

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO ENGENHARIA ELÉTRICA**

NAOMI CASTELLAIN KAMADA

**CARACTERIZAÇÃO DE MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA COM
ÍMÃ PERMANENTE E COMUTADOR**

CURITIBA

2019

NAOMI CASTELLAIN KAMADA

CARACTERIZAÇÃO DE MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA COM ÍMÃ PERMANENTE E COMUTADOR

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica apresentado à disciplina de Trabalho de conclusão de curso 2, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.
Orientador: Prof. Me. Marcelo Barcik

CURITIBA

2019

Naomi Castellain Kamada

Caracterização de motores de corrente contínua com ímã permanente e comutador

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheira Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 19 de setembro de 2019.

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarien Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Marcelo Barcik, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Clider Adriane de Souza Silva, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Daniel Gustavo Castellain, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo Barcik, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

RESUMO

KAMADA, Naomi Castellain. **Caracterização de motores de corrente contínua com ímã permanente e comutador**. 2019. 50 f. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação – Curso de Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

As máquinas de corrente contínua são conversores de energia. No caso do motor, recebe energia elétrica e transforma em energia mecânica, ou seja, recebe energia elétrica de uma fonte CC e converte em movimento, rotação, torque disponível no eixo. Este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo sobre motores de corrente contínua com ímãs permanentes e comutador que são utilizados na indústria automobilística e também usados em robôs. Este trabalho está dividido basicamente em três etapas: a primeira é um aprofundamento dos motores de corrente contínua, seus aspectos funcionais e construtivos além do estudo de materiais de ímãs permanentes, salientando suas características e aplicações; a segunda parte desse trabalho consiste em um estudo prático com essas máquinas elaborando uma caracterização dos motores através de ensaio a vazio e ensaio de rotor bloqueado. Por fim, a terceira parte consiste no levantamento das curvas dos principais parâmetros encontrados anteriormente com o objetivo de comparar com a teoria estudada. Pode-se perceber que os resultados obtidos foram satisfatórios, pois se mostrou compatível com a teoria. O comportamento das curvas características do motor estudado obteve formas semelhantes ao da teoria, validando assim os ensaios realizados.

Palavras-chave: Motor de corrente contínua. Ímãs permanentes. Curvas características. Ensaio a vazio. Ensaio de rotor bloqueado. Curvas de desempenho do motor.

ABSTRACT

KAMADA, Naomi Castellain. **Characterization of DC motors with permanent magnets and commutator**. 2019. 50 f. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação – Curso de Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

DC machines are power converters. In the case of the motor, it receives electrical energy and transforms it into mechanical energy, that is, it receives electrical energy from a DC source and converts the available shaft movement, rotation, torque. This paper aims to present a study on DC motors with permanent magnets and commutator that are used in the automotive industry and also used in robots. This work is basically divided into three stages: the first is a deepening of the DC motors, their functional and constructive aspects and the study of permanent magnet materials, highlighting their characteristics and applications; The second part of this work consists of a practical study with these machines elaborating a characterization of the engines through the empty test and locked rotor test. Finally, the third part is the survey of the curves of the main parameters previously found in order to compare with the theory studied. It can be seen that the results obtained were satisfactory, because it was compatible with the theory. The behavior of the characteristic curves of the studied motor obtained similar shapes to the theory, thus validating the tests performed.

Keywords: DC motors. Permanent magnets. Empty test. Locked rotor test. Engine performance curves.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Motor de corrente contínua com comutador de ímãs permanentes	15
FIGURA 2 (a) Rotor Completo e (b): Elementos do Rotor (Comutador)	17
FIGURA 3 (a) Elementos do Estator e (b): Ímã Permanente.....	18
FIGURA 4: Funcionamento do motor	19
FIGURA 5: Torque x Velocidade para o Motor de corrente contínua com Ímã Permanente.....	20
FIGURA 6: Malha do circuito de corrente contínua	21
FIGURA 7: Curvas características do motor CC de ímã permanente	24
FIGURA 8: Curvas características do motor CC de ímã permanente	25
FIGURA 9: Curva característica de funcionamento do ímã permanente	30
FIGURA 10: Curvas características dos principais materiais de ímãs permanentes do mercado.	31
FIGURA 11: Fonte C.A variável	34
FIGURA 12: Ponte retificadora	34
FIGURA 13: Multímetro ICEL	35
FIGURA 14: Tacômetro ICEL.....	35
FIGURA 15: Motor de ímã permanente com comutador	36
FIGURA 16: Diagrama de ensaio a vazio	36
FIGURA 17: Esquema montado do ensaio a vazio	37
FIGURA 18: Diagrama de ensaio de rotor bloqueado.....	38
FIGURA 19: Esquema montado do ensaio de rotor bloqueado	38
FIGURA 20: Gráfico tensão versus corrente para determinação da resistência	39
FIGURA 21: Gráfico tensão versus velocidade para determinação da constante K_e	41
FIGURA 22: Comparação das curvas esperadas com as obtidas (Rendimento e Potência).....	44
FIGURA 23: Comparação das curvas esperadas com as obtidas (Rotação e Corrente).....	45

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Vantagens e desvantagens dos materiais de imã permanente.	32
TABELA 2: Valores medidos e calculados do ensaio a vazio	37
TABELA 3: Valores medidos do ensaio de rotor bloqueado	39
TABELA 4: Valores medidos e calculados do ensaio para calcular a constante do motor ..	40
TABELA 5: Valores para levantamento das curvas de desempenho	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1.	TEMA	9
1.1.1.	Delimitação do Tema	10
1.2.	PROBLEMAS E PREMISSAS	10
1.3.	OBJETIVOS	11
1.3.1.	Objetivo Geral	11
1.3.2.	Objetivo Específico	11
1.4.	JUSTIFICATIVA	11
1.5.	PROCEDIMENTO METODOLÓGICOS	12
1.6.	ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1.	ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA COM ÍMÃ PERMANENTE	14
2.1.1.	Componentes do Rotor	16
2.1.2.	Componentes do Estator	17
2.2.	ASPECTOS FUNCIONAIS DOS MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA COM IMÃ PERMANENTE	18
2.3.	ANÁLISE QUALITATIVA DO MOTOR CC DE ÍMÃ PERMANENTE	20
2.4.	IMÃS PERMANENTE	26
2.4.1.	Tipos de Imã Permanente	27
2.4.2.	Curvas e Equações para Cada Material	30
2.4.3.	Vantagens e Desvantagens de Cada Material do Imã Permanente	32
3	CARACTERIZAÇÃO DE MOTORES C.C DE ÍMÃ PERMANENTE UTILIZADO NA LINHA AUTOMOTIVA	34
3.1.	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	34
3.2.	ENSAIO A VAZIO	36
3.3.	RESISTÊNCIA DE ARMADURA	37
3.4.	CONSTANTE DO MOTOR	40
4	LEVANTAMENTO DAS CURVAS DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS	42
4.1.	DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS	42
4.2.	CURVAS LEVANTADAS	44

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

As máquinas de corrente contínua são na verdade conversores de energia. No caso do motor, recebe energia elétrica e transforma em energia mecânica, ou seja, recebe energia elétrica de uma fonte CC e converte em movimento, rotação, torque disponível no eixo. A mesma máquina de corrente contínua pode trabalhar como gerador de corrente contínua: transforma uma energia mecânica em energia elétrica.

1.1. TEMA

Os motores CC de imã permanente são utilizados em sistemas de baixa potência devido as suas limitações de campo magnético fixo. Algumas classes de materiais magnéticos que são utilizados: ferrites, alnicos, neodímio (mais potentes com uma força de atração maior). (STRNAT, Karl 1990)

Quando comparados com materiais à base de eletroímã, os imãs permanentes trabalham mais eficientes no segmento de mercado de baixa potência.

Conforme aprendido no curso de Motores CC ministrado pelo professor Marcelo Barcik, pode-se listar algumas vantagens dos motores CC com imã permanente: a eliminação de fontes externas para gerar o campo magnético, são máquinas menores, mais leves, simples para construção e com boa eficiência associado a um custo bom para indústria.

Mas existem também algumas desvantagens como a perda do controle do campo, ou seja, não é possível controlar o fluxo polar, pois não está trabalhando com eletroímãs, o fluxo nesse tipo de motor é constante (porém pode-se implementar outros tipos de controle de velocidade que não seja pelo campo). Esses motores estão sujeitos à desmagnetização do imã permanente quando fica submetido em temperaturas elevadas, impactos mecânicos ou reação da armadura (outro efeito mais complexo onde provoca uma dispersão de fluxo dentro da máquina, ou seja uma perda de fluxo).

O imã permanente presente nas máquinas propicia uma qualidade no campo magnético e não existem grandes perdas nesse processo quando comparado com o eletroímã por exemplo. Pelo motivo de custo, o material desse motor escolhido por essas empresas é o ferrite, por ser mais barato e abundante.

Os ímãs permanentes são materiais que apresentam redução magnética residual, então eles têm um campo magnético próprio, ou seja, produzem campo magnético sem nenhum tipo de enrolamento de excitação ou dissipação de energia elétrica. Eles são caracterizados pelo laço de histerese. São conhecidos como materiais magneticamente duros ou ferro magnético com largo ciclo de histerese, pois tem alta resistência a desmagnetização. (GIERAS, Jacek 2002)

Basicamente esse trabalho vai caracterizar um motor de corrente contínua com ímã permanente informando através de ensaios de bancada os parâmetros necessários para se obter maior conhecimento da eficiência de uma máquina como essa.

1.1.1. Delimitação do Tema

Esses motores de corrente contínua, normalmente são estudados em três modelos: elétrico, magnético e mecânico. Se alterar alguns parâmetros em alguns dos modelos, os outros também são alterados, ou seja, os circuitos estão interligados. No caso desse trabalho, será unicamente no estudo do modelo elétrico.

Não serão realizadas simulações computacionais, serão feitas apenas análises das curvas dos ensaios a fim de definir a caracterização do motor de corrente contínua de ímã permanente usado em indústria automotiva mais especificamente para o sistema de refrigeração.

Portanto o foco do trabalho se limita ao estudo de motores de corrente contínua com ímã permanente e aos ensaios para caracterização do modelo elétrico do motor.

1.2. Problemas e Premissas

As características e parâmetros dos motores de corrente contínua com ímã permanente tem seus dados registrados na placa que o acompanha. Acontece que muitos desses motores, como o que será ensaiado, podem ser recebidos sem esses dados de placa. Os parâmetros são importantes para que possa usar essas máquinas com mais eficiência aplicando corrente ou tensão adequada para conseguir maior produtividade do motor dependendo da sua aplicação.

O motor de ímã permanente com comutador recebido pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná está sem esses dados de placa e a única informação que se sabe sobre ele é de que a tensão nominal é de 12 volts.

Assim, é necessário um estudo das características construtivas do motor, bem como os ensaios e procedimentos necessários para a caracterização dos dados de placa visando a melhor aplicação evitando falhas e melhorando sua performance.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho de conclusão de curso é elaborar um estudo teórico sobre motores de corrente contínua de ímã permanente utilizado na indústria automotiva e caracterizá-los através do levantamento de curvas operacionais de velocidade, corrente, rendimento e potência, todas em função do torque. Essas curvas serão elaboradas a partir de ensaios experimentais.

1.3.2. Objetivo Específico

- Estudar a estrutura de um motor de corrente contínua;
- Estudar o funcionamento de motores de corrente contínua de ímã permanente;
- Realizar ensaios a vazio e com rotor bloqueado com os motores automotivos 12 V a fim de coletar seus principais parâmetros de placa como corrente, resistência de armadura e torque;
- Levantar as curvas de corrente, velocidade/rotação, torque e potência dos motores a partir de ensaios com os mesmos;
- Analisar e interpretar as curvas dos resultados.

1.4. JUSTIFICATIVA

Existem várias aplicações para o motor de corrente contínua a ser usado nesse trabalho de conclusão de curso. Os motores CC de ímã permanente tem uma grande serventia na linha automobilística e também são comumente usados em robôs. É de grande importância saber todas as características do motor para aplicar a melhor configuração e estratégia com o objetivo de obter maior desempenho.

As máquinas de ímã permanente tem uma grande aplicação na linha automobilística; quanto mais luxuoso for o carro, mais motores desse tipo estão embarcados nesse veículo. Ventilação do radiador que movimenta a ventoinha, elevação do banco automático, movimentação do ar condicionado, refrigeração, abertura e levantamento de vidro, limpador de para-brisa são alguns exemplos de uso na área automobilística dos motores CC.

No caso do motor que será realizado o estudo proposto é utilizado pela indústria automotiva, mas especificamente utilizado na ventilação do radiador.

Outros exemplos de aplicações dos motores de corrente contínua mais complexos é o veículo espacial, drones, etc. Esse tipo de máquina está ao nosso redor de uma maneira abrangente e dentro de um seguimento de mercado específico.

Ideia desse trabalho começou quando o laboratório C-004 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná recebeu motores sem nenhum dado de placa, sendo assim não se sabe corrente, torque disponível e nem potência do motor. Isso é muito comum nesse tipo de motor e era preciso descobrir uma forma de obter esses dados para que pudesse utilizá-los da melhor maneira possível com eficiência.

Sendo assim, é possível descobrir características elétricas dos motores mesmo não tendo a especificação do fabricante do motor de corrente de ímã permanente que se utiliza de comutador, mas é necessário realizar alguns ensaios a vazio e de rotor bloqueado em cima das máquinas para descobrir as características.

Por isso, pode-se afirmar que é de grande importância o estudo em cima desse tipo de motor devido ao grande uso no cotidiano.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Primeiramente foi realizada a definição do tema e objetivos principais para o trabalho de conclusão do curso de Engenharia Elétrica, logo na sequência, foi discutido os problemas e as premissas que motivaram a realização do projeto.

Para segunda etapa, é necessário dar início a elaboração do conteúdo teórico começando com o estudo da estrutura de motores de corrente contínua em geral e o funcionamento desses motores de ímã permanente, bem como o estudo do ímã permanente e suas variações dentro das classificações.

Em continuação, foi dissertado o tipo de ensaio prático feito no laboratório e todos os procedimentos necessários para obter os parâmetros de caracterização: ensaio a vazio e o ensaio de rotor travado. Além disso, foram discutidas as curvas da corrente, da velocidade, do torque e da potência levantadas através desses ensaios na fase final de estudo das máquinas elétricas girantes em bancada.

Para concluir o trabalho, foram discutidos os dados de caracterização obtidos através dos experimentos dos motores de ímã permanentes utilizados na indústria automotiva, as curvas dos resultados e suas análises.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

Seguindo as orientações e a grade curricular do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, para que o trabalho de conclusão de curso seja entregue e apresentado, é necessário dividi-lo em três partes:

- Metodologia Aplicada ao TCC: Capítulo 1;
- Trabalho de Conclusão de Curso 1: Capítulo 2;
- Trabalho de Conclusão de Curso 2: Capítulo 3, 4 e 5.

O capítulo 1 é descrita a apresentação do tema (delimitação do tema, problemas e premissas, objetivos, justificativa e procedimentos metodológicos), já para o capítulo 2, a elaboração do conteúdo teórico é realizado a fim de apresentar uma base para a continuação do trabalho.

No capítulo 3 é realizado a caracterização de motores C.C de ímã permanente utilizado na linha automotiva e posteriormente no capítulo 4, a partir da caracterização dos motores, é apresentado o levantamento das curvas dos principais parâmetros.

Para finalizar, o capítulo 5 é mostrado às considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os motores de corrente contínua são basicamente máquinas que convertem energia elétrica em energia mecânica. Esse tipo de motor tem enorme utilidade e aplicação na atualidade nas indústrias automobilísticas, eles são usados como prensas, elevadores, mesas de testes, usados em veículos em diversas funções como levanta vidros, motor para esguichar água no para-brisa, etc. (MORAES, Fillipe 2015)

Apesar dos motores de corrente contínua terem muitas vantagens como maior confiabilidade, alto torque de partida em rotações baixas, ciclo contínuo e variação de velocidade relativamente de fácil controle, esse tipo de acionamento possui algumas desvantagens que necessitam ser analisadas antes da aplicação.

Os motores de corrente contínua são maiores e mais caros que os motores de indução, precisam de maior frequência de manutenção apesar de ser simples, não podem ser usados em alta tensão e não podem ser usados em ambientes explosivos devido a arcos e faíscas que podem produzir. (MORAES, Fillipe 2015)

O motor de corrente contínua tem principalmente duas partes que são as primordiais para o estudo: o estator e o rotor.

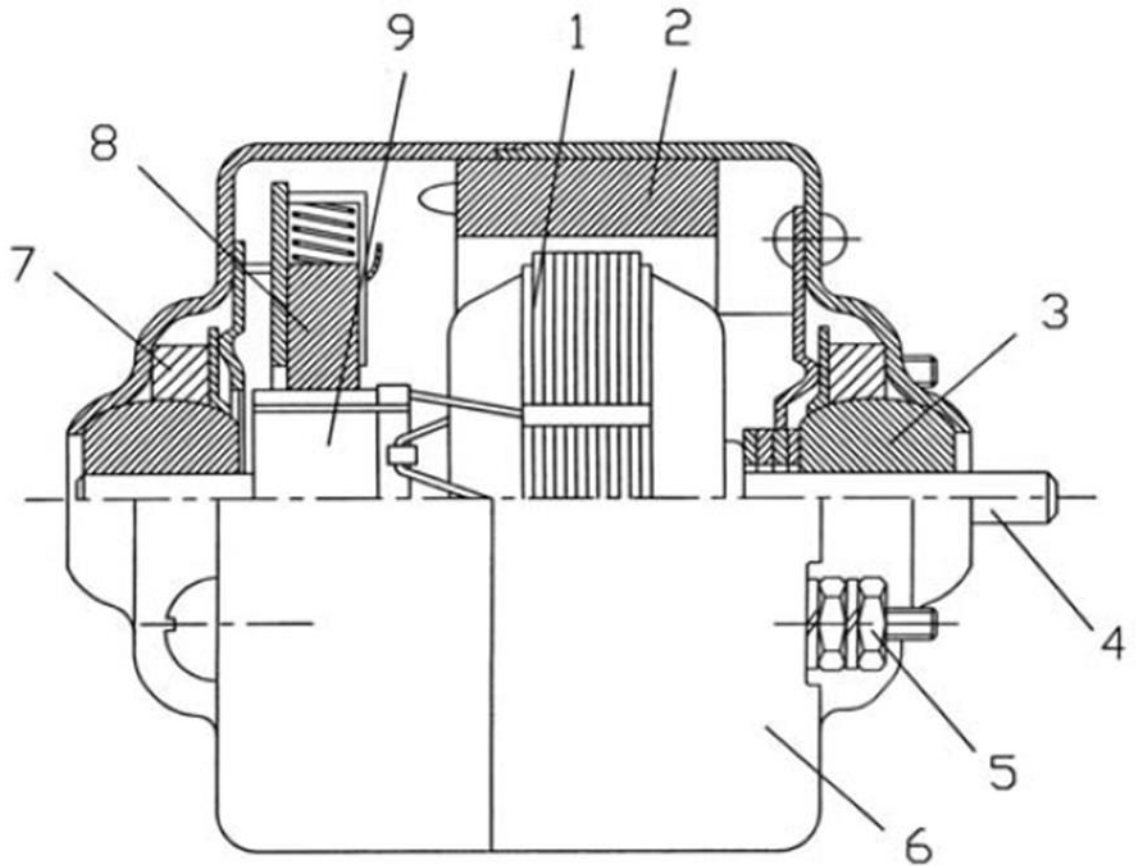
2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA COM ÍMÃ PERMANENTE

Os motores de corrente contínua com ímã permanente são composto basicamente pelo rotor e pelo estator que serão apresentados nos próximos tópicos.

Existem quatro principais tipos de rotor: rotor com fenda convencional, rotor sem ranhuras, rotor cilíndrico de bobina móvel, rotor de disco de bobina móvel. Os motores de corrente contínua de ímã permanente com comutador possuem rotor com ranhuras e sem ranhuras e têm enrolamentos de armadura fixados ao núcleo laminado. (GIERAS, Jacek 2002)

Na FIGURA 1 pode-se ver um desenho representativo de um motor de corrente contínua com comutador de ímãs permanentes.

FIGURA 1: Motor de corrente contínua com comutador de ímãs permanentes



Fonte: GIERAS, Jacek F. P120 (2002)

Cada número representa uma parte do motor, ou seja:

- 1- armadura;
- 2- ímã permanente feito de ferrite;
- 3- rolamento de metal;
- 4- eixo;
- 5- terminal;
- 6- estrutura de aço;
- 7- feltro;
- 8- escova
- 9- comutador.

Com isso temos uma noção geral de como é a estrutura de um motor de corrente contínua.

2.1.1. Componentes do Rotor

A parte móvel é chamada de rotor. O rotor é composto pelos enrolamentos de armadura, que são elementos de cobre. Operando como gerador, a tensão induzida é gerada dentro do rotor e operando como motor, ele tem a função de criar o torque eletromagnético. Além disso, o rotor também tem a função de provocar um caminho de baixa relutância magnética, induzir a tensão, rotacionar o motor e produzir ação necessária para comutação na máquina. (BARCIK, Marcelo 2017)

O rotor é composto pelo núcleo da armadura, eixo principal, os enrolamentos de cobre da armadura e o comutador (que fica na extremidade).

O núcleo da armadura laminado cria um caminho de baixa relutância magnética, ou seja, baixa resistência à passagem do fluxo norte/sul. As perdas por histerese são minimizadas devido às chapas de aço silício laminadas, ou seja, as lâminas servem para reduzir as correntes parasitas. O núcleo contém ranhuras axiais na sua periferia para colocação do enrolamento da armadura. (KOSOW, Irving 1982)

Ainda segundo Kosow, o eixo da armadura é o componente responsável pela transmissão de potência mecânica para a carga do motor. Esse componente está ligado ao núcleo da armadura e dita a rotação do motor.

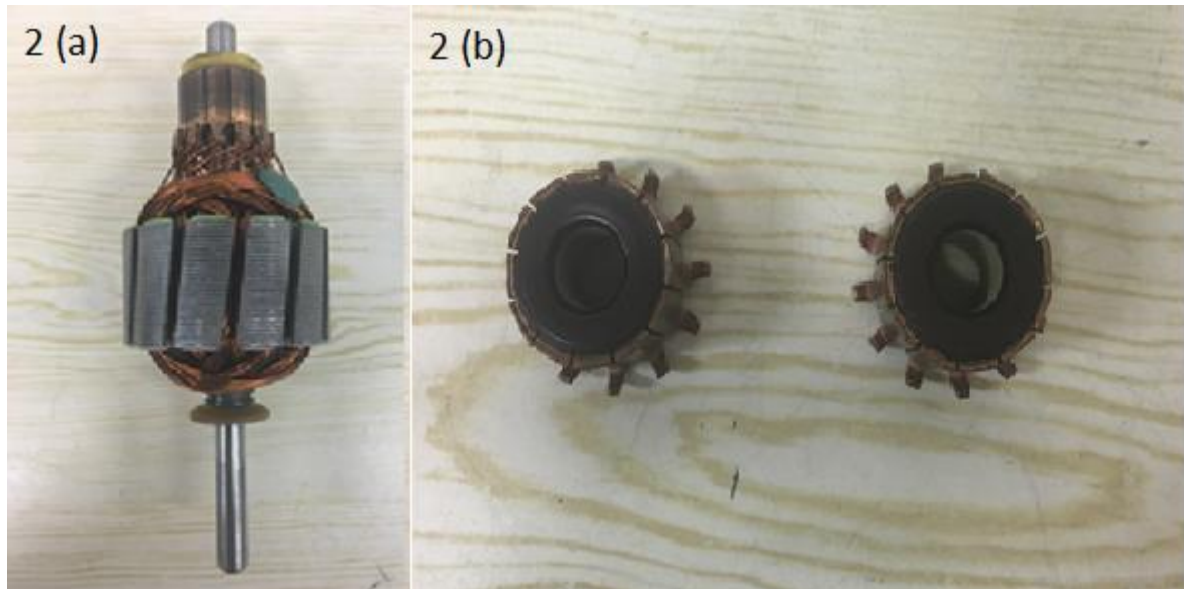
O enrolamento da armadura é um conjunto de condutores ligado eletricamente com as lâminas do comutador. Ele é constituído por bobinas isoladas e do núcleo da armadura.

A função do comutador é converter o sinal CA que é gerado dentro do motor para um sinal CC na saída e fica localizado no eixo do motor de corrente contínua. O comutador é feito normalmente de cobre isolados do eixo e eletricamente conectados as bobinas do enrolamento da armadura. (SILVA, Carolina 2012)

Existe também uma massa epóxi colocada no rotor, ela tem uma função de balanceamento para que não tenha vibração devido ao giro da máquina.

A FIGURA 2 representa os elementos do rotor, onde se pode ver na 2(a) o rotor de corrente contínua e na 2(b) observa-se o detalhamento do comutador do motor de corrente contínua.

FIGURA 2 (a) Rotor Completo e (b): Elementos do Rotor (Comutador)



Fonte: Própria (2017)

2.1.2. Componentes do Estator

O estator é composto pela parte externa (carcaça), os polos de excitação as escovas e porta escovas. Tem como função principal produzir o fluxo magnético para que o mesmo seja encaminhado ao rotor. O fluxo se comporta da seguinte maneira: sai do polo norte, passa pelo rotor, entra no polo sul e a carcaça serve de retorno das linhas de fluxo. (BARCIK, Marcelo. 2017)

A carcaça é responsável por fazer uma “blindagem magnética” e retorna com as linhas de fluxo para o circuito magnético criado pelos enrolamentos de campo, ela é o suporte de todo o motor de corrente contínua por isso deve ser bem rígida (normalmente usado ferro fundido ou laminado) para suportar as vibrações sem danificar a máquina.

O estator possui os polos que produzem o campo magnético, proteção, sustentação e caminho de baixa relutância magnética, ou seja, baixa resistência à passagem do fluxo, como se fosse um núcleo de transformador. Os polos são na maioria das vezes feitos de ferro laminado e presos a carcaça.

Outra parte construtiva do motor de corrente contínua são os enrolamentos de campo que são as bobinas de campo que produzem uma força magnetomotriz no

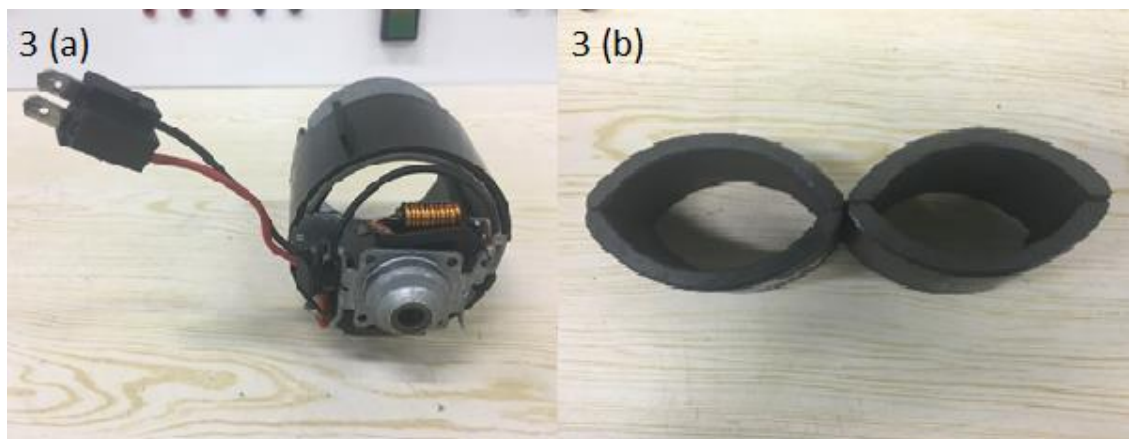
entreferro necessária para gerar uma força eletromotriz. Esses enrolamentos são suportados pelos polos. (KOSOW, Irving 1982)

Segundo Kosow, as escovas são feitas de um material condutor e deslizam sobre o comutador. As escovas ajudam a fazer a ligação elétrica na armadura e ficam em contato elétrico com as lâminas do comutador, ou seja, a fonte de tensão chega aos enrolamentos através das escovas.

As escovas ficam no porta escovas. O porta escovas é basicamente um compartimento no motor de corrente contínua que pressiona as escovas para o comutador através de molas. Esse processo tem como objetivo gerar contato eficiente para o funcionamento sem falhas do motor. (MORAES, Fillipe 2015)

A FIGURA 3 representa os elementos do estator, onde se pode ver na 3(a) o estator de corrente contínua e na 3(b) observa-se o detalhamento dos ímãs permanentes do motor de corrente contínua.

FIGURA 3 (a) Elementos do Estator e (b): Ímã Permanente



Fonte: Própria (2017)

2.2 ASPECTOS FUNCIONAIS DOS MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA COM ÍMÃ PERMANENTE

Os motores de corrente contínua com ímã permanente podem ter aplicação em vários aparelhos domésticos e no setor industrial.

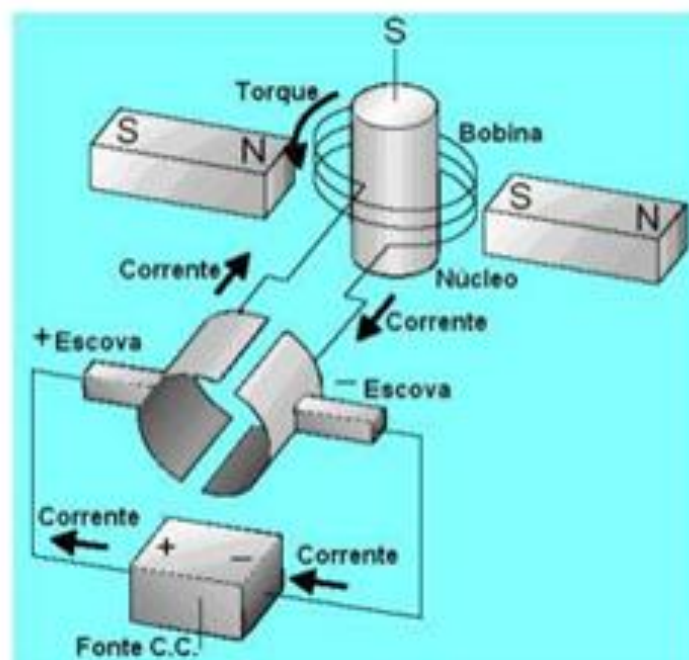
O motor funciona da seguinte forma: o estator fornece um campo magnético constante para a armadura que é uma parte rotativa (bobina). A armadura é

conectada a uma fonte de alimentação CC por um par de anéis do comutador e quando a corrente flui através da bobina, uma força eletromotriz é induzida sobre ela de acordo com a Lei de Lenz, com isso a bobina começará a rodar. A partir da regra da mão esquerda é possível verificar o sentido de rotação no eixo do motor. (MORAES, Fillipe 2015)

Conforme a rotação das bobinas, os anéis coletores são conectados com a fonte de alimentação de polaridade oposta. Por esse processo o lado esquerdo da bobina sempre irá empurrar através da corrente elétrica e o lado direito da bobina irá atraí-la. Isso significa que o torque estará na mesma direção do movimento e o motor continuará funcionando. (MORAES, Fillipe 2015)

A FIGURA 4 mostra de forma simplificada o funcionamento de um motor de corrente contínua com imã permanente com o sentido das correntes e movimento de rotação da bobina.

FIGURA 4: Funcionamento do motor



Fonte: http://www.marioloureiro.net/tecnica/electrif/Motores_CC_ind1.pdf

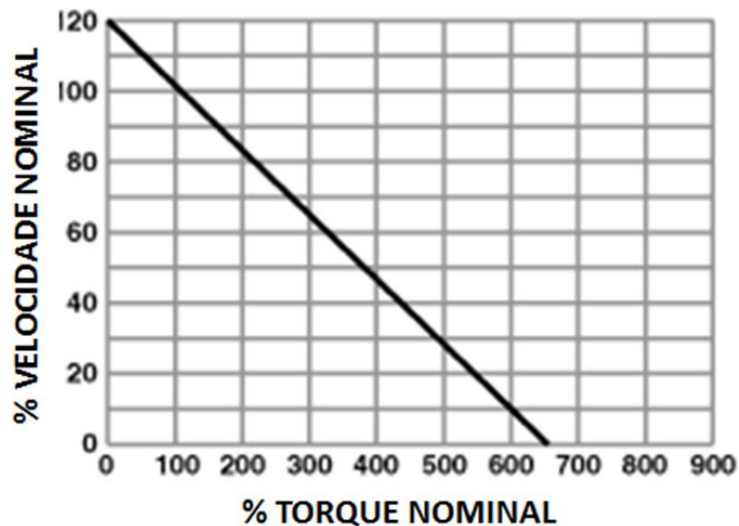
Pode-se analisar que quando a bobina está perpendicular ao campo magnético a ação do torque, torna-se zero. Com isso haverá um movimento irregular do motor. Para evitar esse movimento irregular é necessário adicionar bobinas ao rotor com comutadores e através dessas bobinas, haverá equilíbrio suficiente

(quanto mais bobinas, mais suave será a rotação do motor), pois quando uma bobina esta perpendicular ao campo a outra estará ligada a fonte de alimentação. Dessa maneira, a força do motor estará presente no sistema.

As voltas da armadura estão no interior do motor envolta com camadas de aço que melhoram a interação do fluxo magnético e as escovas do comutador ajudam a manter contato com a fonte de alimentação.

O comportamento da curva de velocidade e torque do motor de corrente contínua com imã permanente pode ser observado na FIGURA 5.

FIGURA 5: Torque x Velocidade para o Motor de corrente contínua com Imã Permanente



Fonte: <https://www.citissystems.com.br/motor-cc/>

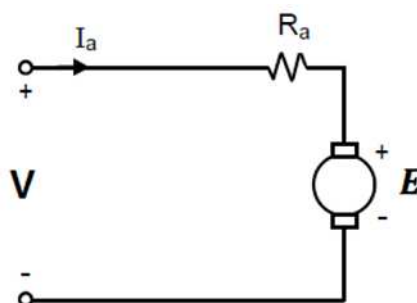
Um ciclo de rotação de um campo magnético vai produzir uma força de acordo com o princípio de indução eletromagnética, ou seja, nas bobinas da armadura uma força contra eletromotriz interna será induzida de modo que se oponha a tensão de entrada aplicada. A força contra eletromotriz induzida reduz a corrente da armadura em grande quantidade e é proporcional a velocidade do motor.

2.3 ANÁLISE QUALITATIVA DO MOTOR CC DE ÍMÃS PERMANENTES

Relação Tensão e Corrente: Para obter a relação de tensão e corrente necessária para analisar o comportamento do motor de corrente contínua, é

fundamental tirar a equação da malha do circuito de acordo com a FIGURA 6. (SILVA, Carolina 2012)

FIGURA 6: Malha do circuito de corrente contínua



Fonte: http://www.deg.ufla.br/site/_adm/upload/arquivos/motorcc-siemens.pdf

A partir disso, tem-se que a equação da tensão resultante dos terminais do motor, ou seja:

$$V_a = E + R_a \cdot I_a \quad (1)$$

Na qual: V_a = tensão V_A de armadura [em V];
 E = força contra eletromotriz gerada [em V];
 R_a = resistência de armadura [em Ω];
 I_a = corrente de armadura [em A].

Equação de Força Contra Eletromotriz: A força eletromotriz é originada no condutor quando ele é percorrido por uma corrente elétrica e colocado sob ação de um campo magnético. (MORAES, Fillipe 2015)

$$E_c = v \cdot B \cdot L \quad (2)$$

Na qual: E_c = força contra eletromotriz [em V];
 v = velocidade do condutor [em m/s];
 B = densidade de fluxo magnético [em T];

L = comprimento do condutor [em m].

O sentido da força contra eletromotriz é o oposto do fluxo da corrente, por causa disso, a força contra eletromotriz muda quando o condutor passa do polo positivo para o negativo do ímã permanente. Apesar disso, a força contra eletromotriz é somada ao comutador e a equação é dada pela (3). (LOPES, Juliana 2008).

$$E_c = K_e \cdot \omega \quad (3)$$

Na qual: E_c = força eletromotriz [em V];

K_e = constante construtiva do motor [em V.s/rad];

ω = rotação da máquina [em rad/s].

Para essa configuração de motor de corrente contínua com ímã permanente podemos considerar K_e e K_t iguais pois o fluxo e a constante construtiva já estão internamente na máquina. (BARCIK, Marcelo 2017)

Relação do Torque: A geração do torque é realizada quando existe um campo magnético e flui corrente elétrica sobre o condutor. A equação do torque necessária para obter a curva característica do motor é representada como: (SILVA, Carolina 2012)

$$T = K \cdot I \quad (4)$$

Na qual: T = torque [em N];

K = constante construtiva do motor;

I = corrente [em A].

Equação da Velocidade: Fazendo as operações matemáticas com as equações vistas anteriormente, pode-se obter (5). Essa operação matemática irá facilitar para as análises posteriores para a obtenção das curvas de comportamento.

$$\omega = \frac{V_a - I_a \cdot R_a}{K_e} \quad (5)$$

Na qual: ω = velocidade [em m/s];

V_a = tensão [em V];

R_a = resistência de armadura [em Ω];

I_a = corrente de armadura [em A];

K_e = constante construtiva do motor.

Relação de Rendimento: Segundo Fillipe Moraes, outro dado importante para a caracterização dos motores de corrente contínua com ímã permanente é com relação ao Rendimento do motor. Através de (1), pode-se analisar que a tensão aplicada é a soma da ação motora (força contra eletromotriz) e a queda de tensão nos enrolamentos (resistência multiplicada pela corrente).

Quando se multiplicam os dois lados da equação por I , temos o balanço de energia:

$$V \cdot I = E \cdot I + R \cdot I^2 \quad (6)$$

Ou seja,

$$P_{entrada} = Perdas + P_{saída} \quad (7)$$

Com isso, pode-se concluir que quanto maior a porcentagem de força contra eletromotriz em relação a tensão aplicada na armadura do motor de corrente contínua com ímãs permanente, maior será o rendimento.

Através da (6), podemos isolar $E \cdot I$:

$$E \cdot I = V \cdot I - R \cdot I^2 \quad (8)$$

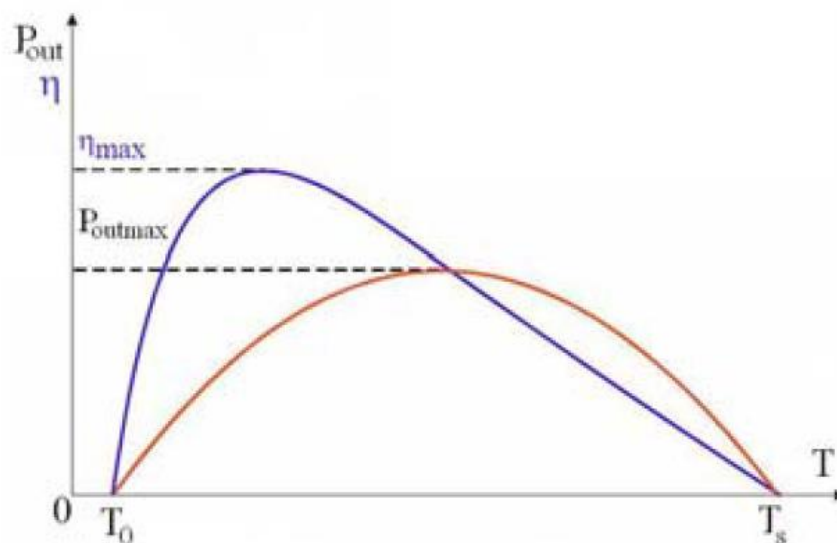
A interpretação da (8) é que quando a potência elétrica ($V.I$) é suprida ao circuito da armadura, uma parte da potência é dissipada ($I^2.R$) e a potência que restou ($E.I$) é requerida da armadura para produzir torque (potência mecânica). Para uma corrente de carga, quando a força contra eletromotriz for máxima, o motor também ficará com a máxima potência. (KOSOW, Irving 1982)

Através de todas essas relações, é possível obter os parâmetros necessários para encontrar as curvas características esperadas para esse tipo de motor automotivo.

Com as curvas é possível saber a faixa de corrente e velocidade que se pode trabalhar com o motor sem que danifique o mesmo. Sabendo onde a potência máxima vai ocorrer e o rendimento máximo também.

A FIGURA 7 representa as curvas esperadas para potência e rendimento do motor de corrente contínua.

FIGURA 7: Curvas características do motor CC de imã permanente



Fonte: GIERAS, Jacek , P.127 (2002)

Onde : P_{out} = potência de saída;

P_{outmax} = potência de saída máxima;

η = rendimento;

η_{max} = rendimento máximo;

T = carga de torque;

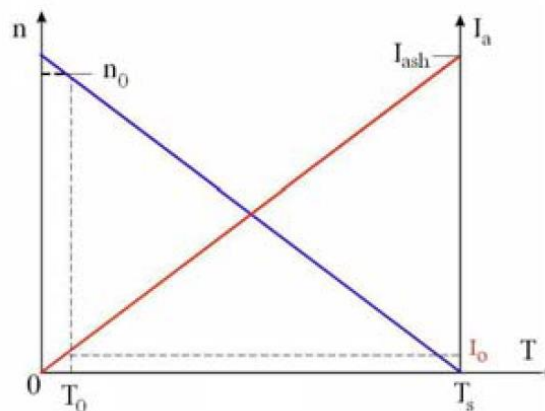
T_0 = carga de torque inicial;

T_s = carga de torque final;

Sendo, o eixo vertical representando a potência de saída e o eixo horizontal representando a carga de torque. A curva em azul representa a curva esperada de rendimento após os ensaios no motor de corrente contínua de ímãs permanente e a curva vermelha é a curva esperada de potência do motor.

A FIGURA 8 representa a curva esperada para corrente e rotação do motor de corrente contínua.

FIGURA 8: Curvas características do motor CC de ímã permanente



Fonte: GIERAS, Jacek , P.127 (2002)

Onde : η = velocidade;

η_0 = velocidade sem carga;

T = carga de torque;

T_0 = carga de torque inicial;

T_s = carga de torque final;

I_a = corrente de armadura máxima;

Sendo, no eixo vertical a esquerda representando a velocidade, no eixo vertical a direita representando a corrente de armadura no motor, e no eixo horizontal a carga de torque. A curva em azul representa a curva esperada da

velocidade após os ensaios no motor de corrente contínua de ímãs permanente e a curva vermelha é a curva esperada do comportamento da corrente de armadura do motor.

Com essas curvas é possível saber a faixa de corrente e velocidade que se pode trabalhar com o motor sem que danifique o mesmo. Sabendo onde a potência máxima vai ocorrer e o rendimento máximo também.

2.4 IMÃS PERMANENTES

Os ímãs permanentes tem a função de provocar um campo magnético para que o motor funcione corretamente. Esse campo magnético pode ser obtido de forma artificial ou natural dependendo do seu material. (GIERAS, Jacek 2002)

Existem diversos tipos de materiais de ímãs permanentes usados no mercado para que o motor de corrente contínua funcione. Dependendo do tipo de ímã permanente pode-se obter melhores resultados se tratando de desempenho e vantagens em relação à outros materiais.

Um ímã permanente pode produzir um campo magnético em um espaço de ar com ou sem enrolamento de excitação de campo e sem dissipação de energia elétrica. Os ímãs permanentes também são chamados de materiais magnéticos duros, significando materiais ferromagnéticos com um amplo laço de histerese.

Nas próximas subseções desse trabalho, será possível analisar um pouco sobre cada composto e suas curvas.

Segundo a terceira edição do livro “Tecnologia de motor de ímã permanente”, o primeiro material magnético rígido chamado *Loadstone* foi encontrado em 600 A.C e recebeu o nome de magnes, pois foi encontrado em Magnesia, um distrito na Tessália. (GIERAS, Jacek 2002)

Os primeiros ímãs artificiais eram agulhas de ferro magnetizadas tocando-se magnetita. O primeiro uso prático do magnetismo pelo homem pode ter sido a bússola.

O primeiro relato sistemático de ímãs foi um trabalho científico de William Gilbert em 1600. Gilbert descreveu como modificar um ímã com pontas macias do pólo do ferro para aumentar a força atrativa em contato e como magnetizar peças de ferro ou aço. O próximo grande avanço no magnetismo veio com a invenção do eletroímã por J. Henry e W. Sturgeon em 1825. (GIERAS, Jacek 2002)

Em 1867, os manuais alemães registraram que as ligas ferromagnéticas foram feitas de materiais não-magnéticos e ligas não-magnéticas de materiais ferromagnéticos, principalmente ferro. Por exemplo, em 1901, as ligas Heusler (Cu_2MnAl), que tinha excelentes propriedades em comparação com os ímãs anteriores. A composição de uma liga típica de Heusler foi de 10% a 30% de manganês e 15% a 19% de alumínio, sendo o restante cobre.

Em 1917 ligas de aço cobalto e em 1931 Alnico (Al, Ni, Co, Fe) foram descobertos no Japão. Em 1938, também no Japão, Kato e Takei desenvolveram ímãs feito de óxidos em pó. Este desenvolvimento foi o precursor do moderno ferrite.

2.4.1 Tipos de Ímã Permanente

Segundo Jacek Gieras, existem três classes de ímãs permanentes atualmente utilizadas para motores elétricos: os Alnicos (Al, Ni, Co, Fe – que são ligas de ferro contendo alumínio, níquel e cobalto), os Ferrites (ferrite de bário $\text{BaO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ e ferrite de estrôncio $\text{SrO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) e os Terras Raras (samário-cobalto SmCo e neodímio-ferro-boro NdFeB).

Alnico

As principais vantagens do Alnico são sua alta densidade de fluxo remanescente magnético e coeficientes de baixa temperatura. Estas vantagens permitem uma alta densidade de fluxo magnético de espaço de ar em alta temperatura magnética. Infelizmente, a força coercitiva é muito baixa e a curva de desmagnetização é extremamente não linear. Portanto, é muito fácil não apenas magnetizar, mas também desmagnetizar o Alnico. (OLIVEIRA, João 2009)

Esse material é um material denso que é uma mistura de alumínio, ferro, níquel e cobalto juntamente com outros elementos.

Alnico foi usado em ímãs permanentes de motores de comutador de disco com espaços de ar relativamente grandes. Isso resulta em um fluxo magnético de reação de armadura insignificante. Às vezes, os ímãs permanentes fabricados com Alnico são protegidos do fluxo da armadura, e conseqüentemente da desmagnetização. (MORAES, Fillipe 2015)

Esse tipo de material dominou o mercado de ímãs permanentes para motores de corrente contínua na década de 1940 até 1960 quando o ferrite se tornou o material amplamente utilizado.

Ferrite

Segundo Jacek Gieras, os ferrites tem uma maior força que o Alnico, mas ao mesmo tempo tem uma menor densidade do fluxo magnético. Os coeficientes de temperatura são relativamente altos, ou seja, o coeficiente de bárrio é $-0,20\% / ^\circ\text{C}$ e o coeficiente de H_c é $-0,27\% / ^\circ\text{C}$.

Para esse material a temperatura máxima de trabalho sem prejudicar a produtividade é de 400°C .

Muitas vantagens podem ser listadas para esse tipo de material: baixo custo, resistência elétrica alta que por consequência, não há corrente de Foucault. Os ímãs permanentes desse material podem mostrar uma vantagem econômica sobre o Alnico visto anteriormente de até 7,5 kW.

Os ímãs permanentes feitos de ferrite de bárrio são usados em motores para automóveis (ventiladores, limpadores de parabrisa), brinquedos elétricos, etc. Para esse material será realizado testes para a caracterização dessa máquina elétrica girante em corrente contínua. (OLIVEIRA, João 2009)

O ferrite de chumbo tem uma grande desvantagem de produção do ponto de vista ambiental, esse é um requisito muito importante nos dias de hoje, pois as indústrias estão cada vez mais se preocupando com a questão sustentável além da própria função do produto a ser fabricado.

Terra Rara

Com o grande avanço do desenvolvimento de ímãs permanentes, começou-se a produção com o componente terra rara. Terra rara é um grupo de elementos químicos que são misturados para dar um resultado e finalidade diferente em uma outra composição e não são em geral raros.

Para produzir um metal de terra rara em particular, os elementos devem ser refinados para que se tenha aplicação comercial.

A primeira geração dessas novas ligas com base na composição SmCo_5 e inventado na década de 1960 tem sido produzido comercialmente desde o início dos

anos 70. Hoje é um bem estabelecido material magnético rígido. Os ímãs de samário foram os primeiros a serem criados como um superimã. SmCo5 tem a vantagem de alta densidade de fluxo remanescente, alta força coercitiva, produto de alta energia, curva de desmagnetização linear e coeficiente de baixa temperatura. O coeficiente de temperatura de Br é -0.02 a -0.045% / °C e o coeficiente de temperatura de Hc é -0.14 a $-0,40\%$ / °C. A temperatura máxima de serviço é de 300 a 350°C. (GIERAS, Jacek 2002)

Recomenda-se o uso desse tipo de material para fabricação de ímãs permanentes para construção de motores com alta densidade de potência. Uma grande desvantagem de se usar essa composição é que ela tem um custo alto em comparação as outras opções de mercado.

Normalmente os ímãs de samário não precisam de revestimento, somente se a aplicação tiver muito problema com sujeira é indicado aplicar um selante de níquel.

A segunda geração da Terra rara foi com base em neodímio descoberta no Japão na década de 80. O ímã de neodímio é uma combinação de neodímio, ferro e boro (Nd₂Fe₁₄B). Esse tipo de material usado em ímãs permanentes foi uma descoberta revolucionária na questão de custos das matérias primas já que é muito abundante na natureza. (OLIVEIRA, João 2009)

Esse tipo de ímã permanente é produzido cada vez mais frequente, pois eles têm melhores propriedades magnéticas do que as da SmCo5, mas tem uma grande desvantagem que é a operação eficiente somente em temperatura ambiente e também é suscetível a corrosão.

Como o neodímio melhora muito o custo de produção dos ímãs permanentes, esse material cada vez mais tem grande impacto no desenvolvimento de tecnologia e estudos, as mais recentes “versões” já estão com revestimento metálico ou de resina com o objetivo de melhorar a resistência à corrosão.

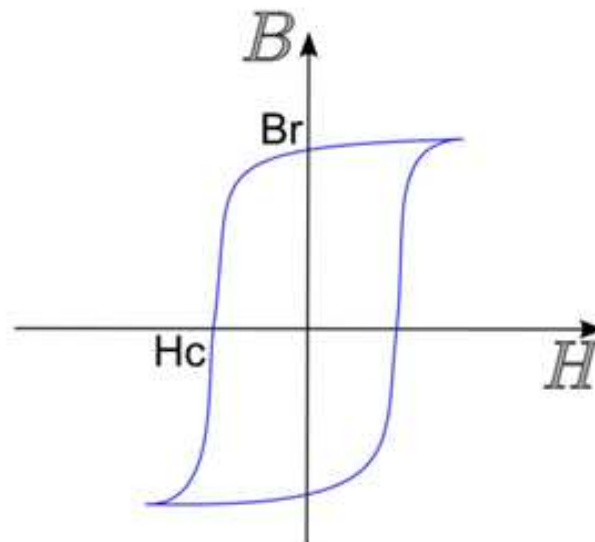
Os ímãs permanentes de terra rara são produzidos por indução a vácuo ou por uma redução calciotérmica dos óxidos. Esse material é juntado até se transformar em um pó muito fino e cristalino que são alinhados em um campo magnético externo, pressionados e densificados. A sintetização e o tratamento térmico são feitos sob vácuo ou sob uma atmosfera de gás inerte com temperaturas de 100 a 120°C. Depois desses processos é necessário magnetizar. (GIERAS, Jacek 2002)

Os ímãs permanentes de neodímio são mecanicamente mais fortes que os de samário.

2.4.2 Curvas e Equações para Cada Material

Os ímãs permanentes são responsáveis por manter o campo magnético no motor e a curva característica geral está representada na FIGURA 9.

FIGURA 9: Curva característica de funcionamento do ímã permanente



Fonte:

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4107810/mod_resource/content/2/Aula06_excitacao_imas.pdf

Percebe-se através da análise da curva característica que os ímãs permanentes em geral são caracterizados por um elevado valor de imantação remanescente (Br), ou seja, valor do campo magnético interno e pelo valor de coercividade (Hc), que significa a intensidade do campo magnético.

Alnico

Segundo Karl Strnat, o alnico é uma combinação de substâncias usadas para a fabricação de ímãs permanentes. Esse tipo de material foi o primeiro a ser descoberto. Existem basicamente dois tipos de alnico usados em máquinas elétricas: o alnico 5 e o alnico 8. O alnico 5 é principalmente uma mistura de ferro, alumínio, níquel e cobalto que possui o valor da imantação remanescente maior e o valor de coercividade baixo. Já o alnico 8 tem o valor da densidade de fluxo menor

mas um valor de coercividade maior que o alnico 5. Isso significa que quanto menor o valor da coercividade menor está a propensão de desmagnetização do material.

A curva característica do alnico pode-se observar na FIGURA 10.

Ferrite

O ferrite também é conhecido por “cerâmica” que são compostos de ferro, bário ou estrôncio. O ferrite tem densidade de fluxo inferior ao alnico porém a taxa de coercividade são bem maiores. Isso significa que esse tipo de material está mais estável e não são tão fácil de desmagnetizar.

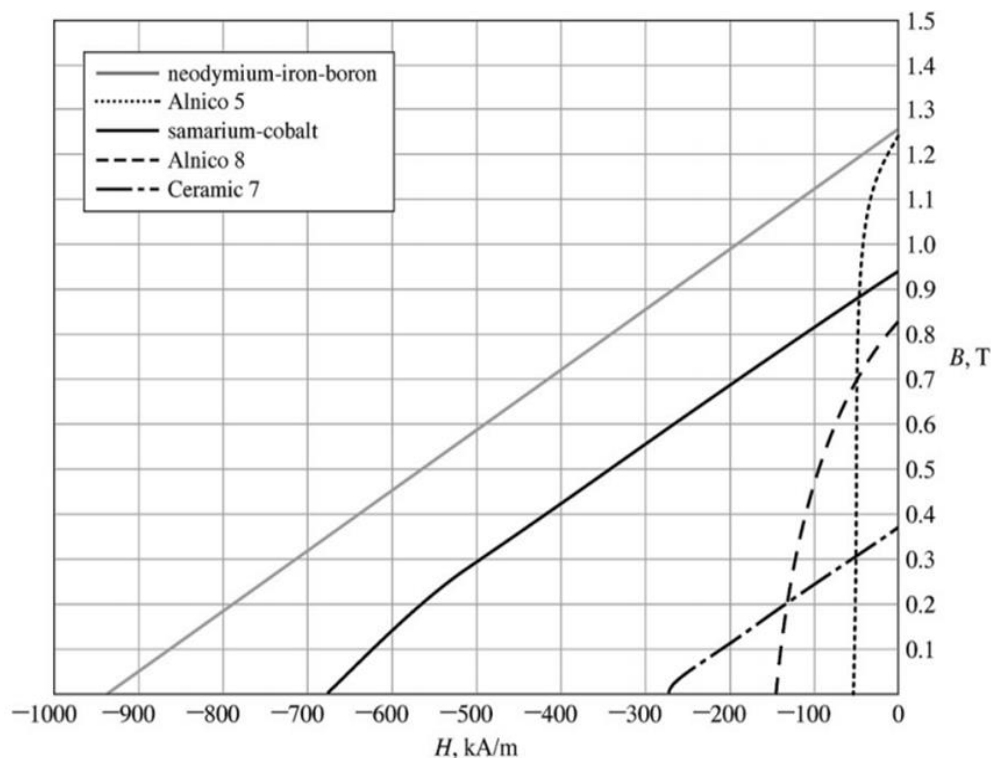
A curva característica do ferrite pode-se observar na FIGURA 10.

Terra Rara

Os ímãs permanentes do tipo terra rara têm maiores taxas de imantação remanescente e também de coercividade. Isso significa que eles possuem melhores propriedades magnéticas que os outros dois materiais apresentados anteriormente. (GIERAS, Jacek 2002)

A curva característica do terra rara pode-se observar na FIGURA 10.

FIGURA 10: Curvas características dos principais materiais de ímãs permanentes do mercado



Fonte:

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4107810/mod_resource/content/2/Aula06_excitacao_imas.pdf

Sendo, *neodymium-iron-boron* um tipo de material de terra rara de neodímio, *samarium-cobalt* um tipo de material de terra rara de samário, *Alnico 5* e *Alnico 8* tipos de alnico e *Cerimic 7* tipo de ferrite.

2.4.3 Vantagens e Desvantagens de Material do Imã Permanente

Foi possível verificar alguns tipos de materiais de imã permanente usados no mercado atualmente, dentre eles o alnico, ferrite e o terra rara que pode ser de samário ou de neodímio.

Pode-se verificar na TABELA 1 algumas vantagens e desvantagens dos elementos.

TABELA 1: Vantagens e desvantagens dos materiais de imã permanente

		VANTAGENS	DESVANTAGENS
ALNICO		<ul style="list-style-type: none"> - Alta densidade de fluxo magnético - Fácil magnetização 	<ul style="list-style-type: none"> - Curva de desmagnetização não linear; - Fácil desmagnetização
FERRITE		<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo; - Resistência elétrica alta; - Não há corrente de Foucault 	<ul style="list-style-type: none"> - A produção do imã permanente não é agressiva ao meio ambiente - Qualidade do material em comparação aos demais
TERRA RARA	SAMÁRIO	<ul style="list-style-type: none"> - Alta densidade de fluxo; - Alta força coercitiva; - Curva de desmagnetização linear 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo elevado
	NEODÍMIO	<ul style="list-style-type: none"> - Custo baixo 	<ul style="list-style-type: none"> - Suscetível a corrosão; - Opera somente em temperatura ambiente

Fonte: Própria (2019)

Além dos itens listados na tabela, sabe-se que os ferrites tem maior força que o alnico, porém tem menor densidade do fluxo magnético. Além disso, com relação aos materiais de terra rara, o neodímio tem melhores propriedades magnéticas que o samário. (OLIVEIRA, João 2009)

3 CARACTERIZAÇÃO DE MOTORES C.C DE ÍMÃ PERMANENTE UTILIZADO NA LINHA AUTOMOTIVA

Para obter a caracterização do motor estudado, são necessários alguns procedimentos que serão detalhados nessa sessão do trabalho. Os experimentos realizados em bancada no laboratório C-004 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná utilizaram os equipamentos do SEMAP (Setor de Manutenção do departamento de elétrica e automação da universidade).

3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

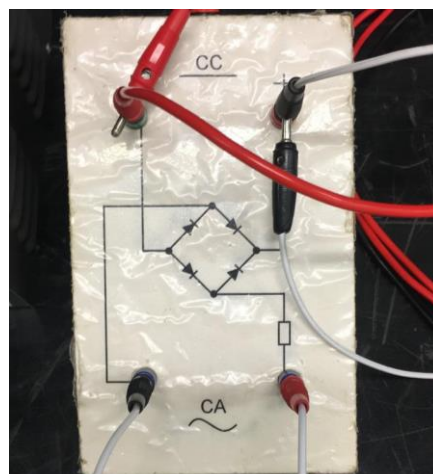
Os equipamentos usados para a caracterização do motor de corrente contínua foram: fonte C.A variável, ponte retificadora, multímetro ICEL modelo MD-6130 (a escala para tensão usou-se 20V e para corrente 20A c.c), tacômetro digital ICEL modelo TC-5035, um alicate usado como freio mecânico, além do próprio motor de ímã permanente. Todos esses equipamentos estão ilustrados nas figuras abaixo.

FIGURA 11: Fonte C.A variável

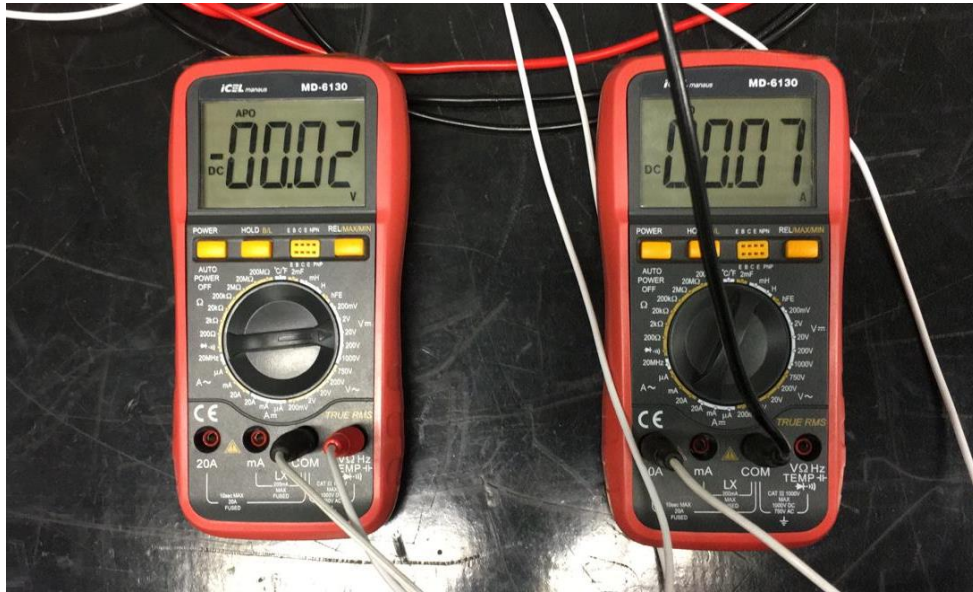


Fonte: Própria (2019)

FIGURA 12: Ponte retificadora



Fonte: Própria (2019)
FIGURA 13: Multímetro ICEL



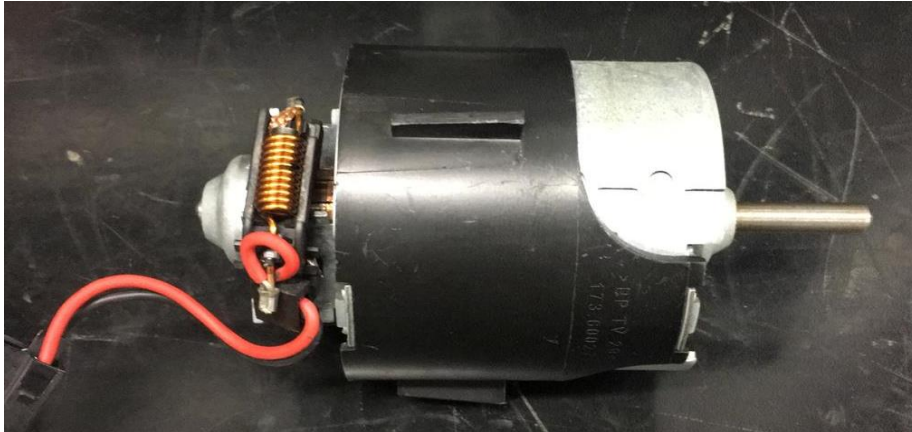
Fonte: Própria (2019)

FIGURA 14: Tacômetro ICEL



Fonte: Própria (2019)

FIGURA 15: Motor de ímã permanente com comutador



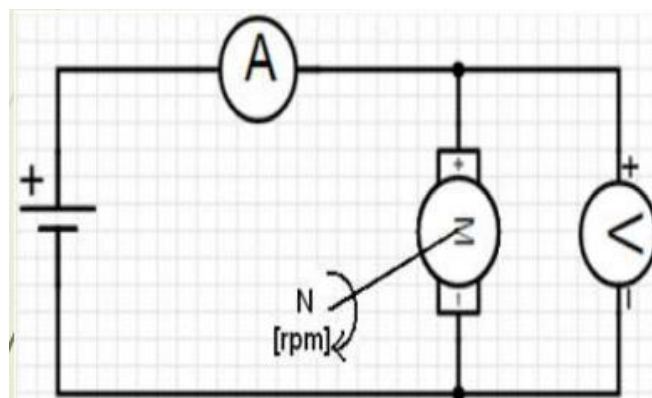
Fonte: Própria (2019)

3.2 ENSAIO A VAZIO

O primeiro ensaio realizado foi o ensaio a vazio que tem o objetivo de encontrar os parâmetros de operação dos motores com a tensão nominal aplicada na armadura.

Para a realização do ensaio a vazio foi necessário montar o esquema de acordo com a figura 16, aplicando tensão nominal de 12V no motor e o eixo sem carga mecânica. Monitorou-se corrente, tensão e rotação no eixo. Apesar de o ensaio ser simples, ele fornece a corrente a vazio (corrente mais baixa que o motor possui, ou seja, a corrente suficiente que ele vai obter da rede para vencer o atrito e colocar o rotor em movimento). A rotação que será coletada será a rotação máxima que o motor pode trabalhar. Para isso é necessário de uma fonte CC, amperímetro, voltímetro e tacômetro. A figura 17 representa o esquema montado do ensaio a vazio.

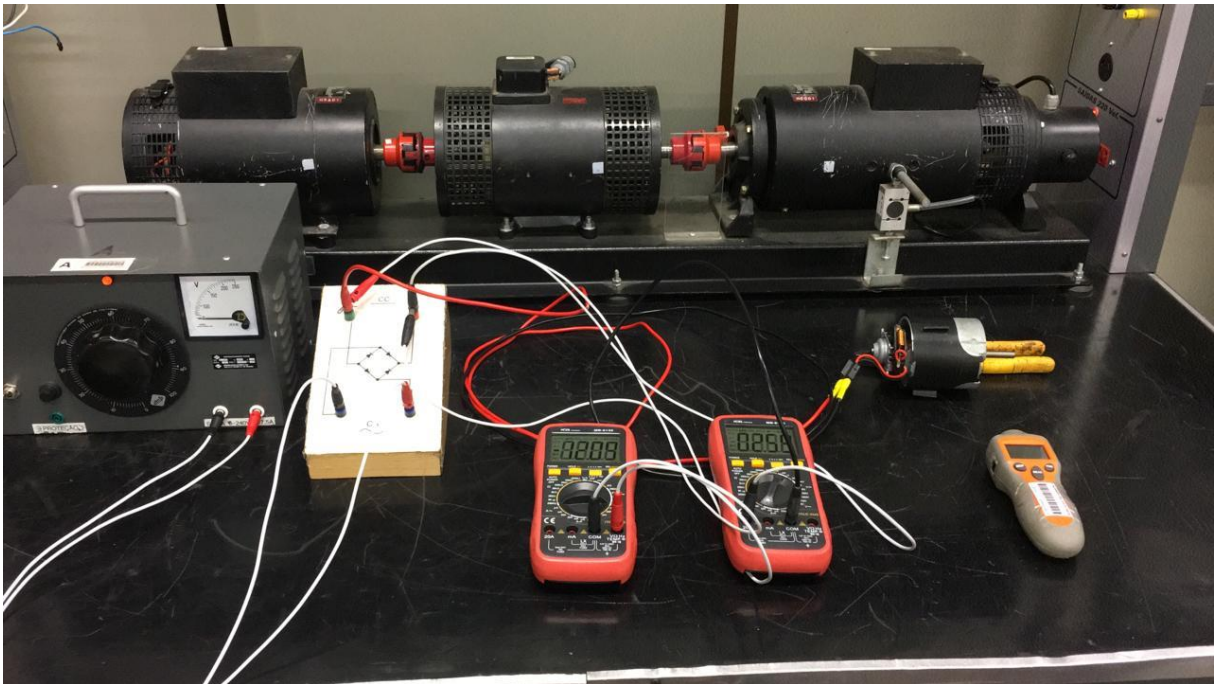
FIGURA 16: Diagrama de ensaio a vazio



Fonte: Curso de motores CC utilizados em robôs de combate. UTFPR. Profº Marcelo Barcik.

(2017)

FIGURA 17: Esquema montado do ensaio a vazio



Fonte: Própria (2019)

Na TABELA 2 a seguir pode-se verificar o valor de potência à vazio em watts calculado através da equação $P = V \cdot I$, a partir dos valores de corrente a vazio em ampère e tensão aplicada em volts.

TABELA 2: Valores medidos e calculados do ensaio a vazio

Tensão Aplicada Nominal (V)	Valores Medidos		Valor Calculado
	Corrente a vazio (A)	Rotação a vazio (rpm)	Potência a vazio (W)
12,13	2,30	5071	27,89

Fonte: Própria (2019)

Com esse primeiro experimento, pode-se notar que foi obtido o valor de rotação máxima do motor e os parâmetros iniciais para a caracterização da máquina de corrente contínua de ímã permanente com comutador.

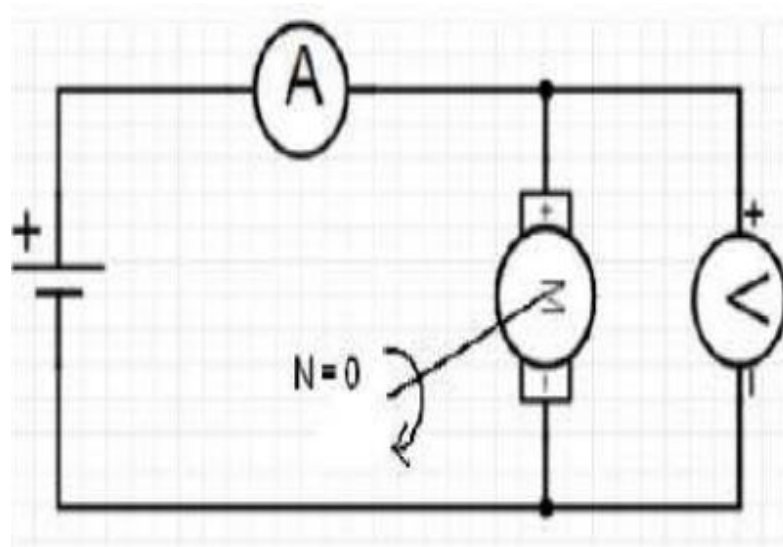
O levantamento das curvas e comparação com as curvas apresentadas na revisão bibliográfica será apresentado no próximo capítulo.

3.3 RESISTÊNCIA DE ARMADURA

O segundo ensaio realizado foi o ensaio de rotor bloqueado. Esse ensaio permite determinar a resistência de armadura do motor de corrente contínua com

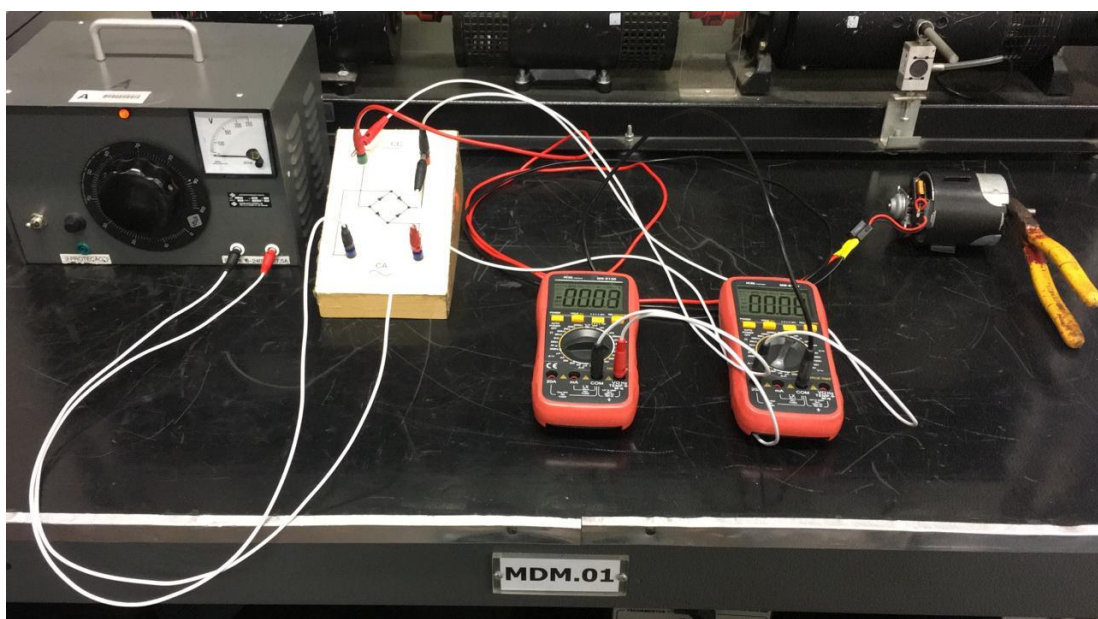
ímã permanente e comutador. Monta-se o esquema conforme o diagrama da Figura 18 e aplica-se tensão nominal para monitorar a corrente e tensão de armadura. Como o motor utilizado é de pequenas proporções, é possível segurar o rotor facilmente para travar o rotor através de um alicate durante todo o ensaio e obter velocidade igual à zero. Nesse tipo de ensaio a corrente é máxima. Foi utilizado uma fonte CC, amperímetro, voltímetro e alicate como freio mecânico. A Figura 19 representa o esquema montado do ensaio de rotor bloqueado.

FIGURA 18: Diagrama de ensaio de rotor bloqueado



Fonte: Curso de motores CC utilizados em robôs de combate. UTFPR. Profº Marcelo Barcik. (2017)

FIGURA 19: Esquema montado do ensaio de rotor bloqueado



Fonte: Própria (2019)

Considerando o motor que foi utilizado, é recomendado não chegar até a tensão nominal com o rotor bloqueado devido ao risco de danificar a máquina, por isso foi necessário trabalhar com a tensão mais baixa.

Os valores medidos podem ser observados na TABELA 3.

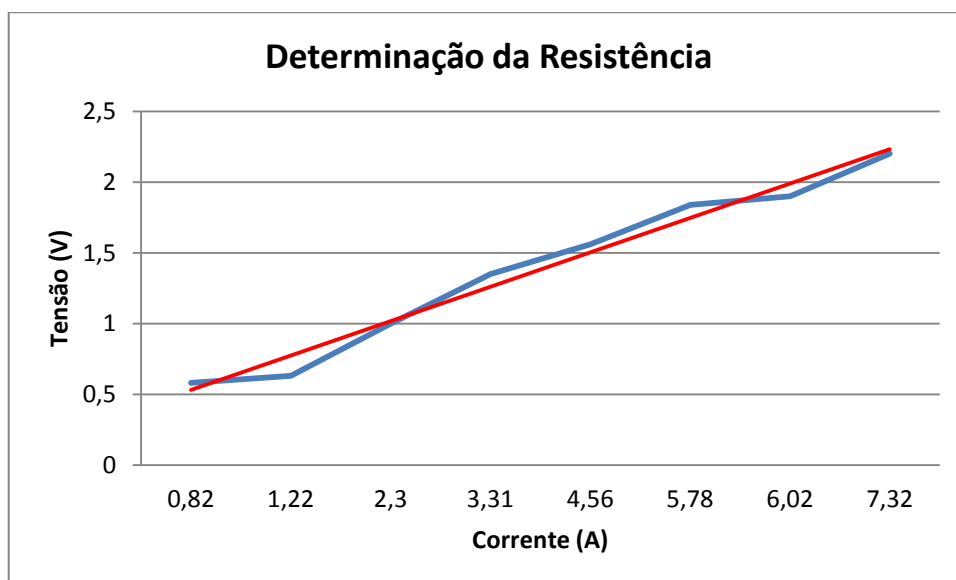
TABELA 3: Valores medidos do ensaio de rotor bloqueado

Tensão Aplicada (V)	Valores Medidos
	Corrente (A)
0,58	0,82
0,63	1,22
1,00	2,30
1,35	3,31
1,56	4,56
1,84	5,78
1,90	6,02
2,20	7,32

Fonte: Própria (2019)

A partir dos valores da tabela 3 foi gerado o gráfico da Figura 20 (tensão versus corrente) para determinar os valores da resistência de armadura (R_a).

FIGURA 20: Gráfico tensão versus corrente para determinação da resistência



Fonte: Própria (2019)

A reta em azul na figura 20 representa a curva real encontrada do motor e a reta vermelha representa a linha de tendência da função. Através da regressão linear foi possível determinar o valor da resistência de armadura que é de $0,2514 \Omega$

(respectivamente o coeficiente angular da reta ajustada) e o valor do coeficiente linear é de 0,3979. A equação da reta é dada por $y = 0,2514x + 0,3979$.

3.4 CONSTANTE DO MOTOR

O terceiro ensaio foi realizado com o objetivo de determinar a constante da tensão gerada (K_e) do motor de corrente contínua com ímã permanente e comutador. Para isso foi utilizado uma fonte c.a variável com retificador, multímetros com a função de amperímetro e voltímetro e um tacômetro digital.

O esquema montado foi o mesmo do primeiro ensaio a vazio (sem carga) representado na figura 16, onde dessa vez aplicou-se tensão de zero até a tensão nominal da máquina e para cada condição de tensão aplicada foram medidos os valores de corrente e rotação do motor.

Os valores encontrados podem ser vistos na TABELA 4.

TABELA 4: Valores medidos e calculados do ensaio para calcular a constante do motor

Tensão Aplicada (V)	Valores Medidos			Valores Calculados
	Corrente (A)	Rotação (rpm)	Rotação (rad/s)	Tensão Gerada (V)
0,56	1,13	77	8,06	0,27
1,28	1,18	330	34,55	0,98
2,47	1,45	914	95,71	2,10
2,80	1,54	958	100,32	2,41
3,40	1,62	1130	118,30	2,99
4,40	1,69	1628	170,40	3,97
5,30	1,78	1949	204,10	4,85
6,45	1,82	2647	277,20	5,99
7,26	1,88	2909	304,60	6,79
8,31	1,92	3390	354,90	7,83
9,13	2,08	3702	387,60	8,61
10,00	2,12	4082	427,40	9,47
11,33	2,20	4574	478,90	10,77
12,10	2,22	5007	524,30	11,54

Fonte: Própria (2019)

Os valores de rotação em rpm foram convertidos para rad/s para se adequar as fórmulas de tensão gerada e seus valores podem ser observadas na tabela 5.

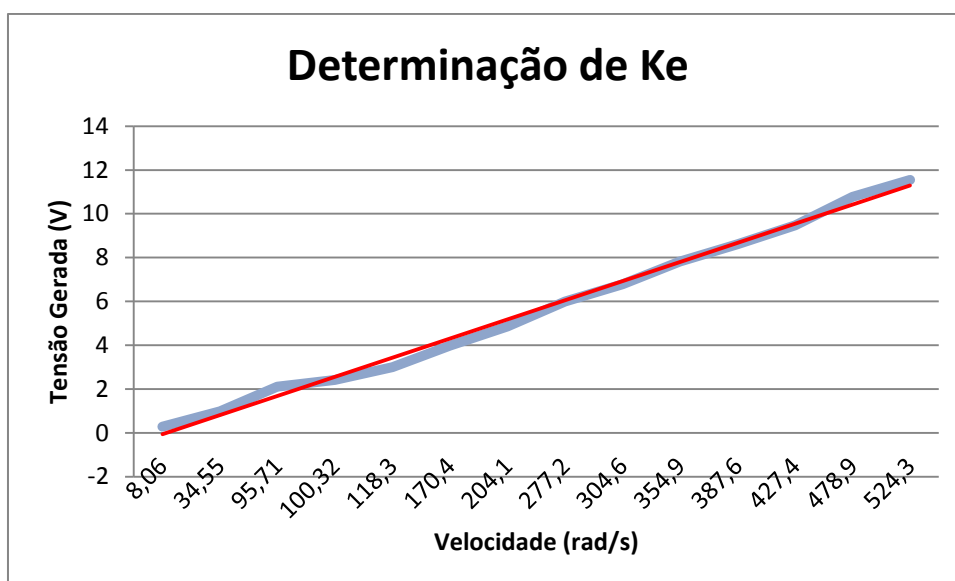
Para as máquinas de corrente contínua de ímã permanente a constante K_e é numericamente igual à constante de torque K_t . Como já comentado no capítulo anterior, a ação geradora pode ser definida como $E_c = K_e \cdot \omega$ e o valor de K_e pode ser resolvido pela equação da tensão gerada e pela velocidade do conjunto através

da equação $Ke = \frac{E [V.s]}{\omega [rad]}$. A ação geradora também pode ser calculada através da equação $E = V - R \cdot I$.

Além das equações apresentadas, o Ke pode ser determinado através da regressão linear, ou seja, o Ke representa o coeficiente angular da reta ajustada do gráfico de tensão gerada versus rotação do motor de corrente contínua.

O gráfico de determinação da constante Ke pode ser observado na figura 21.

FIGURA 21: Gráfico tensão versus velocidade para determinação da constante Ke



Fonte: Própria (2019)

A reta em azul na figura 21 representa a curva real encontrada do motor e a reta vermelha representa a linha de tendência da função. Através da regressão linear foi possível determinar o valor da constante Ke que é de 0,02172 V.s/rad (respectivamente o coeficiente angular da reta ajustada). A equação da reta é dada por $y = 0,02172x + 0,2052$.

Após realizar esses ensaios, usam-se os conceitos de motor cc de ímã permanente com comutador e as equações de corrente, tensão gerada, torque e velocidade para encontrar as curvas características que serão apresentadas no capítulo 4.

4 LEVANTAMENTO DAS CURVAS DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS

A partir dos ensaios realizados no laboratório da universidade utilizando o motor de corrente contínua com ímã permanente e comutador foi possível traçar curvas de desempenho para comparação com a teoria e assim validar os experimentos.

Nesse capítulo serão vistas as curvas de rotação x torque, corrente de armadura x torque, rendimento x torque e potência x torque.

4.1 DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS

Para definir os parâmetros mínimos e máximos de corrente no motor c.c é necessário coletar a corrente mínima do ensaio a vazio e a máxima pela (9).

$$I_{am\acute{a}x} = V/R_a. \quad (9)$$

Depois de calcular a corrente máxima, define-se uma série de valores para corrente dentro dessa faixa que pode ser observada na tabela 5.

Com a faixa de corrente da armadura definida, pode-se calcular os valores de torque para o motor de corrente contínua com ímã permanente. O torque pode ser calculado pela (10).

$$T = K_e \cdot (I_a - I_{vazio}) \quad (10)$$

Os valores da faixa de torque também podem ser verificados na tabela 5.

Após calculados os valores de corrente e torque, pode-se verificar os parâmetros mínimos e máximos de rotação do motor. A máxima rotação ocorrerá para a condição do ensaio a vazio e a mínima vai ocorrer para a condição do ensaio de rotor bloqueado. O cálculo de rotação pode ser feito através da (11).

$$\omega = (V - I_a \cdot R_a) / K_e \quad (11)$$

Outro item importante para a verificação da teoria comparando com o ensaio realizado são os parâmetros de potência do motor (tanto de entrada como de saída).

A máxima potência de entrada ocorrerá para a condição de máxima corrente, ou seja, rotor bloqueado. Já a mínima potência de entrada acontece quando opera a vazio. O cálculo da potência de entrada pode ser feita através da (12).

$$P_{in} = V \cdot I_a \quad (12)$$

Para a máxima potência de saída, acontece com uma condição intermediária de corrente e a mínima potência de saída para a condição de operação a vazio. O cálculo da potência de saída pode ser realizado através da (13).

$$P_{out} = (I_a - I_{vazio}) \cdot (V - R_a \cdot I_a) \quad (13)$$

Finalizando os cálculos dos parâmetros tem-se que efetuar os valores de rendimento do motor. Para esse item é necessário usar a relação entre as potências de saída e entrada (14).

$$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \quad (14)$$

Todos os valores calculados podem ser verificados na TABELA 5.

TABELA 5: Valores para levantamento das curvas de desempenho

Corrente (A)	Rotação (rad/s)	Td (N.m)	P (W) in	P (W) out	Rendimento (%)
2,30	525,86	0,00	27,60	0,00	0,00
6,08	482,11	0,08	72,96	39,58	54,25
9,86	438,36	0,16	118,32	71,98	60,83
13,64	394,61	0,24	163,68	97,19	59,38
17,42	350,86	0,33	209,04	115,22	55,12
21,22	306,87	0,41	254,64	126,11	49,52
25,00	263,12	0,49	300,00	129,73	43,24
28,78	219,37	0,57	345,36	126,17	36,53
32,56	175,62	0,66	390,72	115,42	29,54
36,34	131,87	0,74	436,08	97,49	22,36
40,12	88,11	0,82	481,44	72,38	15,03
43,90	44,36	0,90	526,80	40,08	7,61
47,73	0,00	0,98	572,79	0,00	0,00

*Considerando que a tensão nominal é igual a 12V; $R_a = 0,2514\Omega$; $K_e = K_t = 0,02172$ e $I_{vazio} = 2,3A$

Fonte: Própria (2019)

A corrente indicada na primeira coluna foi pré-determinada para se obter os outros parâmetros. Após a definição de todos esses parâmetros, foram elaborados os gráficos correspondentes com a teoria apresentados no capítulo 2 desse trabalho.

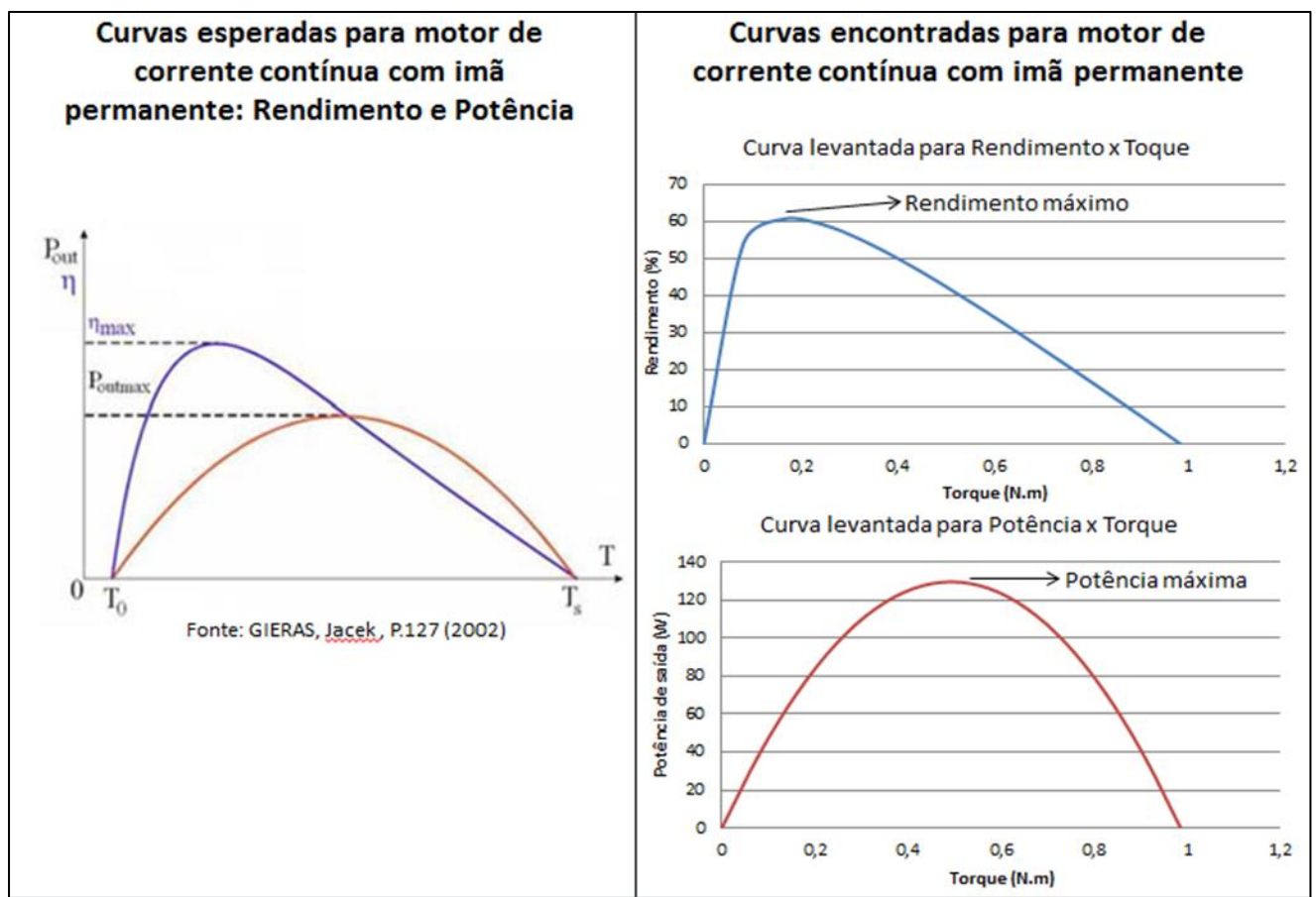
4.2 CURVAS LEVANTADAS

Como se pode verificar na figura 22, as curvas levantadas pelos ensaios e cálculos realizados ficaram satisfatórias (com a mesma forma e tendência) apesar de não estarem nas mesmas proporções que as curvas características apresentadas pelo Jacek Gieras em seu livro de 2002.

O rendimento máximo e potência máxima estão indicados nos gráficos que representam o valor exato de 60,83% e 129,73 W respectivamente.

A eficiência máxima ocorre quando a corrente de entrada é 9,86A associada a uma velocidade de 438,36 rad/s. Fazendo as contas através das equações demonstradas anteriormente, a eficiência máxima resulta em 60,83%.

FIGURA 22: Comparação das curvas esperadas com as obtidas (Rendimento e Potência)

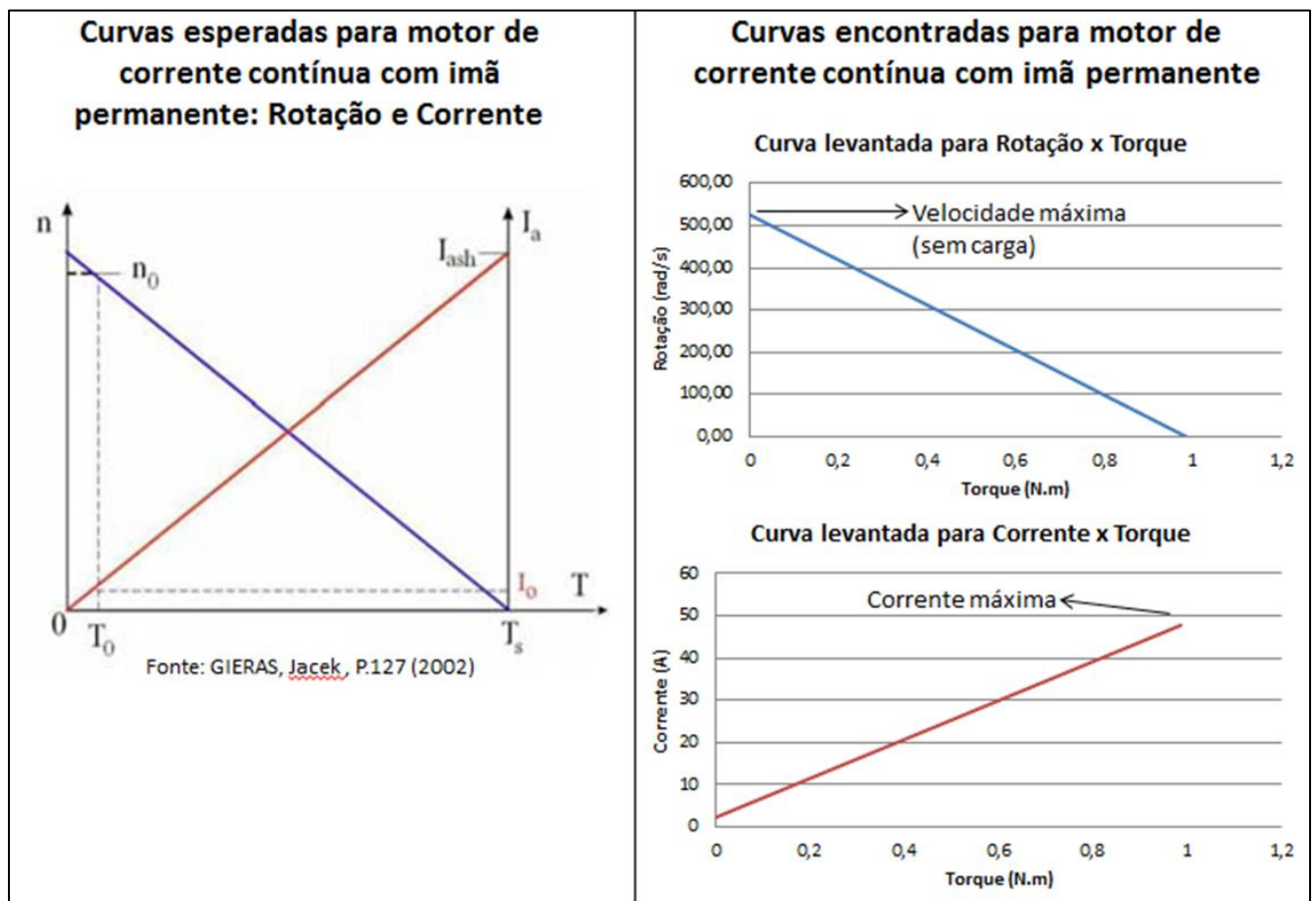


Na figura 23 percebe-se a comparação das curvas características do motor de corrente contínua com ímã permanente apresentada pelo Jacek Gieras (mostradas no capítulo 2 desse trabalho) com as curvas levantadas em bancada no laboratório da universidade.

A curva levantada para rotação tem como valor encontrado 525,86 rad/s, isso significa que esse valor é a velocidade máxima para o motor sem carga.

A tendência das curvas ensaiadas foi a mesma das curvas características, porém, assim como as curvas apresentadas anteriormente, as proporções não estão exatamente iguais. Isso se deve ao fato de que o ensaio foi limitado pelos instrumentos utilizados na universidade. Para um ensaio com mais precisão eram necessários equipamentos mais modernos e com manutenção preventiva para que os valores fossem exatos.

FIGURA 23: Comparação das curvas esperadas com as obtidas (Rotação e Corrente)



Fonte: Própria (2019)

Sendo assim, os ensaios foram validados de forma satisfatória por comparação de curvas e assim autenticando os valores encontrados nos experimentos do motor de corrente contínua com ímã permanente e comutador.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os motores de corrente contínua com ímã permanente e comutador são utilizados para diversas finalidades como já citados no primeiro capítulo desse trabalho. O motor cedido para estudo é especificamente usado na indústria automobilística e foi utilizado para realizar a caracterização através de ensaios de bancada.

Um dos objetivos iniciais do trabalho foi de elaborar um estudo teórico sobre esse tipo de motor se aprofundando no estudo do funcionamento e materiais utilizados na construção do ímã permanente. Entende-se que esses objetivos foram cumpridos tendo em vista que foram apresentados num primeiro momento e essenciais para o entendimento do funcionamento na parte prática desse trabalho.

Consideram-se os experimentos realizados de forma satisfatória apesar das pequenas diferenças de forma de curvas levantadas em comparação com a teoria estudada anteriormente. Esse fato se deve a falta de precisão dos equipamentos disponíveis no laboratório da universidade, ou seja, fica-se limitado pela qualidade dos materiais. Pode-se validar os ensaios através da comparação das curvas características apresentadas no capítulo 2 do trabalho.

Os cálculos necessários também foram realizados utilizando os valores medidos nos experimentos sem o arredondamento para se ter uma melhor veracidade com a teoria.

Através dos ensaios e cálculos realizados nesse trabalho é possível utilizar o motor de corrente contínua de forma mais eficaz, fazendo com que possa utilizar a máquina na máxima produtividade já que foi possível verificar seu desempenho para diversos cenários.

Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se considerar trabalhar com programação em softwares de simulação como, por exemplo, Simulink do Matlab para confirmar a veracidade dos parâmetros elétricos e mecânicos encontrados no experimento prático.

REFERÊNCIAS

BARCIK, Marcelo. **Curso de motores CC utilizados em robôs de combate**. UTFPR. Profº Marcelo Barcik. 2017 – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

GIERAS, Jacek F. **Permanent Magnet motor technology: design and applications**. Third Edition. CRC Presss Taylor & Francis Group, 2002.

KOSOW, Irving L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. Editora Globo. Porto Alegre. Rio de Janeiro, 1982

LOPES, Juliana. **Estratégias de gerenciamento de potência em ônibus de transporte urbano elétrico híbrido série**. 2008. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MORAES, Fillipe A. **Estudo em vazio sobre motores CC com imã permanente com aplicação na indústria automotiva**. 2015. 85 f. Monografia (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA – Siemens. **Guia rápido para uma especificação precisa**. Edição 01.2006. Unidade Automação e Controle – Acionamentos e Motores Elétricos PUBLICAÇÃO TÉCNICA. Disponível em: <http://www.marioloureiro.net/tecnica/electrif/Motores_CC_ind1.pdf>. Acesso em Maio de 2019.

OLIVEIRA, João. G. S. M. de. **Materiais usados na construção de motores elétricos**. Seminário Técnico, PUCRS, 2009. Disponível em: <http://www.motoreletrico.net/upload/materiais_motores.pdf>. Acesso em Maio de 2019.

SEL 329 – CONVERSÃO ELETROMECHANICA DE ENERGIA. **Aula 06 USP – Universidade de São Paulo e-disciplinas. Sistemas de Apoio às Disciplinas**. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4107810/mod_resource/content/2/Aula06_excitacao_imas.pdf>. Acesso em Maio de 2019.

SIEMENS. **Motores de corrente contínua**. Artigo Técnico. Disponível em: <http://www.deg.ufla.br/site/_adm/upload/arquivos/motorcc-siemens.pdf>. Acesso em Maio de 2019.

SILVA, Carolina J. N. da. **Caracterização de um conjunto didático para ensaio de motor de corrente contínua**. 2012. 51 f. Monografia (Graduação) – Universidade São Francisco, Itatiba, 2012.

SILVEIRA Cristiano B. - **Motor CC: Saiba como Funciona e de que forma Especificar**. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/motor-cc/>>. Acesso em Maio de 2019.

STRNAT, Karl J. **Modern Permanent Magnets for Applications in Electro-Technology**. Proceedings of the IEEE, Vol. 78, N6, June, 1990.