

Matheus Di Giorgio Amorim

**Projeto de máquina síncrona de ímãs
permanentes para aplicações de tração elétrica**

Brasil

2023

Matheus Di Giorgio Amorim

Projeto de máquina síncrona de ímãs permanentes para aplicações de tração elétrica

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Elétrica

Orientador: Dr. Igor Pasa Wiltuschnig

Brasil

2023

Matheus Di Giorgio Amorim

Projeto de máquina síncrona de ímãs permanentes para aplicações de tração elétrica/ Matheus Di Giorgio Amorim. – Brasil, 2023-

84 p.

Orientador: Dr. Igor Pasa Wiltuschnig

Pré-projeto de diplomação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Elétrica, 2023.

1. Ímã Permanente. 2. Máquinas elétricas. 3. Máquina Síncrona. 4. Tração elétrica. 5. Veículos Elétricos. I. Wiltuschnig, Igor Pasa. II. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. III. Escola de Engenharia. IV. Departamento de Engenharia Elétrica

Matheus Di Giorgio Amorim

Projeto de máquina síncrona de ímãs permanentes para aplicações de tração elétrica

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Trabalho aprovado. Brasil, 11 de setembro de 2023:

Dr. Igor Pasa Wiltuschnig
Orientador

Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro
Convidado 1

Dr. Ben Hur Bandeira Boff
Convidado 2

Brasil
2023

Agradecimentos

Os agradecimentos principais são direcionados à minha família que esteve ao meu lado durante todo o período de graduação, sempre com apoio e compreensão.

Agradeço ao professor Dr. Igor Pasa Wiltuschnig que durante o desenvolvimento do projeto de diplomação sempre foi solícito em orientar o projeto e responder meus questionamentos. Estendo meu agradecimento à ele por ter aberto as portas do Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia (LMEAE) e o uso de seus equipamentos, e a todo corpo técnico do laboratório que auxiliou em processos do trabalho.

Agradeço aos membros que compõe a banca avaliadora, professores Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro e Dr. Ben Hur Bandeira Boff, que se prontificaram que avaliar o trabalho desenvolvido.

Resumo

O projeto de diplomação propõe a conversão de um alternador automotivo em um motor síncrono de ímãs permanentes para uso em aplicações de tração. O objetivo é projetar o novo rotor para utilização do alternador adaptado em sistemas de propulsão de veículos elétricos, tais como carros, bicicletas e motonetas.

Para fundamentar o trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica qualitativa de máquinas elétricas focada nos objetos de estudo do projeto, alternadores e motores síncronos de ímãs permanentes. Além disso, foram apresentados os principais conceitos dos parâmetros de desempenho de motores. Por fim, foi investigado as etapas e processos de usinagem envolvidos na fabricação de máquinas elétricas, em especial o processo de eletroerosão a fio, além dos materiais de uso típico em motores.

Na sequência é apresentado o alternador a ser utilizado como base para o projeto. É proposto que o estator e os mancais do alternador sejam preservados. O projeto prevê a alteração da excitação de campo da máquina e, com isso, o dimensionamento de um novo rotor. Analiticamente encontrou-se um conjugado mínimo de 7,23 Nm e máximo de 16,58 Nm. Adicionalmente, foi apresentada a ferramenta computacional, *Ansys Maxwell*, utilizada para realizar simulações numéricas, pelo método de elementos finitos, na qual foi possível parametrizar as dimensões dos ímãs e coroa do rotor. Foram obtidas, via simulação paramétrica, valores de tensão induzida, conjugado estático e conjugado transiente para uma faixa de valores de encobrimento e espessura dos ímãs. Com o objetivo de maximizar o conjugado e aliado com as restrições comerciais e com os resultados analíticos e numéricos, foi possível definir todas as variáveis para fabricação do motor. Para o modelo final escolhido, o valor do conjugado em regime permanente foi de 10,04 Nm. Adicionalmente foi realizado o cálculo do conjugado a partir dos valores de tensão induzida, obtido de 10,40 Nm.

Por fim, utilizando os equipamentos e materiais disponíveis no LMEAE foi usinado o novo rotor e validado experimentalmente o protótipo construído pela comparação dos resultados de tensão induzida obtidos pelo ensaio com os resultados de simulação.

Palavras-chaves: Máquina Síncrona. Ímã Permanente. Máquinas elétricas. Tração elétrica. Veículos Elétricos.

Abstract

This graduation project proposes the conversion of an automotive alternator into a permanent magnet synchronous motor for use in traction applications. The objective is to design a new rotor for the adapted alternator in electric vehicle propulsion systems, such as cars, bicycles, and scooters.

To support the work, a qualitative literature review of electric machines focused on the project's study objects, alternators, and permanent magnet synchronous motors, was conducted. In addition, the key concepts of motor performance parameters were presented. Finally, the machining steps and processes involved in the fabrication of electric machines, especially the wire EDM (Electrical Discharge Machining) process, as well as typical materials used in motors, were investigated.

Next, the alternator to be used as the base for the project is presented. It is proposed that the alternator's stator and bearings be preserved. The project involves altering the field excitation of the machine and, as a result, sizing a new rotor. Analytically, a minimum torque of 7.23 Nm and a maximum of 16.58 Nm were found. Additionally, the computational tool, Ansys Maxwell, used for numerical simulations by the finite element method, is introduced. This tool allowed for parameterizing the dimensions of the rotor's magnets and crown. Through parametric simulation, values of induced voltage, static torque, and transient torque were obtained for a range of magnet overlap and thickness values. With the goal of maximizing torque, combined with commercial constraints and analytical and numerical results, all variables for motor fabrication were defined. For the final chosen model, the steady-state torque value was 10.04 Nm. Additionally, torque calculations were made based on induced voltage values, resulting in a torque of 10.40 Nm.

Finally, using the equipment and materials available at the university laboratory (LMEAE), the new rotor was machined, and the prototype was experimentally validated by comparing the results of induced voltage obtained from the test with the simulation results.

Key-words: Synchronous machines. Permanent magnet. Electrical machines. Electric traction. Electric vehicles.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquema do sistema de tração de um veículo híbrido, Toyota Prius.	22
Figura 2 – Acoplamento típico de um alternador ao volante de um motor à combustão através de uma correia dentada.	25
Figura 3 – Partes construtivas de um alternador.	26
Figura 4 – Topologia <i>Half Bridge</i> para acionamento do motor.	29
Figura 5 – Curvas de tensão e de conjugado esperado por acionamento por meia ponte.	30
Figura 6 – Diagrama típico de fluxo de potência para motores síncronos.	32
Figura 7 – Curva de rendimento típica de um alternador em função da velocidade de rotação.	33
Figura 8 – Componentes básicos da eletroerosão a fio	37
Figura 9 – Vista explodida do alternador original.	40
Figura 10 – Modelo de máquina gerado pelo módulo <i>RMXprt</i>	44
Figura 11 – Modelo de máquina gerado pelo módulo <i>Maxwell</i>	45
Figura 12 – Modelo com recobrimento 0,6.	45
Figura 13 – Modelo com recobrimento 0,9.	45
Figura 14 – Curvas de tensão induzida na fase A da máquina.	46
Figura 15 – Capacidade de condução de corrente em função da seção do cabo.	48
Figura 16 – Curva de conjugado com corrente nominal fixa.	49
Figura 17 – Curvas de conjugado transiente.	50
Figura 18 – Mapa de campo com a densidade de fluxo na máquina com recobrimento 0,95 e espessura 6 mm.	52
Figura 19 – Modelo com ímã de superfície plana e rebaixo.	56
Figura 20 – Curvas de conjugado considerando modelo de ímãs com superfície plana e curva, para recobrimento 0,6 e espessura de 5 mm.	57
Figura 21 – Curva de tensão induzida em um período.	58
Figura 22 – FFT da curva de tensão de fase induzida.	58
Figura 23 – Modelo do rotor com as culatras e vãos.	62
Figura 24 – Modelo do rotor com as culatras e vãos. Em destaque os ímãs.	62
Figura 25 – Bloco do material a ser utilizado na usinagem do rotor.	63
Figura 26 – Peça do rotor usinado.	64
Figura 27 – Carcaça do alternador com rolamentos inseridos.	65
Figura 28 – Peça usinada do rotor com eixo inserido.	65
Figura 29 – Rotor após a montagem dos ímãs.	66
Figura 30 – Rotor com ímãs e aplicação de fita com filamento de fibra de vidro.	67
Figura 31 – Máquina montada.	69

Figura 32 – Curvas de tensão induzida nos enrolamentos de armadura obtidas no ensaio.	70
Figura 33 – Curvas de tensão induzida obtidas pelo ensaio e simulação.	71
Figura 34 – Registro fotográfico do acionamento da máquina.	72

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores definidos das dimensões e definições básicas de projeto.	41
Tabela 2 – Valores de tensão induzida eficaz obtidos computacionalmente considerando o diâmetro do rotor de 60 mm.	47
Tabela 3 – Valores de conjugado estático eficaz obtidos computacionalmente considerando o diâmetro interno do rotor de 60 mm.	49
Tabela 4 – Valores de conjugado médio obtidos computacionalmente considerando o diâmetro interno do rotor de 60 mm.	51
Tabela 5 – Valores de densidade de fluxo típicos para máquinas síncronas de ímãs permanentes.	52
Tabela 6 – Valores de densidade de fluxo obtidos computacionalmente considerando recobrimento de 0,95 e espessura de 6 mm.	53
Tabela 7 – Valores de densidade de fluxo obtidos computacionalmente considerando recobrimento de 0,8 e espessura de 5 mm.	54
Tabela 8 – Valores de densidade de fluxo obtidos computacionalmente considerando recobrimento de 0,6 e espessura de 5 mm.	55
Tabela 9 – Valores definidos das dimensões e definições básicas de projeto.	55
Tabela 10 – Medidas de densidade de fluxo dos ímãs.	66

Lista de abreviaturas e siglas

CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
EDM	Usinagem por descarga elétrica, do inglês <i>Electrical Discharge Machining</i>
FEM	Método de elementos finitos, do inglês <i>Finite Elements Method</i>
FFT	Transformada rápida de Fourier, do inglês <i>Fast Fourier Transform</i> , abreviado <i>FFT</i>
IEC	A Comissão Eletrotécnica Internacional, do inglês <i>International Electrotechnical Commission</i>
IGBT	transistor bipolar de porta isolada, do inglês <i>insulated-gate bipolar transistor</i>
LED	Diodo Emissor de Luz, do inglês, <i>Light Emitting Diode</i>
LMEAE	Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo Metal-óxido, do inglês <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MSIP	Motores síncronos de ímãs permanentes
NR	Norma regulamentadora
NBR	Norma brasileira regulamentadora
SI	Sistema Internacional de Unidades

Lista de símbolos

δ	Entreferro (mm)
η	Rendimento
θ	Ângulo entre tensão e corrente (rad)
σ_{Ftan}	Estresse tangencial médio (Pa)
τ	Conjugado (Nm)
τ_{ap}	Conjugado aparente (Nm)
τ_{ind}	Conjugado induzido (Nm)
ξ	Ângulo de fase entre A e B (rad)
ω_e	Velocidade angular elétrica (rad/s)
ω_m	Velocidade angular mecânica (rad/s)
\hat{A}	Densidade linear de corrente de pico (A/mm)
A_{ef}	Densidade linear de corrente efetiva (A/mm)
a_c	Aceleração angular (m/s ²)
\hat{B}_δ	Densidade de fluxo no entreferro (T)
D	Diâmetro interno do estator (mm)
D_r	Diâmetro do rotor (mm)
\hat{e}_f	Valor de pico da componente fundamental da tensão de fase induzida
f_e	Frequência elétrica (Hz)
F_c	Força centrífuga (N)
\hat{I}	Valor de pico da corrente de fase (A)
I_L	Corrente de linha (A)
I_P	Corrente de pico (A)
K_e	Constante de força contra-eletromotriz (Vs/rad)

K_T	Constante de conjugado (Nm/A)
l	Comprimento axial do rotor (mm)
m	Ângulo mecânico a cada 120°elétricos (°)
m_{IMA}	Massa do ímã (kg)
N	Velocidade de rotação (RPM)
N_s	Velocidade de rotação síncrona (RPM)
N_{BAT}	Velocidade de rotação na tensão máxima da bateria (RPM)
n	Ângulo mecânico a cada 360° elétricos (°)
p	Número de polos
$P_{entrada}$	Potência de entrada (W)
P_{saida}	Potência de saída (W)
r	Raio de rotação (m)
T	Período (s)
V_{ef}	Tensão efetiva (V)
V_L	Tensão de linha (V)
V_r	Volume do rotor (mm ³)
V_{pp}	Tensão pico a pico (V)
v_t	Velocidade tangencial (m/s)
x	Ângulo mecânico por ranhura (°)
W	Trabalho (J)
z	Número de ranhuras que os sensores devem ser espaçados

Sumário

	Introdução	21
1	FUNDAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS	25
1.1	Alternadores	25
1.2	Motores síncronos de ímãs permanentes	27
1.2.1	Aplicações típicas	27
1.2.2	Partes construtivas	28
1.2.3	Acionamento e controle	28
1.2.3.1	Sensor de Efeito Hall	31
1.3	Parâmetros de desempenho	31
1.3.1	Potência e conjugado	31
1.3.2	Rendimento e perdas	32
1.3.3	Efeito de conjugado de retenção e saturação	33
1.4	Fabricação de máquinas elétricas	35
1.4.1	Materiais	36
1.4.2	Eletroerosão a fio	37
2	PROJETO DO MOTOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES .	39
2.1	Hipóteses de projeto	39
2.2	Dimensões básicas	39
2.3	Modelagem Analítica	41
2.4	Modelagem Computacional	42
2.4.1	Método de Elementos Finitos	43
2.4.2	Configuração inicial	43
2.4.3	Tensão induzida	46
2.4.4	Conjugado Estático	47
2.4.5	Conjugado com Acionamento	49
2.4.6	Densidade de Fluxo	51
2.5	Restrições comerciais	53
3	FABRICAÇÃO, MONTAGEM, ENSAIO E FUNCIONAMENTO DO MOTOR	61
3.1	Fabricação do rotor	61
3.1.1	Modelo	61
3.1.2	Usinagem	63
3.2	Montagem	64

3.2.1	Eixo e Rolamentos	64
3.2.2	Conexões terminais	65
3.2.3	Ímãs	66
3.2.4	Sensores Hall	67
3.2.5	Máquina Completa	68
3.3	Ensaio de tensão induzida	69
3.4	Acionamento do motor	70
	Conclusão	75
	REFERÊNCIAS	77
	APÊNDICES	79
	APÊNDICE A – DIMENSÕES DA MÁQUINA EXISTENTE	81
	APÊNDICE B – DIMENSÕES DO ROTOR	83

Introdução

As máquinas elétricas são dispositivos que convertem energia elétrica em mecânica e vice-versa. Elas são amplamente utilizadas em uma variedade de aplicações, incluindo geradores, compressores, ferramentas elétricas e eletrodomésticos. Estas máquinas desempenham um papel fundamental na geração, distribuição e uso da energia elétrica, e sua tecnologia tem evoluído ao longo do tempo para melhor atender às demandas da sociedade. Além disso, elas também são amplamente utilizadas em uma ampla gama de indústrias, desde a fabricação de bens de consumo até a exploração de recursos naturais.

Os motores elétricos são uma das aplicações mais comuns das máquinas elétricas. Eles são dispositivos que convertem energia elétrica em energia mecânica para mover objetos ou sistemas. Existem vários tipos de motores elétricos, incluindo motores de corrente contínua (CC), motores de corrente alternada e motores de passo, cada um com características únicas que os tornam adequados para aplicações específicas. Além disso, os motores elétricos também são projetados para operar em diferentes condições de carga, velocidade e temperatura, o que significa que eles podem ser utilizados em uma ampla gama de aplicações, desde pequenos aparelhos domésticos até grandes sistemas industriais.

Motores elétricos têm se tornado cada vez mais comuns em aplicações de tração, como empilhadeiras e veículos elétricos, devido a suas vantagens em relação aos motores a combustão interna. Alguns benefícios dos motores elétricos incluem maior eficiência energética, menor poluição ambiental, menor custo de manutenção e menor ruído durante a operação.

Os motores elétricos em aplicações de tração podem ser divididos em dois tipos principais: motores de corrente contínua (CC) e motores de corrente alternada (CA). Motores CC são frequentemente usados em aplicações de baixa e média potência, enquanto motores CA são usados em aplicações de alta potência.

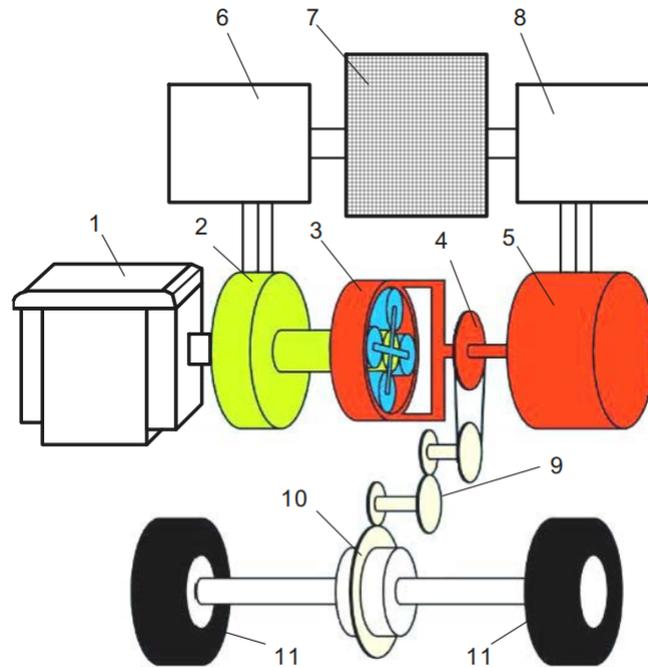
Empilhadeiras elétricas geralmente usam motores CC devido à sua capacidade de oferecer conjugado elevado em baixas velocidades e sua facilidade de controle. O motor CC é alimentado por baterias e pode ser controlado por meio de um controlador eletrônico. A combinação do motor CC e do conversor permite que a empilhadeira seja controlada com precisão e eficiência.

Veículos elétricos, por outro lado, geralmente usam motores CA devido à sua eficiência energética e capacidade de fornecer potência em alta velocidade. Esses motores são geralmente alimentados por baterias ou por um sistema de célula de combustível. O controle do motor CA é geralmente realizado por meio de um inversor, que converte a corrente contínua das baterias em corrente alternada de alta frequência para alimentar o

motor.

Também é possível que motores elétricos sejam parte do sistema de tração de um veículo híbrido, isto é, em conjunto com um motor a combustão. (GOTTLIEB, 1997). A Figura 1 apresenta o esquema simplificado do sistema de tração de veículo híbrido Toyota Prius, que faz uso de dois motores elétricos em conjunto com um motor a combustão.

Figura 1 – Esquema do sistema de tração de um veículo híbrido, Toyota Prius.



1- Motor à combustão; 2 - Máquina elétrica de ímãs permanentes *brushless* (arranque/gerador); 3 - *Power Split Device*; 4 - Corrente silenciosa; 5 - Máquina elétrica de ímãs permanentes *brushless* (motor/gerador); 6 - Conversor; 7 - Bateria; 8 - Conversor; 9 - Câmbio; 10 - Diferencial; 11 - Rodas dianteiras.

Fonte: (GIERAS, 2009).

O objeto de estudo do trabalho é um típico alternador automotivo. Originalmente, o alternador possui um rotor de garras, utilizada em escala desde o início dos anos 60 junto a motores de combustão para geração de energia elétrica. Apesar de tornar o projeto do financeiramente atrativo, essa geometria de rotor com garras diminui o rendimento e fator de potência da máquina (IVANKOVIC et al., 2012). Em aplicações usuais em automóveis, i.é. para recarga de baterias, essa situação é tolerável ao passo que cumpre com seu objetivo de ser uma gerador de baixo custo.

Contudo, deseja-se utilizar o alternador como motor para tração, por tanto, quer se otimizar os parâmetros de desempenhos fornecido pela máquina. Para isso, propõe-se uma nova geometria para o rotor, cilíndrica composta por ímãs permanentes de superfície. Dessa forma, a pergunta que o trabalho se propõe a responder é se com a alteração da

geometria, materiais e outros aspectos construtivos do rotor há alteração e incremento nos indicadores de performance do motor, em especial em potência e conjugado.

Apesar de outras abordagens para melhorar os parâmetros de performance sejam possíveis, o trabalho limitar-se-á a investigar os impactos que a alteração do rotor trás ao motor. Com esse objetivo, propõe-se o estudo das diferentes geometrias de rotor para a busca de maior conjugado e fator de potência. O rotor proposto consiste de um material ferromagnético em formato cilíndrico composto por ímãs permanentes de superfície, i.é., um rotor de ímãs permanentes de polos salientes. O rotor novo deverá possuir dimensões compatíveis com o estator existente do alternador.

Para responder à pergunta que o trabalho se propõe, procurará ser realizada uma primeira abordagem teórica e analítica, da qual deseja-se obter, a partir da revisão de conceitos fundamentais e referências anteriores, resultados e indicativos qualitativos e quantitativos que justifiquem a proposta de uma nova geometria para o rotor.

Após, deverá ser trabalhado o desenvolvimento de simulações em ferramentas de *software* comerciais que permitem realizar análise numérica através do método de elementos finitos (FEM). Com os resultados, poder-se-á estimar os possíveis impactos que o novo rotor trouxe ao motor. Para critério de comparação, serão necessários os valores das grandezas de interesse do motor com o rotor original.

Por fim, deseja-se construir o rotor proposto, a partir do qual poderão ser realizadas medidas de tensão induzida pela máquina. Para que, em posse destas, sejam feitas as comparações e análise dos resultados com àqueles obtidos e esperados das etapas anteriores.

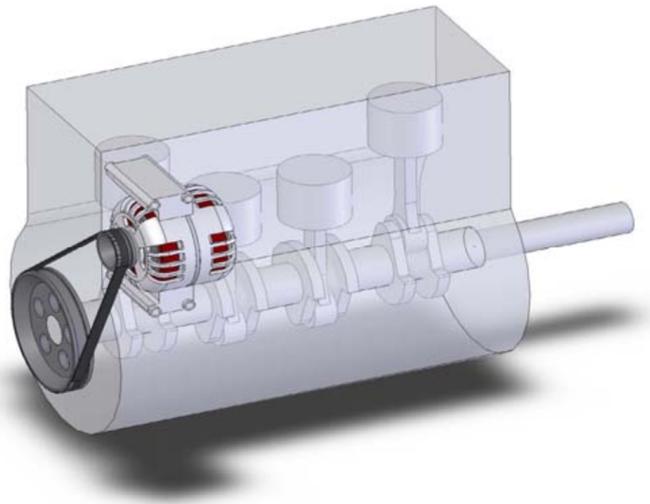
1 Fundamentos de Máquinas Elétricas

Esse capítulo apresenta os conceitos fundamentais de máquinas elétricas que foram utilizados como base para o desenvolvimento do trabalho. Inicialmente é feita uma apresentação de alternadores veiculares, objeto de estudo do trabalho, onde é apresentadas as características construtivas e funcionamento típico em veículos a combustão interna. Na sequência, são apresentados conceitos de motores síncronos de ímãs permanentes, suas aplicações típicas, partes construtivas e uma descrição do acionamento e controle desse tipo de motor. São apresentados os parâmetros de desempenho de máquinas, grandezas balizadoras da tomada de decisão do projeto. Ao fim, é exposto os principais processos e materiais utilizados na fabricação desse tipo de máquina.

1.1 Alternadores

Os alternadores automotivos são componentes elétricos importantes em veículos a combustão interna. Eles fornecem energia elétrica para alimentar as luzes, sistemas de som, painéis de instrumentos, entre outros componentes elétricos do veículo. Além disso, os alternadores também carregam a bateria do veículo e fornecem energia para o motor quando necessário. A Figura 2 apresenta uma visão isométrica do posicionamento usual do alternador junto ao motor de combustão.

Figura 2 – Acoplamento típico de um alternador ao volante de um motor à combustão através de uma correia dentada.

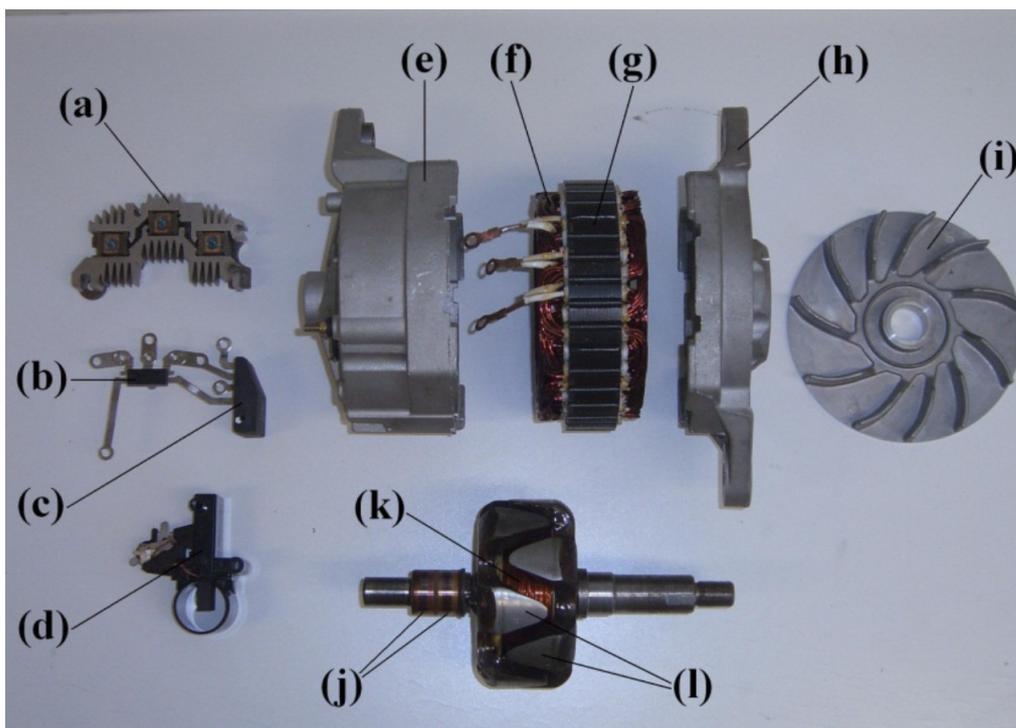


Fonte: (HAGSTEDT, 2013).

Os alternadores automotivos geralmente consistem em vários componentes principais, incluindo o rotor, o estator, o diodo retificador, o regulador de tensão, entre outros. O rotor é uma peça rotativa que é acionada pelo motor do veículo e gera o campo magnético necessário para produzir corrente elétrica. O estator é uma peça fixa que contém enrolamentos elétricos e é projetado para converter o campo magnético gerado pelo rotor em corrente elétrica. O diodo retificador é usado para converter a corrente alternada gerada pelo estator em corrente contínua, que é necessária para carregar a bateria do veículo e alimentar os componentes elétricos. O regulador de tensão é usado para controlar a tensão produzida pelo alternador e garantir que ela se mantenha dentro de limites seguros para os componentes elétricos do veículo. (FERREIRA, 2017)

A geometria da garra do rotor é um aspecto importante na construção de alternadores automotivos. A geometria da garra é importante porque afeta o rendimento e confiabilidade do alternador. A Figura 3 apresenta as partes construtivas básicas de um alternador automotivo comercial.

Figura 3 – Partes construtivas de um alternador.



(a) dissipador com diodos de retificação; (b) retificador de excitação; (c) regulador de tensão; (d) escovas; (e) mancal traseiro; (f) enrolamento do estator; (g) núcleo do estator; (h) mancal frontal; (i) sistema de ventilação; (j) anéis deslizantes; (k) bobina de campo; (l) garras do rotor.

Fonte: (IVANKOVIC et al., 2012).

A geometria da garra pode ser projetada de várias maneiras, incluindo a forma da garra, o número de dentes, a posição dos dentes em relação ao rotor e a distância

entre os dentes. Todos esses aspectos da geometria da garra afetam a corrente gerada pelo alternador e o rendimento do alternador.

1.2 Motores síncronos de ímãs permanentes

Os motores síncronos de ímãs permanentes (MSIP) são motores elétricos sem escovas que se diferem de outros tipos de motores por seu rotor único composto por ímãs permanentes, ao invés de escovas mecânicas que transmitem corrente elétrica para enrolamentos de campo no rotor. A construção do rotor por ímãs permanentes é um aspecto importante e distintivo dos motores síncronos de ímãs permanentes. Os ímãs permanentes no rotor interagem com os enrolamentos no estator para gerar movimento. Este tipo de topologia permite uma operação mais silenciosa, pois não há escovas mecânicas envolvidas, além de uma maior eficiência energética devido à ausência de perdas mecânicas e perdas elétricas nos enrolamentos de campo.

Além da construção por ímãs permanentes, os motores síncronos de ímãs permanentes incluem componentes como o estator e o controlador. O controlador é responsável por gerenciar a corrente elétrica para o estator.

1.2.1 Aplicações típicas

Os motores síncronos de ímãs permanentes são amplamente utilizados em uma ampla variedade de aplicações devido a seu alto rendimento, confiabilidade, silêncio e durabilidade. Algumas das aplicações típicas incluem:

- Veículos elétricos: os MSIP são amplamente utilizados em veículos elétricos, incluindo automóveis, bicicletas elétricas e motonetas, devido à sua alta eficiência energética e confiabilidade;
- Drones: os MSIP são usados em drones para controlar as hélices e fornecer propulsão;
- Sistemas de ventilação: os MSIP são amplamente utilizados em ventiladores de alta velocidade, exaustores e ventiladores de refrigeração, devido à sua alta eficiência e capacidade de controlar a velocidade;
- Bombas: os MSIP são utilizados em bombas para fornecer alta eficiência, confiabilidade e silêncio de operação;
- Automatização industrial: os MSIP são amplamente utilizados em sistemas de automação industrial, incluindo máquinas-ferramenta, robôs industriais e equipamentos de movimentação.

Estas são apenas algumas das muitas aplicações típicas de motores síncronos de ímãs permanentes, que são amplamente utilizados em muitos outros campos, incluindo aeroespacial, aparelhos elétricos, entre outros.

1.2.2 Partes construtivas

As partes que constituem um motor síncronos de ímãs permanentes são análogas àquelas apresentadas na Figura 3 para os alternadores, com exceção do rotor. No que segue, apresento uma descrição qualitativa dos componentes de um motor síncrono de ímãs permanentes. Os motores síncronos de ímãs permanentes são compostos por diversas partes construtivas, incluindo:

- Estator: é a parte fixa do motor que gera o campo magnético que atua sobre o rotor.
- Rotor: é a parte móvel do motor que é movido pelo campo magnético gerado pelo estator. O rotor é geralmente feito de ferro ou aço e contém ímãs permanentes que interagem com o campo magnético gerado pelo estator;
- Bobinas de estator: são as bobinas de cobre enroladas no estator que geram o campo magnético que atua sobre o rotor;
- Sensores de posição: são os dispositivos que monitoram a posição do rotor em relação ao estator.

1.2.3 Acionamento e controle

Foi considerando que o acionamento é feito com o uso de uma fonte de tensão contínuo como, por exemplo, uma bateria. O acionamento e controle de motores síncronos de ímãs permanentes envolve vários processos, incluindo:

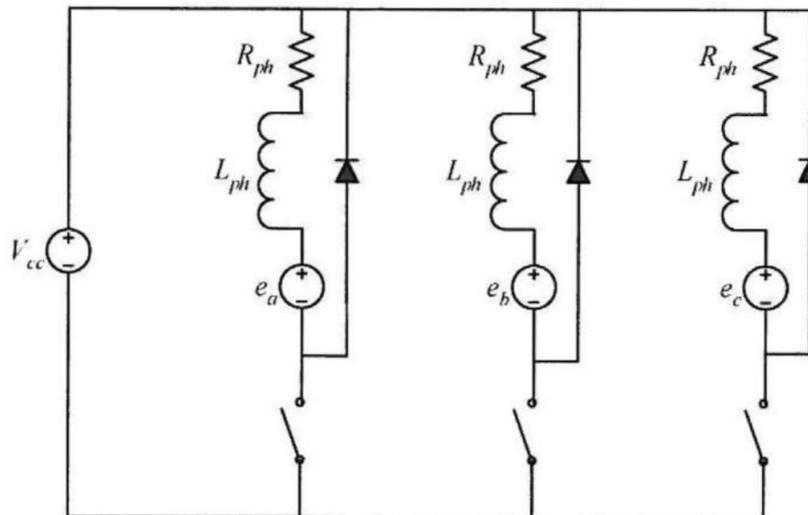
- Detecção de posição do rotor: é necessário saber a posição do rotor em relação ao estator para poder controlar a velocidade do motor. Isso é geralmente feito com sensores de efeito hall, que enviam sinais de tensão, com a presença de campo magnético, para o controlador de velocidade;
- Comutação das bobinas do estator: para produzir movimento, as bobinas do estator precisam ser alimentadas com corrente elétrica em uma sequência específica. Este processo é conhecido como comutação e é controlado pelo controlador de velocidade;
- Controle da velocidade: a velocidade do motor é controlada pelo controlador de velocidade, que geralmente usa um algoritmo de controle de velocidade para garantir que o motor gire a uma velocidade desejada;

- Alimentação elétrica: é necessário fornecer corrente elétrica para as bobinas do estator e para o controlador de velocidade. Isso é geralmente feito através de uma fonte de alimentação externa.

Estes são os processos principais envolvidos no acionamento e controle de motores síncronos de ímãs permanentes. O sistema de acionamento e controle é projetado para fornecer um controle preciso da velocidade do motor, garantindo que ele funcione de maneira eficiente e confiável. (KRISHNAN, 2009)

A topologia de acionamento *Half Bridge*, ou de meia ponte, mostrada na Figura 4 é uma opção de baixa complexidade. Na figura, as chaves representam transistores que podem ser abertos ou fechados eletronicamente. Quando uma chave de transistor é ligada, essa topologia suporta somente o fluxo de corrente positivo. Como resultado, apenas o ciclo positivo da tensão gerada pode ser utilizado para produzir conjugado como mostrado na Figura 5. A simplicidade dessa configuração é acompanhada por baixo desempenho, a ser discutido posteriormente.

Figura 4 – Topologia *Half Bridge* para acionamento do motor.

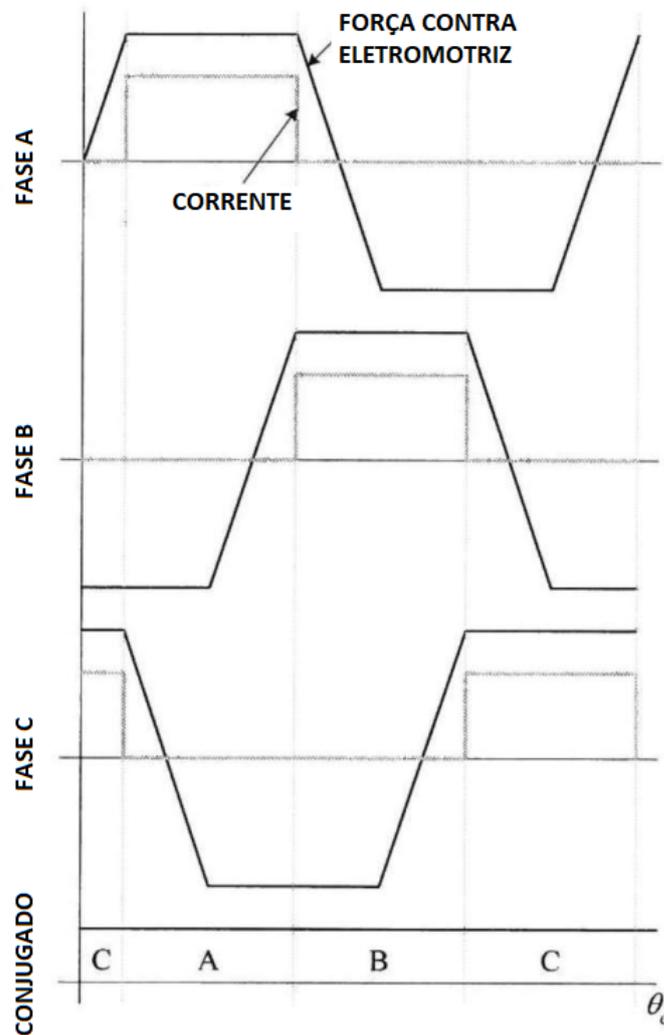


Fonte: (HANSELMAN, 2003)

O circuito responsável pela comutação das bobinas do estator de um motor síncrono de ímãs permanentes é geralmente conhecido como controlador de velocidade. Este circuito é composto por vários componentes, incluindo:

- Microcontrolador: responsável por controlar a comutação das bobinas do estator e o controle da velocidade;
- Sensores de posição: são usados para detectar a posição do rotor do motor;

Figura 5 – Curvas de tensão e de conjugado esperado por acionamento por meia ponte.



Fonte: (HANSELMAN, 2003).

- MOSFETs ou IGBTs: são usados para comutar a corrente elétrica nas bobinas do estator. Eles são controlados pelo microcontrolador para fornecer corrente elétrica às bobinas em uma sequência específica;
- Driver de MOSFET ou IGBT: é usado para controlar o MOSFET ou IGBT, garantindo que ele seja comutado corretamente e de forma precisa;
- Capacitores: são usados para filtrar a corrente elétrica e minimizar o ruído eletrônico;
- Diodos: são usados para proteger o sistema contra correntes de condução indesejadas.

Estes são os componentes principais que compõem o circuito de comutação do estator em um motor síncrono de ímãs permanentes. O circuito é projetado para comutar as bobinas do estator em uma sequência precisa para produzir movimento no rotor do motor.

1.2.3.1 Sensor de Efeito Hall

O sensor de efeito Hall é um dispositivo que detecta campos magnéticos e é amplamente utilizado em diversas aplicações, incluindo em motores elétricos. Ele é nomeado em homenagem ao cientista Edwin Hall, que descobriu o efeito que leva seu nome, o efeito Hall, que é a base de funcionamento desse sensor.

O funcionamento do sensor de efeito Hall ocorre em um material condutor percorrido por uma corrente elétrica e exposto a um campo magnético perpendicular à direção da corrente. Quando isso acontece, uma tensão é gerada perpendicularmente tanto à corrente quanto ao campo magnético. Essa tensão gerada, conhecida como tensão de Hall, é proporcional ao campo magnético aplicado.

Em motores elétricos, os sensores Hall são frequentemente usados para fornecer informações de posição e velocidade do rotor. Eles podem ser usados em motores de corrente contínua (CC) e motores de corrente alternada (CA).

1.3 Parâmetros de desempenho

Na sequência é apresentado os principais parâmetros de desempenho de máquinas elétricas.

1.3.1 Potência e conjugado

O conjugado de um objeto é definido como o produto da força aplicada ao objeto vezes a menor distância entre a reta de ação da força e o eixo de rotação do objeto. É medido em Newton-metro (Nm) (CHAPMAN, 2013).

Trabalho (W) em movimentos de rotação é a aplicação de um conjugado por uma distância, a equação (1.1) apresenta a definição de trabalho (CHAPMAN, 2013).

$$W = \int \tau d\theta \quad (1.1)$$

Potência (P) é a taxa de produção de trabalho (w), no SI é medido em Watt (W). A equação (1.2) apresenta a relação de potência considerando conjugado constante, onde ω é a velocidade angular do eixo do motor, medido em radianos por segundo (rad/s) (CHAPMAN, 2013).

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}(\tau\theta) = \tau\omega \quad (1.2)$$

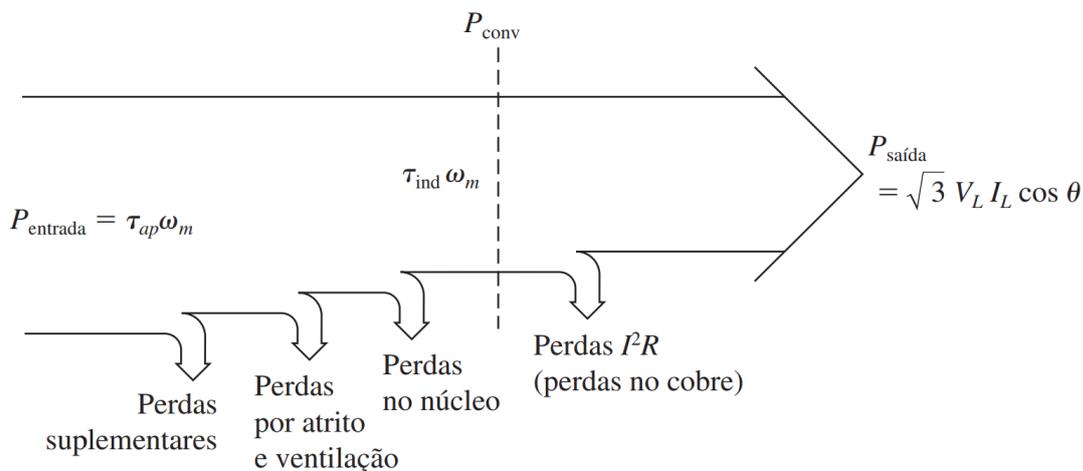
Um motor pode ser projetado para produzir mais conjugado ou mais potência, dependendo das necessidades da aplicação. Por exemplo, o conjugado em uma topologia de meia ponte, previamente apresentada, é limitado devido à falta de corrente negativa aplicada durante o ciclo negativo da tensão gerada pela fase. Metade da capacidade de

conjugado é perdida por não aplicar corrente negativa durante o ciclo negativo da tensão gerada pela fase. Essa topologia aparece geralmente em aplicações de baixa potência, onde o número de transistores e o custo precisam ser minimizados e o baixo rendimento na produção de conjugado tem impacto mínimo na aplicação. Além disso, a ondulação de conjugado também é uma preocupação importante devido à mudança frequente da corrente na topologia.

1.3.2 Rendimento e perdas

Rendimento é a relação entre a potência mecânica útil produzida pelo motor e a potência elétrica consumida pelo motor. É geralmente medido como uma porcentagem. Quanto maior o rendimento, menor a quantidade de energia desperdiçada como calor ou ruído. A Figura 6 apresenta um diagrama típico de fluxo de potência para motores síncronos, destacando a potência elétrica consumida pelo motor e a potência mecânica disponível no eixo.

Figura 6 – Diagrama típico de fluxo de potência para motores síncronos.



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

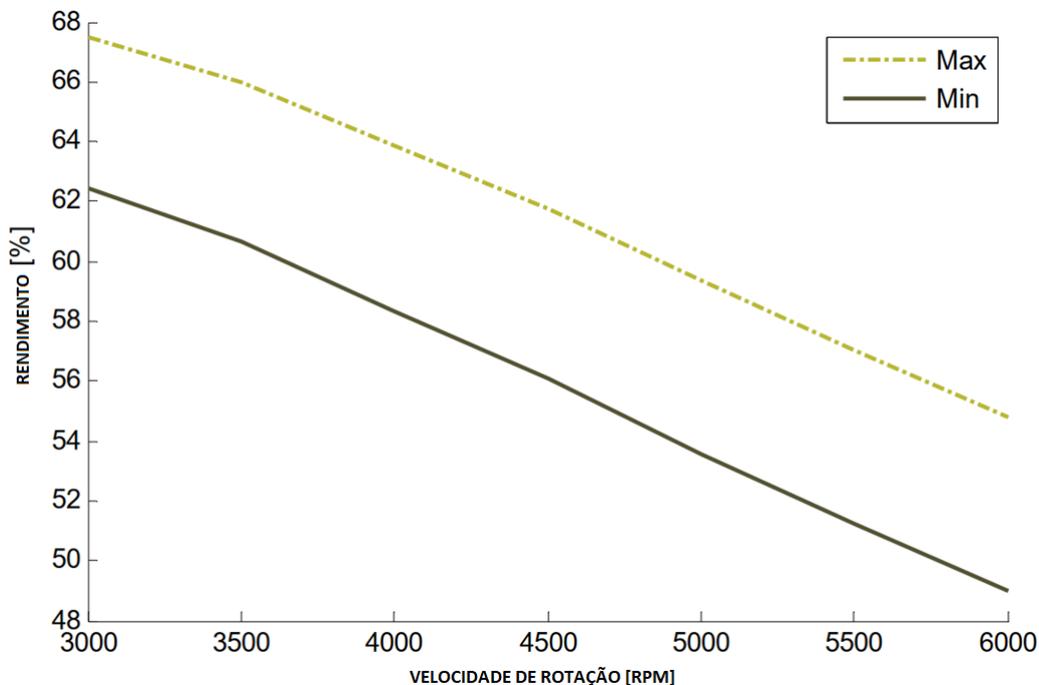
Perdas são a quantidade de energia elétrica que é convertida em outras formas de energia, como calor, ruído ou perda mecânica, em vez de trabalho mecânico útil. As perdas incluem perdas no estator (devido a corrente elétrica), perdas no rotor (devido a atrito e correntes parasitas) e perdas na conexão elétrica (devido à resistência dos cabos e conexões). Usualmente, o objetivo é minimizar as perdas para maximizar o rendimento.

O rendimento é dado pela equação: Rendimento = Potência de saída / Potência elétrica consumida. Portanto, quanto menor as perdas, maior o rendimento e mais eficiente o motor será.

A Figura 7 apresenta as curvas de rendimento típicos de alternadores automotivos em função da velocidade de rotação do alternador, considerando um intervalo mínimo e

máximo de perdas no ferro e nos enrolamentos de armadura. Na figura, pode-se observar o baixo rendimento esperado de alternadores, atingindo valores de rendimento inferiores a 70%.

Figura 7 – Curva de rendimento típica de um alternador em função da velocidade de rotação.



Fonte: (HAGSTEDT, 2013).

1.3.3 Efeito de conjugado de retenção e saturação

O efeito de conjugado de retenção é um fenômeno que ocorre em máquinas elétricas, como motores e geradores, que possuem variação de relutância. Esse efeito pode ser observado principalmente em motores de corrente contínua e motores síncronos de ímã permanente. O efeito é a variação de conjugado com a variação da posição do rotor, podendo implicar em um movimento de rotação não suave. (GIERAS, 2009)

Quando a máquina elétrica possui um projeto com um número par de dentes no estator (parte fixa) e no rotor (parte móvel), o efeito de conjugado de retenção é mais proeminente. Isso ocorre porque, quando os dentes do estator e do rotor estão alinhados perfeitamente, ocorre uma relutância magnética mínima, o que resulta em um movimento suave. No entanto, quando os dentes estão desalinhados, a relutância aumenta e o conjugado gerado diminui momentaneamente, causando solavancos ou oscilações no movimento do rotor.

O efeito de conjugado de retenção pode ser indesejável em algumas aplicações, especialmente em motores que exigem um movimento suave e contínuo. Além disso, o

efeito produz perdas magnéticas pois o fluxo magnético fica pulsando no topo das ranhuras. Para reduzir esse efeito, os projetistas podem adotar algumas técnicas, como (GIERAS, 2009):

- Utilizar um número de ranhuras por polo e por fase fracionárias: Isso ajuda a evitar o alinhamento perfeito dos dentes durante uma rotação completa, minimizando o efeito de conjugado de retenção;
- Reduzir a abertura das ranhuras: pode tornar o caminho magnético mais uniforme ao redor do estator, o que pode minimizar as variações no comprimento do caminho magnético. Isso, por sua vez, reduz as flutuações no campo magnético e, portanto, o efeito de conjugado de retenção.
- Utilizar ranhuras inclinadas: Alterar a forma dos dentes para que eles estejam inclinados em relação à direção radial pode ajudar a reduzir o impacto do conjugado de retenção;
- Utilizar materiais com menor relutância magnética: A escolha de materiais apropriados pode ajudar a minimizar a variação de relutância durante a rotação, reduzindo assim o efeito de conjugado de retenção.

A saturação magnética dos materiais tem uma influência significativa no efeito de conjugado de retenção em máquinas elétricas. A saturação magnética ocorre quando o material ferromagnético atinge seu limite de magnetização, onde não é possível aumentar ainda mais a densidade de fluxo magnético mesmo com o aumento da intensidade do campo magnético aplicado.

A presença de saturação magnética é particularmente relevante em máquinas elétricas que utilizam ímãs permanentes ou materiais ferromagnéticos em seu estator ou rotor. Em muitos casos, esses ímãs ou materiais ferromagnéticos são utilizados para gerar um campo magnético estável e criar o conjugado necessário para o funcionamento da máquina.

Quando a máquina elétrica entra em regime de saturação magnética, o comportamento do fluxo magnético nos dentes do estator e rotor é alterado. Essa alteração do fluxo magnético pode agravar o efeito de conjugado de retenção de várias maneiras:

- Maior relutância nos dentes: Com a saturação magnética, os materiais ferromagnéticos ficam menos permeáveis ao fluxo magnético. Isso aumenta a relutância (resistência ao fluxo) nos dentes, agravando o efeito de conjugado de retenção quando os dentes do rotor e estator estão desalinhados;

- Variação mais acentuada do conjugado: O efeito de conjugado de retenção já causa flutuações no conjugado durante a rotação do rotor. Quando a saturação magnética entra em jogo, essas flutuações podem se tornar mais acentuadas devido à mudança no comportamento do fluxo magnético, levando a oscilações mais significativas no conjugado;
- Dificuldade na redução do conjugado de retenção: A saturação magnética torna mais complexo mitigar o efeito de conjugado de retenção por meio de técnicas de design, uma vez que as características magnéticas dos materiais se alteram significativamente em condições de saturação.

1.4 Fabricação de máquinas elétricas

O processo de fabricação de máquinas elétricas é composto por várias etapas, desde o projeto até a montagem final do produto. As principais etapas incluem:

- Projeto: É a etapa inicial do processo de fabricação, onde são definidos as especificações técnicas da máquina elétrica, incluindo dimensões, material, potência, tensão, corrente, velocidade e outros requisitos. A simulação numérica por elementos finitos é uma ferramenta importante no projeto de máquinas elétricas, pois permite avaliar o comportamento magnético, térmico e mecânico de uma máquina antes da sua fabricação. Com a simulação, é possível otimizar o design da máquina para atender aos requisitos de desempenho, como conjugado, rendimento e vibração;

Na simulação, o modelo da máquina é dividido em pequenos elementos, permitindo a análise detalhada do campo magnético e da distribuição de corrente elétrica. Com essas informações, é possível calcular o conjugado e a potência da máquina e identificar possíveis pontos de concentração de calor que possam prejudicar seu desempenho.

Além disso, as simulações numéricas de elementos finitos são capazes de avaliar a resistência mecânica e a rigidez da máquina, ajudando a evitar problemas de vibração e fadiga estrutural. Com essa análise, é possível escolher o material adequado para as diferentes partes da máquina, bem como avaliar o impacto de possíveis alterações no projeto.

Assim, a simulação numérica por elementos finitos é uma ferramenta fundamental para o projeto de máquinas elétricas, permitindo a análise detalhada do comportamento da máquina em diferentes condições de operação, resultando em um design mais eficiente e confiável.

- Fabricação de componentes: Nesta etapa, os componentes da máquina elétrica são fabricados, incluindo estatores, rotores, bobinas, rolamentos, etc. É importante que

as especificações técnicas sejam rigorosamente seguidas para garantir a qualidade e desempenho adequados dos componentes;

- **Montagem:** É a etapa em que os componentes são montados para formar a máquina elétrica. É importante que a montagem seja realizada com precisão para garantir o rendimento e confiabilidade da máquina;
- **Testes:** Após a montagem, a máquina é submetida a uma série de testes, incluindo testes elétricos e mecânicos. Os resultados dos testes são avaliados para garantir que a máquina atenda às especificações técnicas;
- **Embalagem e envio:** Finalmente, a máquina é embalada e enviada para o destino final. É importante que a embalagem seja segura e adequada para proteger a máquina durante o transporte;

O processo de fabricação de máquinas elétricas é complexo e requer uma combinação de conhecimento técnico, habilidade manual e tecnologia avançada. É importante que todas as etapas sejam rigorosamente seguidas para garantir a qualidade e desempenho adequados da máquina elétrica.

1.4.1 Materiais

Os principais materiais na fabricação de rotores em motores elétricos são ferro fundido, aço silício laminado, aço inoxidável, cobre e ligas de alumínio. A escolha do material depende de fatores técnicos como densidade, condutividade, resistência à corrosão, resistência mecânica, permeabilidade magnética e custo. Ferro fundido é comumente utilizado devido à sua alta resistência mecânica e baixo custo, enquanto aço inoxidável é usado em aplicações em ambientes corrosivos. O aço laminado é utilizado para que uma lâmina seja isolada da outra e reduza as perdas por correntes parasitas induzidas onde há variação temporal de fluxo. No caso do uso de ímãs permanentes para excitação de campo, o rotor pode ser maciço pois atrás dos ímãs tem variação desprezível do fluxo, uma vez que a sua magnetização é fixa, isto é, não altera polaridade.

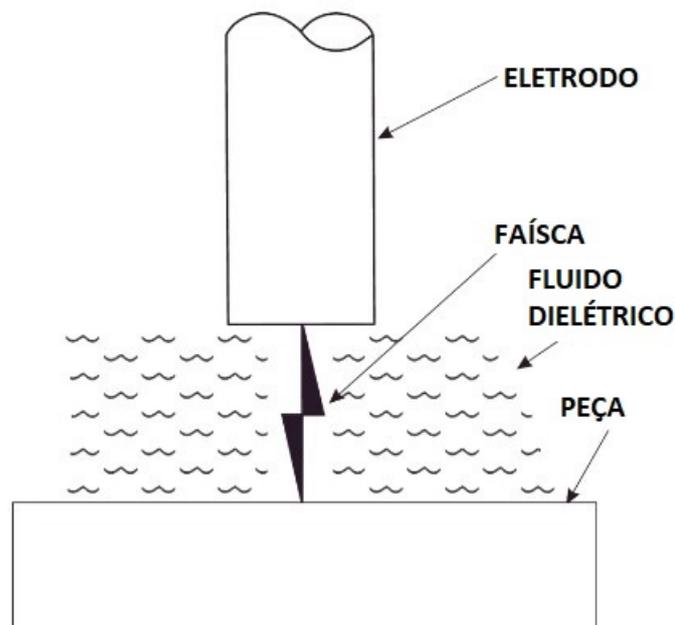
Os principais ímãs utilizados em motores síncronos são ímãs permanentes de neodímio (NdFeB) e de ferrite. Ímãs de neodímio oferecem alta densidade de campo magnético, o que permite aumentar o rendimento do motor, enquanto ímãs de ferrite são mais baratos e resistentes a temperaturas elevadas. Além disso, ímãs de ferrite são amplamente utilizados em aplicações comerciais devido à sua estabilidade térmica e ausência de perda magnética. A escolha do tipo de ímã depende das especificações técnicas do motor, como potência, velocidade, corrente, rendimento, entre outros aspectos.

1.4.2 Eletroerosão a fio

A eletroerosão a fio, também conhecida como EDM (*Electrical Discharge Machining*) ou simplesmente "eletroerosão", é um processo de usinagem que envolve a remoção de material de uma peça através de descargas elétricas controladas entre um fio condutor e a peça a ser usinada. Esse método é frequentemente utilizado para usinar materiais condutores de eletricidade, como aços, ligas metálicas e outros materiais duros. (JAMESON, 2001)

A Figura 8 apresenta os componentes básicos do arranjo do processo de eletroerosão a fio.

Figura 8 – Componentes básicos da eletroerosão a fio



Fonte: (JAMESON, 2001)

O processo de eletroerosão a fio funciona da seguinte maneira:

- *Setup*: Inicialmente, a máquina de eletroerosão é preparada com o fio condutor, normalmente feito de latão ou outro material condutor. A peça a ser usinada também é fixada na máquina, e é importante garantir um bom isolamento entre o fio e a peça, pois a descarga elétrica ocorre apenas onde o isolamento é mais fraco;
- *Descargas Elétricas*: O fio condutor é posicionado próximo à superfície da peça, sem tocá-la. Uma corrente elétrica de alta intensidade é passada através do fio, criando um fluxo de elétrons entre o fio e a peça. Isso gera uma série de descargas elétricas (faíscas) controladas entre o fio e a peça, que ocorrem em um meio dielétrico (normalmente um fluido isolante) que envolve a área de usinagem;

- **Remoção de Material:** As descargas elétricas geram um intenso calor que derrete uma pequena quantidade de material da peça e também do fio condutor. Essas partículas derretidas são expelidas pelo fluido dielétrico. O processo é repetido inúmeras vezes em locais específicos da peça, seguindo o caminho programado no software de controle da máquina;
- **Desbaste e Precisão:** Conforme as descargas elétricas ocorrem, a peça começa a ser desgastada no local desejado. O fio condutor também se desgasta durante o processo. A velocidade e a intensidade das descargas elétricas podem ser ajustadas para controlar a taxa de remoção de material e, portanto, a precisão do acabamento;
- **Finalização:** O processo de eletroerosão a fio é interrompido quando a peça atinge as dimensões e a geometria desejadas. O resultado é uma peça usinada com precisão, que pode ter formas complexas e detalhes intrincados.

A eletroerosão a fio é especialmente útil para peças de formas complexas, materiais endurecidos que são difíceis de serem usinados por métodos tradicionais e para produzir peças com alta precisão e acabamento de superfície. No entanto, o processo é relativamente lento em comparação com outras formas de usinagem e é mais adequado para trabalhos que requerem formatos que o torno e fresa, por exemplo, não fazem. Além disso é importante destacar que o material a ser usinado precisa ser eletricamente condutor. (JAMESON, 2001)

2 Projeto do Motor Síncrono de Ímãs Permanentes

Esse capítulo apresenta o desenvolvimento do projeto de motor. São apresentadas inicialmente as hipóteses do projeto, bem como suas restrições iniciais a partir das quais foram definidas as dimensões básicas da máquina. A partir disso, são determinados analiticamente os valores máximos e mínimos de conjugado nominal da máquina. Adicionalmente, são explorados resultados obtidos através de ferramentas de simulação computacional a fim validar e parametrizar o projeto da máquina. Também foram levadas em conta as restrições comerciais que impactam o projeto. Ao final, são expostas as configurações finais da máquina para que seja possível realizar a fabricação e montagem dela.

2.1 Hipóteses de projeto

Analisando especificamente o caso de interesse desse trabalho, assumiu-se que o desempenho de uma máquina elétrica está diretamente relacionado à seu volume ativo, carregamento elétrico e magnético. Para validar essa hipótese, propôs-se realizar uma análise teórica e simulações computacionais, considerando as propriedades dos materiais, as condições de operação e os parâmetros construtivos da máquina.

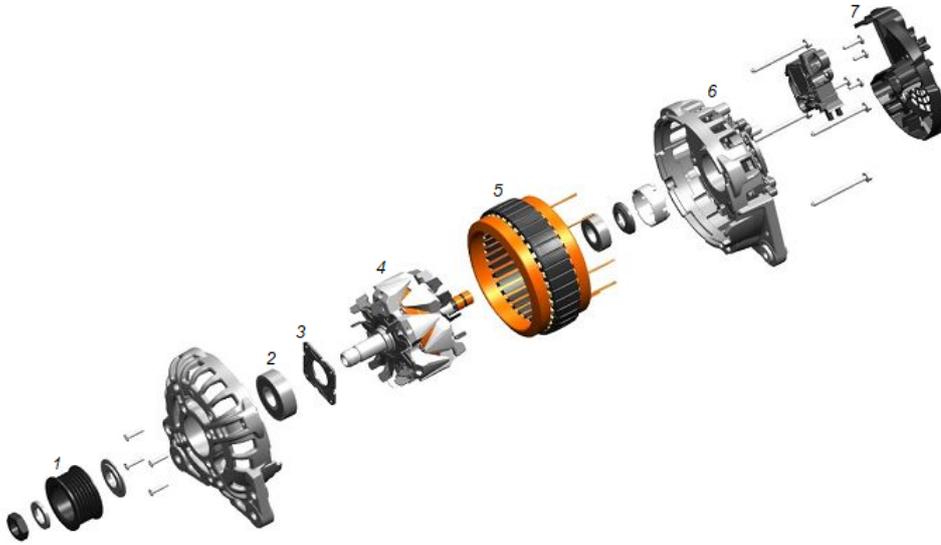
Ao realizar a análise teórica e simulações computacionais, foi possível determinar o desempenho da máquina elétrica em diferentes condições de operação e avaliar o impacto da geometria do rotor nos parâmetros de desempenho, como conjugado. Já os ensaios permitem obter dados reais de desempenho da máquina e comparar com os resultados teóricos e simulações, permitindo verificar a validade da modelagem utilizada e identificar possíveis fontes de erro.

2.2 Dimensões básicas

O projeto consistiu em converter um alternador existente em um motor com aplicações em tração. Dessa forma foi necessário obter informações a respeito da máquina existente para que fosse possível observar e respeitar possíveis restrições que o uso dessa máquina trouxe ao projeto.

O Apêndice A apresenta o diagrama da máquina existente, bem como suas dimensões. A Figura 9 apresenta a vista explodida do alternador original. Foi considerado o uso do mesmo estator da máquina, preservando suas ranhuras e coroa. Dessa forma, a primeira restrição mecânica a ser observada é o diâmetro interno do estator (D) igual à

Figura 9 – Vista explodida do alternador original.



Fonte: catálogo SEG.

98,90 mm. Assim, o diâmetro do rotor (D_r) mais duas vezes o valor do entreferro (δ) deve ser igual ao diâmetro interno no estator. Por ter sido adotada uma geometria de polos salientes, o valor de D_r é o valor do diâmetro considerando a espessura dos ímãs.

O entreferro deve ser tão pequeno quanto possível, contudo, diminuir o valor do entreferro indefinidamente dificulta a fabricação, montagem e funcionamento da máquina, pois diminui a tolerância das dimensões. O limite empírico para o entreferro é dado pela equação (2.1) (JOKINEN; HRABOVCOVA; PYRHONEN, 2013). Escolheu-se um entreferro de 1 mm, que satisfaz o limite empírico apresentado.

$$\delta \geq \frac{D}{1000} \quad (2.1)$$

Propôs-se que o rotor a ser projetado possua uma excitação por ímãs permanentes e uma geometria de polos salientes. Foi utilizado o mesmo número de polos da máquina original, isto é, foram considerados 12 polos no rotor a ser projetado. Também foi considerado o rotor com mesmo comprimento axial que a máquina original, tanto a coroa do rotor quanto os ímãs.

A escolha pela excitação de campo através de ímãs permanentes remove a necessidade de alimentar o enrolamento de campo no rotor. Com isso, deixam de existir as perdas *Joule* nos condutores do enrolamento de campo.

Dessa forma, ficam definidos os valores do número de polos da máquina, do entreferro e diâmetro do rotor. A Tabela 1 sumariza essas informações para melhor visualização. Contudo, ainda não foi apresentado a escolha das dimensões dos ímãs (espessura e largura) e a espessura da coroa do rotor. Foram esses parâmetros, então indeterminados, explorados

via simulação computacional, a fim de obter os maiores valores de desempenho da máquina.

Tabela 1 – Valores definidos das dimensões e definições básicas de projeto.

Grandeza	Valor
Número de polos (p)	12
Entreferro (δ)	1 mm
Diâmetro do rotor com ímãs (D_r)	96,90 mm
Comprimento axial do rotor (l)	26,90 mm

Fonte: o autor.

2.3 Modelagem Analítica

A modelagem teórica é uma etapa importante para entender o comportamento do fenômeno em estudo. A partir das dimensões básicas definidas, pôde-se construir modelo analítico que representem a realidade. Esse modelos pôde ser utilizados para calcular resultados da máquina projetada.

A equação (2.2) apresenta uma expressão analítica do conjugado (τ) esperado a ser produzido pela máquina, dado em Newton-metro (Nm). V_r é o volume do rotor, dado em metros cúbicos (m^3), e σ_{Ftan} é o valor do estresse tangencial médio, dado em Pascal (Pa). (JOKINEN; HRABOVCOVA; PYRHONEN, 2013)

$$\tau = 2\sigma_{Ftan}V_r \quad (2.2)$$

O valor de σ_{Ftan} pode ser determinado em função do valor de pico de densidade linear \hat{A} e do valor de pico da densidade de fluxo no entreferro \hat{B}_δ , conforme equação (2.3). (JOKINEN; HRABOVCOVA; PYRHONEN, 2013)

$$\sigma_{Ftan} = \frac{\hat{A}\hat{B}_\delta \cos \xi}{2} \quad (2.3)$$

Considerando que será utilizada alimentação retangular, pode obter o valor de pico da densidade de corrente linear \hat{A} pela equação (2.4). (WILTUSCHNIG, 2016)

$$\hat{A} = \sqrt{\frac{3}{2}}A_{ef} \quad (2.4)$$

Substituindo (2.4) em (2.3) e (2.3) em (2.2), obtêm-se a equação (2.5). A literatura apresenta uma faixa de valores típicos de $A_{ef} = 35 - 65$ kA/m, $\hat{B}_\delta = 0,85 - 1,05$ T e $\cos \xi = 1$. (JOKINEN; HRABOVCOVA; PYRHONEN, 2013) O valor de V_r é obtido através das dimensões básicas apresentadas e é igual à $1,9838 \times 10^{-4}$ m³.

$$\tau = \sqrt{\frac{3}{2}} A_{ef} \hat{B}_\delta V_r \quad (2.5)$$

Utilizando a equação (2.5), considerando $A_{ef} = 35$ kA/m e $\hat{B}_\delta = 0,85$ T, o valor de conjugado é 7,23 Nm. Considerando $A_{ef} = 65$ kA/m e $\hat{B}_\delta = 1,05$ T, o valor de conjugado é 16,58 Nm. Assim, espera-se que o conjugado da máquina projetada apresenta um valor dentro dessa faixa de valores calculada.

Adicionalmente, pode-se obter o valor da potência mecânica esperada da máquina considerando uma velocidade nominal de 4000 RPM. Pela equação (2.6), calcula-se uma potência entre 3,03 e 6,45 kW.

$$P = \tau\omega = \left(\frac{\pi}{30}\right) \tau N \quad (2.6)$$

2.4 Modelagem Computacional

A modelagem computacional é uma etapa importante onde é realizada simulações através do método de elementos finitos com parametrização da geometria do ímã a fim de obter maior conjugado possível. O modelo pode considerar diferentes aspectos construtivos da máquina, tais como a geometria do rotor e do estator, o número de enrolamentos e a distribuição dos ímãs.

Assim, é possível realizar simulações para avaliar o desempenho do motor com diferentes geometrias propostas. Essas simulações podem incluir cálculos de potência, conjugado, eficiência e fator de potência da máquina, permitindo avaliar os impactos das alterações propostas. Esse modelo será implementado no *software* de simulação *Ansys Electronics*, para realizar análises mais precisas e detalhadas do desempenho do motor e otimizar o projeto.

O *Ansys Electronics* é uma ferramenta de simulação eletromagnética que permite a análise de desempenho de máquinas elétricas, como motores e geradores. Ele oferece recursos avançados de modelagem 2D e 3D, análise de campo magnético, cálculo de conjugado e perda, análise de eficiência, por exemplo.

A ferramenta permite a criação de modelos virtuais de máquinas elétricas, que podem ser facilmente parametrizados e simulados em diferentes condições operacionais. Além disso, o *Ansys Electronics* oferece opções para a modelagem e análise de perdas de materiais não lineares, como os materiais ferromagnéticos, que são frequentemente utilizados em máquinas elétricas.

Uma vez configurado, o modelo é submetido a diversas simulações, que podem variar de acordo com os parâmetros operacionais da máquina, geometria e excitação, por

exemplo. Os resultados das simulações podem ser utilizados para avaliar o desempenho da máquina elétrica, identificar possíveis falhas ou pontos de melhoria e otimizar o projeto.

2.4.1 Método de Elementos Finitos

O principal método de resolução utilizada pelo *Ansys Electronics* é o método de elementos finitos. O método de elementos finitos (FEM, na sigla em inglês) é uma técnica de análise numérica utilizada para resolver problemas de engenharia, como análise estrutural, análise de vibrações, análise térmica, entre outros. O FEM divide um objeto de estudo em pequenos elementos finitos, com comportamento conhecido, e resolvendo as equações matemáticas para cada elemento, obtendo-se uma solução global para o objeto.

O FEM é amplamente utilizado no projeto de motores elétricos, especialmente para simular o comportamento elétrico, térmico e mecânico dos componentes do motor. Com o uso do FEM, é possível avaliar o desempenho do motor antes da fabricação, identificar problemas de projeto e otimizar o desempenho.

O FEM permite modelar o comportamento do motor usando equações matemáticas, o que permite avaliar o desempenho em diferentes condições de operação, incluindo variações de velocidade, tensão, corrente e temperatura. Além disso, é possível avaliar o desempenho do sistema de enrolamento, incluindo a geração de torque e a eficiência.

O uso do FEM também permite avaliar problemas como sobreaquecimento, distorções no campo e desequilíbrios, que podem afetar negativamente o desempenho do motor. Com a identificação desses problemas, é possível tomar medidas para corrigi-los antes da fabricação, o que resulta em motores mais confiáveis e eficientes.

2.4.2 Configuração inicial

A fim de realizar as simulações e obter os resultados provenientes de simulação, foi necessário realizar a configuração das características da máquina. As dimensões básicas da máquina a ser projetada, já obtidas e expostas anteriormente, fazem parte da parametrização do *software*. Além disso, é importante incluir os materiais a serem considerados na simulação, pois as curvas de histerese dos materiais são levadas em conta na computação das perdas.

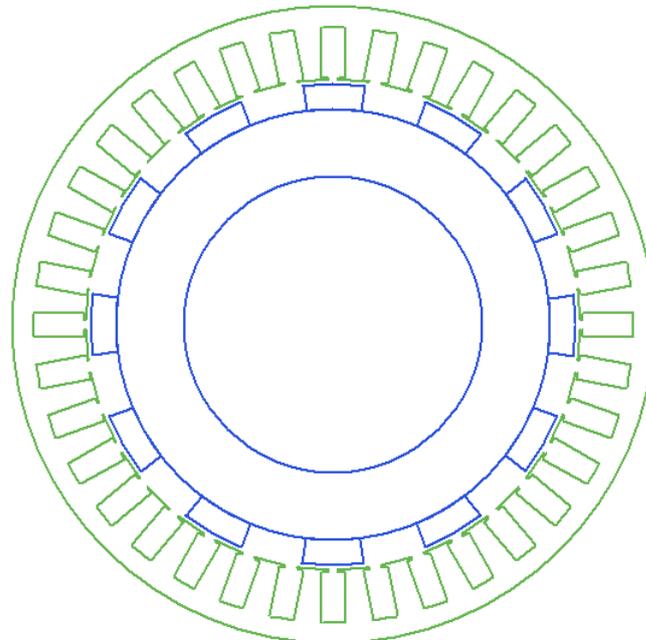
Para os ímãs considerou-se ímãs NdFeB N35, devido a sua grande disponibilidade comercial. O valor 35 na indicação do ímã refere-se ao produto energético máximo, uma medida útil da capacidade de desempenho de um ímã permanente. Esse valor corresponde ao maior produto B-H que está localizado em um ponto do segundo quadrante do laço de histerese desse material (UMANS, 2014). O produto de B vezes H tem a dimensão de densidade de energia (joules por metro cúbico no SI), mas comercialmente é indicado em MGOe (mega-gauss-oersted). 1 MGOe é equivalente a 7.958 kJ/m^3 .

Essas configuração foram inicialmente inseridas no módulo *RMXprt*. O módulo *RMXprt* é uma parte do software *Ansys Electronics* que se concentra na análise eletromagnética de dispositivos elétricos rotativos, como motores, geradores e transformadores. Ele fornece ferramentas poderosas para modelar e simular o desempenho eletromagnético desses dispositivos, permitindo a otimização do projeto e melhor compreensão de seu comportamento.

Com o módulo *RMXprt*, é possível criar rapidamente os modelos de dispositivos eletromagnéticos, especificando as características geométricas, materiais e elétricas do dispositivo. Aqui também foi possível inserir os parâmetros livres a serem variados a fim de obter os valores de desempenho da máquina. Será considerado como parâmetro livre a espessura do ímã, o recobrimento e o diâmetro interno do rotor. O recobrimento é a fração da superfície do rotor ocupada por ímãs, ou seja, o recobrimento está diretamente relacionado com a largura dos ímãs. O diâmetro interno do rotor implica na variação da espessura da coroa do rotor.

A Figura 10 apresenta o modelo gerado pelo módulo *RMXprt*. Está sendo considerado parâmetros de espessura de 5 mm, recobrimento de 0,5 e diâmetro interno do rotor de 60 mm. Esses parâmetros são apenas ilustrativos e foram variados no desenvolvimento do projeto.

Figura 10 – Modelo de máquina gerado pelo módulo *RMXprt*.



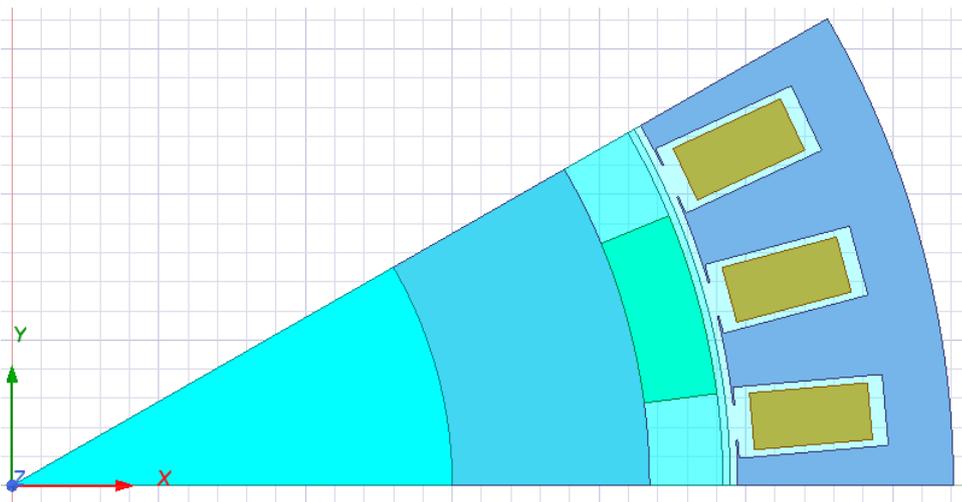
Fonte: o autor.

O módulo *RMXprt* permite a fácil modelagem de uma máquina elétrica. Contudo, o módulo não utiliza o método de elementos finitos para obter as suas soluções. Dessa forma, os resultados gerados diretamente *RMXprt* não foram explorados e considerados.

Felizmente, o *Ansys* permite gerar um modelo do módulo *Maxwell* a partir de um modelo *RMXprt*. O módulo *Maxwell* utiliza o método de elementos finitos em sua simulação e permite que sejam obtidas soluções transientes e magnetostáticas. Foram exploradas as soluções provenientes do modelo do módulo *Maxwell*.

A Figura 11 apresenta o mesmo modelo de máquina, com recobrimento 0,5, espessura de 5 mm e diâmetro interno do rotor de 60 mm. Importante observar que o módulo *Maxwell* utiliza da simetria da máquina para gerar o modelo e realizar a simulação apenas em uma fração da máquina. Além disso, ressalta-se que o modelo gerado possui um ímã com curvatura que acompanha perfeitamente a curva do rotor e estator da máquina. As opções de ímã disponíveis comercialmente são em formato de bloco, isto é, têm suas superfícies planas. Foi modificado, na configuração escolhida final, o modelo para tornar-se mais fidedigno à situação real.

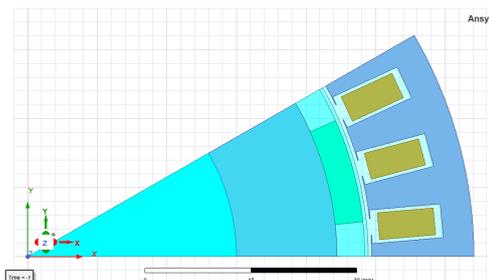
Figura 11 – Modelo de máquina gerado pelo módulo *Maxwell*.



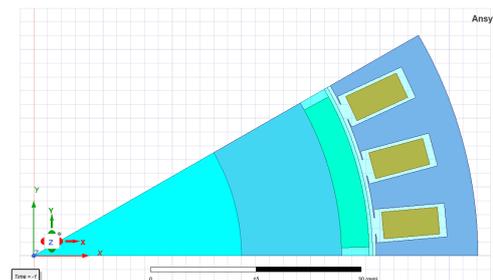
Fonte: o autor.

Para melhor visualização do impacto que o recobrimento tem sobre as dimensões dos ímãs, as Figuras 12 e 13 apresentam dois modelos com 0,6 e 0,9 de recobrimento, respectivamente.

Figura 12 – Modelo com recobrimento 0,6. Figura 13 – Modelo com recobrimento 0,9.



Fonte: o autor.



Fonte: o autor.

Na sequência é exposta a sequência dos resultados extraídos do módulo *Maxwell*, bem como a sequência de tomadas de decisão de projeto balizadas pelos resultados obtidos. Para todos os resultados durante o desenvolvimento do projeto foi imposta a velocidade de rotação de 4000 RPM.

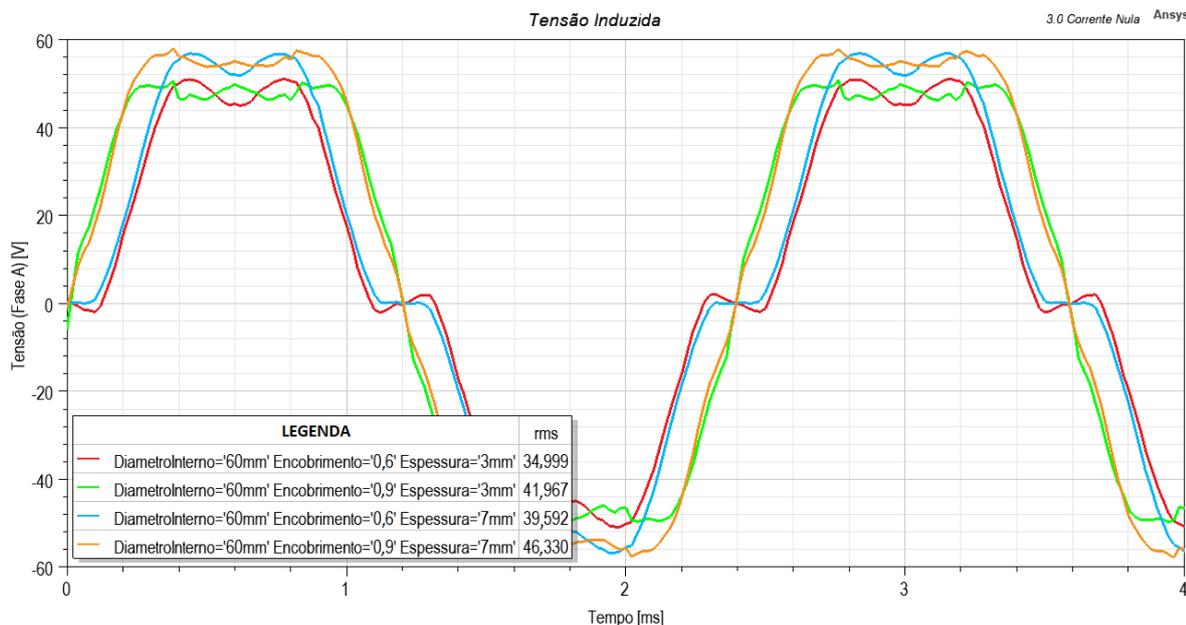
2.4.3 Tensão induzida

Inicialmente, foram explorados os valores de tensão induzida obtidos através do módulo *Maxwell*. Os resultados foram obtidos impondo corrente nula nos enrolamentos de armadura da máquina. Foram analisados os valores de tensão induzida pela conveniência de variação dos parâmetros livres e por requererem menor tempo computacional para obtenção dos resultados.

Como, nessa primeira abordagem, não se sabe a influência da variação das dimensões do ímã tem na tensão induzida, será percorrida uma maior faixa de valores, a fim dessa relação poder ser melhor observada. Contudo, previamente espera-se que maiores ímãs produzam maior fluxo na máquina que, por sua vez, induzam maior valor de tensão.

A Figura 14 apresenta a curva de tensão induzida extraída do *Maxwell*, nas condições de recobrimento 0,6 e 0,9 e espessura 3 e 7 mm. Aqui é possível observar que a largura da curva de tensão induzida aumenta junto com o recobrimento dos ímãs, enquanto que o valor de pico aumenta junto com a espessura dos ímãs. De qualquer forma, aumentar os dois parâmetros implica no aumento da tensão eficaz induzida, o que era esperado qualitativamente.

Figura 14 – Curvas de tensão induzida na fase A da máquina.



Fonte: o autor.

Foram obtidos os valores de tensão eficaz induzida para valores de recobrimento e espessura dos ímãs na faixa de 0,5 a 1 e 2 a 9 mm, respectivamente. Para evitar repetir todas as curvas e melhor leitura dos resultados, os valores eficazes são apresentados na Tabela 2. Importante observar que, para todos os resultados apresentados até então, foi fixado o valor do diâmetro interno do rotor em 60 mm, valor que foi estipulando pequeno o suficiente para que não seja observada saturação na coroa do rotor que comprometa a performance da máquina.

Tabela 2 – Valores de tensão induzida eficaz obtidos computacionalmente considerando o diâmetro do rotor de 60 mm.

Tensão induzida (V) - Valor eficaz

Espessura (mm)	recobrimento										
	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
2	27,6	29,4	31,0	32,4	33,7	34,8	36,0	37,0	37,9	38,5	38,8
3	31,2	33,2	35,0	36,6	38,0	39,2	40,3	41,3	42,0	42,4	42,6
4	33,1	35,3	37,2	38,8	40,3	41,5	42,6	43,4	44,0	44,4	44,6
5	34,3	36,5	38,4	40,1	41,6	42,8	43,8	44,7	45,2	45,6	45,7
6	34,9	37,2	39,2	40,9	42,4	43,6	44,6	45,4	45,9	46,3	46,4
7	35,3	37,6	39,6	41,3	42,8	44,1	45,0	45,8	46,3	46,7	46,7
8	35,5	37,8	39,8	41,6	43,1	44,3	45,3	46,0	46,6	46,9	47,0
9	35,6	37,9	39,9	41,7	43,2	44,4	45,4	46,1	46,7	47,0	47,1

Fonte: o autor.

Investigando os valores apresentados na Tabela 2, observou-se que a tensão eficaz induzida aumenta com o aumento da espessura e recobrimento em toda a faixa explorada. O que, mais uma vez, faz sentido qualitativo visto que um volume maior de ímã implica num maior fluxo concatenado, o que implica em mais tensão induzida. Contudo, apesar do aumento da tensão induzida com a espessura, a partir de 6 mm o incremento de tensão é pequeno. Essa última observação serviu para limitar o valor da espessura a fim de concentrar os esforços na região com impactos significativos. Além disso, um ímã de espessura muito grande impacta no custo do projeto e no conjugado de retenção da máquina.

2.4.4 Conjugado Estático

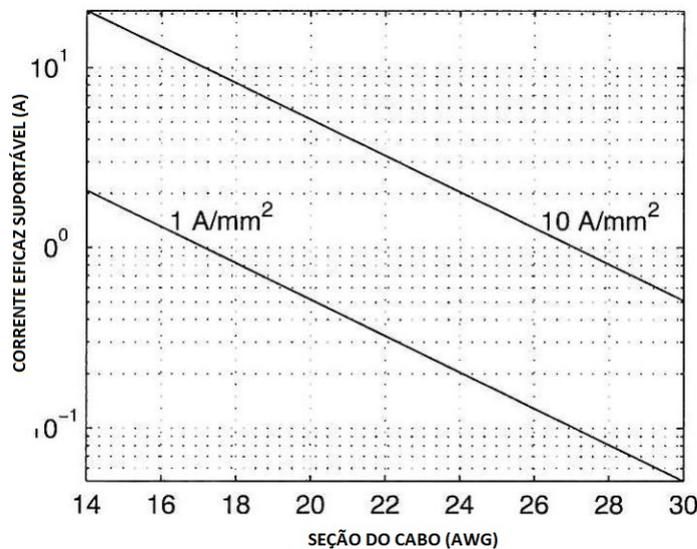
Conforme observado pelos resultado de tensão induzida, limitou-se a espessura do ímã na faixa de 4 a 6 mm. O principal indicador balizador para escolha dos parâmetros livres da máquina será o conjugado gerado pela máquina. É possível obter o conjugado da máquina através do acionamento completo simulado pelo *Maxwell*, e é apresentado na próxima seção.

Contudo, na tentativa de observar o comportamento do conjugado da máquina sem depender do acionamento desconhecido do *Maxwell* foi imposto a corrente de pico

nominal em um enrolamento de uma das fases e o negativo da metade dessa corrente de pico nominal nas outras duas fases. Essas correntes foram mantidas constantes e são equivalentes à componente real das correntes em um instante de tempo fixo, na situação de um sistema trifásico equilibrado. Assim, ao rotacionar a máquina ao longo do tempo, é possível observar o valor do conjugado em todas as posições de rotação.

A corrente nominal para enrolamento de armadura de máquinas síncronas de polos saliente possui valores típicos de densidade de corrente na faixa de 4 a 6,5 A/mm² (JOKINEN; HRABOVCOVA; PYRHONEN, 2013). Outra literatura, apresenta limites entre 1 a 10 A/mm², conforme Figura 15.

Figura 15 – Capacidade de condução de corrente em função da seção do cabo.



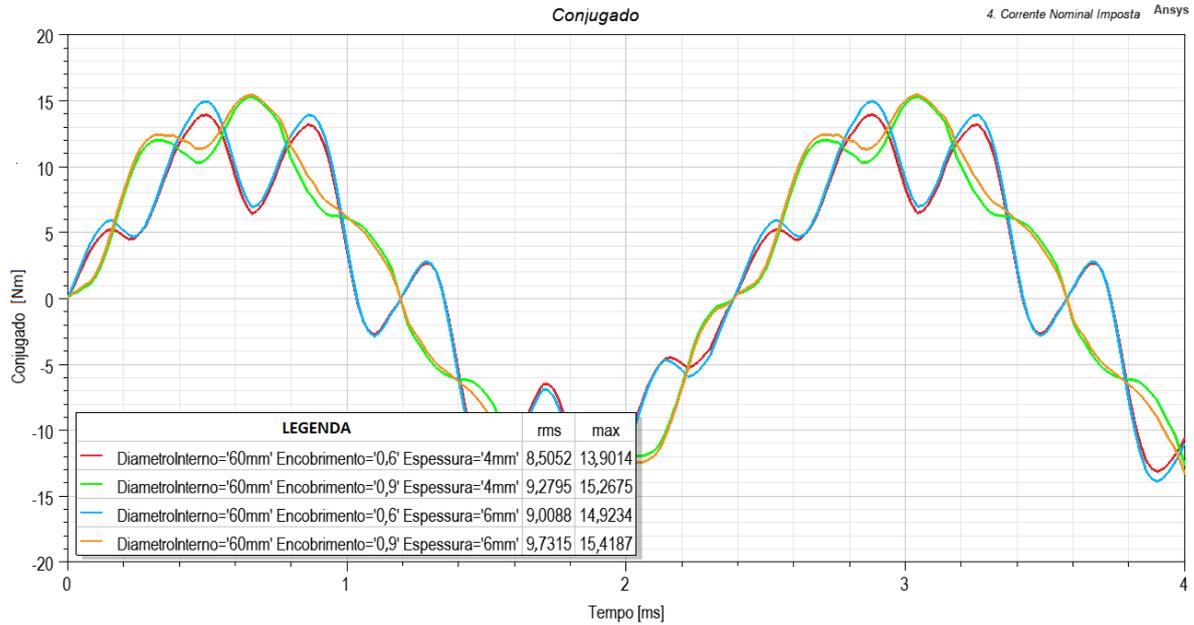
Fonte: (HANSELMAN, 2003).

As dimensões apresentadas no Apêndice A para a área da ranhura do estator é 56,5 mm², então foi escolhida a densidade de corrente de 8,6 A/mm². Considerou-se um enchimento de 0,55 com 6 espiras, a área ocupada por material condutor por espiras é de 5,18 mm². Foi considerado o uso de 4 condutores paralelos AWG 16, de diâmetro 1,291 mm. Dessa forma, a corrente eficaz nominal foi obtida de $I_{RMS} = 45,03$ A e corrente de pico $I_p = 63,68$ A.

A Figura 16 apresenta a curva de conjugado extraída do *Maxwell*, nas condições de recobrimento 0,6 e 0,9 e espessura 4 e 6 mm. Aqui é importante observar que esses valores de conjugado não devem ser interpretados como os valores de conjugado esperados para a máquina em funcionamento. Contudo, o comportamento de tendência do incremento do valor de conjugado pode ser analisado.

Para evitar a repetição e melhor leitura dos resultados, os valores eficazes de conjugado obtidos para a região analisada estão dispostos na Tabela 3. Novamente, os

Figura 16 – Curva de conjugado com corrente nominal fixa.



Fonte: o autor.

resultados expostos estão considerando um valor fixo do diâmetro interno do rotor de 60 mm, a fim de analisar os impactos das dimensões do ímã sem efeito do saturação da coroa do rotor. Aqui podemos observar a mesma tendência antes destacada, o aumento dos valores de recobrimento e espessura do ímã implicam no aumento do valor de conjugado eficaz observado.

Tabela 3 – Valores de conjugado estático eficaz obtidos computacionalmente considerando o diâmetro interno do rotor de 60 mm.

Conjugado Estático (Nm) - Valor eficaz

Espessura (mm)	Recobrimento										
	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
4	7,49	8,15	8,51	8,67	8,75	8,84	9,06	9,20	9,28	9,30	9,24
5	7,76	8,44	8,82	8,98	9,07	9,16	9,36	9,49	9,56	9,58	9,53
6	7,96	8,65	9,01	9,17	9,25	9,33	9,54	9,66	9,73	9,75	9,69

Fonte: o autor.

Considerando os valores observados na tabela, foi restringida a faixa explorada de recobrimento para 0,7 a 1 nas simulações de conjugado com acionamento subsequente.

2.4.5 Conjugado com Acionamento

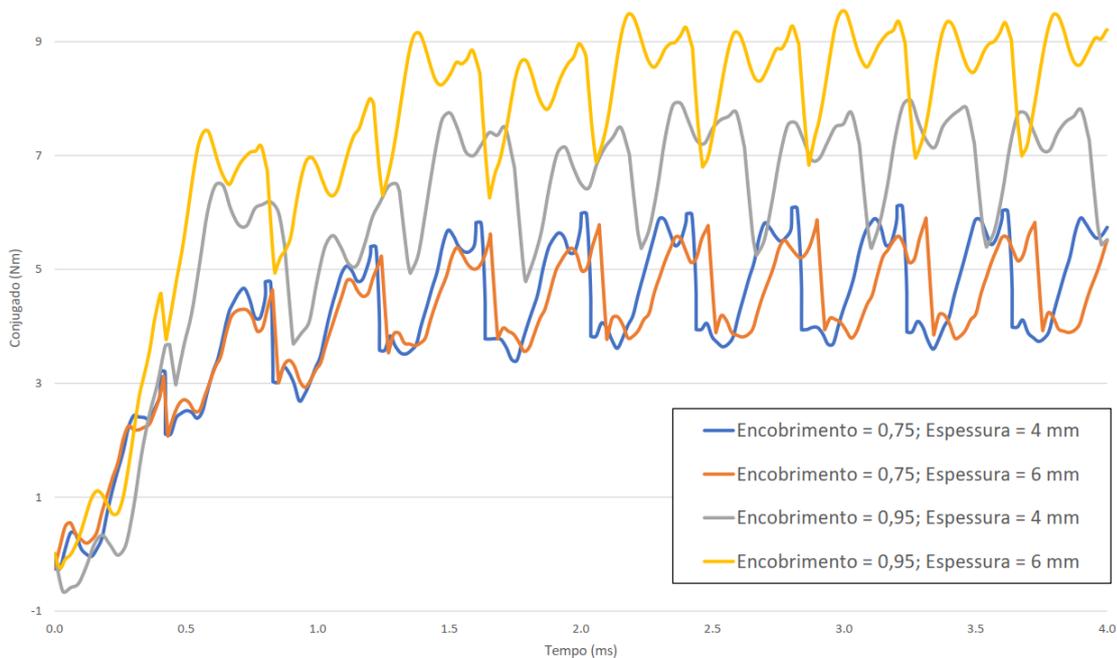
Foram analisados os valores obtidos para o conjugado transiente esperado da máquina. De fato, este é o critério que foi utilizado para definir os parâmetros do projeto de forma definitiva, contudo a obtenção desses valores requer um tempo computacional

superior aos parâmetros apresentados até então. Isto ocorreu pois foi necessário gerar um modelo individual para cada uma das possibilidades de recobrimento e espessura dos ímãs, o que requer interação com a interface e tempo de processamento. Estes são fatores que tornaram a obtenção de uma faixa de valores grande inviável, em relação às outras grandezas.

Além disso, é importante lembrar que o acionamento realizado pelo *software Ansys* não permite total controle pelo usuário uma vez que é gerado automaticamente pela ferramenta. Assim, os resultados anteriores, além mais facilmente obtidos, permitiram validar a previsão qualitativa para o comportamento dos parâmetros escolhidos, isto é, entende-se que com um ímã de maiores dimensões, maior será o fluxo gerado, que por sua vez, implicará em um maior conjugado.

Dessa forma, considerando o comportamento observado na tensão induzida e no conjugado estático, limitou-se os valores explorados de recobrimento na faixa de 0,7 a 1 e espessura de 4 a 6 mm. A Figura 17 apresenta a curva de conjugado no tempo, para a condição de recobrimento 0,75 e 0,95, e espessura de 4 e 6 mm. Aqui observamos que a relação entre o conjugado da máquina e o valor de recobrimento continuam com estreita correlação. Contudo, para o caso de recobrimento 0,75, observa-se que o valor da espessura não respeitou a relação antes observada.

Figura 17 – Curvas de conjugado transiente.



Fonte: o autor.

Para evitar repetir todas as curvas para cada configuração de recobrimento e espessura dos ímãs, optou-se por expor os valores médios de conjugado na Tabela 4.

Observa-se a tendência de aumento do conjugado com o aumento do recobrimento, apesar de isso não ser válido para todos os pontos. Da mesma forma, não é observado em todas os valores de recobrimento que o aumento da espessura implicará no aumento de conjugado observado.

Tabela 4 – Valores de conjugado médio obtidos computacionalmente considerando o diâmetro interno do rotor de 60 mm.

<i>Conjugado Transiente (Nm) - Valor Médio</i>							
Espessura (mm)	Recobrimento						
	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
4	4,22	4,21	4,19	4,06	5,14	5,89	6,08
5	4,28	4,13	3,98	4,32	5,23	6,62	6,97
6	4,33	4,08	4,07	4,63	5,89	7,33	7,68

Fonte: o autor.

É importante lembrar que os valores indicados foram obtidos realizando a média dos valores em todo o tempo de simulação, incluindo o tempo de aceleração do motor. Com isso, esse valor serve apenas para comparar os resultados entre si e não devem ser avaliados como iguais aos valores conjugado esperados em regime permanente da máquina. Para isso, devem ser considerados os valores apenas após o tempo de partida da máquina.

Através dos valores de tensão induzida e conjugado, a melhor escolha para as dimensões dos ímãs é a maior possível. Então, de forma preliminar, escolhe-se o ímã com espessura de 6 mm e recobrimento de 0,95. Opta-se por um recobrimento menor que 1 para que seja possível desbastar a coroa do rotor a fim de criar um encaixe para os ímãs e facilite a montagem da máquina. Além disso, um recobrimento igual a 1 faria com que os ímãs vizinhos ficassem em curto-circuito, diminuindo o fluxo concatenado. Na próxima seção, são analisados os valores de densidade de fluxo para essa configuração e os limites indicados pela literatura.

2.4.6 Densidade de Fluxo

Apesar do conjugado ser o critério balizador no processo de escolhas de projeto, é importante garantir que funcionamento da máquina seja adequado. Com isso, foram observados os valores de densidade de fluxo na máquina simulada. Como referência, a Tabela 5 apresenta a faixa de valores típicos, indicados pela literatura, de densidade de fluxo para máquinas elétricas síncronas com polos salientes. Valores acima da faixa apresentada indicam saturação dos materiais ferromagnéticos. Valores abaixo da faixa indicam subdimensionamento da máquina projetada.

Junto à isso, desejou-se determinar o valor do diâmetro interno da máquina máximo que não implique em saturação na coroa do rotor. Dessa forma, conseguiu-se aliviar a massa

Tabela 5 – Valores de densidade de fluxo típicos para máquinas síncronas de ímãs permanentes.

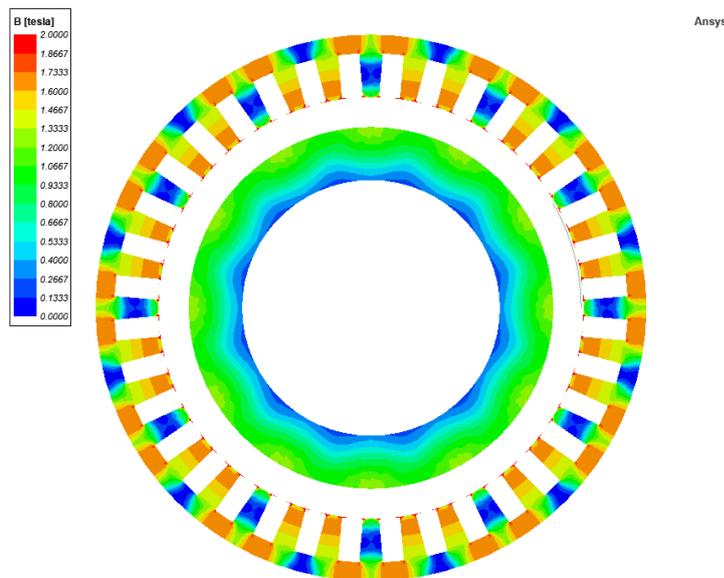
Região	Densidade de Fluxo (T)
Entreferro	0,8 - 1,05
Coroa do Estator	1,0 - 1,5
Coroa do Rotor	1,0 - 1,5

Fonte: (JOKINEN; HRABOVCOVA; PYRHONEN, 2013)

da peça do rotor, diminuindo seu momento de inércia e tempo de aceleração da máquina.

Pelo critério de máximo valor de conjugado dos resultados até então analisados, fez-se a escolha inicial para a máquina de um recobrimento de 0,95 e espessura do ímã de 6 mm. A Figura 18 apresenta o mapa de campo da máquina projetada na configuração de recobrimento 0,95 e espessura 6 mm, nas regiões com material ferromagnético. Os maiores valores podem ser observados na região da coroa do estator da máquina.

Figura 18 – Mapa de campo com a densidade de fluxo na máquina com recobrimento 0,95 e espessura 6 mm.



Fonte: o autor.

Para facilitar a visualização dos resultados de maneira quantitativa, foram traçadas linhas em regiões de interesse de máquina e extraídos os valores máximos de densidade de campo. A Tabela 6 apresenta os valores de densidade de fluxo nas regiões de coroa do rotor, entreferro e coroa do estator. Observa-se que, nessas condições, os valores de densidade de fluxo na regiões de entreferro e coroa do estator supera àqueles de referência. Entende-se então que a máquina, se construída, apresentaria saturação de seus materiais ferromagnéticos.

Tabela 6 – Valores de densidade de fluxo obtidos computacionalmente considerando recobrimento de 0,95 e espessura de 6 mm.

Região	<i>Densidade de Fluxo (T) - Valor Máximo</i>				
	Diâmetro Interno do Rotor (mm)				
	60	65	70	75	80
Coroa Rotor	0,88	0,98	0,99	1,22	1,32
Entreferro	1,11	1,11	1,11	1,12	1,12
Coroa Estator	1,69	1,69	1,69	1,69	1,69

Fonte: o autor.

Dessa forma, para respeitar os limites trazidos pela literatura, foi necessário diminuir o volume dos ímãs a fim de diminuir a excitação gerada, o que evitará a saturação dos materiais e diminuição de possíveis perdas. Na próxima seção será unida à esse critério as restrições comerciais encontradas.

Pôde-se também, através dos valores obtidos, analisar o comportamento da densidade de fluxo com a variação do diâmetro interno do rotor. Na coroa do rotor observa-se o aumento da densidade conforme aumenta-se o diâmetro do rotor, comportamento que pode ser previsto qualitativamente, uma vez que com o aumento do diâmetro do rotor, há a diminuição da espessura da coroa do rotor, assim espera-se um aumento da densidade de fluxo. Já nas regiões de entreferro e na coroa do estator, a variação do diâmetro interno do rotor não impactou nos valores de densidade de fluxo.

2.5 Restrições comerciais

A análise e resultados apresentados até então têm levando em conta apenas critérios técnicos e restrições físicas que o projeto impõe. Contudo, deseja-se fabricar o novo rotor para que seja possível montar e acionar a máquina. Dessa forma, fez-se necessário investigar as opções disponíveis comercialmente de ímãs, parte integrante e fundamental da máquina.

Retomando os resultados anteriormente expostos, observou-se que um recobrimento de 0,95 e espessura de 6 mm levam à saturação na região de entreferro e coroa do estator da máquina. Assim, a busca por ímãs comercialmente disponíveis já usa dessa restrição para a escolha das dimensões do ímã. É importante lembrar que as dimensões disponíveis para os ímãs são discretas, isto é, há um número finito de opções de valores de dimensões. Dessa forma, não foi possível escolher um ímã com a dimensão exata para o projeto. Teve de se escolher a opção que mais se adéqua.

Foram encontradas duas dimensões elegíveis para o projeto. A primeira, 20x10x5 mm, seria necessário utilizar dois ímãs por polo e o ímã teria com comprimento axial inferior ao da máquina. Lembrando que o comprimento axial da máquina é de 26,9 mm.

Essas dimensões resultariam em um recobrimento equivalente de aproximadamente 0,8. A fim de observar se a saturação, antes observada para recobrimento de 0,95 e 6 mm de espessura, é resolvida pelo ímã em questão, foram extraídos os valores de densidade de fluxo nas regiões de entreferro, coroa do rotor e estator. Os resultados estão dispostos na Tabela 7. Comparando com os valores de referência da Tabela 5, observa-se que na região de entreferro e coroa do estator os valores da densidade de fluxo são superiores.

Tabela 7 – Valores de densidade de fluxo obtidos computacionalmente considerando recobrimento de 0,8 e espessura de 5 mm.

Região	<i>Densidade de Fluxo (T) - Valor Máximo</i>				
	Diâmetro Interno do Rotor (mm)				
	60	65	70	75	80
Coroa Rotor	0,66	0,78	0,92	1,04	1,15
Entreferro	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09
Coroa Estator	1,64	1,64	1,64	1,64	1,63

Fonte: o autor.

A segunda opção, com dimensões de 25x15x5 mm, seria necessário utilizar apenas um ímã por polo no rotor e apresenta um comprimento axial próximo ao da máquina. As dimensões resultam em um recobrimento equivalente de aproximadamente 0,6. Apesar da discrepância grande do recobrimento entre as opções é importante observar que, na primeira opção, utilizando dois ímãs por polo, a largura do ímã total do polo seria de 20 mm, enquanto nessa segunda opção, utilizando apenas um ímã é de 15 mm. Assim, apesar do valor de recobrimento ser bem reduzido em relação à primeira opção, a largura do ímã por polo é reduzida em 5 mm. Não foi encontrada opção comercial disponível com valor intermediário de largura.

A Tabela 8 apresenta o valor de densidade de fluxo extraídos na condição de recobrimento 0,6 e espessura de 5 mm. Observa-se que na região da coroa do rotor e estator os valores estão dentro da faixa de valores de referência, conforme Tabela 5. Contudo, na região de entreferro a densidade de fluxo ultrapassa o limite estipulado, mas com valor mais próximo ao limite que aquele observado na primeira opção de ímã.

Considerado a análise dos resultados, escolheu-se utilizar os ímãs de dimensões de 25x15x5 mm. Apesar de o valor da densidade de fluxo no entreferro não respeitar os limites utilizados como referência, entende-se que, devido à oferta de dimensões dos ímãs serem restritivas, diminuir ainda mais o recobrimento da máquina impactaria ainda mais no desempenho dela. Além da discussão já feita, cabe acrescentar que essa opção de ímã é financeiramente mais atraente e de execução mais simples. A simplicidade da execução advém de que, se escolhido a opção com dois ímãs por polo, seria necessário colá-los para evitar repulsão entre os dois ímãs do mesmo polo.

Tabela 8 – Valores de densidade de fluxo obtidos computacionalmente considerando recobrimento de 0,6 e espessura de 5 mm.

<i>Densidade de Fluxo (T) - Valor Máximo</i>					
Região	Diâmetro Interno do Rotor (mm)				
	60	65	70	75	80
Coroa Rotor	0,51	0,61	0,73	0,91	1,10
Entreferro	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
Coroa Estator	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48

Fonte: o autor.

Cabe agora escolher o valor do diâmetro interno do rotor. Assim como analisado anteriormente, somente na região da coroa do rotor observa-se um aumento na densidade de fluxo com o aumento do diâmetro interno do rotor. Nas regiões de entreferro e na coroa do estator os valores se mantiveram constante. Dessa forma, como o valor de densidade de fluxo, para o maior diâmetro interno do rotor, está dentro da faixa de referência na região da coroa do rotor, escolheu-se um diâmetro de 75 mm.

Com as definições de todas as dimensões da máquina, a Tabela 9 apresenta todas as escolhas de projeto para melhor visualização. Adicionalmente definiu-se que na fabricação do rotor será considerados rebaixos na superfície do rotor, com profundidade de 0,5 mm, para encaixe dos ímãs.

Tabela 9 – Valores definidos das dimensões e definições básicas de projeto.

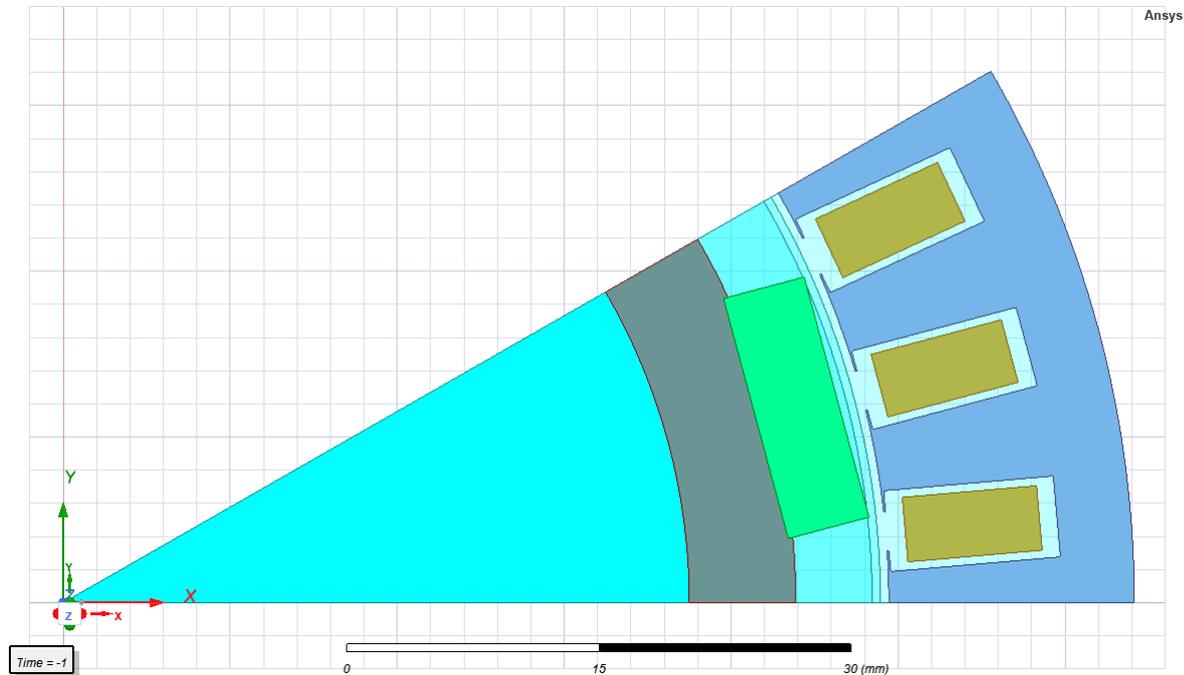
Grandeza	Valor
Número de polos (p)	12
Entreferro (δ)	1 mm
Diâmetro do rotor com ímãs (D_r)	96,90 mm
Diâmetro interno do rotor	75 mm
Comprimento axial do rotor (l)	26,90 mm
Comprimento dos ímãs	25 mm
Largura dos ímãs	15 mm
Espessura dos ímãs	5 mm
Rebaixo	0,5 mm

Fonte: o autor.

A fim de refinar os resultados e obter os valores de esperados de conjugado, alterou-se o modelo até então utilizado para representar ímãs com superfície plana. Rebaixos na coroa do rotor também foram incluídos e ajustados a fim de facilitar o encaixe dos ímãs na montagem. Além disso, é importante observar que o fato do ímã não acompanhar a curvatura do rotor, se não houvesse o rebaixo, o ímã colidiria com o estator. A Figura 19 apresenta o modelo a ser simulado considerando um ímã de superfície plana e rebaixo. Para obter os valores corretos de conjugado, teve-se que determinar a posição inicial de

maior conjugado. Dessa maneira, garante-se que a máquina estará em sincronismo e se presume que a máquina será acionada em quadratura.

Figura 19 – Modelo com ímã de superfície plana e rebaixo.



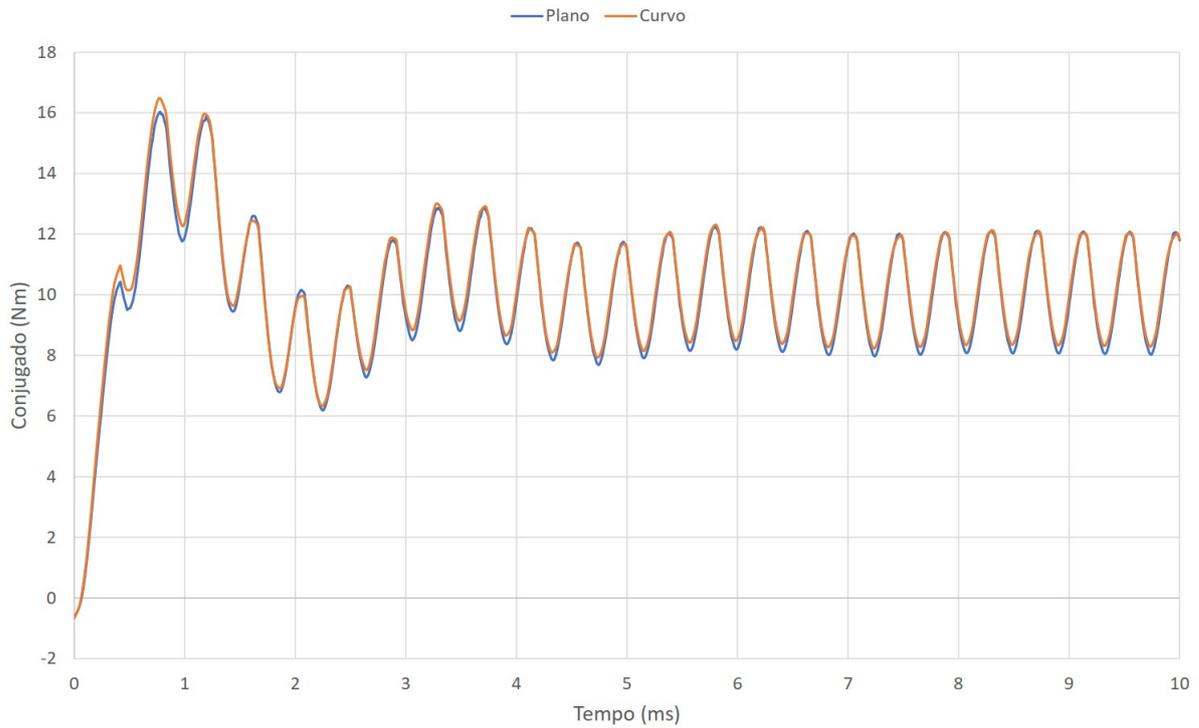
Fonte: o autor.

A Figura 20 apresenta a curva de conjugado para o modelo final, considerando os ímãs de superfície plana e dimensões definidas previamente. Observando a curva, escolheu-se obter a média de conjugado em regime permanente utilizando valores a partir de 5 ms. Dessa forma, a média obtido para o conjugado em regime permanente da máquina é de 10,04 Nm com ondulação (Γ) de 0,40. O valor encontrado para a ondulação, da curva de conjugado de 40% é elevado, o que indica que o conjugado de retenção é alto. Como já foi explicitado, o objetivo do projeto foi de maximizar o conjugado médio da máquina mas a minimização do conjugado de retenção poderá ser explorada em trabalhos futuros. Para o cálculo da ondulação da curva em regime permanente foi considerada a equação (2.7).

$$\Gamma = \frac{\tau_{MAX} - \tau_{MIN}}{\tau_{MED}} \quad (2.7)$$

Para comparação dos modelos com ímã de superfície curva e plana, a Figura 20 também apresenta a curva de conjugado obtido pelo de ímã de superfície curva. Observa-se aqui que o modelo com ímã de superfície plana apresenta valor médio inferior àquele obtido pelo modelo de ímã com superfície curva. Essa diferença pode ser justificada, pois os rebaixos do rotor tiveram que ser ajustadas para que as quinas dos ímãs não colidam com o estator, com isso o entreferro médio da máquina aumentou. Da mesma maneira, em regime permanente observou-se um valor médio de 10,22 Nm e ondulação de 0,36.

Figura 20 – Curvas de conjugado considerando modelo de ímãs com superfície plana e curva, para recobrimento 0,6 e espessura de 5 mm.



Fonte: o autor.

Adicionalmente, é apresentada a metodologia para obtenção do valor de conjugado esperado com base na tensão induzida (HENDERSHOT; MILLER, 1994). A constante da força contra-eletromotriz (K_e) é definida pela equação (2.8), onde \hat{e}_f é o valor de pico da componente fundamental da tensão de fase induzida e ω_m é a velocidade angular mecânica da máquina.

$$K_e \equiv \frac{\hat{e}_f}{\omega_m} \quad (2.8)$$

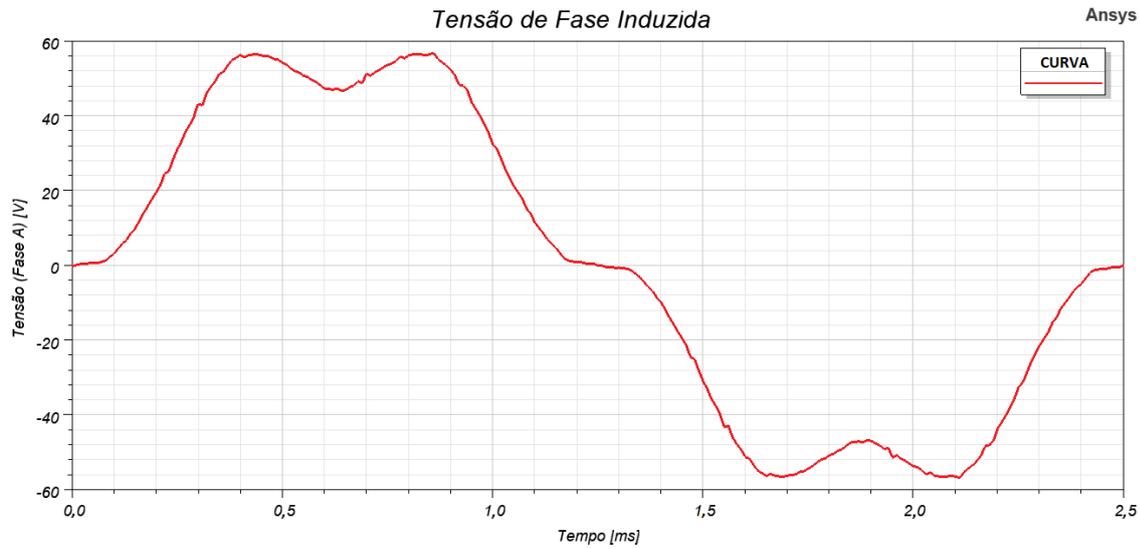
Para obtenção do valor de pico da componente fundamental da tensão de fase é necessário analisar a curva em um período elétrico. A frequência da curva pode ser determinado pela equação (2.9) (CHAPMAN, 2013). Considerando a velocidade de rotação de 4000 RPM e lembrando que a máquina possui 12 polos, o período da curva de tensão induzida é de 2,5 ms.

$$\omega_e = \omega_m \times \frac{p}{2} = 2\pi f_e \quad \therefore \quad f_e = \frac{1}{2\pi} \left[\left(\frac{\pi}{30} \right) N \right] \left(\frac{p}{2} \right)$$

$$f_e = \frac{pN}{120} \quad (2.9)$$

A Figura 21 apresenta a curva de tensão induzida na configuração de recobrimento 0,6 e espessura 5 mm, configuração final da máquina, considerando um período completo da curva de tensão induzida.

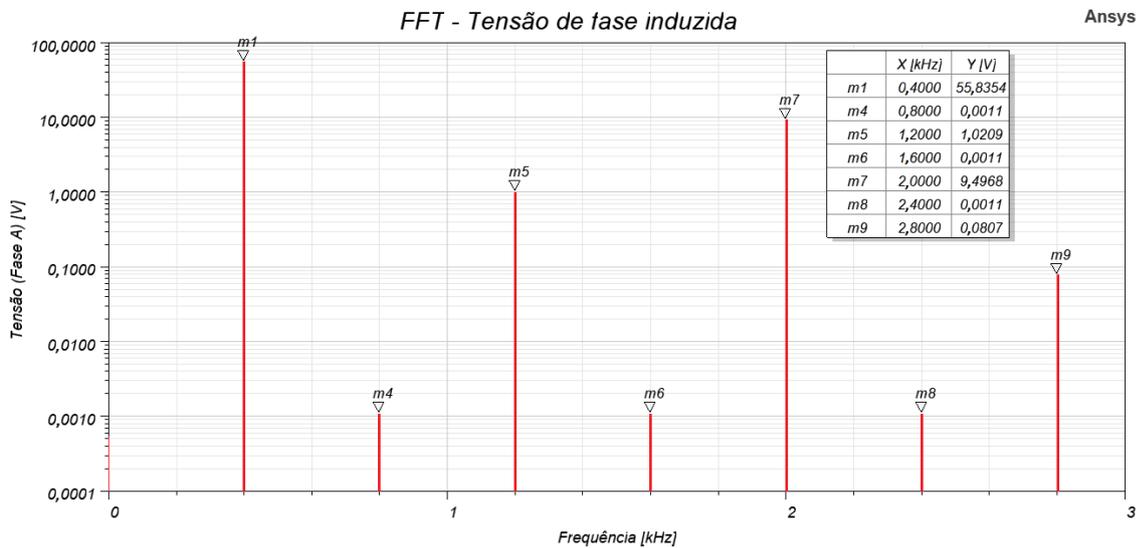
Figura 21 – Curva de tensão induzida em um período.



Fonte: o autor.

A Figura 22 apresenta a magnitude de tensão induzida no domínio da frequência, obtida através da transformada rápida de Fourier (FFT), a componente fundamental apresenta valor de pico de 55,84 V.

Figura 22 – FFT da curva de tensão de fase induzida.



A constante de conjugado (K_T) é definida pela equação (2.10) (HENDERSHOT; MILLER, 1994), onde τ é o conjugado e \hat{I} é o valor da corrente de pico. Alternativamente, pode ser obtida através de K_e pela equação (2.11).

$$K_T \equiv \frac{\tau}{\hat{I}} \quad (2.10)$$

$$K_T = \sqrt{\frac{3}{2}} K_e \quad (2.11)$$

Dessa forma, substituindo as equações (2.11) e (2.8) em (2.10), o valor do conjugado pode ser determinado em função da corrente de pico \hat{I} , valor de pico da componente fundamental da tensão induzida de fase \hat{e}_f e da velocidade de rotação N , conforme equação (2.12).

$$\tau = \sqrt{\frac{3}{2}} \left(\frac{30}{\pi N} \right) \hat{e}_f \hat{I} \quad (2.12)$$

Foi considerado o valor de pico da corrente obtido anteriormente de 63,68 A, velocidade de rotação de 4000 RPM e 55,84 V o valor de pico da componente fundamental da tensão induzida de fase. Nessas condições o conjugado calculado é de 10,40 Nm.

Com isso, foi determinado o valor de conjugado através de 3 métodos diferentes. Inicialmente, calculou-se analiticamente o intervalo de 7,23 a 16,58 Nm com base no volume do rotor e valores típicos de densidade linear de corrente e densidade de fluxo no entreferro apresentado na literatura. Após, com a determinação da geometria final da máquina, obteve-se, via simulação computacional, 10,04 Nm de conjugado em regime permanente. Adicionalmente, através da curva de tensão induzida da máquina, obteve-se 10,40 Nm de conjugado.

3 Fabricação, Montagem, Ensaio e Funcionamento do Motor

Neste capítulo são apresentados os processos de fabricação do rotor projetado, a montagem de máquina e os ensaios realizados. Os processos foram realizados utilizando materiais e equipamentos disponíveis no Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia (LMEAE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Além disso, os procedimentos dentro da oficina foram realizados com o acompanhamento e auxílio do orientador.

3.1 Fabricação do rotor

Para realizar a usinagem da peça do rotor é importante que sejam observadas as dimensões exatas do modelo proposto. Na sequência é apresentado o modelo definitivo utilizado para usinagem do motor, bem como a descrição do processo de usinagem do rotor.

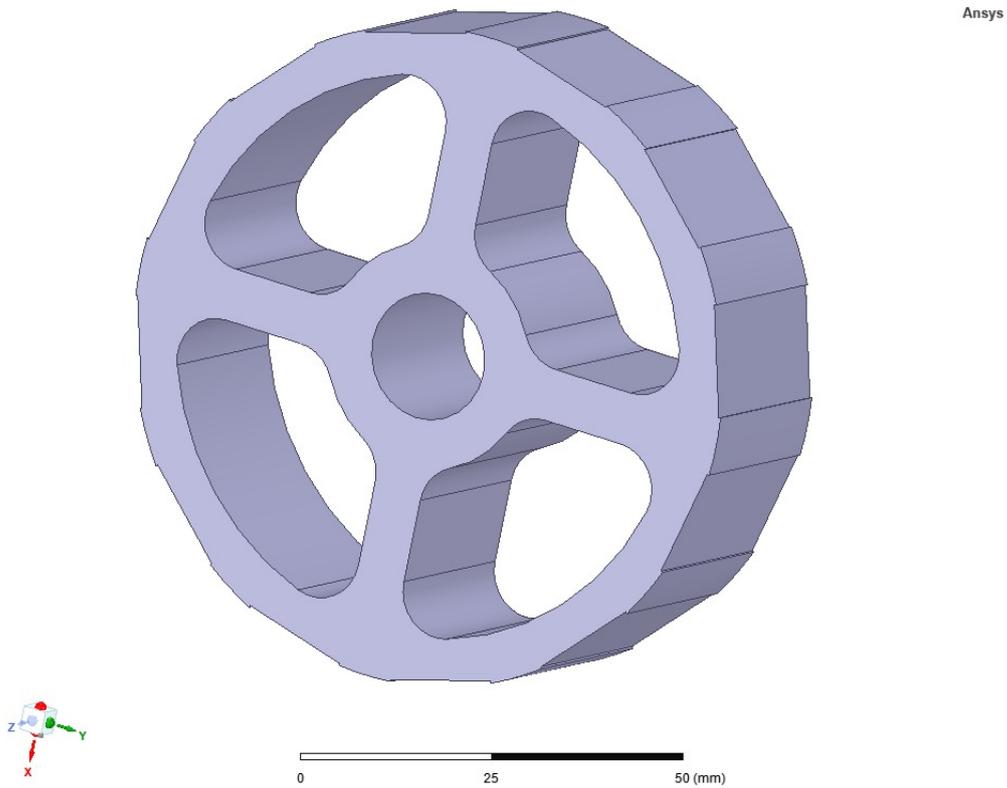
3.1.1 Modelo

Adicionalmente às definições já expostas no capítulo anterior, o modelo deve apresentar elementos de suporte estrutural do motor que ligam o círculo central junto ao eixo à coroa do rotor, isto é, material que faça a conexão mecânica do eixo com a coroa do rotor. Apesar de o projeto mecânico da máquina não ser parte do escopo do deste trabalho, utilizou-se da relação empírica de que a largura dos elementos estruturais devem possuir a mesma dimensão da coroa do rotor. Obviamente, um projeto comercial de uma máquina elétrica deve possuir um projeto mecânico adequado.

As Figuras 23 e 24 apresentam vistas das peça modelada em *software*. Na Figura 23 é possível observar a peça com destaque nos elementos que conectam a coroa do rotor ao eixo, bem como a presença de vãos para diminuir a massa da peça, o momento de inércia e, por consequência, o tempo de aceleração da máquina. Na Figura 24 é possível observar a presença dos ímãs encaixados nos rebaixos indicados na peça.

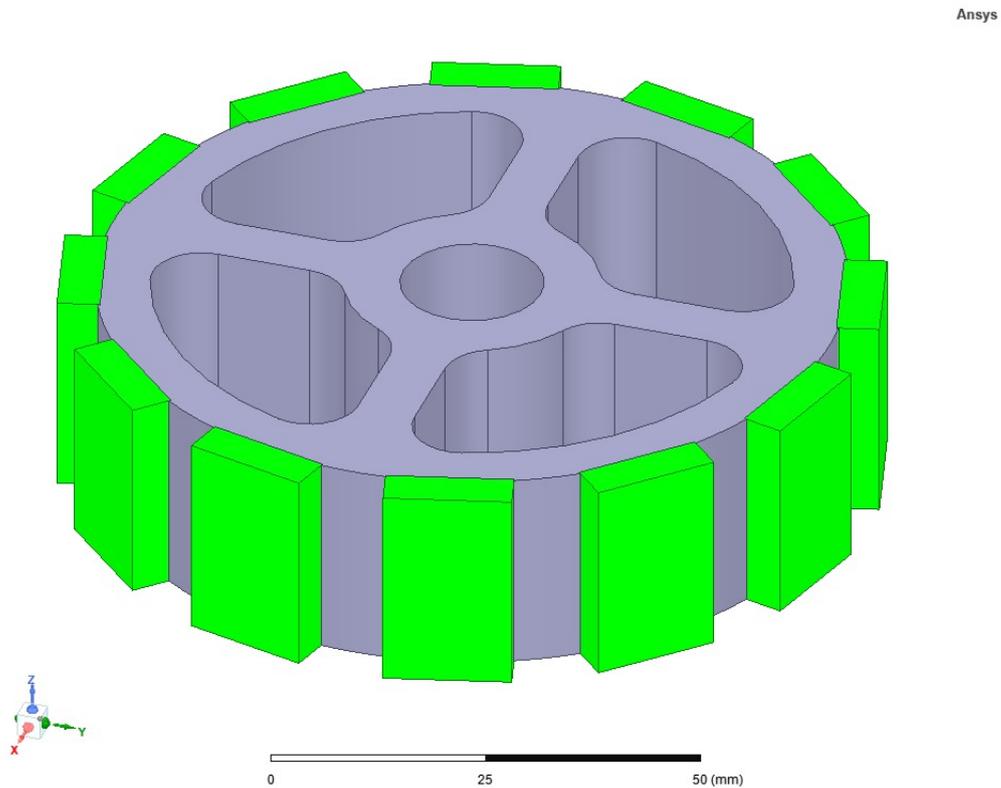
O Anexo B apresenta o diagrama da peça a ser usinada com todas as cotas a serem observadas. Para inserção do eixo, foi considerado um vão de 19,97 mm, para que o eixo de 20 mm de diâmetro seja inserido sob pressão no rotor. Foram incluídos furos, a serem realizados através de brocas, para que seja possível passar com o fio e ser realizado o corte.

Figura 23 – Modelo do rotor com as culatras e vãos.



Fonte: o autor.

Figura 24 – Modelo do rotor com as culatras e vãos. Em destaque os ímãs.

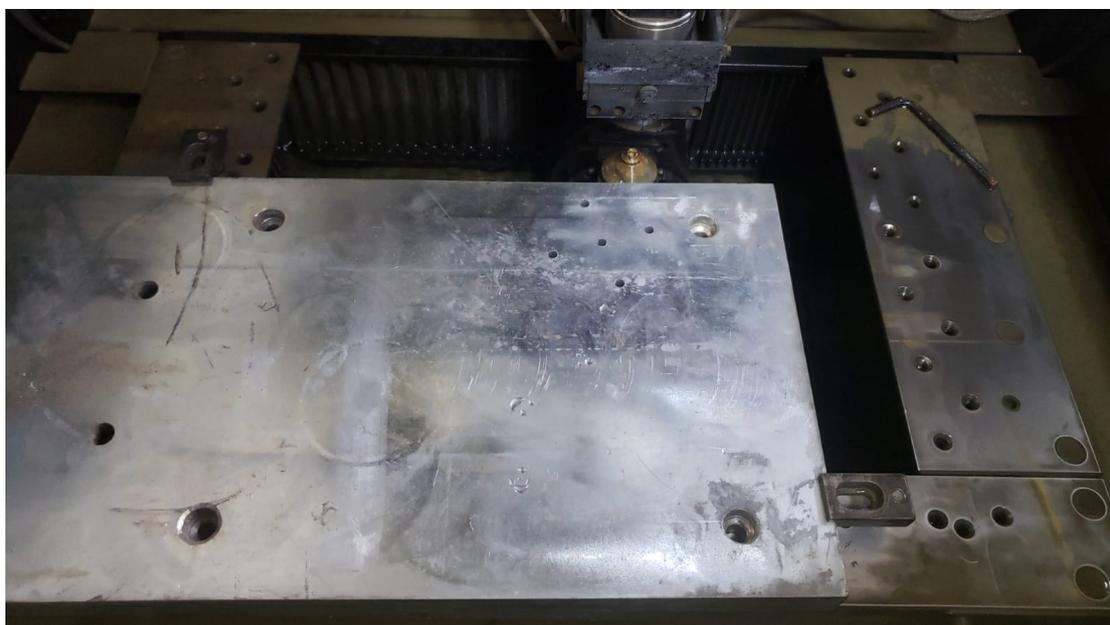


Fonte: o autor.

3.1.2 Usinagem

A peça do rotor foi usinada a partir de um bloco de material utilizando o equipamento de eletroerosão a fio (Fanuc) disponível na oficina do LMEAE. O bloco disponível, exposto na Figura 25, apresenta espessura de 25 mm, inferior ao comprimento axial do estator da máquina. O bloco é de aço 1020, contudo, não foi realizada a caracterização elétrica para determinação exata do material utilizado. Para realizar o processo de corte com o equipamento, foram realizados furos com uma broca para a passagem do fio. Os furos também podem ser observados na Figura 25. A operação e parametrização do equipamento foi realizada pelo professor orientador e pelo técnico do laboratório.

Figura 25 – Bloco do material a ser utilizado na usinagem do rotor.



Fonte: o autor.

A remoção de cada um dos vãos deve ser realizado em processos reparados, para que possa ser realizada a passagem do fio e corte da peça no formato desejado. Foram realizados os cortes dos vãos, do furo para o eixo de 19,97 mm e o corte externo. A Figura 26 apresenta a peça usinada.

Figura 26 – Peça do rotor usinado.



Fonte: o autor.

3.2 Montagem

No que segue são apresentadas as descrições das etapas de montagem dos principais componentes do rotor, montagem do eixo e rolamentos na carcaça do rotor original, prolongamento das conexões terminais dos enrolamentos de armadura, montagem dos ímãs, sensores hall e montagem completa da máquina.

3.2.1 Eixo e Rolamentos

Para montagem da máquina, foram utilizadas as peças de carcaça do alternador original. A Figura 27 apresenta o registro fotográfico da carcaça do alternador original com os rolamentos novos inseridos sob pressão com o uso da prensa disponível na oficina. Além disso, os diodos da ponte retificadora do alternador original foram removidos, pois não tem mais uso na máquina proposta.

Para compor o eixo da máquina, utilizou-se de uma peça disponível no laboratório de 20 mm de diâmetro que foi cortada usando o torno do laboratório para ter um comprimento axial final de 20 cm. A medida de 20 mm de diâmetro do eixo foi escolhida por ser superior à medida do furo na peça do rotor, a fim de fornecer maior rigidez junto ao rotor, ou seja, não girar o eixo em falso no rotor. O eixo foi inserido no rotor com o uso do equipamento de prensa hidráulica disponível no laboratório, sendo necessário a força de 1,5 tonelada. A Figura 28 apresenta o registro fotográfico do rotor com o eixo inserido.

Figura 27 – Carcaça do alternador com rolamentos inseridos.



Fonte: o autor.

Figura 28 – Peça usinada do rotor com eixo inserido.



Fonte: o autor.

3.2.2 Conexões terminais

Os enrolamentos de armadura do estator original apresentava condutores terminais curtos que dificultavam o acionamento da máquina. Para facilitar as conexões, utilizou-se de condutores disponíveis em laboratório que foram soldados com estanho nos terminais da máquina.

3.2.3 Ímãs

A montagem dos ímãs consistiu em posicionar os ímãs nas culatras usinadas na peça do rotor. Antes de realizar a montagem, com o auxílio de um gaussímetro Hirst GM05 disponível no laboratório, foi realizada a medição da densidade de fluxo dos ímãs adquiridos comercialmente para verificar se os ímãs apresentam mesma característica. As medições estão expostas na Tabela 10 apresentam valor médio absoluto de $0,416 \pm 0,008$ T.

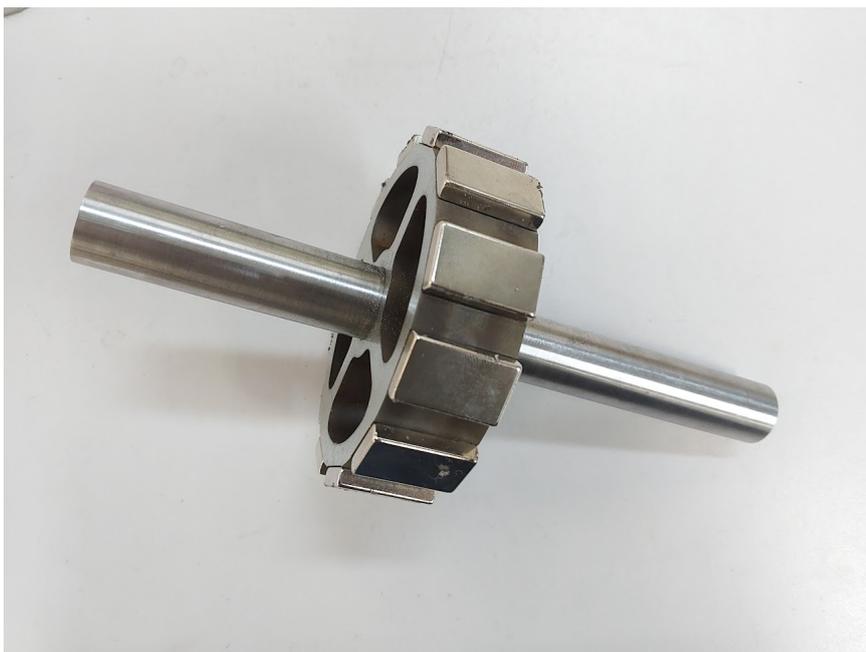
Tabela 10 – Medidas de densidade de fluxo dos ímãs.

Ímã	Densidade de Fluxo (T)	Ímã	Densidade de Fluxo (T)
1	0,414	7	0,426
2	- 0,400	8	- 0,420
3	0,413	9	0,405
4	- 0,414	10	- 0,427
5	0,413	11	0,424
6	- 0,418	12	- 0,419

Fonte: o autor.

A superfície da peça usinada do rotor foi limpa com solvente e os ímãs foram posicionados no rotor conforme Figura 29. Garantiu-se, com o uso do gaussímetro, que as polaridades dos ímãs estivessem alternadas. Inicialmente utilizou-se cola multiúso para que os ímãs adiram no rotor, contudo no primeiro teste de acionamento da máquina houve o deslocamento dos ímãs do rotor.

Figura 29 – Rotor após a montagem dos ímãs.



Fonte: o autor.

Com o ocorrido, foi utilizado uma solução mais robusta para aderir os ímãs ao rotor. Após limpar os resíduos da cola multiúso, os ímãs foram novamente posicionados e tratados com ativador LOCTITE 7649, para preparar a superfície para receber a cola e aumentar a velocidade de cura, na sequência foi utilizada a cola LOCTITE 638 indicado para uso em superfícies metálicas e cura anaeróbica, isto é, sem a necessidade da presença de ar. Após o tempo de cura do produto, foi preparada pasta de resina e aplicada nas laterais dos ímãs. Além disso, utilizada uma fita especial poliéster filamentosa (P170) cobrindo os ímãs. A Figura 30 apresenta o rotor com os ímãs após aplicação da cola e fita com filamento de fibra de vidro.

Figura 30 – Rotor com ímãs e aplicação de fita com filamento de fibra de vidro.



Fonte: o autor.

3.2.4 Sensores Hall

O controlador utilizado para o acionamento da máquina permite o uso de sensores hall para determinar a posição do rotor em relação ao estator a fim de realizar a partida de maneira eficaz. Para isso é importante instalar os sensores hall nas posições corretas. Na sequência é apresentada a metodologia de cálculo utilizada para obter as posições adequadas para instalação dos sensores.

O ângulo mecânico a cada 360° elétricos, n , é dado pela equação (3.1). Onde pp é o número de pares de polos magnéticos.

$$n = \frac{360^\circ \text{ mecânicos}}{pp} = \frac{360^\circ \text{ mecânicos}}{6} = 60^\circ \text{ mecânicos por } 360^\circ \text{ elétricos} \quad (3.1)$$

Assumindo que o controlador do motor considera que os sensores hall estão espaçados a cada 120° elétricos, então o ângulo mecânico a cada 120° elétricos, m , é obtido pela

equação (3.2).

$$m = \frac{n}{3} = 20^\circ \text{ mecânicos por } 120^\circ \text{ elétricos} \quad (3.2)$$

Como desejou-se instalar os sensores junto às ranhuras do estator, deve-se obter o espaçamento que os sensores hall devem ter em termos de número de ranhuras. O valor de ângulo mecânico para cada ranhura da máquina, x , é dado pela equação (3.3), onde s é o número de ranhuras da máquina.

$$x = \frac{360^\circ \text{ mecânicos}}{s} = \frac{360^\circ \text{ mecânicos}}{36} = 10^\circ \text{ mecânicos por ranhura} \quad (3.3)$$

O valor de ranhuras que os sensores devem ser espaçados, z , deve respeitar a equação (3.4). O valor de i deve ser um número inteiro que faça com que o produto $m \times i$ seja divisível por x . Por inspeção, observa-se que qualquer valor inteiro positivo de i é solução. Escolheu-se $i = 1$.

$$z = \frac{m \times i}{x} = \frac{20 \times 1}{10} = 2 \text{ ranhuras} \quad (3.4)$$

Apesar de aqui determinada o espaçamento adequado para os sensores, não foi possível realizar a montagem dos sensores na máquina. Os sensores disponíveis comercialmente possuem dimensões que impossibilitam sua instalação nas ranhuras do motor. Alternativas de instalação podem ser exploradas em momentos oportunos futuros mas não está no escopo deste trabalho.

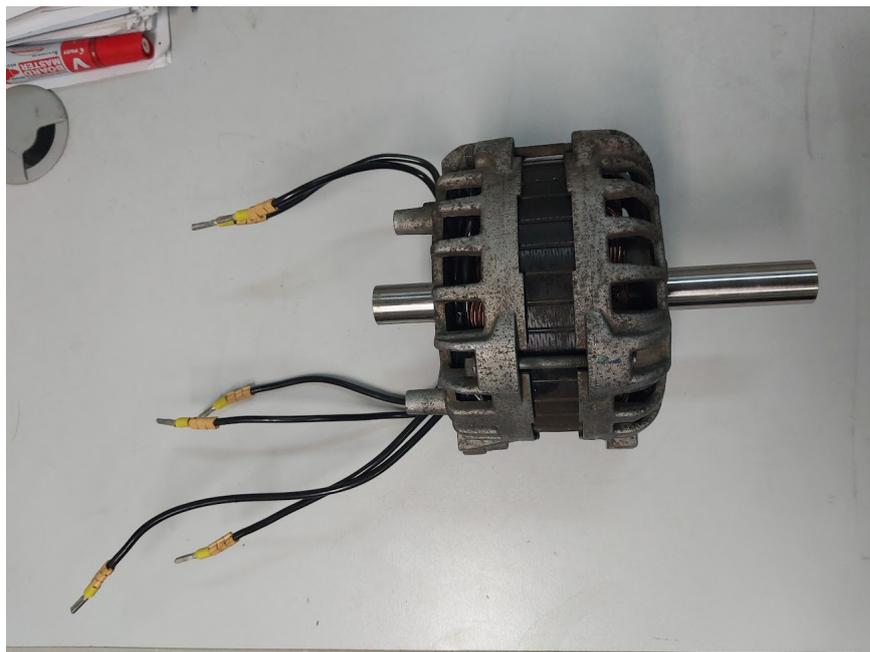
3.2.5 Máquina Completa

Antes da montagem completa da máquina é interessante comparar a massa do rotor montado, com ímãs e eixo, com a massa do rotor do alternador original. O novo rotor possui 1181 g, enquanto o rotor antigo, com eixo e enrolamento de campo, possui 2406 g. Dessa forma, observa-se que o projeto conseguiu diminuir em mais da metade da massa da máquina original. Importante observar que a maior parte da massa está concentrada no eixo do rotor, diminuindo o valor do momento de inercia.

A montagem completa da máquina resume-se à unir o rotor ao estator encaixados pela carcaça da máquina. Iniciou-se inserindo o rotor com o eixo junto à carcaça com estator, com o auxílio de um martelo, devido à baixa tolerância das dimensões do eixo com o diâmetro interno da carcaça.

A fixação das peças é realizada através de parafusos que rosqueiam na própria carcaça do alternador. Os condutores terminais foram ajustados para que seja possível acessá-los no lado externo da máquina. A Figura 31 apresenta a máquina montada.

Figura 31 – Máquina montada.



Fonte: o autor.

3.3 Ensaio de tensão induzida

A fim de compreender o funcionamento da máquina, foi realizado um ensaio de tensão induzida. Para isso, a máquina teve seu eixo acoplado ao torno do LMEAE que tem sua velocidade de rotação controlada por um inversor de frequência. Deseja-se acionar a máquina em ligação estrela, para isso, uma das conexões terminais de cada bobina de armadura foi unida e as outras conexões foram deixadas abertas. Utilizando um osciloscópio foi possível obter as curvas de tensão induzida da máquina.

Com as curvas do osciloscópio foi possível observar que uma das ligações estava invertida. Alterando a ligação, as curvas obtidas de tensão induzida, para as três fases, podem ser observadas pela Figura 32. A curva apresenta um valor de tensão efetiva de 1,97 V com período de 30 ms. Importante observar as curvas de tensão induzida obtidas estão equilibradas o que indica que os enrolamentos de armadura da máquina original está em bom estado. As curvas foram obtidas diretamente do osciloscópio, que define o zero da sua escala temporal centralizado na curva, por isso a curva apresenta valores temporais negativos.

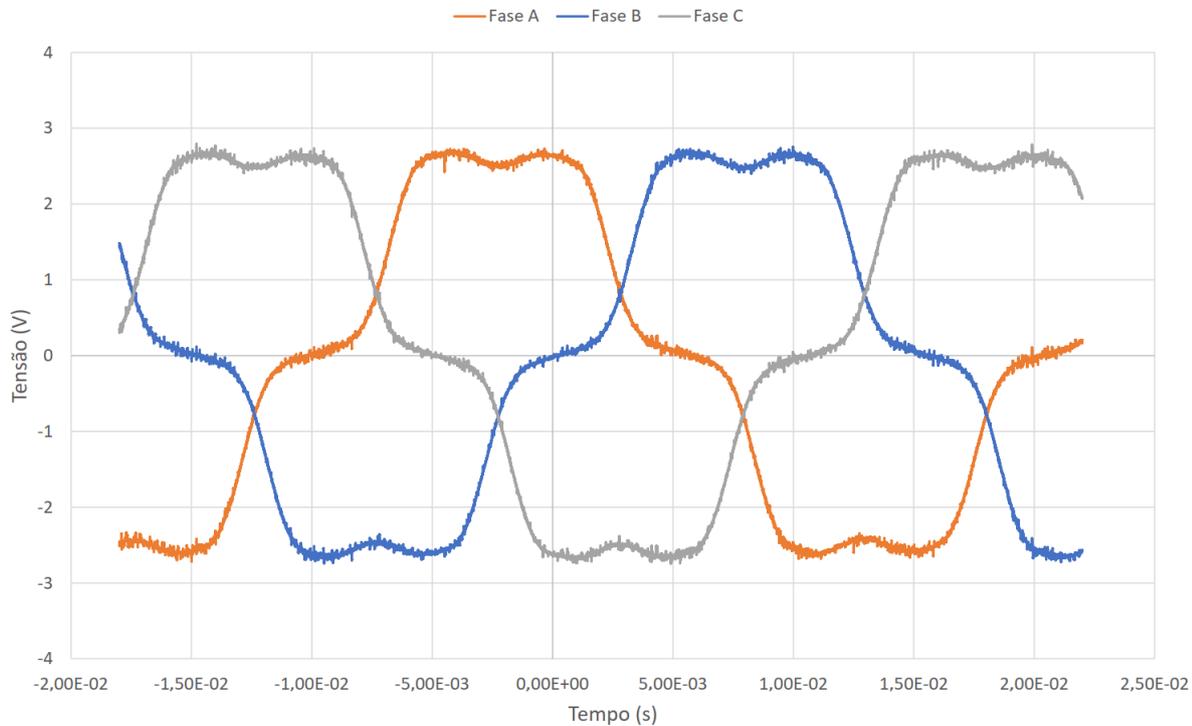
A velocidade síncrona da máquina pode ser obtida pela equação 3.5. Considerando $p = 12$ polos e $f = 1/0.03 = 33,33$ Hz, a velocidade síncrona durante o ensaio é de 333,33 RPM.

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (3.5)$$

Assumindo que a relação entre a tensão efetiva aplicada da máquina e a velocidade

de rotação é linear, pode-se definir uma constante de velocidade dada pela razão da velocidade pela tensão aplicada. O valor da constante de velocidade obtida durante o ensaio é de $333,33, \text{RPM}/1,97 \text{ V} = 171,82 \text{ RPM}/\text{V}$.

Figura 32 – Curvas de tensão induzida nos enrolamentos de armadura obtidas no ensaio.



Fonte: o autor

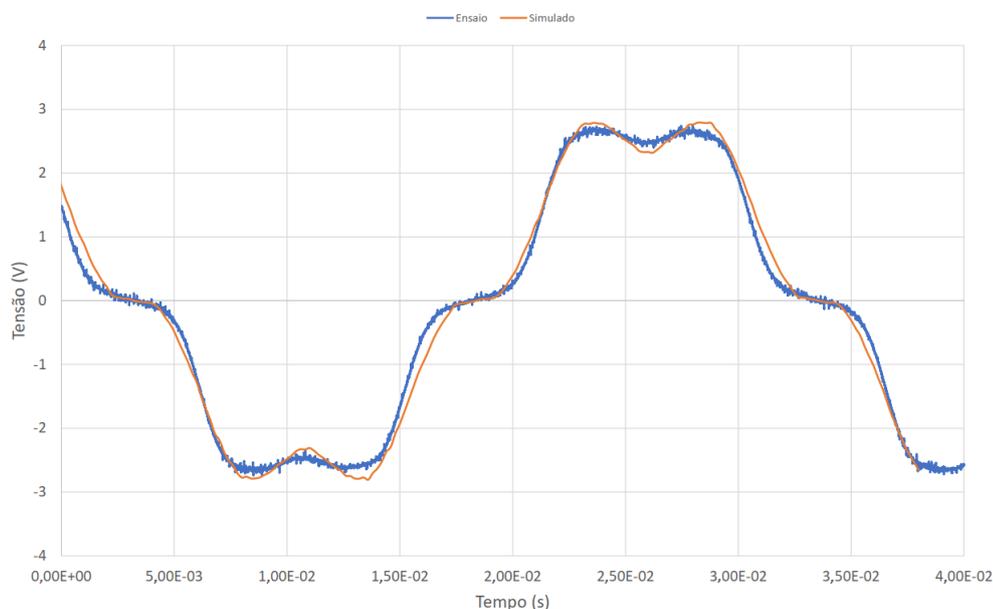
A fim de comparar os resultados obtidos através do ensaio de tensão induzida e os valores obtidos através de simulação pelo *Ansys Maxwell*, foi configurado o *software* para a mesma velocidade de rotação considerada no ensaio. Além disso foi considerado o número de espiras igual à 6, valor estimado por inspeção visual.

A Figura 33 sobrepõe as curvas de tensão induzida, obtidas pelo ensaio e simulação. Observa-se que as duas curvas apresentam o mesmo comportamento e valor de pico. Dessa forma, considera-se que a máquina reflete os resultados simulados do projeto.

3.4 Acionamento do motor

Desejou-se fazer o acionamento da máquina para observar seu funcionamento como motor, funcionamento para o qual ela foi projetada. O acionamento foi realizado com um controlador de posse do orientador. A bateria de 48 V é conectada no barramento CC do controlador. Há bornes disponíveis para fazer a conexão trifásica da máquina. Da mesma forma que no ensaio de tensão induzida, a máquina foi acionada em estrela, com uma conexão de todos os enrolamentos conectadas entre si.

Figura 33 – Curvas de tensão induzida obtidas pelo ensaio e simulação.



Fonte: os autores

A controladora permite a conexão para os sensores hall instalados na máquina, conforme anteriormente descrito não foi possível instalar os sensores hall. Dessa forma esses conectores ficaram em aberto. A ausência dos sensores hall resulta em baixo conjugado de partida, contudo, como desejou-se apenas observar o funcionamento da máquina sem carga mecânica no eixo, não houve maiores complicações quanto à isso.

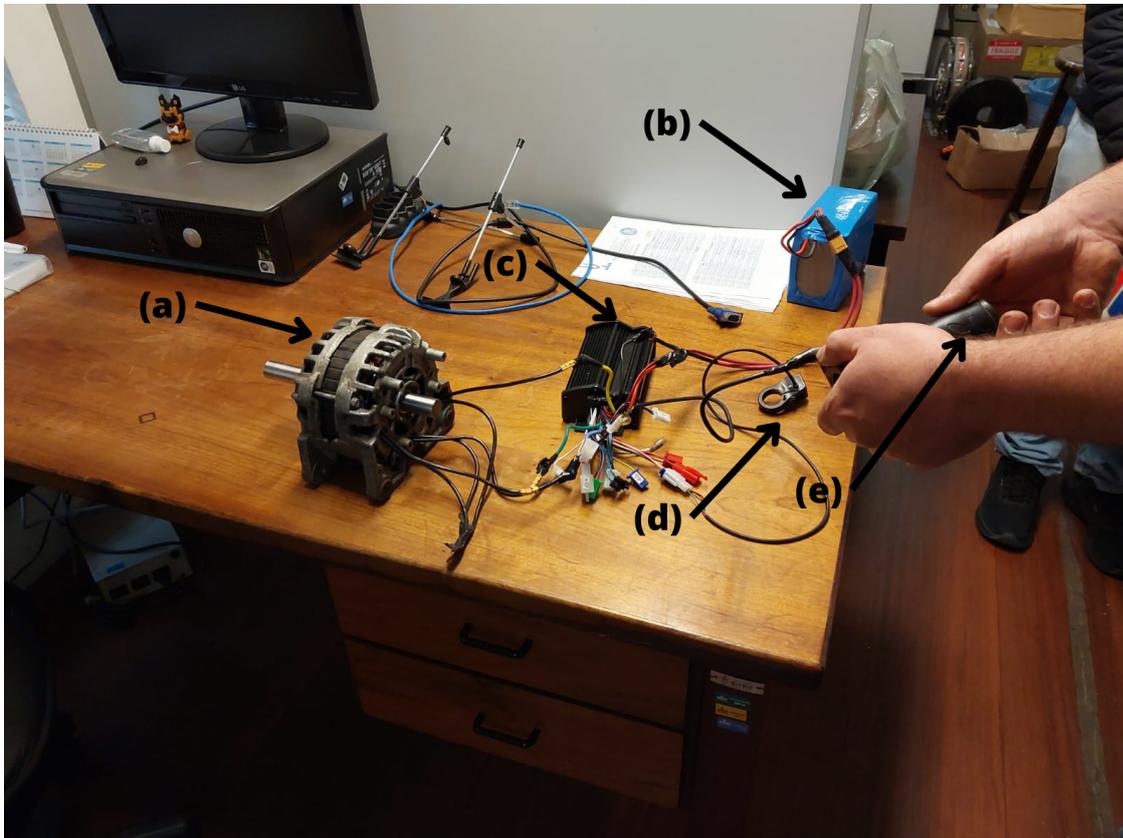
Também há a necessidade de conectar à controladora um equipamento de resistência variável, de funcionamento análogo à um potenciômetro, para controlar a velocidade da máquina. Permite-se também conectar um seletor de velocidades, o seletor disponível possui três níveis de velocidade.

Na descrição da montagem dos ímãs já foi adiantado que houve a necessidade de remontar os ímãs, pois na primeira tentativa de acionamento houve o escape de ímãs do rotor que acabaram sendo atraídos pelo estator da máquina. Esse evento ocorreu porque na primeira tentativa de acionamento as conexões do acelerador do controlador foi ligada no máximo. Com a máquina em máxima rotação, a colagem dos ímãs não foi suficiente para mantê-los no lugar. A estimativa da força centrífuga sob os ímãs é calculada na próxima seção.

Refeita a montagem da máquina, conforme já descrito anteriormente na montagem dos ímãs, a máquina conseguiu operar de maneira satisfatória, inclusive nas maiores velocidades. O funcionamento da máquina foi registrado e está disponível para visualização em <<https://youtu.be/v-a786FZyn0>>. Idealmente deveria ser feito o acionamento da máquina em bancada, mas o escopo do trabalho foi grande e não houve tempo hábil

para fazê-lo. A Figura 34 apresenta o registro fotográfico do momento de acionamento da máquina, na figura é possível observa a bateria, o controlador, o seletor de velocidades, o acelerador e a máquina montada.

Figura 34 – Registro fotográfico do acionamento da máquina.



(a) motor síncrono de ímãs permanentes; (b) bateria 48 V; (c) conversor; (d) seletor de velocidades; (e) acelerador.

Fonte: o autor.

Para avaliar o ocorrido, no primeiro acionamento da máquina, deseja-se determinar a força centrífuga sofrida pelos ímãs. A força centrífuga (F_c) sofrida por um ímã depende da massa do ímã (m_{IMA}), velocidade de rotação (v_t) e raio do movimento circular (r), conforme equação (3.6).

$$F_c = m_{IMA}a_c = m_{IMA} \left(\frac{v_t^2}{r} \right) \quad (3.6)$$

A velocidade tangencial pode ser obtida em função do período (T) pela equação (3.7).

$$v_t = \frac{2\pi r}{T} \quad (3.7)$$

O período T pode ser obtido através da velocidade de rotação N pela equação (3.8).

$$T = \frac{60}{N} \quad (3.8)$$

Substituindo as relações 3.8 em 3.7 e 3.7 em 3.6, a força centrífuga pode ser obtida pela equação (3.9) em função da velocidade de rotação N .

$$F_c = m_{IMA} r \left(\frac{\pi}{30} \right)^2 N^2 \quad (3.9)$$

O fornecedor indica a massa de cada ímã igual a 10 g e o considerou-se o raio de rotação igual ao raio do rotor de 48 mm. No caso de velocidade de rotação nominal de 6000 RPM para veículos elétricos (SILVA, 2014), a força centrífuga sob o ímã é de 189,5 N.

Especificamente para o caso do escape do ímã em laboratório, estava sendo aplicada a tensão máxima da bateria. Sabendo que o conjunto da bateria é formada por 13 módulos em série, a tensão máxima da bateria pode ser obtida por $13 \times 4,2 \text{ V} = 54,6 \text{ V}$. Considerando que a tensão pico a pico que o controlador utilizando essa bateria seja $V_{pp} = 54,6 \text{ V}$, o valor eficaz de tensão no enrolamento de armadura pode ser dado pela equação (3.10), considerando fator de modulação unitário.

$$V_{ef} = \frac{V_{pp}}{2\sqrt{2}} = 19,3 \text{ V} \quad (3.10)$$

Considerando a constante de velocidade indicada pelo ensaio de tensão induzida, pode-se estimar que a velocidade da máquina, se apresentar um comportamento linear com a tensão de armadura aplicada, é dada pela equação (3.11).

$$N_{BAT} = (171,82 \text{ RPM/V}) \times 19,3 \text{ V} \approx 3300 \text{ RPM} \quad (3.11)$$

Para essa velocidade a força centrífuga, obtida pela mesma equação (3.9), é de 57,32 N.

Neste capítulo foram apresentados os processos de fabricação do rotor projetado, a montagem de máquina, o ensaio realizado e o acionamento da máquina projetada.

Conclusão

O trabalho proposto teve como objetivo realizar a conversão de um alternador automotivo em um motor síncrono de ímãs permanentes para aplicações de tração. Dessa forma, foi realizado o projeto da máquina a partir de uma abordagem analítica e outra computacional.

A partir da abordagem analítica foi possível obter o intervalo de 7,23 a 16,58 Nm, de conjugado esperado. Essa faixa de valores foi obtida em função do volume do rotor e de valores mínimos e máximos da densidade de corrente linear e densidade de fluxo no entreferro indicados pela literatura.

A partir do uso de *softwares* de simulação pelo método de elementos finitos, foi possível desenvolver e explorar o desempenho da máquina com a geometria do novo rotor. Essa abordagem permitiu variar as dimensões de ímãs a fim de obter o maior conjugado. Unido as conclusões técnicas da ferramenta com as restrições comerciais, escolheu-se um ímã de dimensões 20x15x5 mm. Além disso, a partir de simulações de densidade de fluxo, escolheu-se o raio interno do rotor de 75 mm.

Nessa configuração o modelo final foi gerado, considerando ímãs de superfície plana iguais aos comercialmente disponíveis. Com o uso do acionamento gerado pelo software, chegou-se em um conjugado em regime permanente de 10,04 Nm. Adicionalmente, optou-se por explorar uma terceira abordagem de cálculo do conjugado, utilizando os valores de tensão induzida, chegou-se em 10,40 Nm. Como base de comparação, o protótipo com rotor e geometria de garras e excitação por ímãs permanentes, desenvolvido em (FERREIRA, 2017), apresentou conjugado inferior a 1,2 Nm. Assim, entende-se que o projeto conseguiu melhorar o valor de conjugado da máquina ao projetar uma nova geometria para o rotor.

Dessa forma, foram obtidos valores de conjugado de três maneiras diferentes. As três maneiras apresentam valores compatíveis, mostrando que as diferentes abordagens são equivalentes entre si. É claro que a abordagem analítica, diferentemente da abordagem por simulação, não permite a exploração precisa das variáveis e obtenção das curvas transientes dos parâmetros de desempenho.

Foi possível grafar o modelo da peça de rotor a ser usinada. Utilizando os equipamentos e ferramentas do LMEAE, a peça do rotor foi cortada por eletroerosão a fio de uma peça de material disponível no laboratório. Com a peça usinada foi feita a montagem da máquina e realizado o ensaio de tensão induzida. Com a velocidade de rotação, durante o ensaio determinada em 333 RPM, simulou-se nas mesmas condições pelo *software* e as curvas de tensão induzida do ensaio e simuladas possuem o mesmo comportamento. Obteve-se do ensaio de tensão induzida a constante de velocidade de 171, 82 RPM/V.

Aqui é importante observar que com os valores de tensão induzida obtidos através da simulação validados através do ensaio realizado, implica que o valor de conjugado calculado utilizando a tensão induzida também é válido. E como o resultado de conjugado obtido através da tensão induzida é compatível com a simulação da máquina por acionamento do *Maxwell*, isso indica que a todos os resultados obtidos refletem o desempenho da máquina real.

Como o escopo do trabalho foi amplo, não houve tempo hábil para realizar o acionamento da máquina em bancada, dessa maneira não foi possível estimar os valores de conjugado de maneira experimental. Esse ensaio poderá ser explorado em um trabalho futuro, comparando com o valor de conjugado estimado pela simulação. Além disso podem ser propostas alternativas para minimizar o conjugado de retenção da máquina, como fabricar o rotor com ímãs embutidos, por exemplo.

Adicionalmente, foi realizado o acionamento da máquina com o uso de um conversor eletrônico, bateria 48 V, acelerador e seletor de velocidade. Dessa forma, pôde-se observar o funcionamento da máquina sem carga mecânica em seu eixo.

Por fim, para estimar a força centrífuga sofrida pelo ímã durante a rotação da máquina, considerou-se as velocidade típica de 6000 RPM com força calculada de 189,5 N e 3300 RPM, calculada pela constante de velocidade obtida, com força calculada em 57,32 N.

Referências

CHAPMAN, S. *Fundamentos de Máquinas Elétricas - 5ed.* AMGH Editora, 2013. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Fyg6AgAAQBAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 57.

FERREIRA, F. *Estudo de uma máquina de Lundell com ímãs permanentes no rotor para aplicações de tração elétrica.* [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/169278>>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 75.

GIERAS, J. *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications, Third Edition.* CRC Press, 2009. (Electrical and Computer Engineering). ISBN 9781439859018. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=rFrFLUTri0MC>>. Citado 3 vezes nas páginas 22, 33 e 34.

GOTTLIEB, I. *Practical Electric Motor Handbook.* Elsevier Science, 1997. ISBN 9780080514390. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Irj9w5IE31AC>>. Citado na página 22.

HAGSTEDT, D. *Comparison of Different Electrical Machines for Belt-driven Alternator and Starter.* Tese (Doutorado) — Industrial Electrical Engineering and Automation, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 33.

HANSELMAN, D. *Brushless Permanent Magnet Motor Design.* Writers' Collective, 2003. ISBN 9781932133639. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=vIWSQAAACAAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 48.

HENDERSHOT, J.; MILLER, T. *Design of Brushless Permanent-magnet Motors.* Magna Pysics Pub., 1994. (Magna physics publications). ISBN 9780198593898. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=HhXBQgAACAAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 58.

IVANKOVIC, R. et al. Power electronic solutions to improve the performance of lundell automotive alternators. In: CARMO, J. P.; RIBEIRO, J. E. (Ed.). *New Advances in Vehicular Technology and Automotive Engineering.* Rijeka: IntechOpen, 2012. cap. 6. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/48459>>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 26.

JAMESON, E. *Electrical Discharge Machining.* Society of Manufacturing Engineers, 2001. ISBN 9780872635210. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=FJbdIKGmfSgC>>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

JOKINEN, T.; HRABOVCOVA, V.; PYRHONEN, J. *Design of Rotating Electrical Machines.* Wiley, 2013. ISBN 9781118701652. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=4SUIAQAAQBAJ>>. Citado 4 vezes nas páginas 40, 41, 48 e 52.

KRISHNAN, R. *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives.* Taylor & Francis, 2009. ISBN 9780824753849. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=DIDgbwAACAAJ>>. Citado na página 29.

SILVA, R. L. S. d. S. I. C. da. *Unidade de controle para sistema de carga automotivo*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado na página 73.

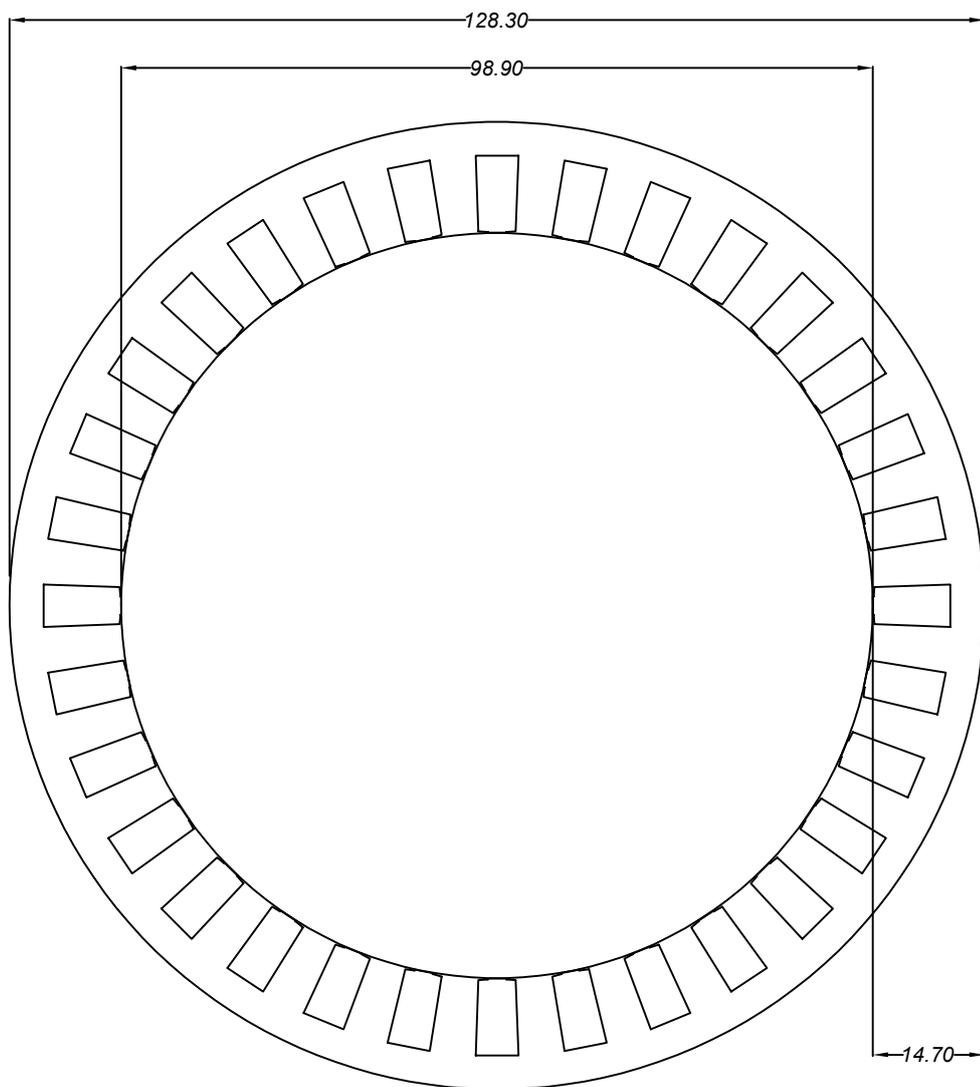
UMANS, S. *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley - 7.ed.* AMGH Editora, 2014. ISBN 9788580553741. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=3Fa2AwAAQBAJ>>. Citado na página 43.

WILTUSCHNIG, I. P. *Projeto e dimensionamento de um sistema de tração para veículos elétricos*. [s.n.], 2016. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/149350>>. Citado na página 41.

Apêndices

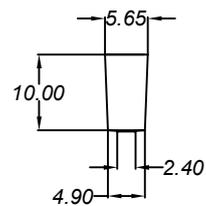
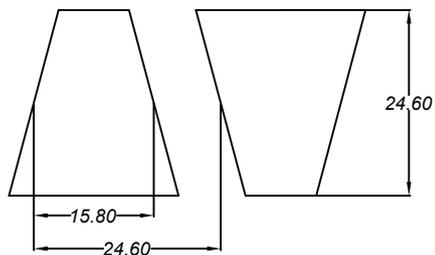
APÊNDICE A – Dimensões da máquina existente

Dimensões obtidas da máquina existente a ser utilizada como base para o projeto da máquina nova. As medições foram realizadas com o uso de paquímetro metálico, com precisão de 0,05 mm. O esquema do polo do rotor é aproximado e tem como objetivo apenas aproximar o valor do recobrimento da máquina original, avaliado em 0,65.



1 Estator existente

Escala 1:1



2 Ranhura

Escala 1:1

3 Pólo rotor existente

Escala 1:1

NOTAS

- todas dimensões são indicadas em milímetros;
- o estator existente possui um total de 36 ranhuras;
- o comprimento axial do estator é 26,90 mm.

TÍTULO: DIMENSÕES DA MÁQUINA EXISTENTE

AUTOR: MATHEUS AMORIM

DATA: 08/06/23

ASSUNTO: PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

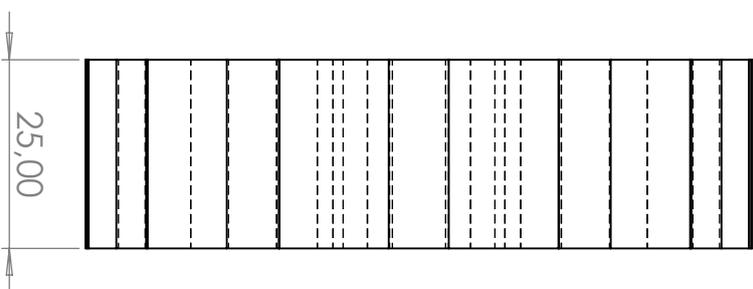
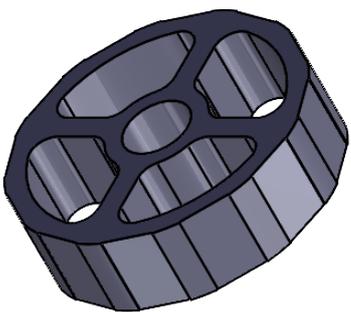
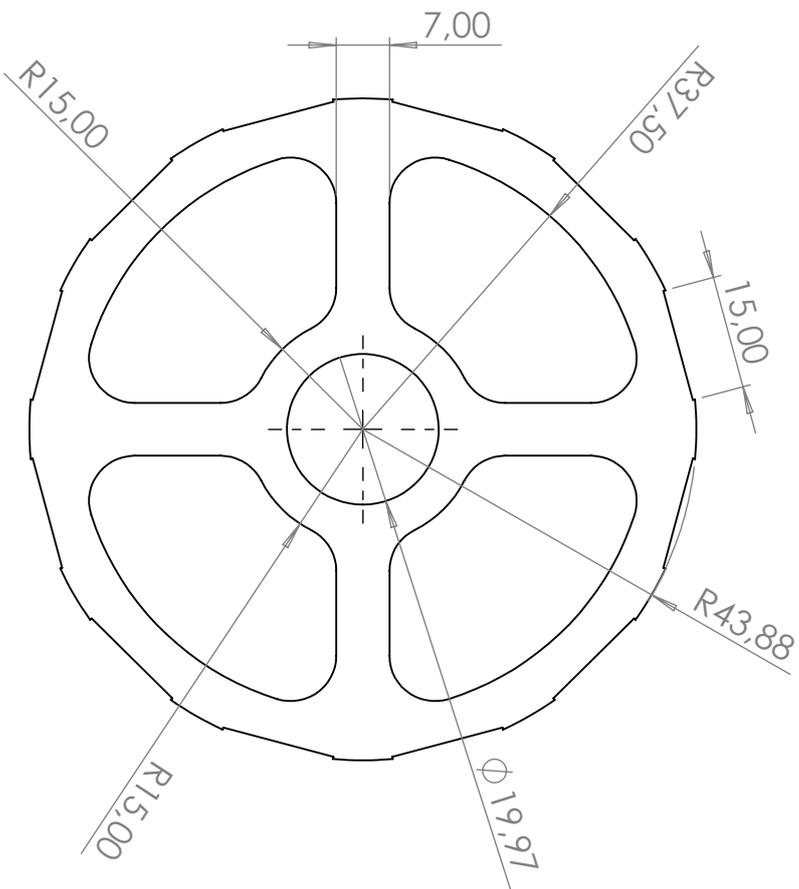
ESCALA: INDICADA

FOLHA: 01

APÊNDICE B – Dimensões do rotor

Dimensões da peça do rotor a ser usinada para ser cortada via o processo de eletroerosão a fio.

6 5 4 3 2 1



A

B

C

D

A

B

C

D

MATERIAL:

1020

DES. Nº

ESCALA:1:1

Rotor

FOLHA 1 DE 1

A4

A

B

C

D

A

B

C

D

A

B

C

D