhuras do estator.	43
Figura 23 - Micro gerador ao final da construção.	44
Figura 24 - Detalhe interno do micro gerador.	45
Figura 25 - Vista explodida do projeto no <i>software</i> SOLIDWORKS.....	45
Figura 26 - Esquema de acionamento do micro gerador	46

Figura 27 - a) Tensões de fase. b) Ondas geradas.	47
Figura 28 – Tensão trifásica obtidas em osciloscópio.....	48
Figura 29 - Comparação entre curva teórica e prática.....	48
Figura 30 - Espectro de harmônicos.....	49
Figura 31 – Tensão a vazio X Velocidade.....	50
Figura 32 – (a) Diagrama do circuito de carga; (b) Circuito em bancada.....	51
Figura 33 - Lâmpadas durante o ensaio do micro gerador.....	53
Figura 34 – Circuito retificador.....	54
Figura 35 – (a) Tensão retificada sem filtro. (b) Tensão retificada com capacitor.....	55
Figura 36 – (a) Retificador em bancada. (b) Efeito luminoso produzido.....	56

ÍNDICES DE TABELAS

Tabela 1 - Winding Factor para diferentes configurações.	31
Tabela 2 – Fluxo concatenado e FEM obtidos por ângulo.	37
Tabela 3 – Área ocupada na ranhura.	39
Tabela 4 – Dados da bobina.....	40
Tabela 5 – Dados do fio utilizado.....	40
Tabela 6 - Resultados por carga.....	52
Tabela 7 – Custos de projeto.....	58
Tabela 8 – Tipos de rolamentos NSK.	63

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	7
RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
ÍNDICES DE FIGURAS	10
ÍNDICES DE TABELAS	12
SUMÁRIO.....	13
1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVO	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4. DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA	20
4.1. Carcaça, eixo e rolamentos	20
4.2. Estator	22
4.3. Rotor e Ímãs.....	25
4.4. Disposição dos enrolamentos.....	30
4.5. Número de espiras, fluxo concatenado e FEM gerada	33
4.6. Escolha do fio e Enrolamento da Máquina	39
4.7. Encaixe e fechamento da carcaça	44
5. RESULTADOS	46
5.1. Acoplamento entre gerador e máquina motriz.....	46
5.2. Perfil de tensão gerada	47
5.3. Ensaio a vazio	50
5.4. Ensaio com carga	51
5.5. Ensaio com retificação.....	54
6. CONCLUSÃO.....	57
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

8.	Anexo A - Script em LUA para fluxo concatenado por ângulo	61
9.	Anexo B - Tabela de rolamentos	63

1. INTRODUÇÃO

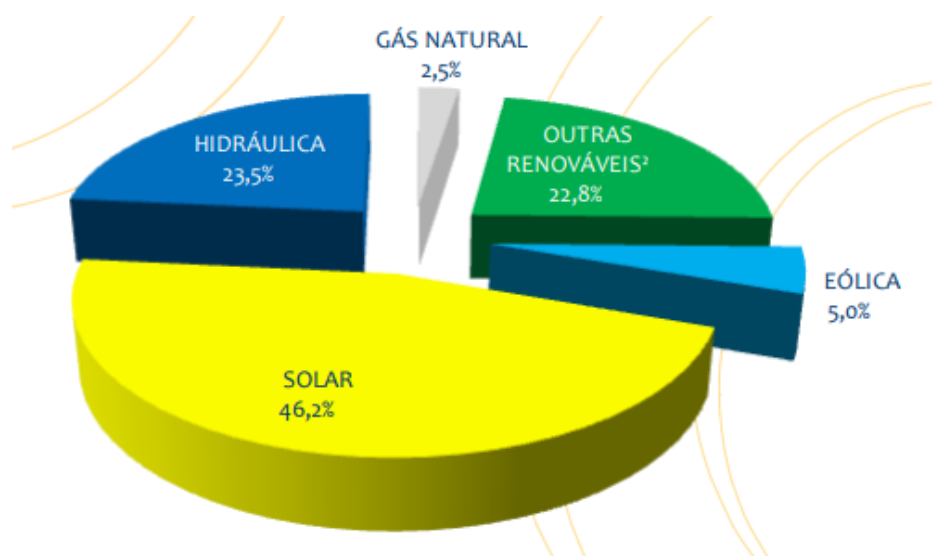
Os meios de obtenção de energia com o passar das décadas estão se desenvolvendo alinhados com as novas tecnologias que vem emergindo, isso traz diferentes possibilidades e benefícios para geração de energia elétrica, e devido às grandes tarifas impostas, quem necessita dessa energia para consumo pessoal e/ou comercial busca por métodos mais baratos a fim de economizar por meio de eficiência energética e geração própria.

Algo comum em grandes empresas com larga produção é o uso de geradores em horário de ponta, que se refere ao período composto por 3 (três) horas diárias consecutivas definidas pela resolução 414 da ANEEL, considerando a curva de carga do sistema elétrico brasileiro (ANEEL, 2016). Este horário é aplicado a grandes consumidores, principalmente em fábricas e zonas rurais. Como as tarifas durante esse horário tendem a ser cinco vezes maior, estes consumidores são levados a utilizarem outras fontes para suprir a demanda de energia neste período. Porém, com a tarifa dos combustíveis cada vez menos acessíveis, o diesel usado para o funcionamento do gerador acaba se tornando uma alternativa já não mais viável levando os engenheiros eletricitistas a pensarem em outras soluções.

Outro fator importante, é a discussão ambiental dos recursos que utilizamos para a geração de energia, onde a matriz energética renovável tem sido questão constante no debate entre governantes, para buscar impactos menos nocivos ao meio ambiente. Hoje, a estrutura que a sociedade alcançou e as condições ambientais que são observadas demonstram claramente como a população está sendo afetada, sendo necessário alcançar um ponto de equilíbrio entre o desenvolvimento e a sustentabilidade. A Figura 1, demonstra como está composta a matriz energética de micro e mini geração distribuída no Brasil para o ano de 2017 (BEN, 2018).

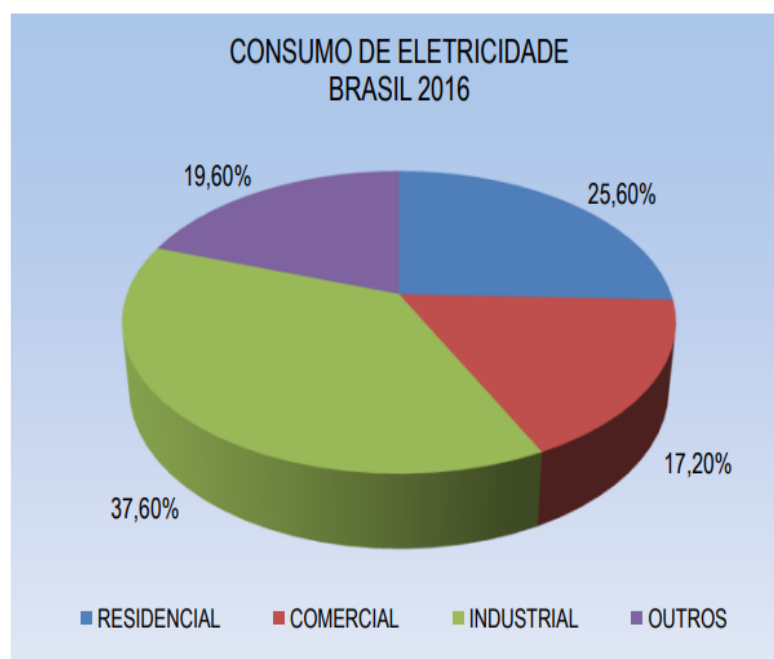
As soluções amplamente debatidas para esta questão são imediatistas e particulares, visando prioritariamente objetivos socioeconômico de grandes empresas. Estes objetivos devem fundamentalmente satisfazer inicialmente os processos de maiores impactos, mas deixa de lado, muitas vezes, os pequenos consumidores de energia, que agrupados, representam uma parcela significativa da demanda energética mundial. Na Figura 2, está o atual consumo de energia elétrica por setores no Brasil para o ano de 2016 (SECIMA, 2018).

Figura 1 – Matriz energética de micro e mini geração Brasileira.



Fonte: BEN (2018).

Figura 2 – Consumo de eletricidade por setores no Brasil em 2016.



Fonte: SECIMA (2018).

No Estado de Goiás, o crescimento de pequenas usinas de energia solar, e sua utilização residencial se desenvolveu de uma forma extraordinária, um ponto positivo para a questão ambiental e eficiência energética do estado. Todavia, pouco se tem discutido sobre a utilização

de energia proveniente dos ventos, ou seja, a energia eólica, para tal fim nesta região. Isso ocorre devido à localização do estado em relação ao continente, por se encontrar geograficamente no meio da América do Sul, sendo que este meio de produção de energia é priorizado em áreas litorâneas onde há maior incidência de ventos com maiores velocidades.

Mesmo que sejam implementados sistemas de geração fotovoltaica de energia, as residências rurais ficam à mercê da disponibilidade de luz solar, i.e., sem geração de energia durante o período noturno. Por outro lado, os microgeradores podem complementar essa falta de energia, visto que à noite há a presença de ventos. Dessa forma, é possível diminuir o custo e o uso de baterias neste tipo de sistema.

Outra aplicação interessante, também na área rural, é a geração de energia eólica atuando no sistema de bombeamento de água nas fazendas, reduzindo assim o custo com irrigação e hidratação animal.

Para geração eólica de pequeno porte, é necessário um micro gerador, este pode ser projetado e construído de diversas maneiras, e uma delas é a configuração *Brushless* com ímãs permanentes no rotor, este se destaca devido a sua alta eficiência, alta densidade de energia e alta confiabilidade. (CHAU, 2008). Esse gerador tem tido crescente valorização no mercado, devido a redução no preço dos ímãs, tornando mais atrativo o seu custo-benefício em comparação as outras configurações.

2. OBJETIVO

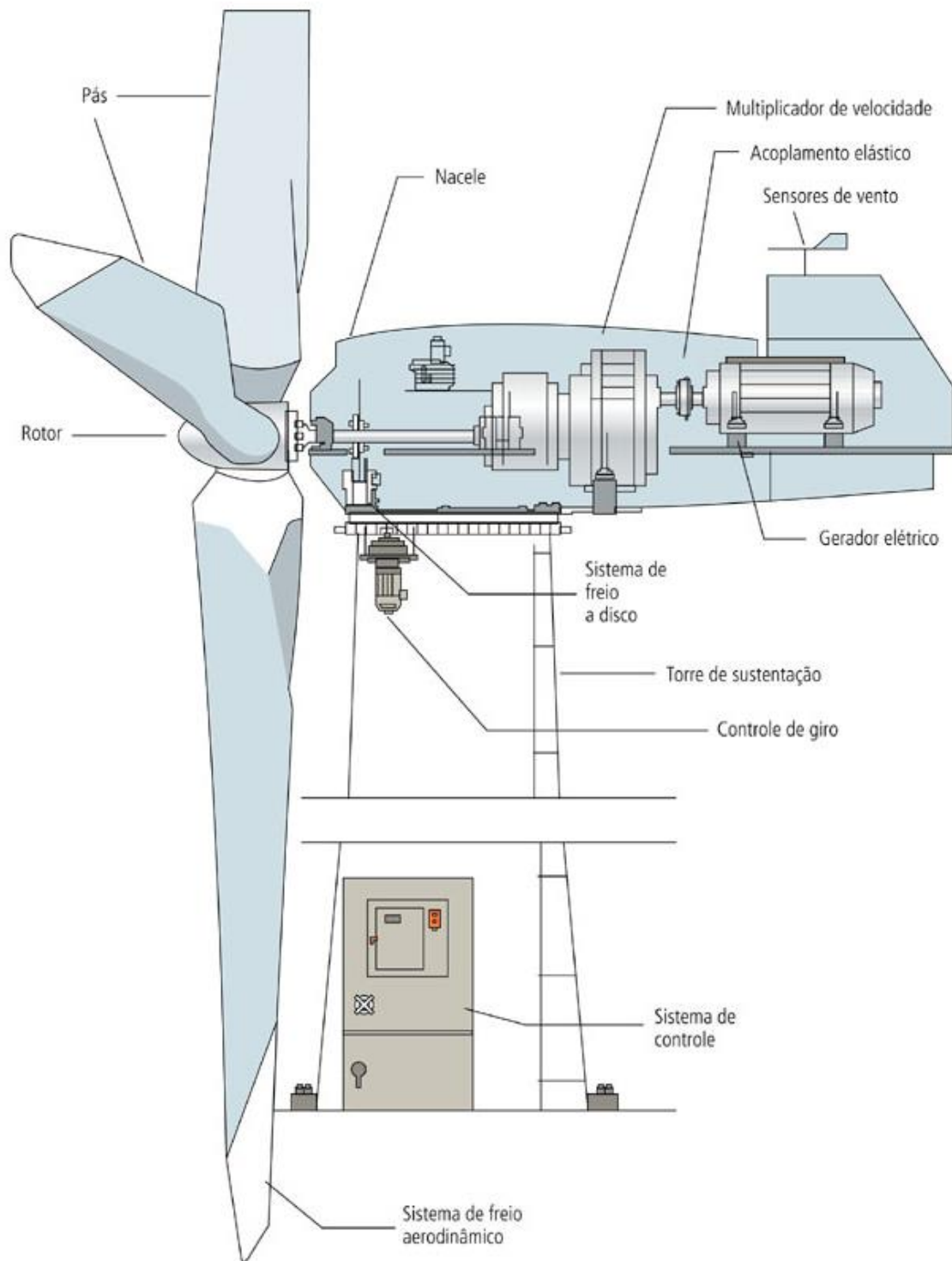
Este trabalho tem como objetivo projetar, construir e ensaiar um micro gerador, ou seja, um gerador de baixa potência projetado para o aproveitamento da disponibilidade de energia eólica, como fonte complementar de energia, em áreas rurais, áreas urbanas de pequeno porte, comunidades isoladas ou que dependem fortemente de fontes diesel/gasolina para obtenção de energia elétrica. A configuração escolhida para o motor é a *brushless AC* com ímãs no rotor, essa configuração diz respeito a motores sem escovas, no caso deste trabalho, em corrente alternada, agregando vantagens como não apresentar perdas na comutação mecânica, por centelhamento e ruído eletromagnético (OLIVEIRA JR., 1990)

Como visto na Figura 3, a estrutura completa de uma turbina para geração eólica de grande porte é composta por diversos equipamentos, destaca-se na parte traseira a presença de um gerador elétrico, que é o foco deste trabalho.

Devido a situações dispostas, o projeto e construção desta máquina se adequa ao chamado micro gerador e, devido as suas dimensões inferiores aos geradores usuais, faz-se necessária a otimização e reutilização de materiais aliado a um baixo custo financeiro, o que torna o trabalho um grande desafio de engenharia. Como exposto anteriormente, atendendo a uma demanda de baixa potência, é designado para residências rurais. Bombeamento para irrigação e hidratação animal são exemplos em que os micro-aerogeradores poderia atuar.

É também objetivo deste trabalho, agregar valores socioeconômicos e sustentáveis à formação de engenheiros eletricitas, tendo em vista a necessidade de dimensionar as peças de forma eficiente e adequadas ao projeto, levando em consideração o reaproveitamento de materiais que seriam descartados.

Figura 3 – Estrutura interna de uma turbina eólica.



Fonte: CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA (2000). Disponível em: www.eolica.com.br. (adaptado).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em (MILLER e HENDERSOT JR, 1994), principal referência bibliográfica, trata da configuração utilizada neste trabalho, o *brushless* AC de ímãs permanentes. Se faz necessário o apoio deste livro pois nele é encontrado os aspectos necessários para o dimensionamento de cada componente da máquina e por se tratar de uma configuração não usual no mercado, torna-se um desafio desvendar as diferenças e peculiaridades dessa configuração. É também de extrema importância a formulação presente na obra, guiando o leitor ao pleno desenvolvimento de uma máquina elétrica com bom desempenho.

Em (ISHAK, ZHU e HOWE, 2004) é tratada a escolha do número de polos em relação ao número de ranhuras do estator, o que possibilitou para este trabalho uma geração senoidal de tensão sem uso de inclinação de estator ou magnetização não uniforme dos ímãs.

Já (CHAU, 2008) aborda sobre as vantagens dos motores *brushless*, em especial os de ímãs permanentes no rotor, demonstrando e comparando características de cada tipo de máquina, dando visibilidade à alta confiabilidade das máquinas de ímãs permanentes que não necessitam de comutação mecânica.

(HAYT, 2003) acrescenta para este trabalho ao falar de magnetização de corpos, demonstrando curvas de histerese e o comportamento de diversos tipos de materiais, classificados de acordo com sua natureza magnética.

Em (DORF, 2003) trata de análise de circuitos elétricos, em especial para este trabalho, os circuitos trifásicos.

Em (FITZGERALD e KINGSLEY, 2014) há o estudo de máquinas elétricas e suas peculiaridades. Elucida questões eletromagnéticas de fundamental importância para a correta compreensão do funcionamento dos motores/geradores elétricos como definição e compreensão de fluxo concatenado, força eletromotriz, indutância própria e mútua, regulação de tensão, entre outros.

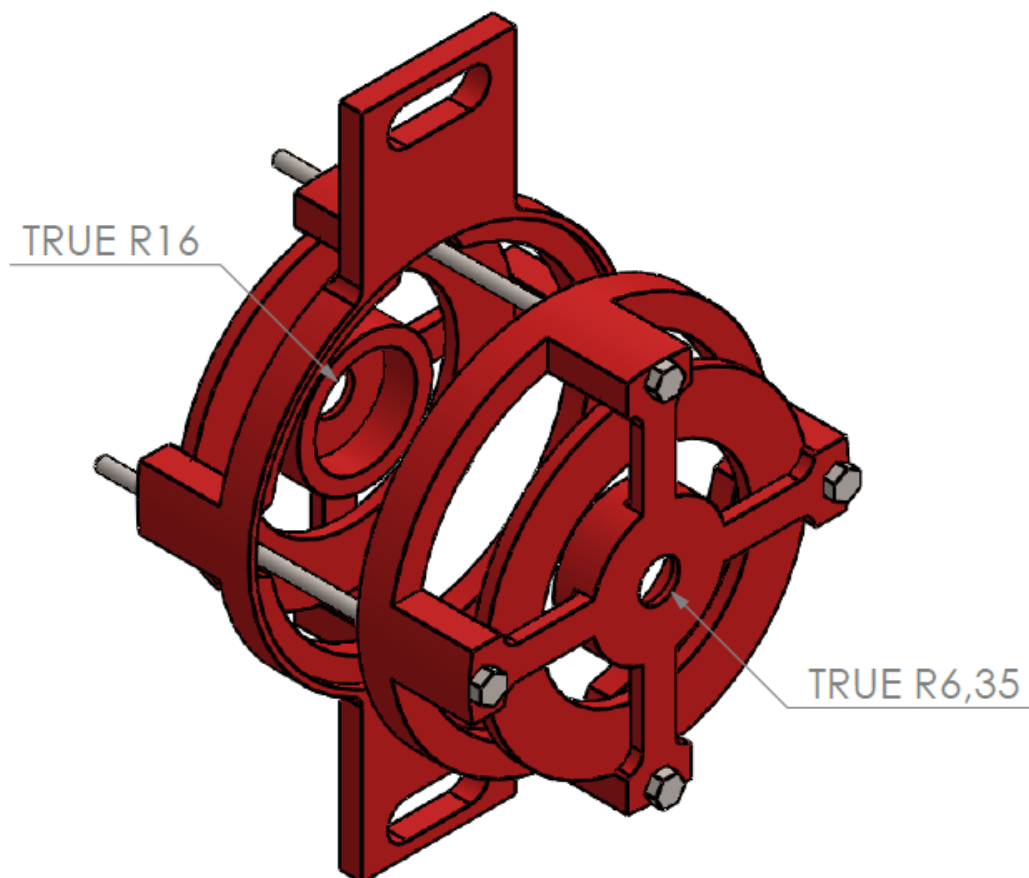
4. DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA

4.1. Carcaça, eixo e rolamentos

Por se tratar de um gerador feito a partir de um motor de indução de uma máquina de lavar roupas Aspectos invariantes do projeto como a carcaça, o eixo e os rolamentos são discutidos abaixo ressaltando a sua influência e limitação em torno da máquina.

A carcaça possui caixas de rolamento e apoios para o estator que é preso por parafusos axiais passantes. Vazada, a carcaça não oferece proteção contra impurezas ou líquidos que possam eventualmente, a depender da aplicação, entrar em contato com o gerador, causando falha elétrica, como oxidação de terminais ou degradação do esmalte dos enrolamentos, e falha mecânica, como o travamento de rolamentos ou danificação de rotor/estator/eixo por objeto estranho dentro do gerador. Na Figura 4 é mostrada a carcaça reaproveitada e algumas dimensões em milímetros.

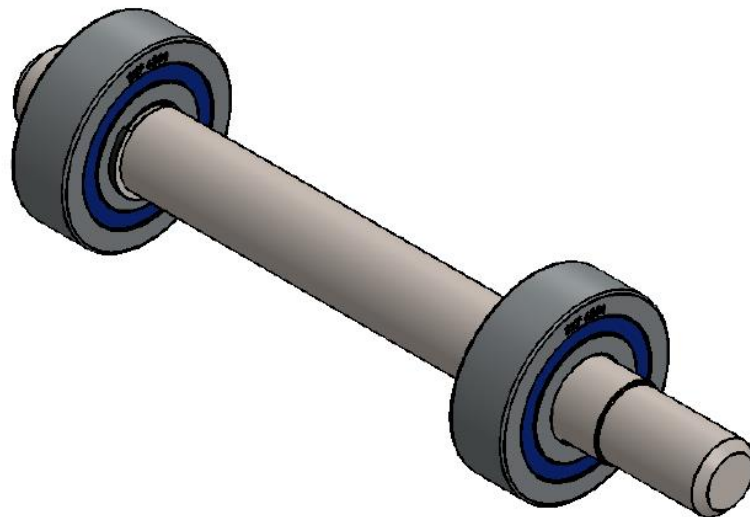
Figura 4 - Modelo 3D da carcaça obtida.



Fonte: Do autor (2018).

Os rolamentos originais do motor (um rolamento 6201Z e outro 6201RSC3) foram substituídos por duas unidades de 6201ZZ (NSK,2018), tendo dupla proteção metálica para evitar entrada de impurezas e contaminação do óleo lubrificante. A escolha de rolamentos esféricos para suportar esforços axiais e radiais foi feita baseada na previsão de erros de empenamento e desbalanceamento oriundos da montagem do gerador. É mostrado na Figura 5 a montagem dos rolamentos, travas e eixo.

Figura 5 - Modelo 3D do projeto de eixo com rolamentos.



Fonte: Do autor (2018).

4.2. Estator

Por se tratar de um gerador dimensionado a partir de um motor de indução pré-existente tem-se limitações físicas de dimensões do estator, eixo, tampas e rolamentos que devem ser respeitadas. Listadas detalhadamente a seguir, são mostradas tais limitações e comentadas suas implicações no projeto.

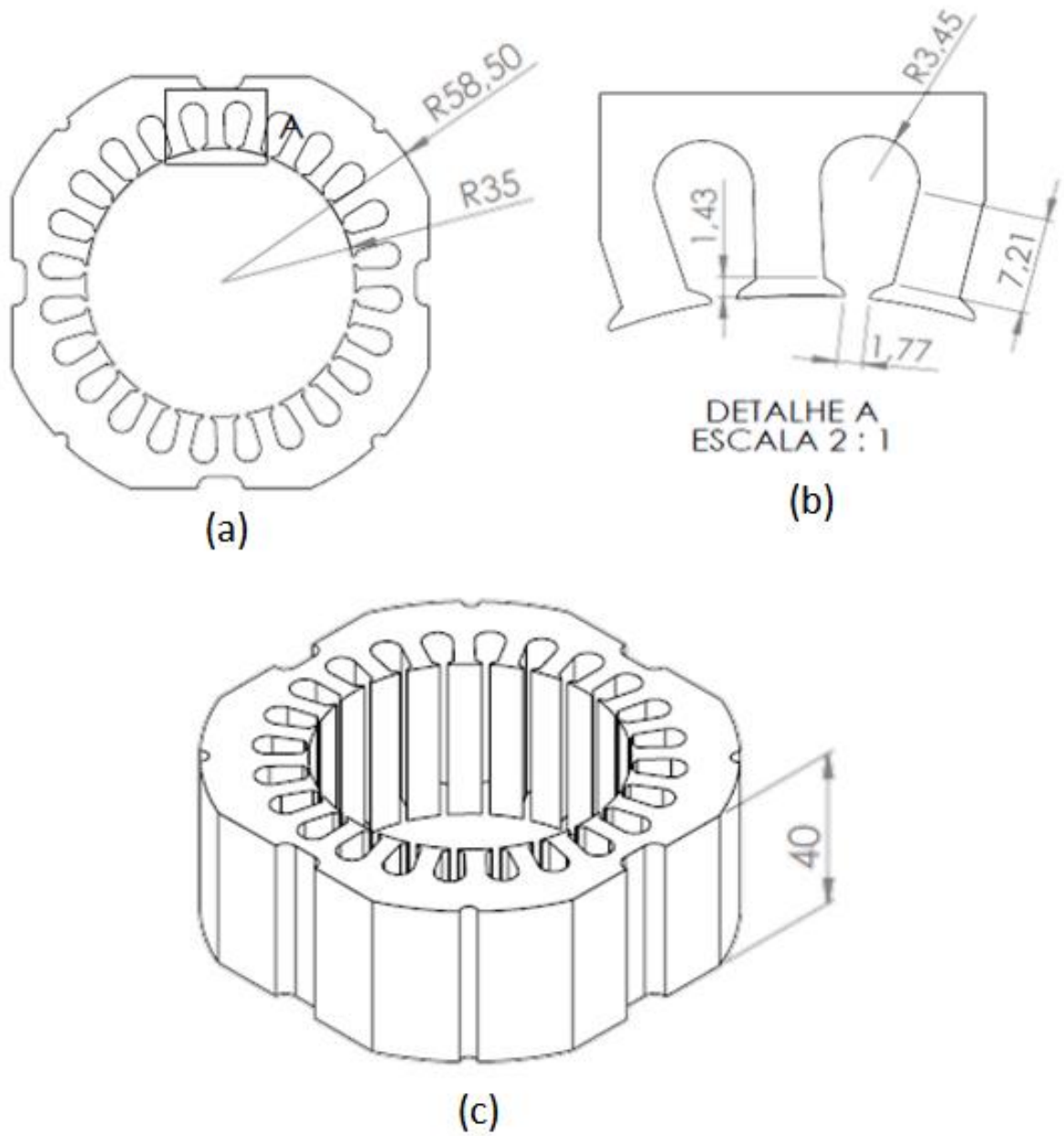
O estator usado, mostrado na Figura 7, possui as dimensões em milímetros conforme indicadas na Figura 6. Com 24 ranhuras, determina-se a quantidade máxima e mínima de polos que serão usados, pois, segundo (ISHAK, ZHU e HOWE, 2004), a melhor razão entre o número de ranhuras e o número de polos ($2p$) para que a máquina possua o menor *cogging torque* - e uma forma de onda de tensão gerada semelhante a uma senoide - ocorre quando o número de polos se diferencia em duas unidades do número de ranhuras conforme (1).

$$2p = n^{\circ} \text{ ranhuras} \pm 2 \quad (1)$$

Desta forma, tem-se 22 ou 26 polos no rotor para que a tensão gerada tenha perfil senoidal. A escolha será elucidada no tópico 4.3. Rotor e Ímãs com base em outros parâmetros construtivos. Com raio interno de 35mm, o raio do rotor fica limitado a um valor menor que este, considerando os ímãs em sua superfície, e ainda sofre limitação quanto ao comprimento do rotor que deve ser inferior ao comprimento do pacote magnético do estator, que é 40mm.

O estator ainda restringirá a quantidade de espiras das bobinas e o diâmetro do fio que será usado para o enrolamento. Será necessário encontrar um equilíbrio entre o espaço físico disponível para o enrolamento dentro da ranhura, a tensão gerada e a corrente suportada pela máquina.

Figura 6 – (a) Vista frontal do estator; (b) Detalhe do dente do estator; (c) Vista em perspectiva do estator.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 7 – (a) Estator a ser reaproveitado; (b) Estator a ser reaproveitado sem bobinas e limpo.



(a)



(b)

Fonte: Do autor (2018).

4.3. Rotor e Ímãs

Poderiam ser usados 22 ou 26 ímãs no rotor para obtenção do número de polos convenientes à aplicação do gerador. Levando em consideração os ímãs disponíveis no mercado foi escolhida a configuração de 22 polos uma vez os ímãs possuíam 6X6X35mm, como mostradas na Figura 8. Esta configuração permitia que existissem 22 ímãs contidos no perímetro externo do rotor descontando o ressalto da ranhura ($h_{ranhura} = 1mm$), isto é, o perímetro definido pelo raio base dos ímãs ($R_{bi} = 28mm$), como demonstrado na equação (5).

$$R_{bi} = R_{ext_{rot}} - h_{ranhura} = 29 - 1 = 28mm \quad (2)$$

$$2pR_{bi} = 2\pi R_{bi} = 2 \cdot 3,1415 \cdot 28 = 175,98mm \quad (3)$$

$$2p_{ímãs} = L_{ímãs} \cdot n_{ímãs} = 6 \cdot 22 = 132mm \quad (4)$$

Portanto,

$$2p_{ímãs} < 2pR_{bi} \quad (5)$$

Onde:

R_{bi} : raio base dos ímãs;

$R_{ext_{rot}}$: raio externo do rotor;

$h_{ranhura}$: altura da ranhura;

$2pR_{bi}$: perímetro do círculo definido pelo raio base dos ímãs;

$2p_{ímãs}$: perímetro ocupado pelos ímãs;

$L_{ímãs}$: lado do ímã;

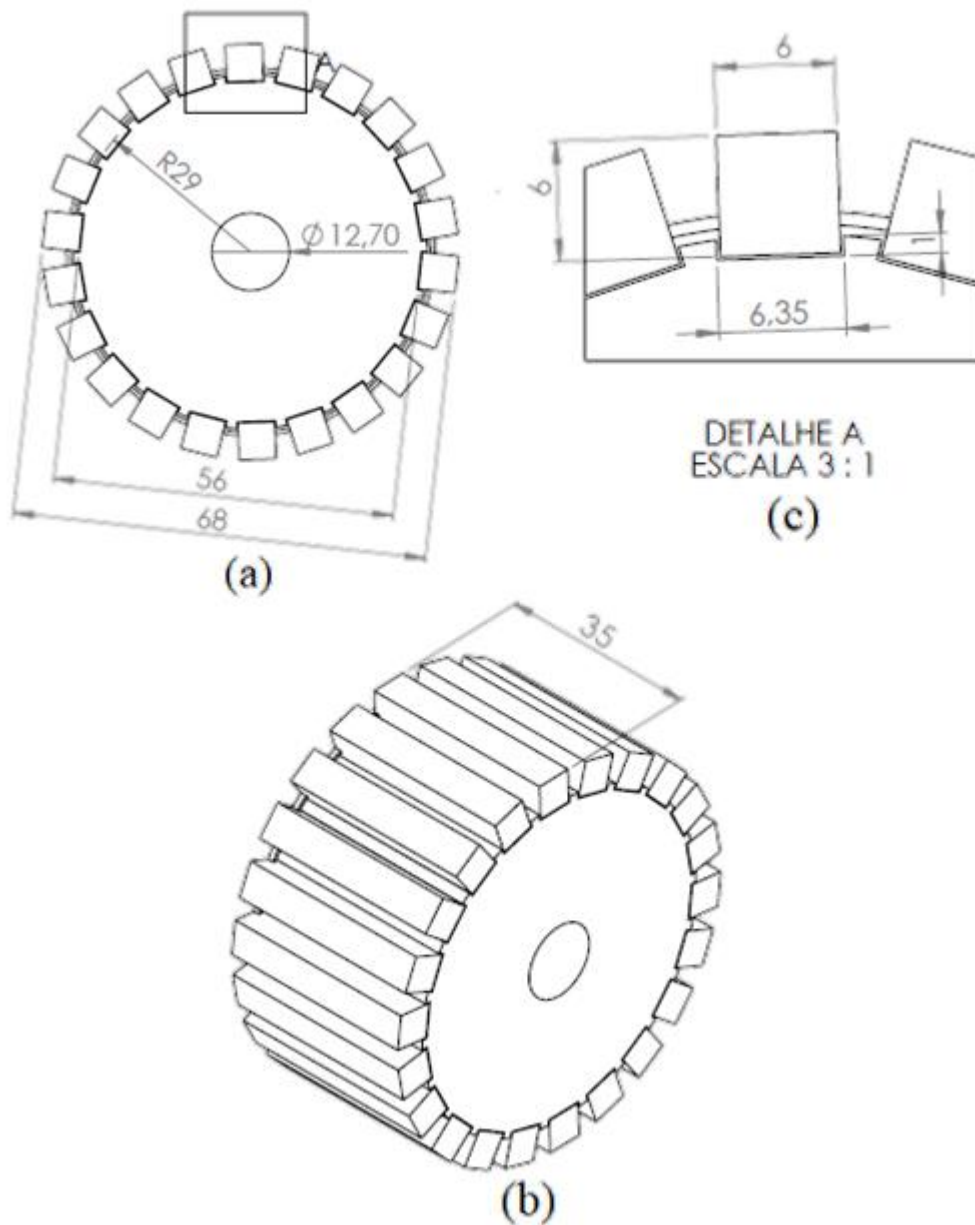
$n_{ímãs}$: número de ímãs.

Logo, o rotor consiste de uma peça maciça de aço com raio externo ($R_{ext_{rot}}$) de 29mm contendo 22 ranhuras de 6,35mm ($\frac{1}{4}$ "") de largura por 1mm de altura espaçadas igualmente em 360° em torno do rotor. É importante salientar que, apesar do pacote magnético do estator possuir 40mm, o rotor foi dimensionado em 35mm, isto porque os ímãs utilizados possuíam 35mm de comprimento. A diferença entre a largura da ranhura, 6,35mm, e a largura do ímã, 6mm, é necessária para que não houvesse interferência entre as peças (já considerando a tolerância da precisão da usinagem) e para que a cola usada para fixar os ímãs ao rotor pudesse

ser depositada. Na Figura 9 podemos observar a montagem já realizada, com os ímãs colados ao rotor e montados no eixo junto aos rolamentos.

Também se observa que o entreferro existente entre o rotor e o estator é de 1mm. É um valor razoável dado que valores menores, apesar de entregarem um desempenho melhor da máquina, resultaria em uma dificuldade maior de fabricação pela precisão. Em tópicos a frente será discutida a influência deste entreferro na máquina.

Figura 8 – (a) vista frontal do rotor; (b) vista em perspectiva do rotor; (c) detalhe do rasgos do rotor;



Fonte: Do autor (2018).

Figura 9 – (a) eixo a ser reaproveitado (ainda encaixado no rotor do tipo gaiola de esquilo);
(b) vista em perspectiva do eixo, rotor usinado e rolamento; (c) detalhe da montagem dos ímãs na superfície do rotor.



(a)



(b)

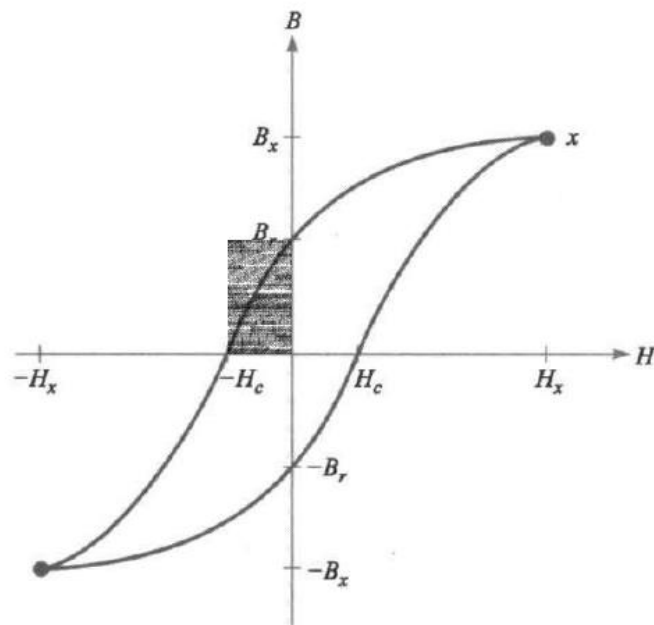


(c)

Fonte: Do autor (2018).

Os ímãs utilizados no projeto são de Neodímio e possuem Grade N35, isto é, o produto de energia máximo obtido neste ímã é de até 287 MGOe (Mega Gauss Oersted). A medida de produto de energia máximo é um fator importante para determinação das características do ímã e é obtido tomando-se o produto entre a remanência (B_r) e a coercividade (H_c), como mostrado na região hachurada da Figura 10 (HAYT, 2003).

Figura 10 - Curva de Histerese de um ímã.



Fonte: HAYT (2003).

Onde:

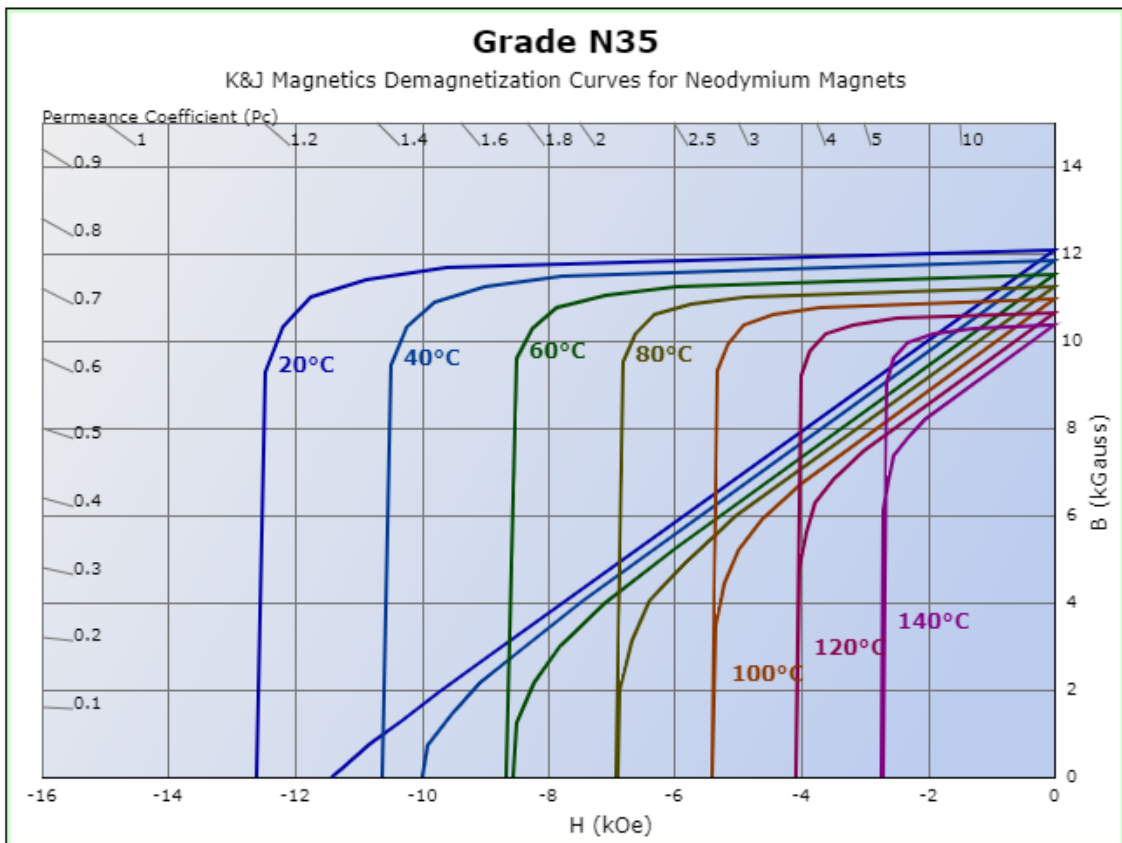
H_c : Coercividade;

B_r : Remanência.

Os ímãs de neodímio possuem uma boa razão entre Produto de Energia Máximo e Volume, o que significa que podem produzir campos magnéticos mais intensos com geometrias enxutas, fazendo com que sejam preferíveis em aplicações onde as pequenas dimensões são importantes. Além disso, são também mais caros que os demais, como ferrite ou alnico e são bastante frágeis não suportando deformações ou impactos.

Segue, na Figura 11, a curva de magnetização para o ímã de neodímio Grade N35 a 80°C com as dimensões supracitadas.

Figura 11 – Curva de magnetização para ímã neodímio Grade N35.



Fonte: K&J Magnetics, Inc. (2018). Disponível em: www.kjmagnetics.com.

Os ímãs são dispostos na superfície do rotor de tal maneira que, para um ímã qualquer, o ímã seguinte e o anterior a ele estejam com polaridade oposta à sua própria, ou seja, não haverá na disposição do rotor dois ímãs adjacentes com mesma polaridade. Isso porque, para que seja gerado um fluxo concatenado alternado nas bobinas é necessário que esta disposição seja seguida, aproveitando assim a possibilidade máxima de inversão de polos para os 22 ímãs durante o giro do rotor que irá gerar a onda próxima de uma senoide. Na Figura 9 (d) é possível perceber a disposição dos ímãs pela marcação das suas polaridades em suas superfícies.

Adiante é mostrada a relação da polaridade dos ímãs, o fluxo concatenado pelas bobinas e a tensão gerada.

Onde:

L1 : enrolamento da fase 1 (fase R);

L2 : enrolamento da fase 2 (fase S);

L3 : enrolamento da fase e (fase T).

Como visto na Figura 12, a configuração seguida foi de quatro bobinas para cada fase (L1, L2 e L3) e o sentido de enrolamento de cada bobina é representado por 1 ou -1, isto é, se tomarmos o enrolamento da bobina 1-2 da fase L1, teremos, no plano da Figura 12, o sentido de enrolamento de espiras saindo da ranhura 1 e entrando em 2, enquanto para a bobina 3-4 tem-se o enrolamento saindo da ranhura 4 e entrando em 3.

Um fato importante a ser observado é que o Winding Factor (fator de enrolamento) para a configuração 24/22 é bastante satisfatória (próximo a unidade) para a geração senoidal chegando à 0,949469. Isso significa que para essa configuração teremos um maior valor RMS de FEM (Força Eletromotriz) gerada uma vez que as influências negativas das harmônicas serão atenuadas permitindo a geração de maior tensão. É mostrado na Tabela 1 as possíveis configurações de polos e seus respectivos fatores de enrolamento. Em destaque se encontra a configuração usada, onde $K_w \approx 0,95$.

Tabela 1 - Winding Factor para diferentes configurações.

	Q	2p /	kw	t	Ncpg
1	24	10	0.925031	2	0.571429
2	24	14	0.759765	2	0.8
3	24	16	0.866025	8	1
4	24	2	0.957662	2	0.363636
5	24	20	0.933013	4	2
6	24	22	0.949469	2	4
7	24	26	0.949469	2	-4
8	24	4	0.965926	4	0.4
9	24	8	1	8	0.5

Fonte: Do autor (2018).

Onde:

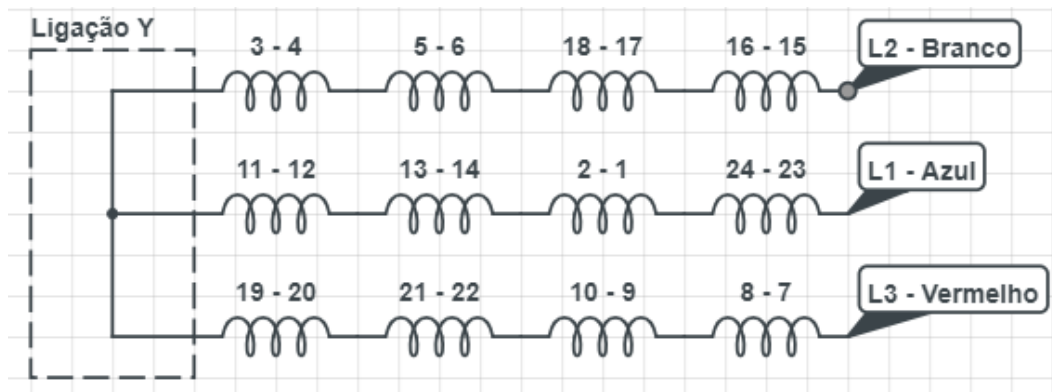
Q : número de ranhuras;

$2p$: número de polos;

k_w : fator de enrolamento.

Na Figura 13 está representado como foi feita a conexão das bobinas seguindo a proposta da Figura 12. Para cada fase foi atribuída uma cor distinta de fio (Branco, Azul e Vermelho) e foi fechada uma ligação em estrela (Y) para a outra extremidade dos enrolamentos.

Figura 13 - Diagrama dos enrolamentos dispostos por fase.

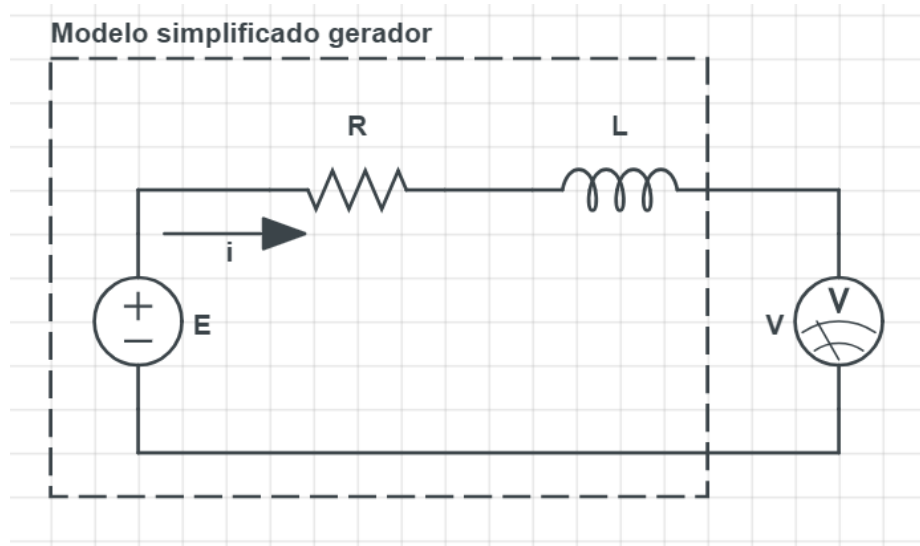


Fonte: Do autor (2018).

4.5. Número de espiras, fluxo concatenado e FEM gerada

A equação geral da máquina para a análise pode ser determinada através do circuito equivalente monofásico do gerador mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Diagrama simplificado de geradores.



Fonte: Do autor (2018).

Onde:

R : resistência dos enrolamentos;

L : indutância dos enrolamentos;

E : FEM (força eletromotriz) gerada;

i : corrente nos enrolamentos;

V : Tensão de saída do gerador.

Dada as quedas de tensões,

$$E - V = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (6)$$

Uma vez que a análise será feita em conjunto com o *software* FEMM, escreveremos a FEM (E) como função do fluxo concatenado (Ψ) e da velocidade angular (ω).

$$E = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (7)$$

Se definirmos,

$$e = \frac{d\Psi}{d\theta} \quad (8)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (9)$$

Então, podemos escrever,

$$E = e \cdot \omega \quad (10)$$

Em que:

Ψ : fluxo concatenado;

θ : Ângulo, em radianos;

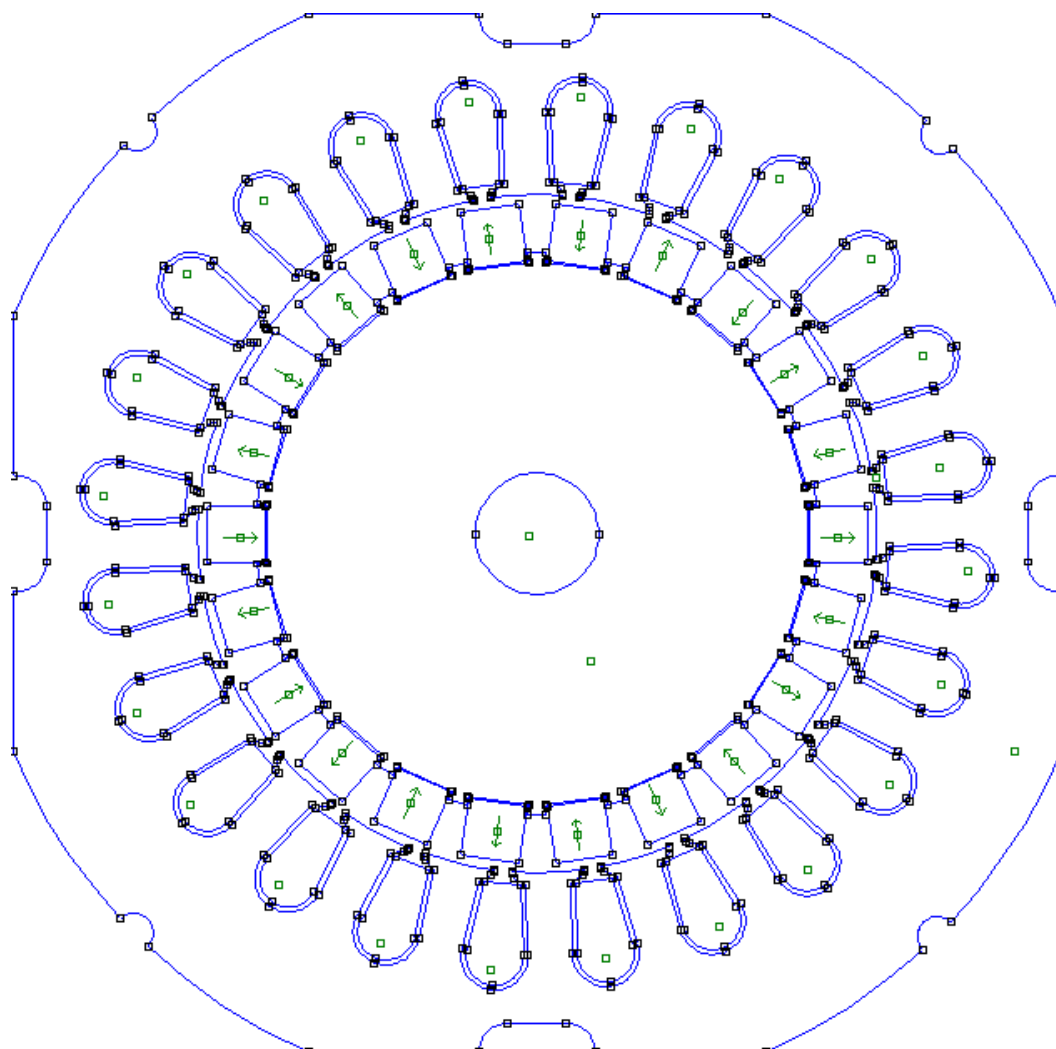
t : tempo, em segundos;

e : derivada do fluxo pelo ângulo;

ω : velocidade angular.

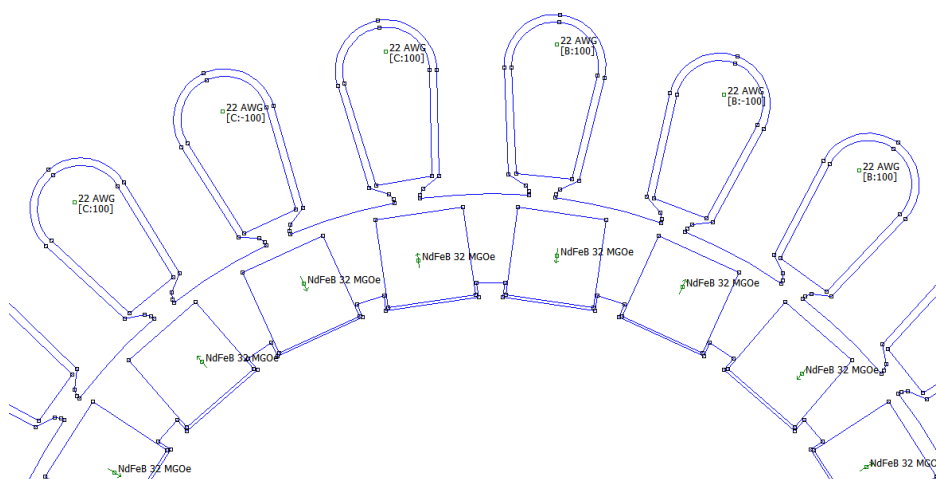
Expressar E como função da derivada do fluxo pelo ângulo da equação (8) é convenientemente adotado pois as simulações feitas a partir do método de elementos finitos oferecidos pelo *software* FEMM traz resultados estáticos no tempo. Porém é possível simular a operação do gerador em qualquer ângulo que se queira e a derivada do fluxo concatenado pelo ângulo pode então ser obtida. Desta forma, foi feita a modelagem da máquina conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Projeto da máquina no *software* FEMM.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 16 - Detalhe dos ímãs e dentes no *software* FEMM.

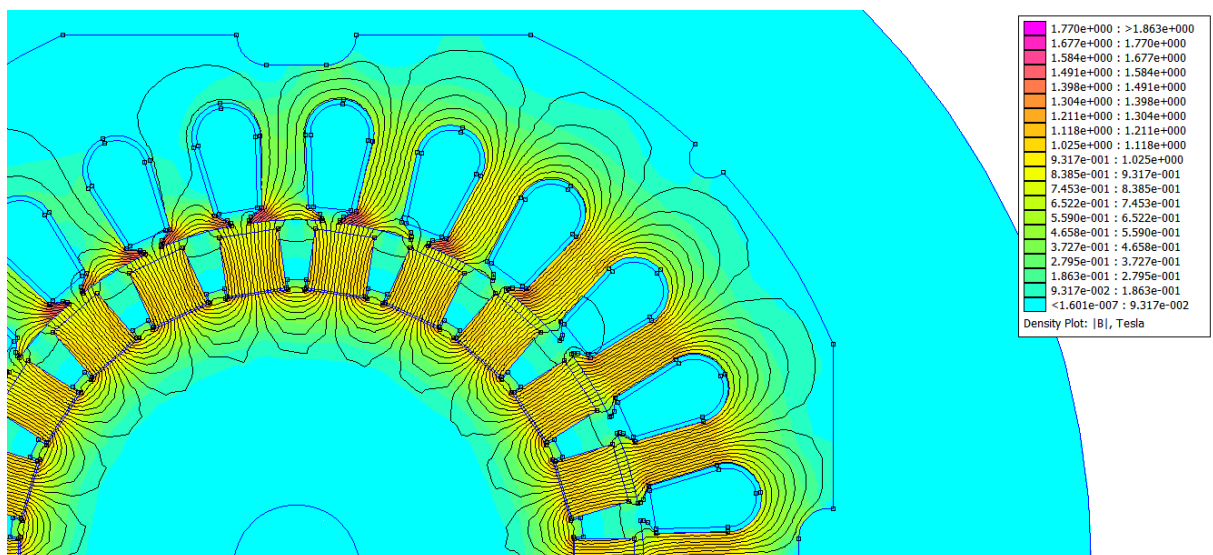


Fonte: Do autor (2018).

Um ponto a ser destacado é que na biblioteca original de materiais oferecida pelo *software* não havia um ímã compatível com N35, portanto foi usado o N32. Tomando-se um valor de produto de energia menor na simulação claramente obteríamos resultados ligeiramente menores que o esperado, no entanto, esta margem não compromete a robustez da simulação. Para o rotor e estator foram usados Aço 1020.

A simulação com $\theta = 0^\circ$ é mostrada na Figura 17 e é então obtido o valor de fluxo concatenado para cada fase (A, B e C).

Figura 17 - Fluxo concatenado projetado sobre a máquina.



Fonte: Do autor (2018).

É importante salientar que a densidade de fluxo magnético obtida na simulação nunca ultrapassa 1,7 T isto porque para a fabricação de motores de pequeno porte os metais usados são de grão não-orientados e valores de densidade fluxo magnético maiores que 1,7 T causam a saturação do material, levando a uma queda no desempenho da máquina. Na prática isso pode ser notado pela não linearidade entre torque e corrente.

Incrementando o ângulo θ em um passo 1° até uma volta completa (360°), tem-se o perfil aproximado de fluxo concatenado em cada fase, conforme mostrado na Tabela 2. Esse procedimento foi repetido para diversas quantidades de espiras/bobinas considerando uma velocidade média de rotação do gerador de 10 rad/s, aproximadamente 95 rpm, para que fosse possível determinar quantas espiras eram necessárias para uma tensão gerada satisfatória. Como

resultado, escolheu-se 100 como o número de espiras adotado na construção das bobinas. Ainda na Tabela 2 é mostrado o valor de $e = \frac{d\psi}{d\theta}$ e da FEM gerada $E = e \cdot \omega$.

Tabela 2 – Fluxo concatenado e FEM obtidos por ângulo.

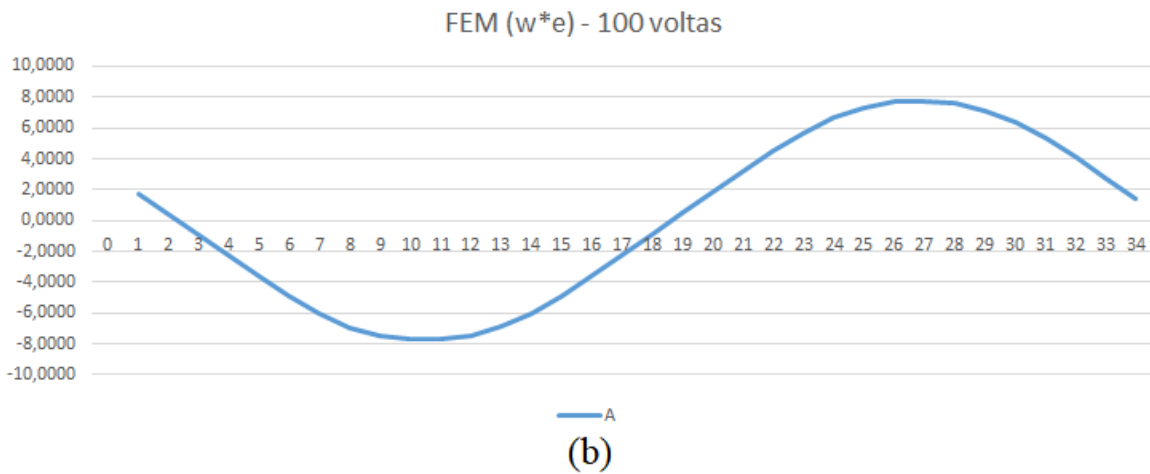
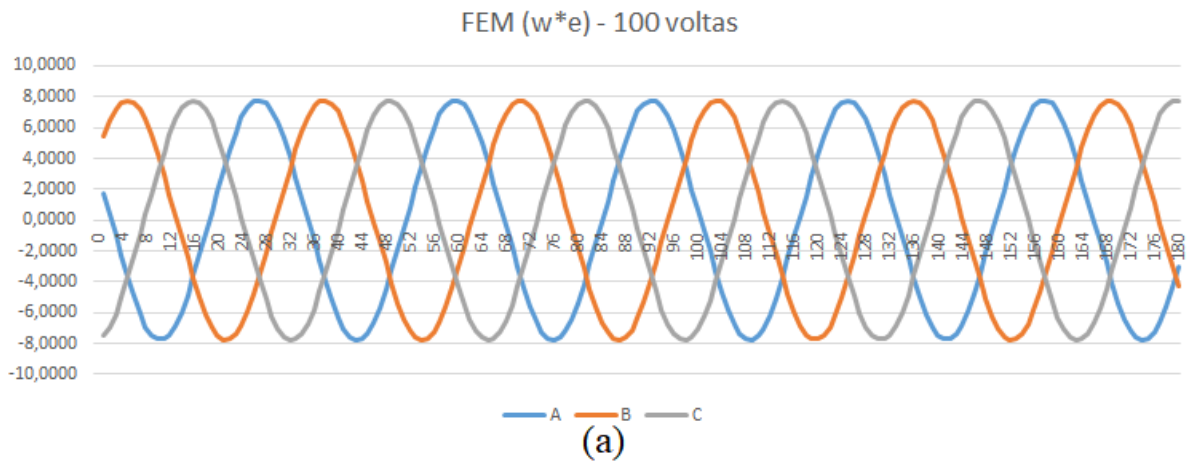
Fluxo concatenado				derivada - 100 voltas				FEM ($w \cdot e$) - 100 voltas				w	10
Ang	A	B	C	Ang	A	B	C	Ang	A	B	C	Voltas	100
0	0,0657	-0,0539	-0,0126	0				0					
1	0,0688	-0,0443	-0,0257	1	0,1730	0,5476	-0,7500	1	1,7302	5,4760	-7,5005		
2	0,0695	-0,0330	-0,0378	2	0,0402	0,6495	-0,6961	2	0,4020	6,4949	-6,9614		
3	0,0678	-0,0204	-0,0485	3	-0,0936	0,7221	-0,6104	3	-0,9364	7,2210	-6,1042		
4	0,0638	-0,0071	-0,0572	4	-0,2276	0,7629	-0,4987	4	-2,2763	7,6285	-4,9873		
5	0,0575	0,0065	-0,0636	5	-0,3618	0,7757	-0,3687	5	-3,6175	7,7574	-3,6868		
6	0,0489	0,0198	-0,0677	6	-0,4929	0,7647	-0,2340	6	-4,9286	7,6470	-2,3396		
7	0,0384	0,0325	-0,0694	7	-0,6060	0,7242	-0,0992	7	-6,0600	7,2425	-0,9923		
8	0,0263	0,0439	-0,0689	8	-0,6926	0,6531	0,0331	8	-6,9259	6,5315	0,3307		
9	0,0132	0,0535	-0,0660	9	-0,7484	0,5523	0,1666	9	-7,4840	5,5228	1,6665		
10	-0,0003	0,0610	-0,0607	10	-0,7732	0,4292	0,3020	10	-7,7319	4,2925	3,0202		
11	-0,0138	0,0661	-0,0531	11	-0,7723	0,2947	0,4348	11	-7,7230	2,9471	4,3475		
12	-0,0268	0,0689	-0,0434	12	-0,7467	0,1603	0,5576	12	-7,4666	1,6033	5,5763		
13	-0,0388	0,0694	-0,0319	13	-0,6892	0,0281	0,6578	13	-6,8915	0,2810	6,5781		
14	-0,0493	0,0676	-0,0192	14	-0,6023	-0,1064	0,7274	14	-6,0234	-1,0642	7,2735		
15	-0,0578	0,0634	-0,0058	15	-0,4871	-0,2401	0,7655	15	-4,8714	-2,4010	7,6552		
16	-0,0641	0,0568	0,0077	16	-0,3563	-0,3748	0,7757	16	-3,5632	-3,7481	7,7574		
17	-0,0679	0,0480	0,0210	17	-0,2220	-0,5037	0,7618	17	-2,2202	-5,0374	7,6182		
18	-0,0695	0,0373	0,0336	18	-0,0882	-0,6160	0,7194	18	-0,8818	-6,1603	7,1936		
19	-0,0687	0,0251	0,0448	19	0,0450	-0,6993	0,6456	19	0,4499	-6,9933	6,4555		
20	-0,0656	0,0120	0,0543	20	0,1784	-0,7515	0,5419	20	1,7836	-7,5154	5,4195		
21	-0,0601	-0,0016	0,0616	21	0,3133	-0,7746	0,4169	21	3,1334	-7,7458	4,1692		
22	-0,0523	-0,0150	0,0665	22	0,4467	-0,7710	0,2826	22	4,4674	-7,7099	2,8256		
23	-0,0424	-0,0280	0,0691	23	0,5669	-0,7425	0,1482	23	5,6690	-7,4245	1,4818		
24	-0,0308	-0,0399	0,0694	24	0,6657	-0,6828	0,0155	24	6,6568	-6,8283	0,1547		
25	-0,0180	-0,0502	0,0673	25	0,7310	-0,5921	-0,1180	25	7,3104	-5,9210	-1,1804		
26	-0,0046	-0,0585	0,0629	26	0,7676	-0,4759	-0,2527	26	7,6761	-4,7591	-2,5267		
27	0,0089	-0,0645	0,0561	27	0,7753	-0,3442	-0,3872	27	7,7528	-3,4420	-3,8723		
28	0,0222	-0,0682	0,0471	28	0,7601	-0,2092	-0,5156	28	7,6013	-2,0923	-5,1558		
29	0,0346	-0,0695	0,0362	29	0,7139	-0,0757	-0,6244	29	7,1388	-0,7568	-6,2442		
30	0,0457	-0,0685	0,0239	30	0,6371	0,0580	-0,7056	30	6,3710	0,5804	-7,0559		
31	0,0550	-0,0652	0,0107	31	0,5310	0,1906	-0,7548	31	5,3103	1,9057	-7,5476		
32	0,0621	-0,0595	-0,0028	32	0,4057	0,3256	-0,7753	32	4,0568	3,2556	-7,7528		

Fonte: Do autor (2018).

Para automatização do processo de simulação e iteração foi desenvolvido um *script* em LUA que, interpretado pelo interpretador do FEMM, calculava os valores de fluxo concatenado para cada ângulo escolhido. Este está disponível no Anexo A.

Abaixo, na Figura 18, é mostrada a onda gerada em cada fase, defasadas de 120° no tempo e com perfil semelhante a uma onda senoidal. Em detalhe está a fase A que possui um valor de RMS de 5,44V e um valor de pico de cerca de 8V.

Figura 18 – (a) Onda de tensão trifásica; (b) detalhe da fase A;



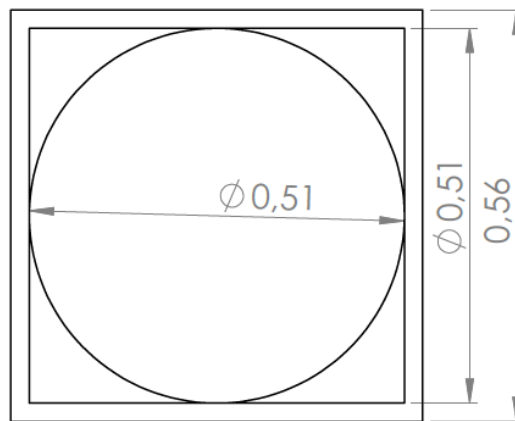
Fonte: Do autor (2018).

4.6. Escolha do fio e Enrolamento da Máquina

Determinada a quantidade de espirar por bobina, 100 voltas, determina-se qual bitola de fio será utilizada no enrolamento da máquina.

Como todo o processo de enrolamento será manual e feito por não profissionais considerou-se uma margem de segurança razoavelmente grande e, para tanto, o cálculo da área ocupada pelo fio foi aproximada para a área de um quadrado de lado igual ao diâmetro do fio, aumentado por um fator de 10%, como mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Representação do fio de cobre usado.



Fonte: Do autor (2018).

Desta forma, a escolha feita foi para o uso do fio AWG 25, que possui 0,51 mm de diâmetro e, com as considerações de segurança, passava de uma área de 0,2878mm² para 0,286mm².

Nas Tabelas 3 e 5 seguem as dimensões em relação a ranhura do estator e do fio, onde é possível perceber que a área ocupada pela bobina é cerca de 57% da área disponível pela ranhura.

Tabela 3 – Área ocupada na ranhura.

Estator/bobinas	
Área ranhura	50,54 mm ²
Área fios	28,611 mm ²
% util. Área	57%
Qtde fio	168 m

Fonte: Do autor (2018).

Tabela 4 – Dados da bobina.

Bobina	
RMS	5,445604 V
Resist. Bobina	1,9866 Ω
Resist. Fase	7,9464 Ω

Fonte: Do autor (2018).

Tabela 5 – Dados do fio utilizado.

Fio	
AWG	25
Diâmetro	0,51 mm
Área corr	0,28611 mm ²
Resistência	0,1419 100°C [mΩ/mm]
Corrente	0,46 A

Fonte: Do autor (2018).

Calculou-se também a quantidade de fio necessária para confecção de todas as bobinas que, neste caso, é de aproximadamente 168m. Para tanto, foi considerado um aumento de 75% em relação ao valor do comprimento do pacote magnético do estator para incluir o comprimento das cabeças polares das bobinas. Como são 12 bobinas, segue o cálculo.

$$\begin{aligned}
 L_{fio} &= 2 \cdot n_{bobinas} \cdot 1,75 \cdot h_{estator} \\
 L_{fio} &= 2 \cdot 12 \cdot 1,75 \cdot 40 \\
 L_{fio} &= 168mm
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Onde:

L_{fio} : comprimento do total do fio;

$n_{bobinas}$: número de bobinas;

$h_{estator}$: comprimento do pacote magnético do estator.

Então é possível determinar a resistência apresentada por cada enrolamento e, conseqüentemente, por cada fase (L1, L2 e L3), multiplicando-se o valor de resistência/milímetro, informado pelo fabricante, pelo comprimento total da bobina, como mostrado na Tabela 4.

Para o enrolamento da máquina foi confeccionada uma bobinadeira artesanal e com o auxílio de uma furadeira foram feitas as bobinas. Segue abaixo, na Figura 19, a ferramenta utilizada.

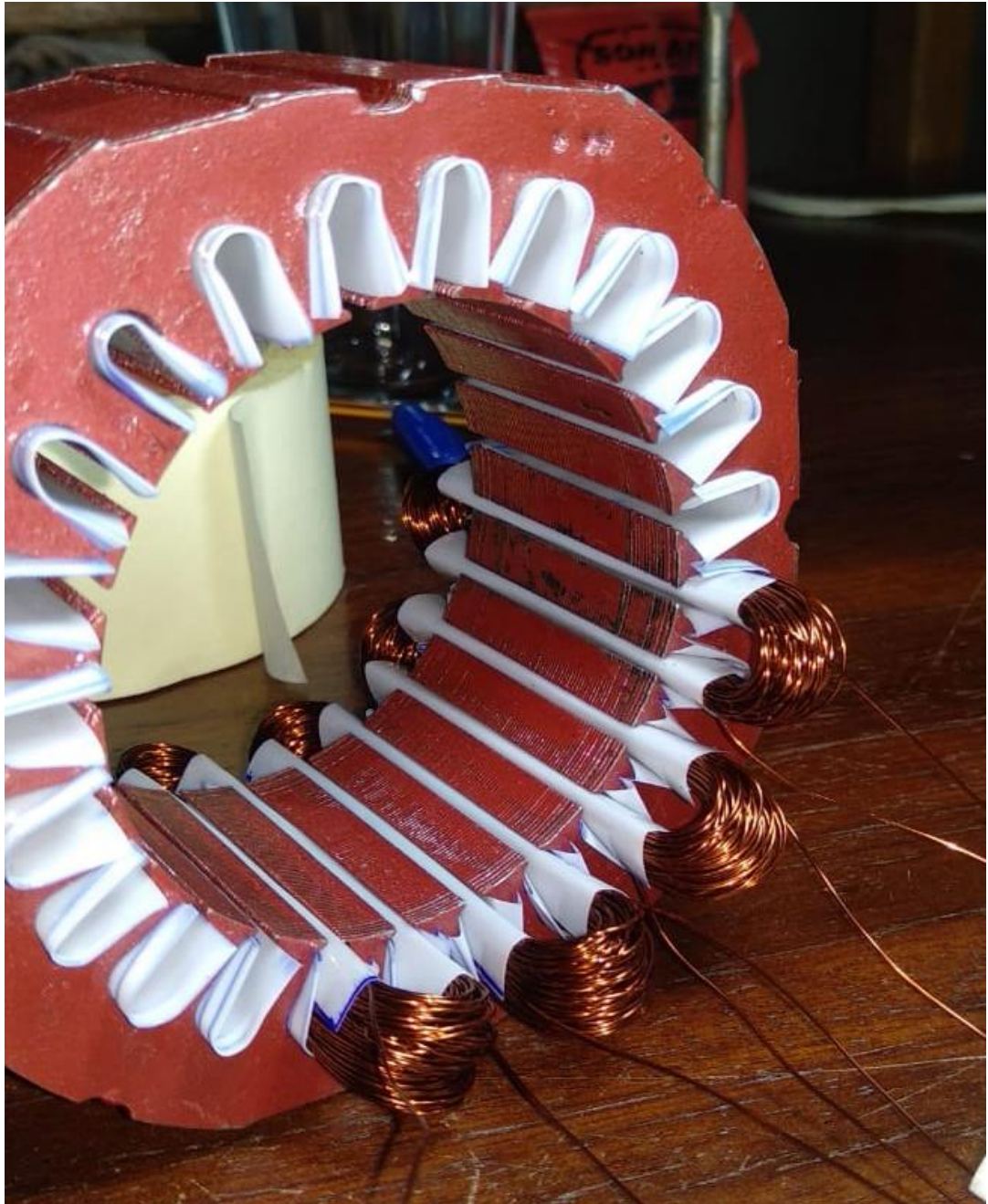
Figura 20 - Bobinadeira feita manualmente.



Fonte: Do autor (2018).

Antes de alojar as bobinas no estator é necessário isola-las e proteger com fitas de poliéster. Essas fitas são cortadas e dobradas a fim de isolar as bobinas do pacote magnético, acamando o sulco da ranhura, como mostrado na Figura 21. Após a colocação da bobina na ranhura, ainda é colocada mais uma tira de poliéster, desta vez para segurar as bobinas dentro do sulco da ranhura e a isolar do estator e rotor.

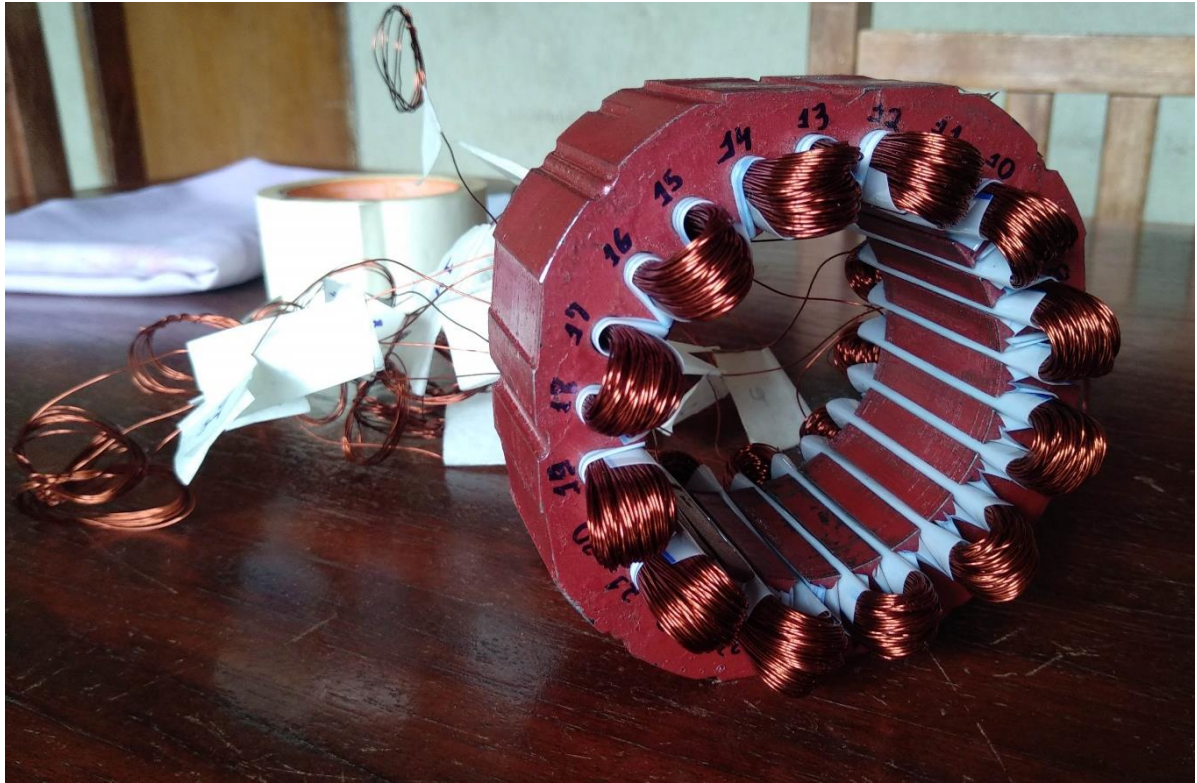
Figura 21 - Enrolamento sendo bobinado com isolamento.



Fonte: Do autor (2018).

Na Figura 22 é mostrado o estator já com todas as bobinas segundo diagrama da Figura 12. Os sentidos de enrolamentos são determinados pelas ligações das “pontas” de cada bobina e também respeitam o diagrama da Figura 14. Foram feitas 12 bobinas individuais que terão suas extremidades soldadas.

Figura 22 - Enrolamento bobinado nas ranhuras do estator.



Fonte: Do autor (2018).

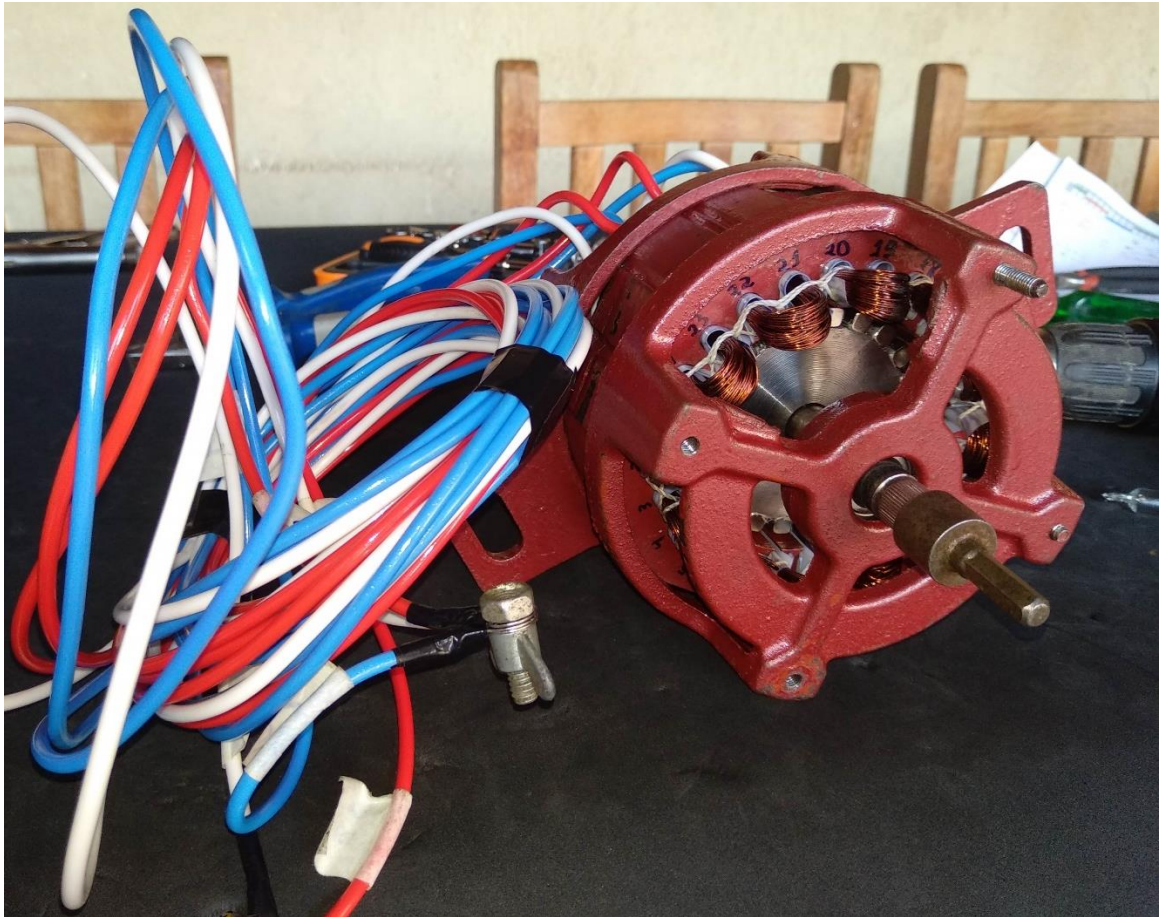
Após soldadas as conexões das bobinas e isoladas com termo retrátil, faz-se as amarrações com cordão encerado nos enrolamentos, assegurando-se de que o conjunto estará bem preso e não acarretará em falhas durante o uso da máquina.

Por fim, é derramado por todas as bobinas verniz isolante que além de proteger o enrolamento também lhe confere uma fixação por servir como cola para os fios e demais componentes.

4.7. Encaixe e fechamento da carcaça

Uma vez que o estator e rotor estavam prontos, foi possível unir as duas partes através da carcaça. A Figura 23 mostra o gerador em seu aspecto final.

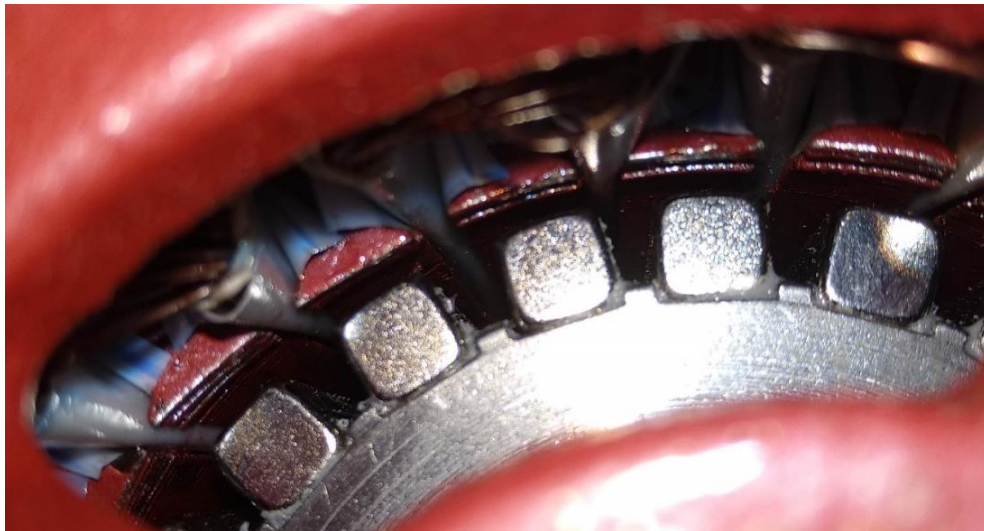
Figura 23 - Micro gerador ao final da construção.



Fonte: Do autor (2018).

A carcaça é presa através de 4 parafusos axiais. Através deles, em apertos alternados, foi possível centralizar o rotor, no entanto, ainda há um desalinhamento entre rotor e estator que provoca um entreferro irregular ao longo da superfície do estator pois dois parafusos cisalharam enquanto estavam sendo apertados causando folga em um lado da carcaça. Isso afetará os resultados conforme veremos adiante. Porém ainda é possível uma qualidade satisfatória na análise dos dados obtidos. Segue na Figura 24 a foto em detalhe do entreferro existente no gerador.

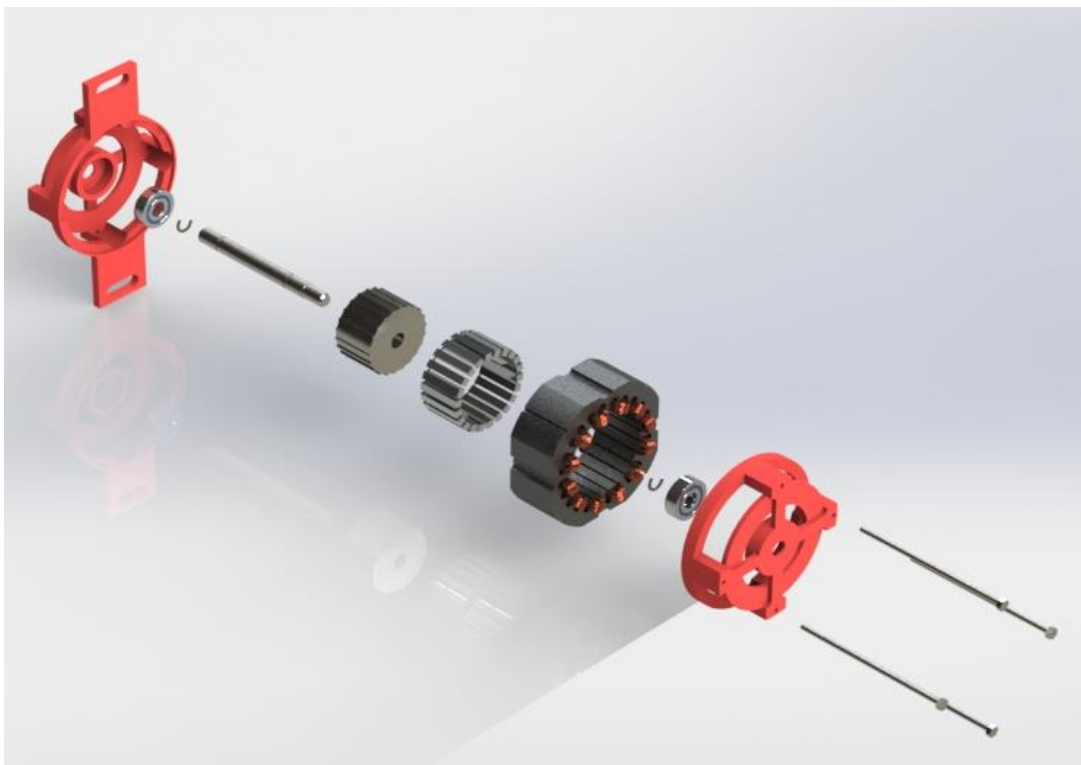
Figura 24 - Detalhe interno do micro gerador.



Fonte: Do autor (2018).

Foi feito um modelo 3D do gerador no *software* SolidWorks (DS SOLIDWORKS, 2016) a fim de se obter maior compreensão espacial da máquina elétrica. A Figura 25 mostra a vista explodida de todas as partes que compõe o gerador.

Figura 25 - Vista explodida do projeto no *software* SOLIDWORKS.



Fonte: Do autor (2018).

5. RESULTADOS

5.1. Acoplamento entre gerador e máquina motriz

Acoplou-se o gerador diretamente em uma furadeira e, através de um variador de tensão, era possível controlar a velocidade da furadeira e, conseqüentemente, a velocidade de rotação do gerador. Na Figura 26 como foi realizada a montagem em bancada.

Figura 26 - Esquema de acionamento do micro gerador



Fonte: Do autor (2018).

Como mencionado anteriormente, há um desalinhamento entre estator e rotor proveniente do cisalhamento de dois parafusos axiais e isso provoca vibração na máquina já que está não está centrada. Há vibrações provenientes do acoplamento não ideal utilizado e da caixa de engrenagens da furadeira (se trata de uma máquina antiga e existem folgas nas peças). Outro ponto a ser observado é que nenhuma das máquinas estavam fixadas a uma base para evitar que se movessem. Todo esse conjunto de situações acabam por gerar medições menos precisas, mas, de modo geral, os resultados encontrados são próximos aos esperados e é possível que se obtenha conclusões satisfatórias quanto ao comportamento da máquina elétrica.

Os valores de rotação da máquina foram obtidos através de um tacómetro óptico.

5.2. Perfil de tensão gerada

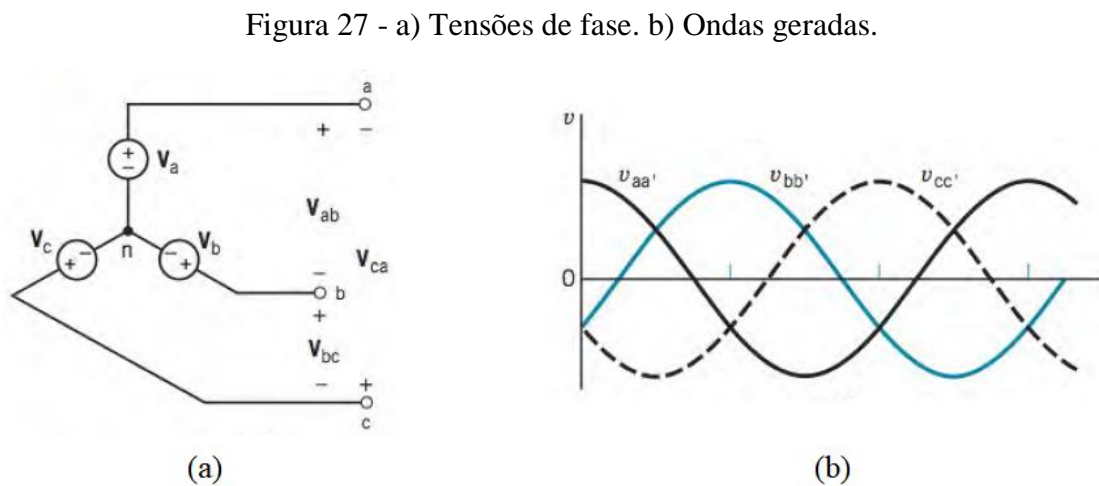
O gerador foi ensaiado sempre em configuração estrela, Figura 27 (a) (DORF, 2003), onde era possível se obter valores de tensão de fase (V_a, V_b, V_c) e de linha (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}) facilmente através de um osciloscópio.

Na Figura 27 (b) (DORF, 2003) é mostrado o perfil de tensões trifásicas senoidais esperadas para um gerador de ímãs permanentes CA. Segundo (DORF,2013), as três senoides podem ser descritas como mostrado nas equações (12), (13), (14) e conforme visto matematicamente estão defasadas de 120° no tempo.

$$v_{aa'} = V_m \cos \omega t \quad (12)$$

$$v_{bb'} = V_m \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (13)$$

$$v_{cc'} = V_m \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (14)$$

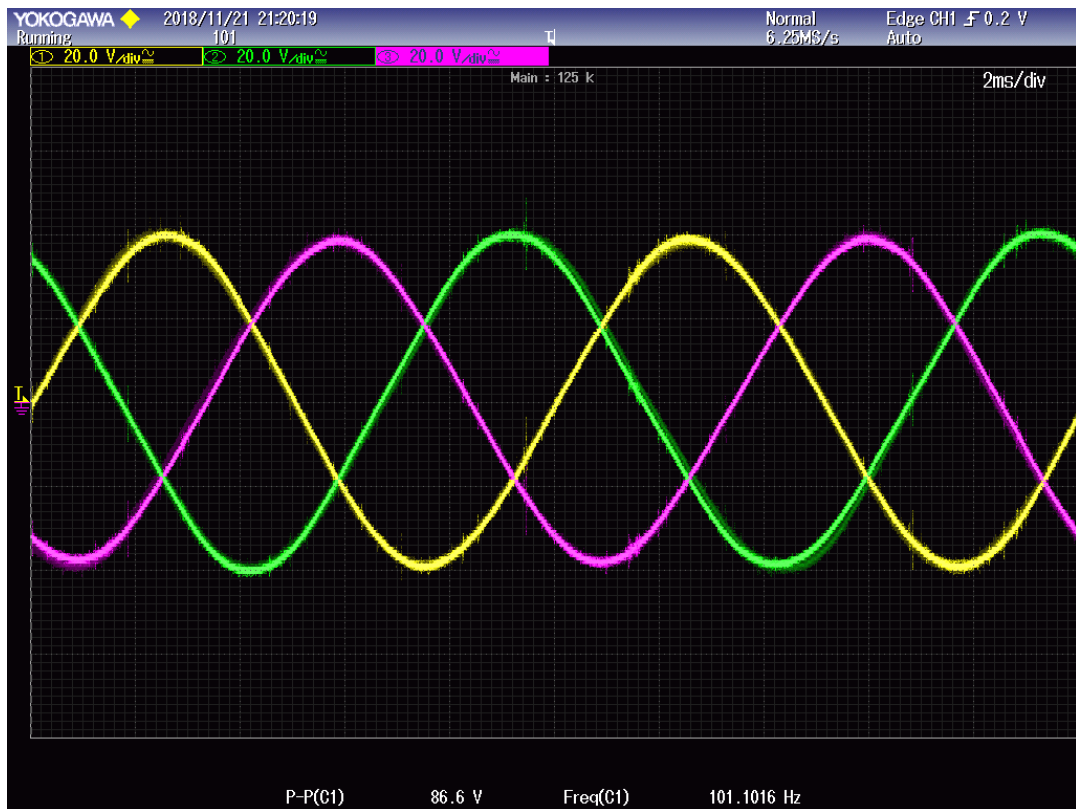


Fonte: DORF (2003).

Na Figura 28 tem-se o perfil de ondas geradas pela máquina no ensaio a vazio. É possível perceber que as ondas são bastante próximas do perfil ideal trifásico senoidal esperado estando as três fases defasadas em torno de 120° no tempo e possuindo a mesma amplitude. Isso demonstra que a configuração de polos e ranhuras da Figura 12 proposta é bastante satisfatória. Neste ensaio tem-se uma onda com amplitude pico a pico cerca de 86,6V, frequência de oscilação em torno de 101,1016Hz e uma velocidade de rotação da máquina de 542rpm.

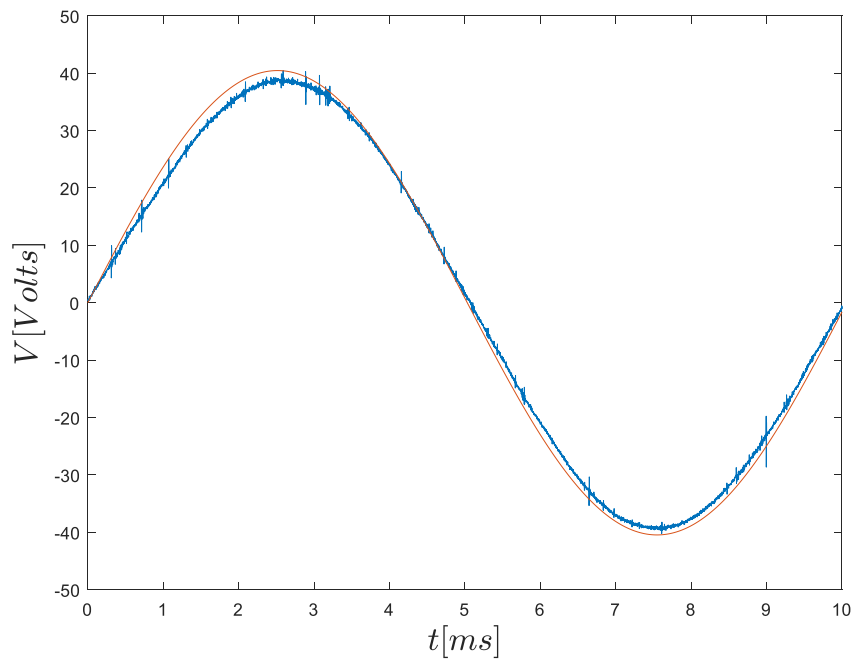
Na Figura 29 tem-se a comparação de um ciclo de onda obtido da coleta de dados do ensaio a vazio nas condições anteriormente citadas e uma senoide pura ideal.

Figura 28 – Tensão trifásica obtidas em osciloscópio.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 29 - Comparação entre curva teórica e prática.

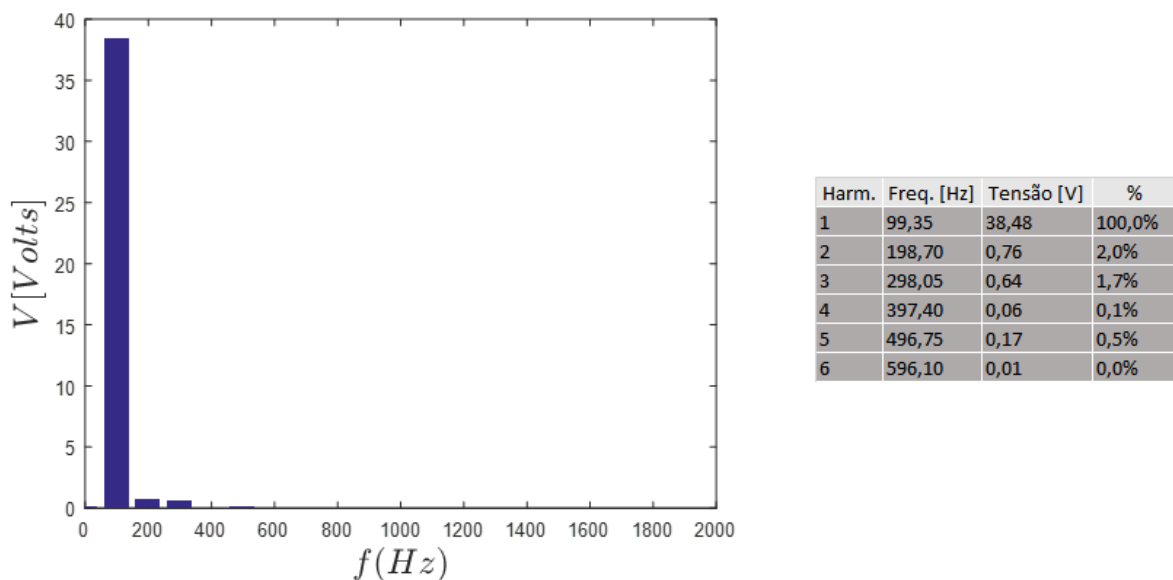


Fonte: Do autor (2018).

Pode-se perceber que existem disparidades entre as duas curvas, isso provem das imperfeições na construção e do fato de a velocidade de rotação do gerador não ser constante durante todo o ciclo de rotação. Ainda assim, obtém-se um valor de 0,9989 quando tomamos o coeficiente de determinação R^2 entre os valores práticos e teóricos. Isso significa que 99,89% do resultado prático obtido é condizente com a amostra ideal senoidal, confirmando que o gerador tem uma grande fidelidade com o projetado.

Em termos gerais, a amplitude de um dado harmônico é inversamente proporcional à sua ordem, mas é proporcional ao fator de enrolamento para o harmônico dado (KOSTENKO M.; PIOTROVSKI, 1979). Isso significa que quanto maior a ordem n de uma harmônica, menor será sua influência na tensão final gerada. Segue na Figura 30 o espectro de harmônicos presentes nessa amostra analisada. É possível perceber que a influência das harmônicas é baixa (a segunda é a mais expressiva e representa apenas 2% da amplitude da fundamental) o que garante uma maior qualidade da energia gerada.

Figura 30 - Espectro de harmônicos.



Fonte: Do autor (2018).

Findadas as análises do perfil e qualidade das ondas geradas passou-se para ensaios com e sem cargas, como descritos nos tópicos seguintes.

5.3. Ensaio a vazio

Com a máquina a vazio foram realizados ensaios para determinar a relação entre a tensão gerada e a velocidade de rotação da máquina como mostrado na Figura 31. É possível perceber que, no intervalo considerado (100rpm – 500rpm) temos uma variação praticamente linear de tensão, como mostra a equação (15) da linha de tendência do gráfico. A relação linear é satisfatória pois facilita a vasta maioria de aplicações do gerador

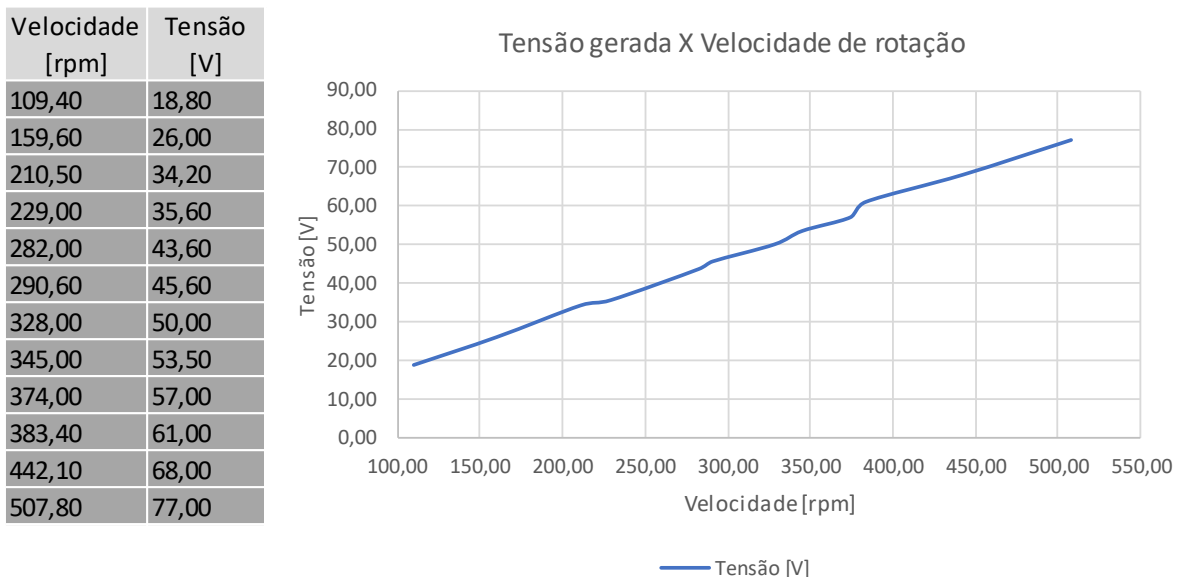
$$V_f = 0,1476 \cdot vel \quad (15)$$

Onde:

V_f : Tensão de fase [V];

vel : Velocidade de rotação [rpm].

Figura 31 – Tensão a vazio X Velocidade.



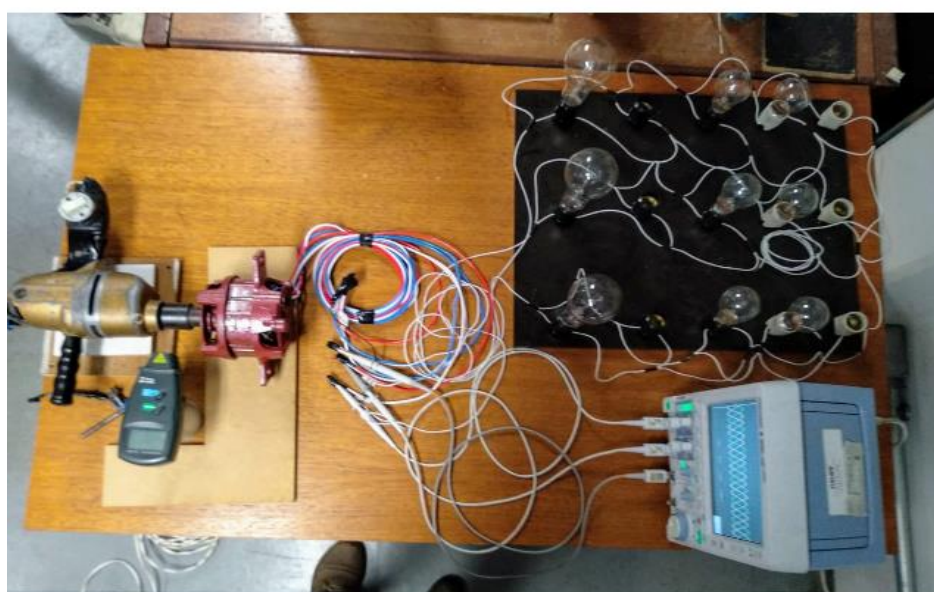
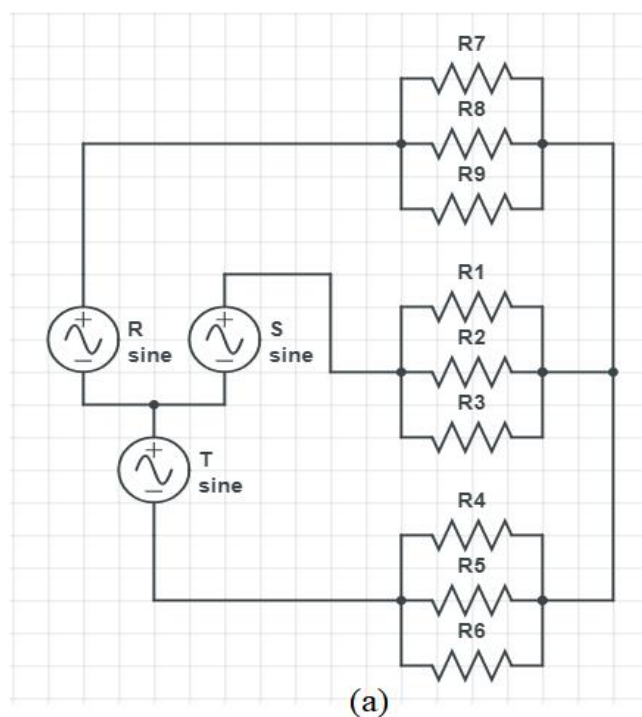
Fonte: Do autor (2018).

Foram feitas medições de resistência dos enrolamentos presentes na máquina e obteve-se 8,1Ω, 8,11Ω e 8,1Ω para L1, L2 e L3, respectivamente. A divergência entre o valor previsto na Tabela 4 e o real é aceitável e se deve ao fato de que as bobinas e cabeças polares possuem ligeira diferenças de tamanho entre si já que foram feitas com uma bobinadeira não profissional.

5.4. Ensaio com carga

Para o ensaio com carga foi montada uma bancada de lâmpadas incandescentes conectadas em estrela (Y) e através da retirada ou inserção de lâmpadas de diversas potências construía-se a carga desejada. Na Figura 32 segue um diagrama do circuito montado.

Figura 32 – (a) Diagrama do circuito de carga; (b) Circuito em bancada.



(b)

Fonte: Do autor (2018).

Para cada carga presente, posta progressivamente a partir do ensaio a vazio, foram anotados valores referentes à tensão pico a pico por fase (V_{pp}), frequência, velocidade de rotação e corrente por fase. Foi ainda calculada a regulação de tensão (Reg) para cada aumento de carga, isso porque a cada incremento de carga o gerador aumentava sua perda devido ao aumento na corrente, diminuindo sua velocidade, portanto, reajustava-se a rotação através do variador de tensão que alimentava a máquina de excitação (furadeira). Segue na equação (16) o memorial de cálculo para a determinação da regulação de tensão (Reg).

$$Reg = \frac{V_{vazio} - V_{carga}}{V_{carga}} \cdot 100\% \quad (16)$$

Onde:

Reg : Regulação de tensão;

V_{vazio} : Tensão a vazio;

V_{carga} : tensão com carga.

Segue na Tabela 6 a relação de cargas utilizadas para os ensaios e os resultados obtidos.

Tabela 6 - Resultados por carga.

Lâmpada/ fase[W]	Rot. Gerador [rpm]	Freq. Fase [Hz]	Vpp [V]	Corrente Fase/fase [mA]	Pot. Carga [W]	Reg [%]
0	542	101	86,6	0	0,00	0,0%
40	542	99	85	76,67	19,55	1,9%
60	542	100	84,8	123,33	31,38	2,1%
100	543	100	82,2	193,33	47,68	5,4%
150	542	99,7	80,5	326,67	78,89	7,6%
210	624	114	89	353,33	94,34	

Fonte: Do autor (2018).

Quanto menor a regulação de tensão, melhor é o desempenho da máquina pois uma baixa regulação de tensão significa dizer que as perdas internas da máquina com o aumento de carga são pequenas e grande parcela da potência injetada é transferida para a carga.

Segue na Figura 33 o momento do ensaio com lâmpadas de 150W.

Figura 33 - Lâmpadas durante o ensaio do micro gerador.



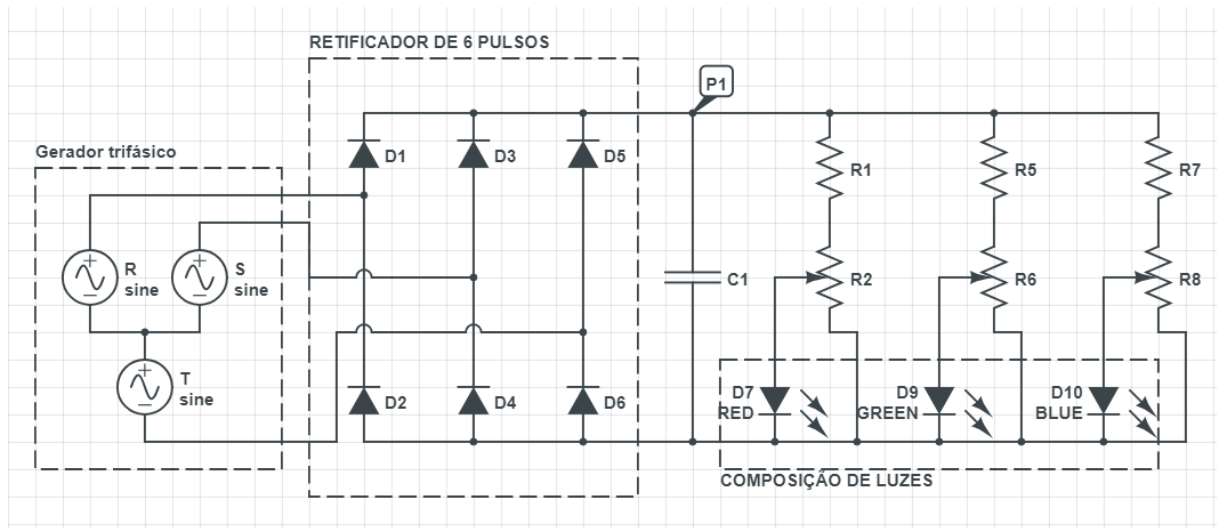
Fonte: Do autor (2018).

5.5. Ensaio com retificação

Na maior parte das aplicações de aerogeradores a geração de energia não é constante, de tal forma que a tensão gerada oscila no tempo, assim, faz-se necessário o uso de retificadores e conversores de frequência para que essa energia seja disponibilizada de maneira satisfatória para a rede.

O circuito mostrado na Figura 34 foi montado em bancada no laboratório. Composto por uma ponte retificadora de 6 pulsos. No ponto P1 está a saída de tensão já retificada e filtrada pelo capacitor C para minimização do *ripple*. Foram ligados três LEDs com as cores vermelha, verde e azul, respectivamente, formando o sistema de cores RGB e através da combinação de diferentes intensidades de luz emitida por cada LED (e, conseqüentemente, a variação da intensidade da corrente elétrica, controlada pelo potenciômetro, que atravessa cada LED) é possível a obtenção de um vasto espectro de cores.

Figura 34 – Circuito retificador.



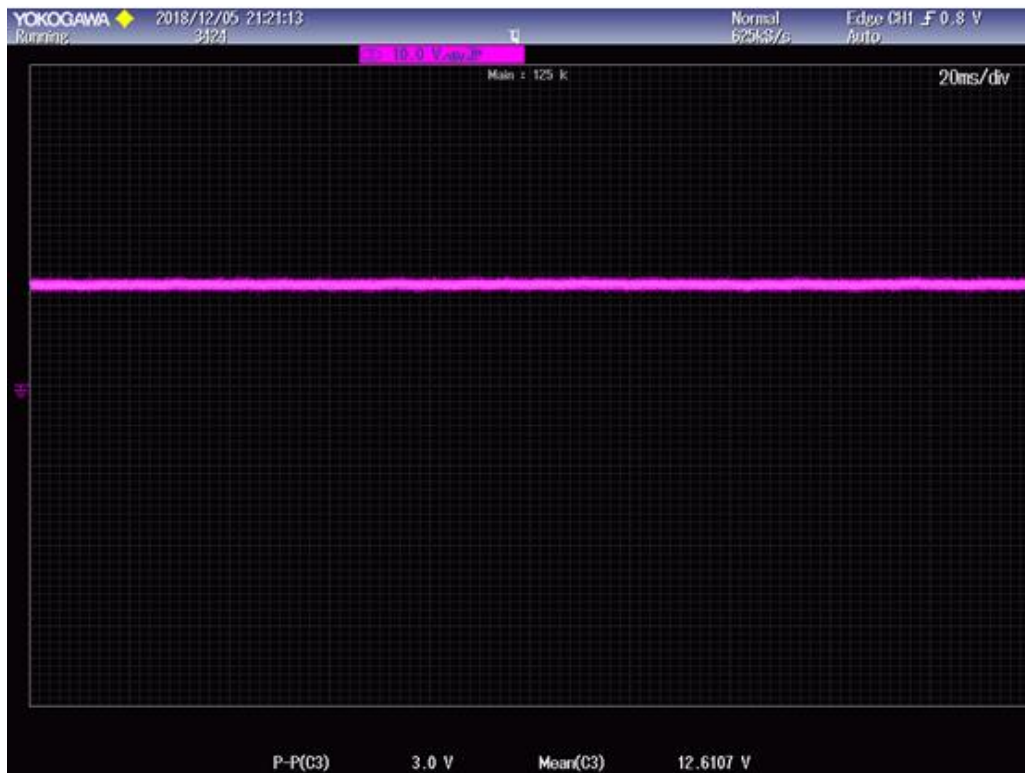
Fonte: Do autor (2018).

Na Figura 35 (a) é mostrada a tensão de saída do retificador no ponto P1 da Figura 34 sem a inserção do capacitor de filtro no circuito. É possível observar claramente a influência do *ripple* na tensão de saída. Já na Figura 35 (b) tem-se a tensão de alimentação dos LEDs, cerca de 12,6V, já filtrada pelo capacitor, com *ripple* minimizado.

Figura 35 – (a) Tensão retificada sem filtro. (b) Tensão retificada com capacitor.



(a)

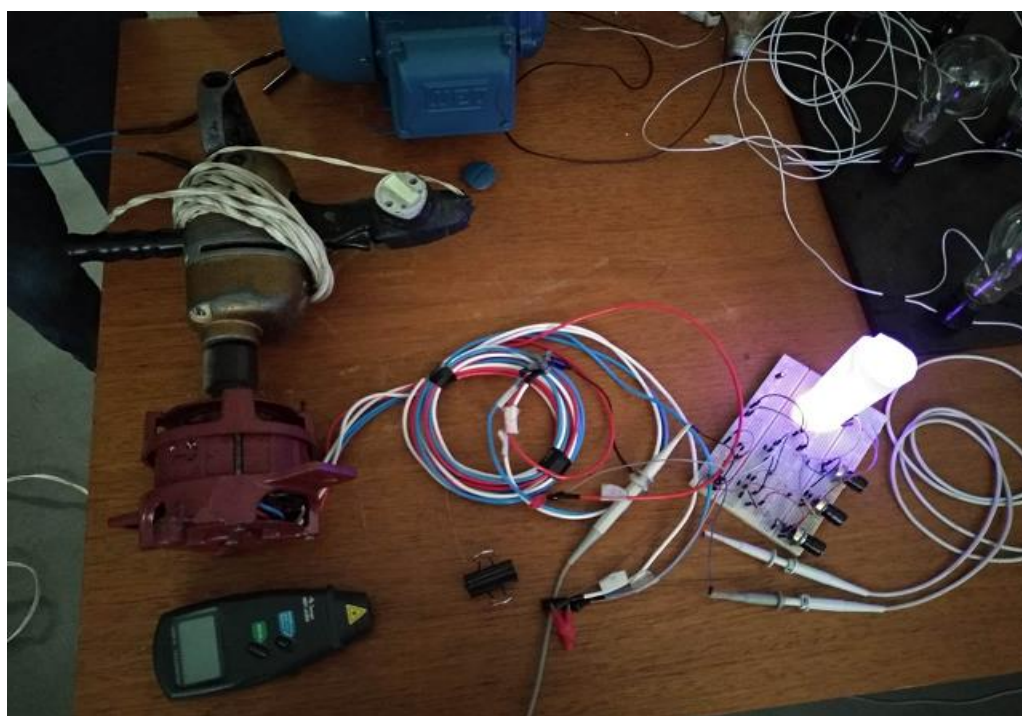


(b)

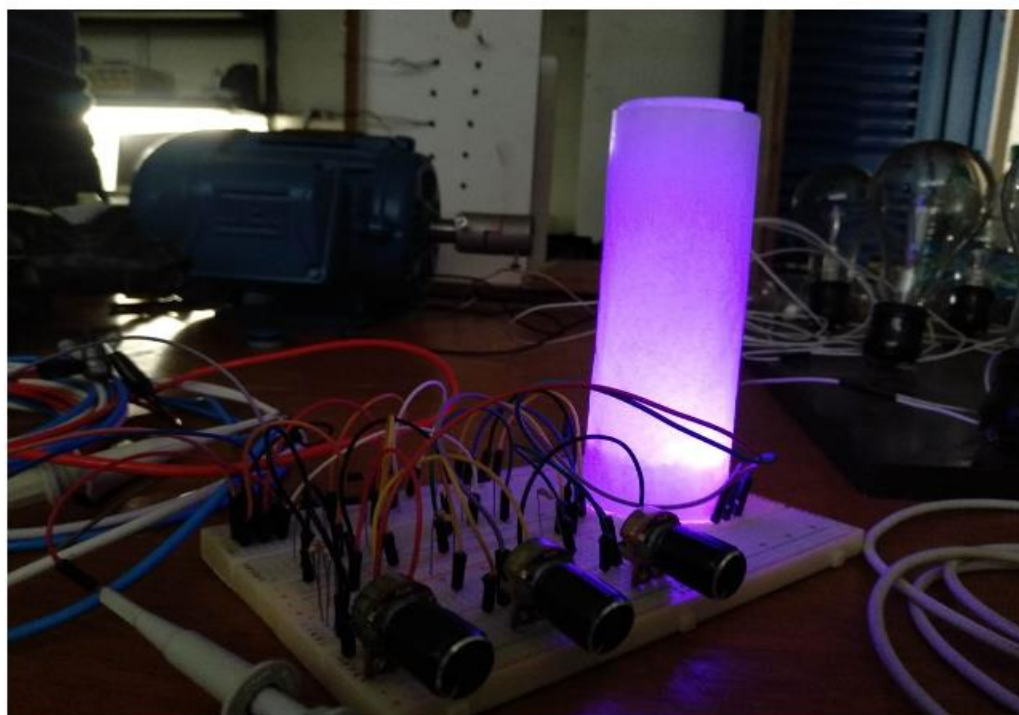
Fonte: Do autor (2018).

A luz sofre difusão e reflexão dentro do cilindro de papel de seda o que permite ao olho humano enxergar a composição das cores formando uma nova cor como mostrado na Figura 36 (b).

Figura 36 – (a) Retificador em bancada. (b) Efeito luminoso produzido.



(a)



(b)

Fonte: Do autor (2018).

6. CONCLUSÃO

Como exposto durante todo o desenvolvimento do trabalho, o objetivo final de projetar um microgerador *brushless AC* de ímãs permanentes no rotor foi atingido. Construir o gerador, passando por diversas etapas e dificuldades, elétricas e mecânicas, enriqueceu o campo de conhecimento e experiência dos envolvidos provendo-os melhor entendimento prático da fabricação de máquinas elétricas. Entender as peculiaridades do projeto de uma máquina *brushless* a partir de um motor de indução monofásico pré-existente foi tratado como um desafio para os realizadores.

Com uma baixa influência de harmônicos, uma vez que as mais relevantes, 2ª e 3ª harmônicas, possuem apenas 2% e 1,7%, respectivamente, da amplitude da fundamental, apresentando uma regulação de tensão razoável e com um perfil trifásico senoidal próximo ao ideal, pois, ao comparar o ciclo de onda do gerador com uma função seno é obtido um valor $R^2 = 0,9989$, mostrando que mais de 99% da onda obtida condiz com a teórica ideal.

Com este trabalho, a evolução em termos de projeto e resultado foram satisfatórios, tendo em vista o dimensionamento de partes do gerador que foram calculadas e projetadas em *softwares* e os conhecimentos adquiridos, não só na bibliografia, mas também ao longo processo de graduação e auxílio dos professores.

Segue, na Tabela 7, os custos referentes a peças para a realização de um projeto reaproveitando motores de indução de pequeno porte. É importante salientar que o serviço de usinagem do rotor e o valor do motor reaproveitado não foram levados em consideração no custo real pois, para este trabalho, não oneraram custo para os realizadores, sendo fruto de doações. É possível perceber o baixo custo envolvido na construção do gerador e este é um dos pontos mais atrativos neste projeto.

Tabela 7 – Custos de projeto.

Peça	Custo [R\$]
Imãs	R\$ 106,00
Motor reaproveitado	R\$ 80,00
Usinagem do rotor	R\$ 60,00
Verniz WEG	R\$ 30,00
Fio AWG 25	R\$ 22,00
Tinta	R\$ 13,00
Resina	R\$ 11,00
Rolamentos	R\$ 8,00
Poliéster	R\$ 5,00
Fio 2,5mm ²	R\$ 4,00
Termo retrátil	R\$ 3,00
Travas	R\$ 2,00
	R\$ 344,00
Custo projetado	R\$ 344,00
Custo real	R\$ 204,00

Fonte: Do autor (2018).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTINI, LUIGI. **Koil**. Free University of Bozen, 2012. Disponível em: < <http://koil.sourceforge.net/>>. Acessado em: 15 de setembro de 2018.

ANEEL. **Energia Eólica**. Disponível em: < [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf) > Acessado em: 25 de novembro de 2018.

BEM. **Relatório Síntese**, 2017. Disponível em: < <http://www.epe.gov.br> >. Acessado em: 05 de dezembro de 2018.

CBEE, UFPE. CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA, 2000. Disponível em: < www.eolica.com.br > Acesso em: 25 de novembro de 2018.

CHAU, K. T. **Overview of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, junho de 2008.

DASSAULT SYSTÈMES SOLIDWORKS CORPORATION, **SolidWorks**. 2018. Disponível em: <<https://www.solidworks.com/>>. Acessado em: 22 de agosto de 2018.

HAYT JR. WILLIAM H.; BUCK, JOHN A. **Eletromagnetismo**. 6ª Edição. Livros Técnicos e Científicos, 2003.

ISHAK, D.; ZHU, Z. Q.; HOWE. D. **High torque density permanent magnet brushless machine with similar slot and pole numbers**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004. 272-276.

K&J MAGNETICS, INC. **Demagnetization (BH) Curves for Neodymium Magnets**. Disponível em: < <https://www.kjmagnetics.com/bhcurves.asp> >. Acessado em: 05 de dezembro de 2018.

KOSTENKO, M., PIOTROVSKY, L., **Máquinas Eléctricas**. Ed. Lopes da Silva, Porto, 1979.

NSK. **Rolamentos fixos de esferas**. Disponível em: < www.nsk.com.br > Acessado em: 18 de setembro de 2018.

MILLER, T. J. E. **Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives**. Oxford: Claredon Press, 1993.

MILLER, T.J. E.; HENDERSOT JR, J. R **Design of brushless permanent-magnet motors**. 1. ed. Oxford: Magna Physics Publications, Oxford Science Publications, 1994.

OLIVEIRA, JR., N. Acionamentos de avanço para máquinas-ferramenta e robôs. **Comparação entre as técnicas CA, CC**. Revista Siemens. Separada da Revista Siemens, julho 1990.

SECIMA. **BALANÇO ENERGÉTICO DO ESTADO DE GOIÁS – BEGO**, 2017. Disponível em: < <http://www.secima.go.gov.br> >. Acessado em: 05 de dezembro de 2018.

SVOBODA, J.; DORF, R. **Introdução aos Circuitos Elétricos**. 5ª. Edição, LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**: 7. ed.amgh Editora: 2014.

VENDRAMINI, E.Z. **Distribuições probabilísticas de velocidades do vento para a avaliação do potencial energético eólico**. Botucatu: UNESP, 1986. 110P. Tese (Doutorado em Agronomia) – Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, 1986.

8. Anexo A - Script em LUA para fluxo concatenado por ângulo

```
-- abrir o estudo
mydir="./"
open(mydir .. "Motor 1.fem")

-- Salva um arquivo temporário para não sobrescrever o original
mi_saveas(mydir .. "temp.fem")

-- Zera as correntes para pegar apenas o fluxo concatenado oriundo dos ímãs
mi_modifycircprop("A",1,0);
mi_modifycircprop("B",1,0);
mi_modifycircprop("C",1,0);

-- Abre o console
showconsole()

-- Rotaciona o rotor passo a passo gravando o fluxo concatenado em cada posição
data = { };
steps = 360;
for k = 1,(steps+1) do
    print((k-1) .. "/" .. steps);
    mi_analyze(1);
    mi_loadsolution();
    data[k]={ };
    data[k][1] = (k-1)*360/steps;

-- Grava o fluxo concatenado em cada fase
v1,v2,data[k][2] = mo_getcircuitproperties("A");
v1,v2,data[k][3] = mo_getcircuitproperties("B");
v1,v2,data[k][4] = mo_getcircuitproperties("C");

-- incrementa um passo na posição do rotor
mi_selectgroup(1);
```

```
mi_moverotate(0, 0, 360/steps, 4);
mi_clearselected();
end

-- Grava os resultados em um arquivo de texto
fp=openfile(mydir .. "flux-results.txt","w")
for k = 1,(steps+1) do
  write(fp,data[k][1]," ",data[k][2]," ",data[k][3]," ",data[k][4]," ", "\n")
end
closefile(fp);
```

9. Anexo B - Tabela de rolamentos

Tabela 8 – Tipos de rolamentos NSK.

d	Dimensões (mm)			Capacidade de Carga Básica (N)				Fator f_0	Limite de Rotação (rpm)			Número do Rolamento			
	D	B	r mín.	C_r	C_{0r}	C_r	C_{0r}		Graxa		Óleo	Aberto	Blindado	Vedado	
									Aberto Z - ZZ V - VV	DU DDU	Aberto Z				
10	19	5	0,3	1 720	840	175	86	14,8	34 000	24 000	40 000	6800	ZZ	VV	DD
	22	6	0,3	2 700	1 270	275	129	14,0	32 000	22 000	38 000	6900	ZZ	VV	DD
	26	8	0,3	4 550	1 970	465	201	12,4	30 000	22 000	36 000	6000	ZZ	VV	DDU
	30	9	0,6	5 100	2 390	520	244	13,2	24 000	18 000	30 000	6200	ZZ	VV	DDU
	35	11	0,6	8 100	3 450	825	350	11,2	22 000	17 000	26 000	6300	ZZ	VV	DDU
12	21	5	0,3	1 920	1 040	195	106	15,3	32 000	20 000	38 000	6801	ZZ	VV	DD
	24	6	0,3	2 890	1 460	295	149	14,5	30 000	20 000	36 000	6901	ZZ	VV	DD
	28	7	0,3	5 100	2 370	520	241	13,0	28 000	—	32 000	16001	—	—	—
	28	8	0,3	5 100	2 370	520	241	13,0	28 000	18 000	32 000	6001	ZZ	VV	DDU
	32	10	0,6	6 800	3 050	695	310	12,3	22 000	17 000	28 000	6201	ZZ	VV	DDU
37	12	1	9 700	4 200	990	425	11,1	20 000	16 000	24 000	6301	ZZ	VV	DDU	
15	24	5	0,3	2 070	1 260	212	128	15,8	28 000	17 000	34 000	6802	ZZ	VV	DD
	28	7	0,3	4 350	2 260	440	230	14,3	26 000	17 000	30 000	6902	ZZ	VV	DD
	32	8	0,3	5 600	2 830	570	289	13,9	24 000	—	28 000	16002	—	—	—
	32	9	0,3	5 600	2 830	570	289	13,9	24 000	15 000	28 000	6002	ZZ	VV	DDU
	35	11	0,6	7 650	3 750	780	380	13,2	20 000	14 000	24 000	6202	ZZ	VV	DDU
42	13	1	11 400	5 450	1 170	555	12,3	17 000	13 000	20 000	6302	ZZ	VV	DDU	
17	26	5	0,3	2 630	1 570	268	160	15,7	26 000	15 000	30 000	6803	ZZ	VV	DD
	30	7	0,3	4 600	2 550	470	260	14,7	24 000	15 000	28 000	6903	ZZ	VV	DDU
	35	8	0,3	6 000	3 250	610	330	14,4	22 000	—	26 000	16003	—	—	—
	35	10	0,3	6 000	3 250	610	330	14,4	22 000	13 000	26 000	6003	ZZ	VV	DDU
	40	12	0,6	9 550	4 800	975	490	13,2	17 000	12 000	20 000	6203	ZZ	VV	DDU
47	14	1	13 600	6 650	1 390	675	12,4	15 000	11 000	18 000	6303	ZZ	VV	DDU	
20	32	7	0,3	4 000	2 470	410	252	15,5	22 000	13 000	26 000	6804	ZZ	VV	DD
	37	9	0,3	6 400	3 700	650	375	14,7	19 000	12 000	22 000	6904	ZZ	VV	DDU
	42	8	0,3	7 900	4 450	810	455	14,5	18 000	—	20 000	16004	—	—	—
	42	12	0,6	9 400	5 000	955	510	13,8	18 000	11 000	20 000	6004	ZZ	VV	DDU
	47	14	1	12 800	6 600	1 300	670	13,1	15 000	11 000	18 000	6204	ZZ	VV	DDU
52	15	1,1	15 900	7 900	1 620	805	12,4	14 000	10 000	17 000	6304	ZZ	VV	DDU	
22	44	12	0,6	9 400	5 050	960	515	14,0	17 000	11 000	20 000	60/22	ZZ	VV	DDU
	50	14	1	12 900	6 800	1 320	695	13,5	14 000	9 500	16 000	62/22	ZZ	VV	DDU
	56	16	1,1	18 400	9 250	1 870	940	12,4	13 000	9 500	16 000	63/22	ZZ	VV	DDU

- Notas** (1) As tolerâncias das dimensões da ranhura e do anel de retenção são indicadas nas páginas de **A50** a **A53**.
(2) Quando da aplicação de uma grande carga axial, aumentar d_a e diminuir D_a em relação aos valores indicados.
(3) Anéis tipo N e NR aplicáveis somente para rolamentos abertos.

Fonte: NSK. Rolamentos fixos de esferas. Disponível em: www.nsk.com.br.