

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

FILLIPE ALEXANDRE MORAES

**ESTUDO EM VAZIO SOBRE MOTORES CC COM ÍMÃ PERMANENTE
COM APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

CURITIBA

2015

FILLIPE ALEXANDRE MORAES

**ESTUDO EM VAZIO SOBRE MOTORES CC COM ÍMÃ PERMANENTE
COM APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica 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. Marcelo Barcik.

CURITIBA

2015

Fillipe Alexandre Moraes

Estudo em vazio sobre motores CC com ímã permanente com aplicação na indústria automotiva

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

Curitiba, 27 de novembro de 2015.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

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

ORIENTAÇÃO

Marcelo Barcik, Eng
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Antonio Ivan Bastos Sobrinho, Eng
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Clider Adriane de Souza Silva, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ivan Born, Eng
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

MORAES, Fillipe Alexandre. **Estudo em vazio sobre motores CC com ímã permanente com aplicação na indústria automotiva.** 2015. 85 f. Trabalho de conclusão de curso do curso de graduação em engenharia elétrica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

Este trabalho tem por objetivo abordar um estudo sobre motores de corrente contínua com ímãs permanentes que são utilizados dentro da indústria automotiva, especificamente para aplicações de ventilação e equilíbrio térmico. Este estudo está dividido em três etapas: a primeira aborda os aspectos construtivos desses motores, dando ênfase aos materiais magnéticos e aos ímãs permanentes, salientando as suas características e propriedades, assim como suas aplicações em máquinas elétricas girantes; a segunda parte desse trabalho consiste em um estudo prático com essas máquinas de aplicação específica, tendo como foco elaborar uma caracterização elétrica e também levantar alguns parâmetros mecânicos, que auxiliam na elaboração da última etapa do trabalho. Por fim, é feita uma simulação, no ambiente Simulink do Matlab, utilizando os parâmetros elétricos e mecânicos determinados, a fim de avaliar a veracidade desses parâmetros.

Palavras-chave: Materiais magnéticos. Ímãs permanentes. Motor de corrente contínua. Parâmetros elétricos.

ABSTRACT

MORAES, Fillipe Alexandre. **Study empty about DC motors with permanent magnet with application in automotive industry.** 2015. 85 f. Trabalho de conclusão de curso do curso de graduação em engenharia elétrica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

This paper aims to address a study on DC motors with permanent magnets that are used in the automotive industry, specifically for ventilation and heat balance applications. This study is divided into three stages: The first addresses the constructive aspects of these engines with emphasis on magnetic materials and permanent magnets, highlighting their characteristics and properties as well as their applications in rotating electrical machines. The second part of this work is a practical study of these specific application equipment, focusing on preparing an electrical characterization and also raise some mechanical parameters that assist in working out the final stage of work. Finally, to finish, a simulation is performed in Matlab programming environment using the electrical and mechanical parameters determined in order to assess the accuracy of these parameters.

Keywords: Magnetic materials. Permanent magnets. Direct current motor. Electrical parameters.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	4
1.1. TEMA.....	4
1.1.1. DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	9
1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS	10
1.3. OBJETIVOS	11
1.3.1. OBJETIVO GERAL.....	11
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.4. JUSTIFICATIVA	13
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	14
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2. ASPECTOS CONTRUTIVOS DE UM MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA COM ÍMÃS PERMANENTES.	16
2.1 EIXO DA ARMADURA	16
2.2 NÚCLEO DA ARMADURA	16
2.3 ENROLAMENTO DA ARMADURA	17
2.4 COMUTADOR.....	17
2.5 CARCAÇA.....	17
2.6 PÓLOS DE EXCITAÇÃO	18
2.6.1 Materiais magnéticos.....	18
2.6.2 Classificação dos materiais magnéticos	18
2.6.3 Propriedades magnéticas	19
2.6.3.1 Remanência (Br)	19
2.6.3.2 Coercividade intrínseca (Hci).....	19
2.6.3.3 Coercividade indutiva (Hc).....	20
2.6.3.4 Produto máximo de energia (BH).....	20
2.6.3.5 Fator de quadratura (FQ)	20
2.6.4 Curva de histerese.....	21
2.6.5 Materiais magneticamente macios e duros	23

2.6.6	Ímã permanente.....	24
2.6.7	Tipos de ímãs permanentes	26
2.6.7.1	Alnico.....	26
2.6.7.2	Ferrites ou cerâmicos	27
2.6.7.3	Samário cobalto.....	27
2.6.7.4	Neodímio ferro boro.....	27
2.6.8	Aplicações de ímãs permanentes.....	28
2.6.9	Vantagens da utilização de ímãs permanentes em motores elétricos.	28
2.7	CONJUNTO PORTA ESCOVA E ESCOVAS.....	29
3.	ESTUDO PRÁTICO SOBRE MOTORES CC A ÍMÃ PERMANENTE COM APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.	32
3.1	CARACTERIZAÇÃO A VAZIO	32
3.2	MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DO CIRCUITO DE ARMADURA.....	33
3.2.1	Introdução	33
3.2.2	Objetivo	35
3.2.3	Método e aplicação	35
3.2.4	Resultados.....	36
3.3	CONTROLE DE VELOCIDADE.....	37
3.3.1	Introdução.....	37
3.3.2	Objetivo	38
3.3.3	Método e aplicação.....	38
3.3.4	Resultados.....	39
3.4	DETERMINAÇÃO DA AÇÃO GERADORA DO MOTOR.	42
3.4.1	Introdução.....	42
3.4.2	Objetivos.....	42
3.4.3	Método e aplicação.....	42
3.4.4	Resultados.....	43
3.5	RENDIMENTO	45
3.5.1	Introdução.....	45

3.5.2	Objetivos.....	46
3.5.3	Método e aplicação.....	46
3.5.4	Resultados.....	46
4.	SIMULAÇÃO	49
4.1	Introdução	49
4.2	Determinação de Ke (constante de força contra eletromotriz).....	50
4.3	Determinação de Bv (coeficiente de atrito viscoso) e F (coeficiente de atrito seco).....	52
4.4	Determinação de J (momento polar de inércia)	57
4.5	Determinação da indutância (L).....	58
4.6	Simulação com o <i>Simulink</i>	59
4.6.1	Resposta ao degrau de 12 V	59
5.	INSTRUMENTOS E FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.....	68
6.	CONCLUSÕES.....	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

LISTA DE SIGLAS

A	ampére
B	indução magnética
B_v	coeficiente de atrito viscoso
B_r	remanência
BD	queda de tensão entre escova e comutador
CC	corrente contínua
E_c	ação geradora
F	coeficiente de atrito seco
FQ	fator de quadratura
H	campo excitador / indutivo
H_c	coercividade indutiva
H_{ci}	coercividade intrínseca
HV	<i>heating and ventilation</i>
HVAC	<i>heating ventilation and air conditioning</i>
I	corrente elétrica
I_a	corrente elétrica do circuito de armadura
J	joule
J	momento polar de inércia
K	constante geométrica
K_e	constante elétrica
K_t	constante de torque
L	indutância
L_a	indutância do circuito de armadura
m	metro

N	velocidade rotórica
\emptyset	fluxo magnético
R	resistência elétrica
R_a	resistência do circuito de armadura
R_{cu}	resistência do enrolamento de cobre
$R_{contato}$	resistência de contato entre escova e comutador
R_{comut}	resistência do comutador
rpm	rotações por minuto
rad	radianos
s	segundo
T_e	torque eletromagnético
t	tempo
T	tesla
tm	constante de tempo mecânico do rotor
V	volts
V_a	tensão aplicada no circuito da armadura
ω	velocidade angular

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: partes componentes do motor CC	6
Figura 2: motor CC a ímã permanente.....	6
Figura 3: detalhe <i>blower</i>	7
Figura 4: detalhe <i>cooling</i>	7
Figura 5: posicionamento dos módulos de arrefecimento nos automóveis	8
Figura 6: gráfico / curva de histerese de um material ferromagnético.....	21
Figura 7: gráfico / ciclos de histerese para materiais magneticamente duros e macios	23
Figura 8: gráfico / eixo fácil de magnetização	25
Figura 9: gráfico / curva de desmagnetização de um ímã permanente.....	26
Figura 10: detalhes da escova e seus periféricos	29
Figura 11: posição radial	30
Figura 12: posição <i>trailing</i> ou <i>leading</i>	30
Figura 13: esquema de ligação para o procedimento de caracterização	32
Figura 14: circuito equivalente motor CC com ímãs permanentes	34
Figura 15: esquema elétrico para coleta da resistência do circuito de armadura.....	35
Figura 16: Esquema elétrico para procedimento de controle de velocidade	38
Figura 17: gráfico / velocidade (<i>rpm</i>) x tensão (<i>Va</i>) - motor#01	39
Figura 18: gráfico / corrente (<i>A</i>) x tensão (<i>Va</i>) - motor#01	40
Figura 19: gráfico / velocidade (<i>rpm</i>) x tensão (<i>Va</i>) - motor#02.....	41
Figura 20 - gráfico / corrente (<i>A</i>) x tensão (<i>Va</i>) - motor#02.....	41
Figura 21: gráfico / <i>Ec</i> (V) x velocidade (rpm) – motor #01	43
Figura 22: gráfico / <i>Ec</i> (V) x velocidade (rpm) – motor#02	44
Figura 23: gráfico / rendimento (%) x velocidade (<i>rpm</i>) – motor #01	47
Figura 24: gráfico / rendimento (%) x velocidade (<i>rpm</i>) – motor #02	48
Figura 25: diagrama eletromecânico do motor CC a ímãs permanentes	49
Figura 26: gráfico / torque (<i>N.m</i>) x velocidade angular (<i>rad/s</i>) - motor #01	55
Figura 27: gráfico / torque (<i>N.m</i>) x velocidade angular (<i>rad/s</i>) - motor #02	55
Figura 28: regressão linear.....	56
Figura 29: diagrama de blocos para simulação.....	59
Figura 30: resposta transitória e permanente da corrente da armadura - motor #01	60

Figura 31: resposta em regime permanente da corrente da armadura - motor #01 ..	61
Figura 32: resposta transitória e em regime permanente da velocidade angular - motor #01	61
Figura 33: resposta em regime permanente da velocidade angular – motor #01.....	62
Figura 34: resposta transitória e em regime permanente da corrente da armadura - motor #02	63
Figura 35: resposta em regime permanente da corrente da armadura - motor #02 ..	63
Figura 36: resposta transitória e em regime permanente da velocidade angular - motor #02	64
Figura 37: resposta em regime permanente da velocidade angular - motor #02	64
Figura 38: pico da corrente da armadura para $L = 0$ - motor #01	66
Figura 39: pico da corrente da armadura para $L=0$ - motor #02.....	66
Figura 40: motores HVAC sem carga no eixo	69
Figura 41: motores HVAC com carga no eixo	69
Figura 42: motores <i>cooling</i>	70
Figura 43: suporte de fixação - visão geral	70
Figura 44: suporte de fixação - visão de cima	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: caracterização elétrica em vazio	33
Tabela 2: resistência da armadura - motor #01	36
Tabela 3: resistência da armadura – motor #02	36
Tabela 4: controle de velocidade - motor #01	39
Tabela 5: controle de velocidade - motor #02	40
Tabela 6: ação geradora - motor #01	43
Tabela 7: ação geradora - motor #02	44
Tabela 8: rendimento elétrico - motor #01	46
Tabela 9: rendimento elétrico - motor #02.....	47
Tabela 10: determinação constante K_e - motor #01	51
Tabela 11: determinação da constante K_e - motor #02	51
Tabela 12: constante K_e - motores #01 e #02	52
Tabela 13: determinação do torque eletromagnético - motor #01	53
Tabela 14: determinação do torque eletromagnético - motor #02.....	53
Tabela 15: coeficientes de atrito - motor #01	56
Tabela 16: coeficientes de atrito- motor #02	56
Tabela 17: momento polar de inércia - motor #01	58
Tabela 18: momento polar de inércia - motor #02.....	58
Tabela 19: indutância - motor #01	58
Tabela 20: indutância - motor #02.....	58
Tabela 21: parâmetros de simulação - motor #01	60
Tabela 22: parâmetros de simulação - motor #02.....	62
Tabela 23: erro percentual da corrente - motor #01	65
Tabela 24: erro percentual da velocidade - motor #01	65
Tabela 25: erro percentual da corrente - motor #02	65
Tabela 26: erro percentual da velocidade - motor #02.....	65
Tabela 27: instrumentação	68

1. INTRODUÇÃO

1.1. TEMA

Máquinas girantes são aparelhos elétricos que conseguem converter tanto energia elétrica em energia mecânica (motores), quanto energia mecânica em energia elétrica (geradores) (ISANONIO, 2011).

As máquinas girantes conhecidas trabalham em regime CA (Corrente Alternada) ou CC (Corrente Contínua). Para Fitzgerald (2008), as máquinas CC possuem grande versatilidade na sua forma de ligação, o que proporciona diferentes características no que diz respeito à tensão versus corrente ou velocidade versus torque aplicado ao eixo. As duas possíveis formas de operação das máquinas CC são como gerador ou motor. A primeira utiliza de uma máquina primária para obtenção de torque e, dessa forma, a energia mecânica é transformada em energia elétrica. Para a segunda opção, a máquina CC é alimentada por uma fonte de energia que energiza com corrente contínua os enrolamentos do rotor e, juntamente com o fluxo magnético, desenvolvem torque no eixo da máquina, caracterizando assim, a transformação de energia elétrica em mecânica.

Del Toro (1999) ressalta que um motor CC tem como característica semelhante ao de um gerador CC, porém com fluxo de potência invertido; dessa forma, transforma energia elétrica em energia mecânica.

Uma derivação das máquinas CC são os motores CC de campo magnético fixo, ou motores CC de ímãs permanentes, que de acordo com Fitzgerald (2008), são utilizados em sistemas de baixa potência, em decorrência das suas limitações devido ao campo magnético fixo.

Os motores CC de ímãs permanentes são largamente encontrados na indústria automobilística em módulos de arrefecimento automotivos, sendo parte integrante dos *coolings* e *blowers*.

Os *blowers* são encontrados nos sistemas HV (*heating and ventilation*) e HVAC (*heating, ventilation and air conditioning*). O primeiro sistema tem como características básicas prover aquecimento e ventilação, enquanto o segundo, além das duas funções mencionadas, possui como recurso o ar condicionado.

O aquecimento tem como função manter a temperatura interna do veículo de acordo com as necessidades do usuário. Por outro lado, a ventilação deve manter a circulação de ar constante dentro do automóvel, promovendo a saída do dióxido de carbono e facilitando a entrada do oxigênio; um ambiente sem ventilação facilita a propagação de doenças ou até mesmo o desenvolvimento de alergias como rinite alérgica. Finalmente, com o incremento do ar condicionado é possível aferir os controles de temperatura e ventilação de forma mais eficaz (FÁBRICA DO PROJETO, 2010).

Os *coolings*, por sua vez, são encontrados nos sistemas de radiadores, os quais são responsáveis pela manutenção da temperatura dos motores dos automóveis.

Em tais aplicações, os motores CC a ímã permanente possuem estrutura básica composta por um eixo, pacote de lâminas, nas quais serão bobinados condutores de cobre, coletor, escovas, carcaça e ímãs.

A figura a seguir apresenta com maior detalhe as partes integrantes do motor CC.

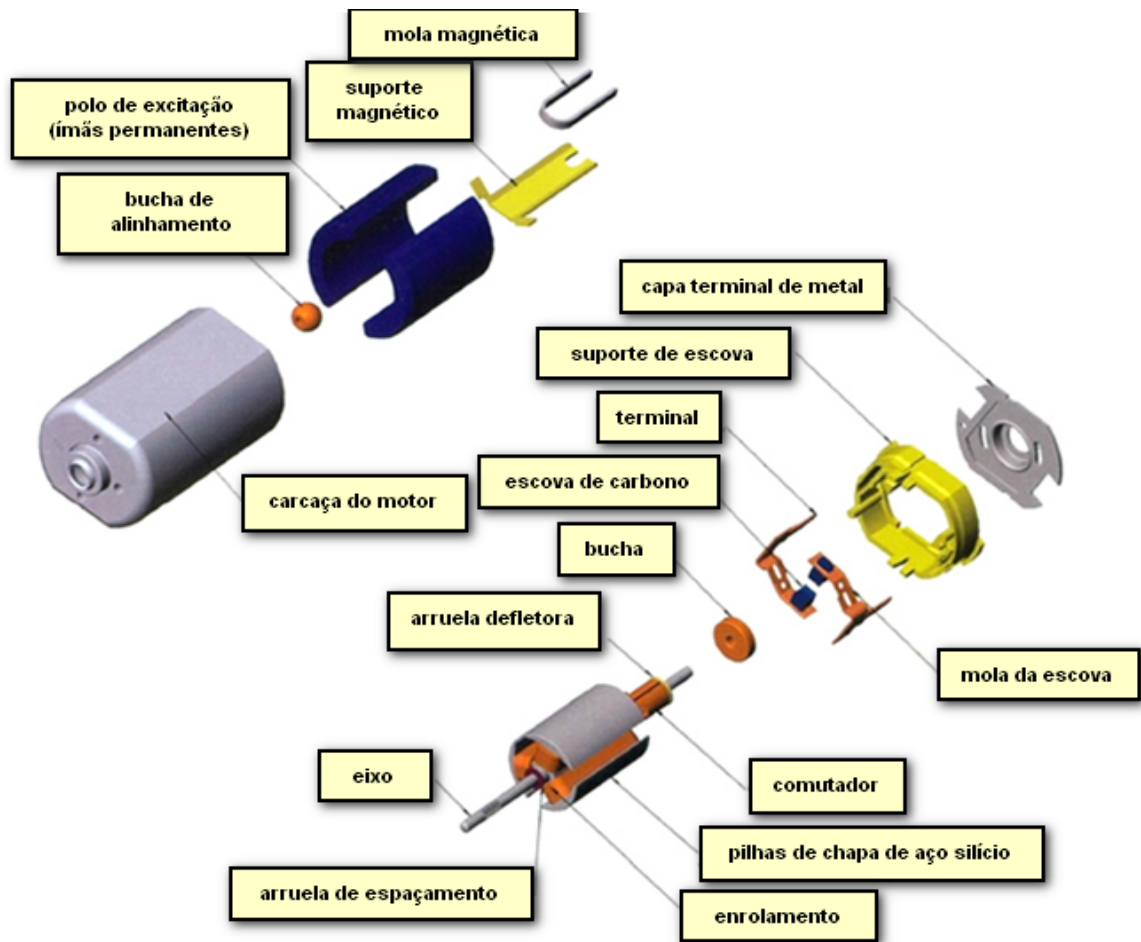


Figura 1: partes componentes do motor CC

Fonte: Johnson Electric (2014)

Todos esses elementos passam por um processo de montagem para formação do motor.



Figura 2: motor CC a ímã permanente

Fonte: Johnson Electric (2014)

Após essa primeira etapa os motores são envolvidos por uma carcaça plástica e posteriormente é fixada uma ventoinha no eixo, dando origem ao *blower* ou *cooling*.



Figura 3: detalhe *blower*

Fonte: Brose do Brasil (2014)

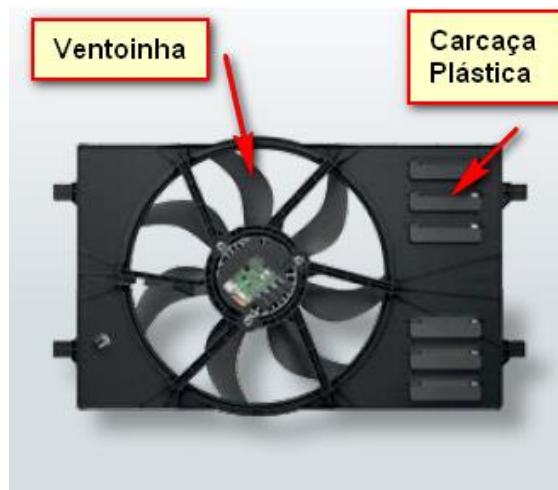


Figura 4: detalhe *cooling*

Fonte: Brose do Brasil (2014)

Após esse procedimento os *coolings* e *blowers* são acoplados nos módulos de arrefecimento, que, por sua vez, são integrados ao processo de montagem dos automóveis nas montadoras.

A figura a seguir ilustra a posição do *blower* e do *cooling* nos automóveis.



Figura 5: posicionamento dos módulos de arrefecimento nos automóveis

Fonte: Brose do Brasil (2014)

1.1.1. DELIMITAÇÃO DO TEMA

Motores CC em aplicações para arrefecimento automotivo passam por um processo de montagem que começa com a inserção do eixo no pacote de lâminas, até a etapa final, que diz respeito ao encapsulamento do motor na parte plástica junto à inserção da ventoinha. Após todo esse processo, é necessário que os motores atendam as especificações básicas de funcionamento exigidas pelas montadoras.

Essas especificações são exigências que visam avaliar parâmetros, como corrente em regime permanente, corrente de partida, condição de funcionamento em caso do bloqueio do rotor, condição de torque na partida e em regime estacionário, condições de funcionamento com carga, sem carga, e temperatura dos componentes em funcionamento contínuo. Tais parâmetros fornecem dados sobre o desempenho da máquina e, dessa forma, proporcionam parâmetros suficientes para os engenheiros de testes diagnosticarem falhas.

Assim, o foco desse trabalho consiste no estudo dos motores de corrente contínua com ímãs permanentes com aplicação na indústria automotiva, bem como conhecer suas características construtivas, no que diz respeito ao seu aspecto de excitação e seu comportamento elétrico.

1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS

Como mostrado na figura - 5 os *blowers* e *coolings* são instalados em locais de difícil acesso, e expostos a condições climáticas diversas, as quais expõem os motores a condições extremas de funcionamento. Portanto, ainda que os motores CC passem por um processo de produção eficaz e possuam características robustas em suas constituições físicas, falhas elétricas podem comumente ser constatadas. De acordo com Brito, Filho e Pederiva (2004), motores elétricos podem desenvolver falhas capazes de afetar diretamente o rendimento dos mesmos. Tais lapsos podem ser identificados quando os motores apresentam variação do comportamento de seus parâmetros básicos, como, por exemplo, disparo da velocidade de rotação do motor devido à perda de fluxo magnético da máquina.

$$N = \frac{V_a - (I_a \cdot R_a + BD)}{k \cdot \emptyset}$$

A formulação acima mostra que, a velocidade rotórica N sofre variação inversamente proporcional à variação do fluxo magnético \emptyset , assim comprovando a afirmação que foi mencionada na última frase do último parágrafo.

Portanto, para uma máquina, sendo ela um gerador ou um motor, é necessário um estudo de suas características construtivas e de suas características elétricas, visando prevenção e manutenção de possíveis falhas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral estudar motores de corrente contínua com ímãs permanente, com aplicação na indústria automotiva, abordando sua principal característica, que diz respeito ao seu método de excitação. Pretende-se, também, elaborar uma caracterização elétrica dessa categoria de motores.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir de um motor CC ímã permanente com aplicação na indústria automotiva:

- fazer breve abordagem teórica sobre aspectos construtivos;
- fazer abordagem teórica sobre ímãs permanentes, no que diz respeito ao seu funcionamento e sua utilização em motores elétricos;
- fazer abordagem teórica sobre o sistema de escovas utilizado para fazer o contato elétrico no sistema de comutação;
- realizar em bancada medição da resistência do circuito de armadura;
- realizar em bancada um estudo do comportamento da velocidade e da corrente em função da tensão aplicada nos terminais da armadura;
- determinar matematicamente o comportamento da ação geradora, em função da variação da velocidade rotórica;
- realizar um estudo do rendimento em função da variação da velocidade rotórica;
- determinar o modelo matemático dos motores em estudo;
- simulação via *Matlab* do comportamento da corrente e da velocidade do motor quando submetido a sua tensão nominal;

1.4. JUSTIFICATIVA

Apesar de os motores de corrente contínua estarem perdendo sua utilização dentro dos processos industriais, esses motores, de forma geral, estão presentes em aparelhos do uso cotidiano, como por exemplo, os eletrodomésticos, e, especificamente, os motores CC ímãs permanentes, em aplicações automotivas.

Portanto, ainda é de grande importância o conhecimento e estudo dessa categoria de motores.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Considerando que o ímã permanente é o principal fator de diferenciação desses motores para aqueles que não possuem uma excitação permanente, primeiramente são abordados os aspectos construtivos da categoria de motores ora analisados, enfatizando os materiais magnéticos e ímãs permanentes utilizados em máquinas elétricas girantes.

A segunda parte deste trabalho acadêmico aborda um estudo em bancada, empregando motores CC de ímãs permanentes. E, finalmente, é realizada uma simulação computacional dos motores, visando comparar o comportamento dos parâmetros elétricos adquiridas na prática e na simulação.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

De acordo com a grade curricular do curso de Engenharia Industrial Elétrica – Eletrotécnica, o trabalho foi elaborado em três etapas, dividido da seguinte forma:

- Metodologia Aplicada ao TCC: Cap1
- Trabalho de Conclusão de Curso 1: Cap 2
- Trabalho de Conclusão de Curso 2: Cap 3, 4, 5, e 6

Capítulo 1: Introdução, tema, delimitação do tema, problemas e premissas, objetivo geral e específico, justificativas e procedimentos metodológicos para a realização do trabalho.

Capítulo 2: Aspectos construtivos dos motores CC a ímãs permanentes com aplicação na indústria automotiva.

Capítulo 3: Estudo em bancada de dois motores CC a ímãs permanentes com aplicação na indústria automotiva.

Capítulo 4: Simulação.

Capítulo 5: Instrumentação.

Capítulo 6: Conclusão.

2. ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE UM MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA COM ÍMÃS PERMANENTES.

Abaixo, apresenta-se as partes construtivas de um motor CC de ímãs permanentes de aplicação na indústria automotiva, enfatizando os materiais magnéticos e o sistema de escovas utilizado por tais motores.

2.1 EIXO DA ARMADURA

Kosow (2005) afirma que o eixo de um motor CC é responsável por imprimir rotação para os elementos que estão nele acoplados mecanicamente: núcleo da armadura, comutador e enrolamentos.

Para Silva (2012), o eixo também é o componente responsável pela transmissão da potência mecânica para a carga do motor.

2.2 NÚCLEO DA ARMADURA

O núcleo da armadura é construído por lâminas de aço silício, as quais são responsáveis pela redução das correntes de fuga que surgem quando os motores estão em operação. O aço silício tem como função reduzir as perdas por histerese.

Na sua construção física, apresenta ranhuras em sua extremidade externa para que se possam acomodar os condutores de cobre. (KOSOW, 2005)

2.3 ENROLAMENTO DA ARMADURA

Enrolamento da armadura consiste em bobinas de cobre acomodadas no rotor e isoladas entre si. Elas representam a parte energizada do sistema quando o mesmo está em operação. (SILVA, 2012)

2.4 COMUTADOR

Comutador constitui o elemento que providencia o chaveamento para o processo de comutação no gerador, e o processo de conversão eletromecânica no motor. O mesmo é constituído de segmentos de cobre que estão isolados entre si e são eletricamente conectados aos condutores da armadura (KOSOW, 2005).

Para Kosow (2005), esses últimos quatro elementos mencionados, são parte constituinte do rotor do motor CC.

Assim, o rotor possui quatro funções principais:

- imprimir rotação para o desenvolvimento da ação geradora e motora;
- produzir chaveamento que auxilia no processo de comutação e inversão eletromecânica;
- acomodação dos condutores que providenciam a circulação de corrente elétrica;
- providencia uma baixa relutância para o fluxo magnético;

2.5 CARCAÇA

A carcaça é uma estrutura cilíndrica de aço fundido ou de ferro, que serve de suporte e sustentação das partes que foram mencionadas anteriormente (KOSOW, 2005).

2.6 PÓLOS DE EXCITAÇÃO

2.6.1 Materiais magnéticos

Todas as substâncias em qualquer estado físico possuem característica magnética. Essa propriedade provém da estrutura eletrônica dos átomos e tem origem em dois movimentos associados aos elétrons: momento angular orbital e momento angular “spin” (UFSM; 2015).

Para Anocibar (2011), o efeito da magnetização da matéria é decorrente de uma tendência que os elementos atômicos que constituem um material têm de se comportar como dipolos magnéticos.

2.6.2 Classificação dos materiais magnéticos

2.6.2.1 Diamagnéticos

Os diamagnéticos são materiais que não possuem momento magnético atômico ou molecular. Desta forma, quando é submetido a um campo magnético qualquer, são geradas correntes que induzem uma magnetização que se opõe ao campo no qual o material está inserido (ANOCIBAR, 2011).

2.6.2.2 Paramagnéticos

Os materiais paramagnéticos, por sua vez, possuem momento atômico. Seus ímãs elementares apresentam alinhamento quando submetidos a um campo magnético aplicado, porém são facilmente desalinhados em altas temperaturas, devido ao efeito aleatório da agitação térmica (ANOCIBAR, 2011).

2.6.2.3 Ferromagnéticos

Os ferromagnéticos são materiais que apresentam um momento magnético que permite a permanência do alinhamento dos seus ímãs elementares após a retirada do campo magnetizante (ANOCIBAR, 2011).

2.6.2.4 Antiferromagnéticos

Os materiais antiferromagnéticos, quando submetidos a um campo excitador, apresentam momentos magnéticos antiparalelos e iguais, fato que proporciona um momento magnético resultante nulo (ANOCIBAR, 2011).

2.6.3 Propriedades magnéticas

2.6.3.1 Remanência (B_r)

A remanência pode ser definida como o campo magnético remanescente de um material que foi submetido a um campo magnético externo por um determinado período de tempo. A unidade medida no S.I é o Tesla (T) (FERREIRA, 2008).

2.6.3.2 Coercividade intrínseca (H_{ci})

Coercividade Intrínseca é definida como a resistência que um material (com magnetismo prévio) apresenta ao processo de desmagnetização. A sua unidade de medida no S.I é (Ae/m) (FERREIRA, 2008).

2.6.3.3 Coercividade indutiva (H_c)

Em relação à coercividade indutiva, pode-se aferir que quando se pretende reduzir o campo magnético remanescente de um ímã até zero, é necessário aplicar um campo magnético no sentido contrário ao da polarização prévia. Então, esse campo aplicado é chamado de coercividade indutiva. Sua medida no S.I é (Ae/m) (FERREIRA, 2008).

2.6.3.4 Produto máximo de energia (BH)

Esse produto é obtido no segundo quadrante da curva de histerese, que é a parte da curva que diz respeito à desmagnetização do material. Caso multiplicado todos os valores da indução magnética (B) do material com os valores do campo indutivo (H), nesse quadrante, pode-se observar um valor que se destaca numericamente sobre os outros.

Tal parâmetro é utilizado para avaliação de desempenho de um ímã permanente quando se deseja avaliar sua característica de desmagnetização (CASTRO, 2001).

2.6.3.5 Fator de quadratura (FQ)

O fator de quadratura é uma propriedade que mede a estabilidade de um ímã quando o mesmo está sujeito a um campo magnético desmagnetizante. Ela é definida pelo quociente entre o valor do campo desmagnetizante e o valor da coercividade intrínseca do material. Quando o valor de FQ é próximo de 1, o ímã apresenta grande estabilidade (CASTRO, 2001).

Do ponto de vista físico, essa propriedade mede a proporção de grãos magnéticos que reverteram o sentido de sua magnetização quando submetidos a uma magnetização externa. Para um ímã permanente, esse valor deve ficar em

torno de 0,9, o que indica um material de boa qualidade. Essa propriedade não apresenta unidade de medida, seu valor é adimensional (FERREIRA, 2008).

2.6.4 Curva de histerese

Dos materiais mencionados anteriormente, os de maior importância, em aplicações industriais são os ferromagnéticos. Seu comportamento magnético pode ser representado pela curva de histerese, a qual apresenta o comportamento da indução magnética B do material em função de um campo magnetizante H aplicado.

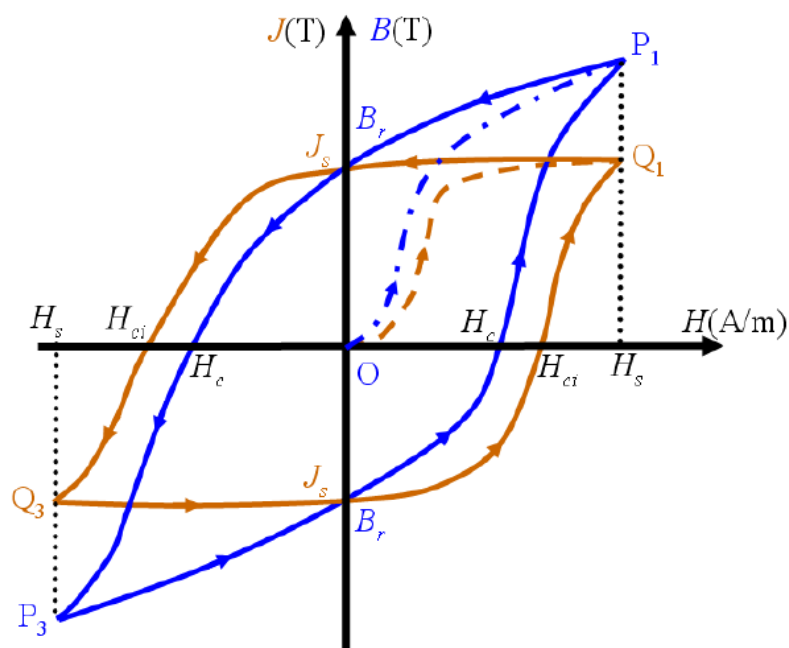


Figura 6: gráfico / curva de histerese de um material ferromagnético

Fonte: Anocibar (2011)

Do gráfico acima, considerando a curva azul para interpretação, é importante salientar que o material encontra-se previamente sem fluxo magnético. Do primeiro tracejado, que parte do ponto O até P_1 , o material é submetido a um campo magnetizante que varia de zero até H_s . Esse primeiro percurso em que a indução magnética varia de O até P_1 é chamado de inicial, virgem ou de indução normal (ANOCIBAR, 2011).

Decrementando o campo magnetizante H até zero, é possível acompanhar pelo traçado do gráfico, que a indução magnética do material não diminuiu com a mesma proporção com a qual aumentou, quando aplicado uma excitação magnetizante. Portanto, com $H = 0$ é possível perceber uma indução magnética residual, também denominada como *Remanência B_r* .

Com o intuito de levar a indução magnética B a zero, é necessário aplicar um campo magnetizante no sentido contrário de H ; esse campo é definido pelo gráfico como H_c , também podendo ser chamado de campo de força *coerciva*.

Quando aumentado negativamente os valores de H_c até $-H_s$, é possível perceber pelo ponto P3 no traçado azul que o fluxo magnético do material atingiu valores negativos (sentido oposto de magnetização). Essa força magnetizante, necessária para inverter a polaridade do fluxo magnético do material, é denominada *força coerciva intrínseca H_s* .

Agora, novamente levando o campo magnetizante ao nível zero, é possível perceber que há um fluxo magnético residual polarizado no sentido oposto ao do primeiro que já foi mencionado, $-B_r$. Para reduzir o mesmo à zero deve-se aplicar uma força coercitiva positiva $+H_c$. Todavia, aumentando o campo excitador H para valores maiores que zero, o material atinge novamente seu ponto de saturação, ponto no qual apresenta a polaridade inicial do primeiro quadrante.

“O fenômeno que causa o atraso de (B) em relação à (H) , de modo que a curva de magnetização dos campos que aumentam e diminuem seja a mesma, é chamado de histerese, e o ciclo traçado pela curva de magnetização é chamado de ciclo de histerese.” (ANOCIBAR, 2011).

Observando a curva em marrom da figura 6 é possível perceber que no primeiro quadrante a curva se comporta praticamente como uma reta à medida que o campo magnetizante H é aumentado. Quando essa situação ocorre, diz-se que o material atingiu seu ponto de saturação magnética, ou seja, por mais que se aumente o valor do campo excitador, não haverá aumento do fluxo magnético do material.

Se um material for submetido a um campo que o leve até a saturação em ambas as extremidades polares, o ciclo é chamado de ciclo de *histerese de saturação*, ou *ciclo principal*. Nesse caso, o magnetismo residual B_r é chamado de

retentividade ou *remanência*, e a força coerciva H_c é chamada de *coercitividade* (ANOCIBAR, 2011).

2.6.5 Materiais magneticamente macios e duros

Do ponto de vista da *coercividade intrínseca*, os materiais ferromagnéticos podem ser classificados como materiais macios e duros. Os primeiros são caracterizados por apresentar uma baixa *coercividade intrínseca*, portanto são materiais facilmente desmagnetizáveis. Já os duros possuem alta coercividade intrínseca, fazendo com que sejam de difícil o processo de desmagnetização.

A figura a seguir ilustra o que foi mencionado.

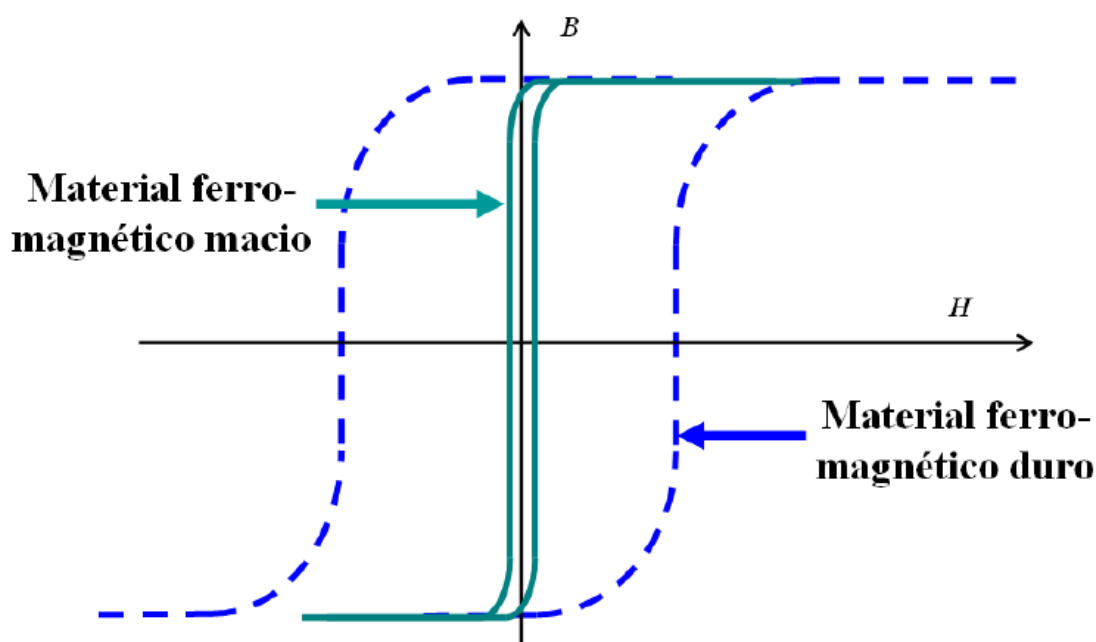


Figura 7: gráfico / ciclos de histerese para materiais magneticamente duros e macios

Fonte: Anocibar (2011)

Apesar de o gráfico mostrar que os materiais magneticamente duros apresentam maior coercividade, os materiais macios possuem permeabilidade superior em relação à dos materiais duros. Quando se procura um material macio para aplicações técnicas, é levada em consideração a sua permeabilidade e magnetização, que são fatores importantes para confinamento, direcionamento, e

blindagem de fluxo; coercividade e resistência elétrica são ponderadas quando tais materiais são aplicados em sistemas de alta frequência (ANOCIBAR, 2011).

2.6.6 Ímã permanente

Os materiais magneticamente duros, também conhecidos como ímãs permanentes (ANOCIBAR, 2011), podem ser definidos da seguinte forma:

“O componente que chamamos de ímã permanente, é um pedaço de material magnético, o qual, uma vez magnetizado ou “carregado” por um campo magnético externo, mantém um campo magnético útil após a força magnetizante ser removida.” (STRNAT, 1990).

Além das propriedades mencionadas anteriormente, observa-se uma propriedade muito importante presente nos ímãs permanentes: anisotropia magnetocristalina.

“É uma propriedade intrínseca do material na qual a magnetização é favorecida em direções preferidas ou eixos fáceis (“easyaxes”). O alinhamento preferido dentro do material constitui um estado de baixa energia e é devido primariamente ao acoplamento do spin orbital. Especificamente, os elétrons atômicos se acoplam ao retículo cristalino de tal forma que seus momentos orbitais tendem a alinhar-se ao longo dos eixos cristalográficos, e, devido ao acoplamento do spin orbital, os momentos do spin também tendem a ficar alinhados.” (ANOCIBAR 2011).

Para Castro (2001), a anisotropia magnetocristalina é uma propriedade intrínseca do material que diz respeito à estrutura de magnetização dos seus domínios magnéticos. Em materiais ferromagnéticos existem eixos de magnetização (direção em que dipolos magnéticos se organizam, determinando a polarização do ímã), nas quais ocorre de maneira mais fácil o processo de saturação, enquanto que, em outras direções, não ocorrem da mesma forma.

A figura a seguir ilustra o que foi afirmado acima.

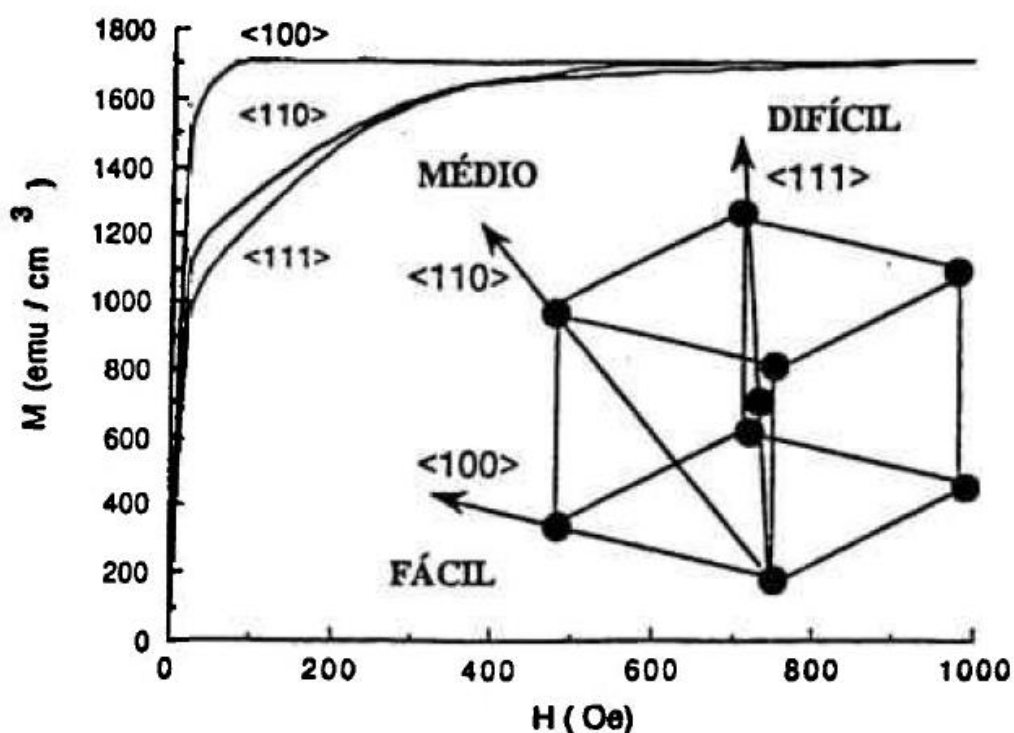


Figura 8: gráfico / eixo fácil de magnetização

Fonte: Castro (2001)

Anocibar (2011) afirma que os ímãs permanentes apresentam anisotropia magnetocristalina predominante, o que determina uma característica importante para esses materiais: a curva de desmagnetização no segundo quadrante se apresenta de forma linear, o que facilita avaliar o desempenho desses materiais para tal situação.

O gráfico a seguir ilustra o que foi mencionado anteriormente, apresentando a curva de desmagnetização, no segundo quadrante da curva de histerese, de um ímã permanente.

2.6.7.2 Ferrites ou cerâmicos

Ferrites ou cerâmicos são materiais magnéticos que foram desenvolvidos a partir dos anos quarenta. Apesar de apresentarem menor fluxo magnético remanente em comparação com os alnicos, os ímãs desta categoria são mais resistentes a campos desmagnetizantes. Isso ocorre devido a sua elevada coercividade intrínseca. Além disso, suas vantagens sobre os alnicos são o baixo custo, e alta resistência elétrica em baixas e em altas frequências (LUCIANO, SILVA; 2015).

2.6.7.3 Samário cobalto

Ímãs de Samário cobalto são considerados a primeira geração dos materiais denominados terras – raras.

Descoberto nos anos sessenta, ímãs de samário cobalto começaram a ser comercializado na década de setenta. Este tipo de ímã apresenta como características: curva de desmagnetização linear, sendo assim, alta resistência a campos desmagnetizantes; altos valores de produto energético; e densidade de fluxo remanente próxima a $(1 T)$ e força coerciva de $720 kAe/m$.

No entanto, o que limita a utilização desse material em aplicações industriais é o alto preço do samário e do cobalto, limitando esses ímãs às aplicações especiais (LUCIANO, SILVA; 2015).

2.6.7.4 Neodímio ferro boro

Esses materiais constituem a segunda geração dos ímãs terras – raras, os quais foram anunciados por volta dos anos oitenta.

Em uma breve comparação com os ímãs da primeira geração, os ímãs de neodímio ferro boro apresentam maior produto energético ($210 kJ/m^3$), maior força

coerciva (900 kAe/m) e maior remanência ($1,2 \text{ T}$). Em contra partida, ímãs que apresentam essa composição são suscetíveis à corrosão e grande limitação à temperatura de utilização (LUCIANO, SILVA; 2015).

2.6.8 Aplicações de ímãs permanentes

Para Ferreira (2008), os ímãs permanentes apresentam uma larga aplicação em sistemas elétricos e eletrônicos, como por exemplo, em relógios, alto falantes, motores elétricos, sensores, componentes para computadores, indústria automobilística, aeronaves, etc.

Ferreira (2008 Apud Coey; 2002) afirma que dos sistemas mencionados anteriormente, os que mais consomem ímãs permanentes dentro do mercado mundial são os motores elétricos.

Os motores elétricos utilizam os ímãs permanentes como parte constituinte do seu sistema de excitação, considerado parte essencial para o funcionamento de qualquer máquina girante. Para Gieras e Wing, (2002), os motores elétricos que utilizam ímãs permanentes no sistema de excitação, possuem as seguintes classificações: motor de corrente contínua com comutador, motor de corrente contínua sem escovas, e motores síncronos de corrente alternada. Todavia, como já mencionado no capítulo 1, o foco do presente trabalho está no estudo dos motores de corrente contínua com ímãs permanentes com comutadores.

2.6.9 Vantagens da utilização de ímãs permanentes em motores elétricos.

Para Gieras e Wing, (2002), as vantagens na utilização de ímãs permanentes no sistema de excitação de motores elétricos são:

- como não há energia elétrica sendo utilizada em um sistema que utiliza ímãs permanentes, não há perdas de desempenho no sistema de excitação, logo existe uma melhora significativa na eficiência do motor;

- melhor desempenho dinâmico quando comparados com motores que utilizam excitação eletromagnética;
- a construção e manutenção do motor são mais simples;
- para alguns tipos de máquinas há redução do seu preço;

2.7 CONJUNTO PORTA ESCOVA E ESCOVAS

O fluxo energético que é proveniente da fonte de tensão contínua chega aos enrolamentos da armadura através das escovas, que fazem contato direto com o comutador da máquina. As escovas são fixadas por um sistema chamado de porta escovas, o qual consiste em uma caixa com molas que tem por objetivo impulsionar as escovas contra o comutador, gerando um contato eficaz e que garanta o funcionamento do motor.

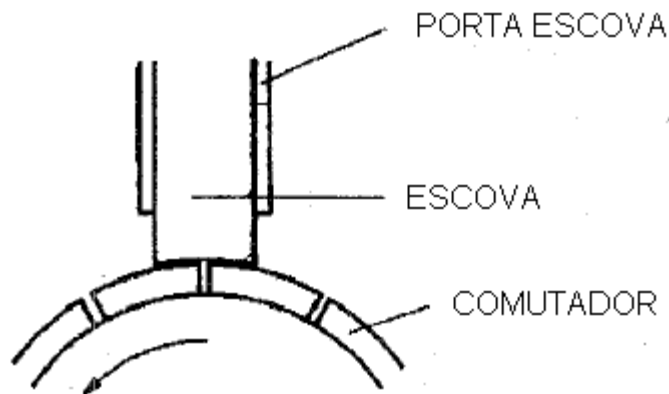


Figura 10: detalhes da escova e seus periféricos

Fonte: Hameyer; Belmans (1996)

As figuras abaixo determinam três maneiras diferentes de se posicionar as escovas perante o comutador: “*radial*”, “*trailing*” ou “*leading*”.

A combinação radial, figura 11, visa o desempenho da máquina tanto no sentido horário, quanto no anti-horário. Já o arranjo “*trailing*” ou “*leading*”, figura 12, é aplicado quando se visa aumentar a estabilidade das escovas em sistemas que é prevista vibração do sistema (HAMEYER; BELMANS 1996).



Figura 11: posição radial

Fonte: Hameyer; Belmans (1996)

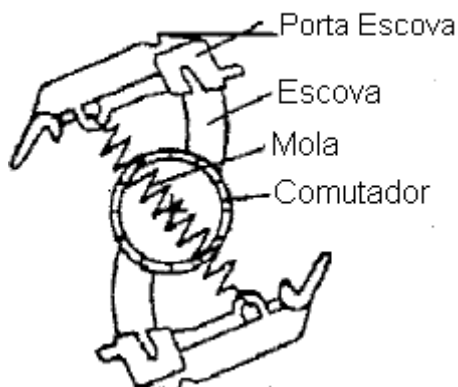


Figura 12: posição *trailing* ou *leading*

Fonte: Hameyer; Belmans (1996)

A qualidade de comutação do sistema depende diretamente da resistência de contato que existe entre o comutador e escova; quanto maior essa resistência de contato, maior será a temperatura da escova e do comutador. Dessa maneira, gera-se degradação da escova em longo prazo.

Para diminuir as perdas geradas pelas altas temperaturas, são utilizados dois materiais na composição da escova: o grafite e o cobre.

O grafite é utilizado na borda de saída da escova, enquanto que o restante é composto por cobre.

Normalmente os grafites utilizados para compor as escovas são: grafite natural, grafite duro, eletro grafite e metal grafite.

O grafite natural apresenta em sua composição boas propriedades mecânicas; assim, apresenta aplicabilidade em máquinas que trabalham em alta velocidade.

As aplicações de alto custo e alta qualidade utilizam o eletro grafite por apresentar longo tempo de vida útil.

Já o metal grafite apresenta alta condutividade e baixa queda de tensão; portanto, são utilizados em máquinas que necessitem de altos níveis de corrente e baixa queda de tensão.

E por último, as escovas de carbono duro: essas escovas são utilizadas em sistemas de baixa potência onde as máquinas operam com baixa rotação (HAMEYER; BELMANS 1996).

3. ESTUDO PRÁTICO SOBRE MOTORES CC A ÍMÃ PERMANENTE COM APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.

Primeiramente, é necessário informar que os motores que foram utilizados nesse trabalho foram colhidos de um conjunto de motores doados pela empresa Brose do Brasil.

Os motores submetidos aos estudos propostos por esse trabalho são de aplicação HVAC sem carga acoplada ao eixo, portanto, motores em vazio.

Vale ressaltar aqui que, devido a um contrato de confiabilidade confidencialidade que a empresa Brose possui com seus clientes, não foi fornecida a documentação que diz respeito aos aspectos nominais de operação, sendo fornecida apenas a tensão de trabalho das amostras: 12 V.

Devido a essa situação, o primeiro procedimento realizado em bancada foi o da caracterização elétrica.

3.1 CARACTERIZAÇÃO A VAZIO

O processo de caracterização foi realizado em bancada com o intuito de levantar os parâmetros de operação dos motores a 12 V.

Foram utilizados para realizar esse procedimento dois multímetros digitais, um tacômetro digital e uma fonte de corrente contínua.

As conexões elétricas para o procedimento são ilustradas na figura abaixo.

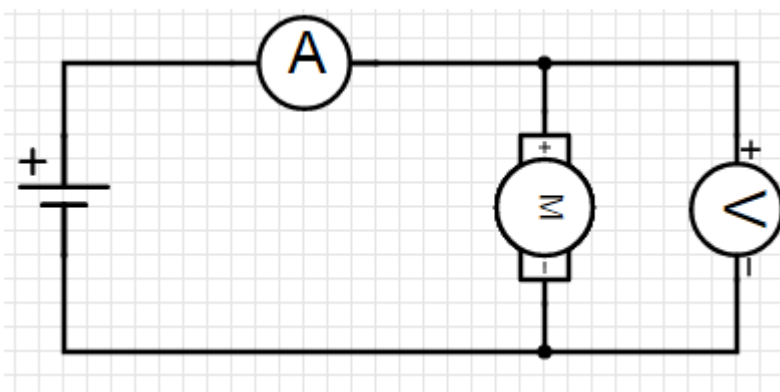


Figura 13: esquema de ligação para o procedimento de caracterização

A seguir é apresentada uma tabela com as características elétricas do conjunto dos motores.

Caracterização elétrica em vazio				
Motor	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade (rpm)	Potência (W)
#01	12	1,03	2320	12,36
#02	12	1,17	2320	14,04

Tabela 1: caracterização elétrica em vazio

Da tabela acima, é possível perceber que as amostras receberam uma numeração sequencial, #01 e #02. Essa numeração estará presente na carcaça dos motores com o intuito de facilitar a identificação das amostras.

A 12 V, com o auxílio do multímetro, foi possível coletar o valor da corrente para cada amostra; em seguida, multiplicou-se esse valor com o da tensão aplicada aos terminais para se determinar o valor da potência elétrica consumida por motor. Por último, foi utilizado o tacômetro para determinar a velocidade de rotação em função da tensão nominal aplicada.

3.2 MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DO CIRCUITO DE ARMADURA

3.2.1 Introdução

Aplicada uma tensão nos terminais de um condutor elétrico, é estabelecida uma corrente elétrica, a qual é proporcional à tensão aplicada. Dessa forma é possível estabelecer uma constante de proporcionalidade entre essas duas grandezas.

$$\frac{U}{I} = \text{constante}$$

Essa constante, também definida como **resistência elétrica**, é uma grandeza que depende diretamente da natureza do material.

A fórmula demonstrada anteriormente é definida como a lei de Ohm e pode ser expressa da seguinte forma:

$$U = R.I$$

Quando a constante de proporcionalidade R (resistência elétrica) é mantida constante com a variação da tensão aplicada, o condutor é chamado de “condutor ôhmico”.

Outra definição para essa grandeza é a de que a resistência elétrica representa a “dificuldade” encontrada pela corrente elétrica para percorrer por entre um condutor quando aplicada uma tensão nas suas extremidades (SÓ FÍSICA, 2015).

Nos motores de corrente contínua, a resistência elétrica se apresenta no circuito de armadura como:

- resistência do enrolamento da armadura do motor (R_{cu});
- resistência de contato das escovas com o comutador ($R_{contato}$);
- resistência das escovas (R_{esc});
- resistência das lâminas do comutador que estão comutando (R_{comut})

Dessa forma, o circuito elétrico equivalente, para regime permanente de um motor CC a ímãs permanentes, fica definido da seguinte forma:

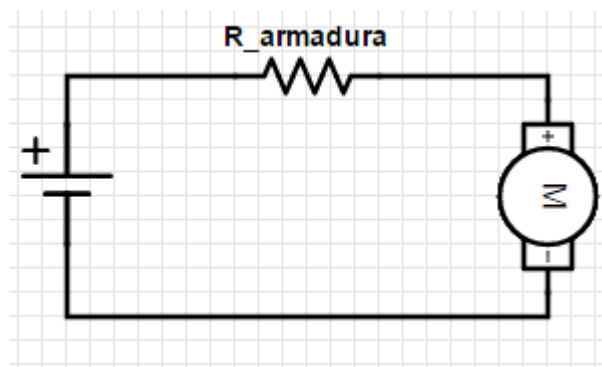


Figura 14: circuito equivalente motor CC com ímãs permanentes

Onde $R_{Armadura} = R_{cu} + R_{contato} + R_{esco} + R_{comut}$

3.2.2 Objetivo

Coletar o valor da resistência do circuito de armadura (R_a).

3.2.3 Método e aplicação

Para a coleta da resistência do circuito de armadura dos motores, foi utilizado o método proposto por Silva (2012), que consiste em travar o rotor da máquina e aplicar uma tensão de forma que a corrente que passa pelo circuito da armadura procure não ultrapassar 50% da corrente nominal da máquina. Assim, com os valores de tensão e corrente, foi possível, aplicando a lei de Ohm, calcular a resistência elétrica do circuito de armadura dos motores.

Para realizar esse procedimento foram utilizados dois multímetros digitais, uma ponte retificadora, um variac, a rede elétrica e um freio mecânico. As ligações elétricas utilizadas para executar esse procedimento são representadas na figura a seguir.

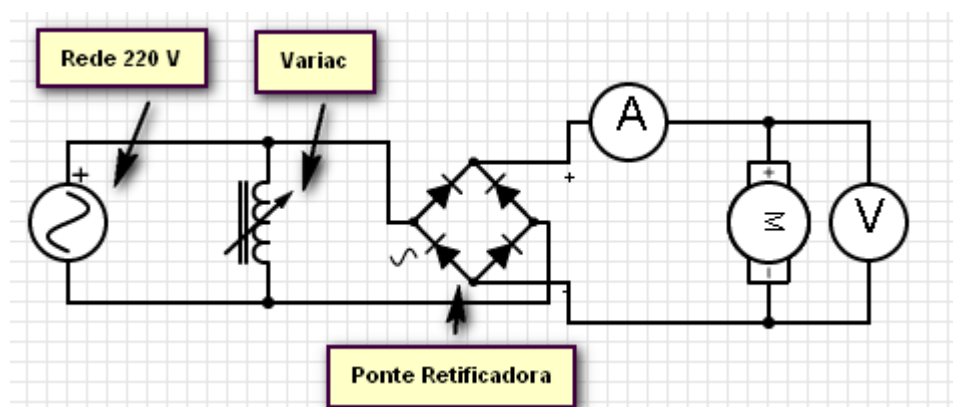


Figura 15: esquema elétrico para coleta da resistência do circuito de armadura

Esse foi o sistema utilizado para energizar o motor, pois com o rotor travado, a corrente da fonte CC, perante uma mínima variação da tensão, lacra no seu valor nominal em 3 A. Dessa forma, não seria possível coletar um número suficiente de V_a e I_a para determinar, por meio de média aritmética, um valor confiável de resistência da armadura.

3.2.4 Resultados

Resistência da armadura			
Medições	U (V)	I (A)	R (Ω)
Med 1	0,90	2,06	0,44
Med 2	1,00	2,40	0,42
Med 3	1,45	3,33	0,44
Med 4	1,69	3,93	0,43
Med 5	2,15	5,00	0,43
R Média	0,43		
Desvio Padrão	0,0080		

Tabela 2: resistência da armadura - motor #01

Resistência da armadura			
Medições	U (V)	I (A)	R (Ω)
Med 1	1,15	2,65	0,43
Med 2	1,60	3,75	0,43
Med 3	1,95	4,43	0,44
Med 4	2,40	5,50	0,44
Med 5	2,80	6,70	0,42
R Média	0,43		
Desvio Padrão	0,0088		

Tabela 3: resistência da armadura – motor #02

3.3 CONTROLE DE VELOCIDADE

3.3.1 Introdução

No funcionamento de um motor CC, os condutores possuem movimento relativo ao campo magnético no qual estão inseridos, razão pela qual se apresenta a função geradora da máquina E_c que, junto à resistência da armadura, limitam a corrente que passa pelos condutores.

$$I_a = \frac{V_a - (E_c + BD)}{R_a}$$

Como é possível ver pela fórmula acima, a corrente da armadura do rotor é limitada pela queda de tensão entre comutador e escova BD , pela resistência da armadura R_a e pela força contra eletromotriz E_c .

E_c pode ser escrito em função do fluxo magnético (\emptyset), da característica construtiva da máquina (k) e da velocidade rotórica (N).

$$E_c = k\emptyset N$$

Assim, substituindo E_c na fórmula de I_a , é possível deduzir a equação da velocidade do motor.

$$N = \frac{V_a - (I_a \cdot R_a + BD)}{k \cdot \emptyset}$$

Portanto, considerando a queda de tensão (BD) constante, a resistência da armadura constante, e para os motores CC com ímãs permanentes, o fluxo constante, as únicas variáveis que influenciam diretamente na velocidade do motor são a tensão aplicada aos terminais da armadura V_a , e a corrente que passa pelos condutores I_a (KOSOW, 2005).

3.3.2 Objetivo

Observar o comportamento da velocidade do motor em função da variação da tensão da armadura.

- levantar a curva da rotação (*rpm*) x tensão da armadura (V_a).
- levantar a curva da corrente da armadura (I_a) x tensão da armadura (V_a).

3.3.3 Método e aplicação

Para a execução desse procedimento foi utilizado como base o método proposto por Martignoni no livro *Ensaio de Máquinas Elétricas (Controle de Velocidade)*.

Foi utilizado para o procedimento, dois multímetros digitais, um tacômetro digital e uma fonte de corrente contínua.

O esquema de ligação para o procedimento é mostrado a seguir.

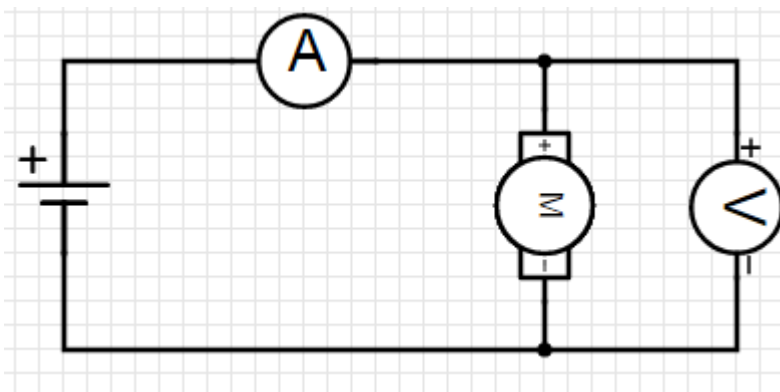


Figura 16: Esquema elétrico para procedimento de controle de velocidade

Para a coleta da velocidade em função da tensão, a tensão foi variada de 0 V até 12 V. A cada 1 V de variação foram coletados os valores da corrente (I_a) e velocidade (*rpm*).

Assim foi possível determinar o comportamento desses parâmetros em função da variação da tensão terminal do motor.

3.3.4 Resultados

Controle de velocidade				
Va (V)	Ia (A)	Ra (Ω)	velocidade (rpm)	ω (rad/s)
0,00	0,00	0,43	0	0,000
1,00	0,61	0,43	135	14,137
2,00	0,67	0,43	314	32,882
3,00	0,71	0,43	514	53,826
4,00	0,76	0,43	710	74,351
5,00	0,80	0,43	916	95,923
6,00	0,84	0,43	1124	117,705
7,00	0,87	0,43	1310	137,183
8,00	0,90	0,43	1525	159,698
9,00	0,93	0,43	1730	181,165
10,00	0,96	0,43	1932	202,319
11,00	0,99	0,43	2140	224,100
12,00	1,03	0,43	2320	242,950

Tabela 4: controle de velocidade - motor #01

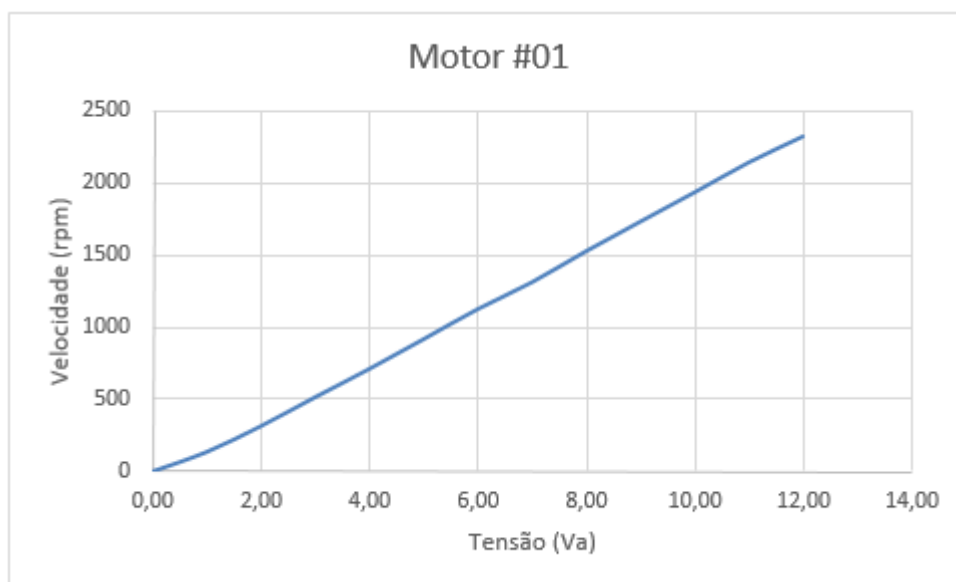


Figura 17: gráfico / velocidade (rpm) x tensão (Va) - motor#01

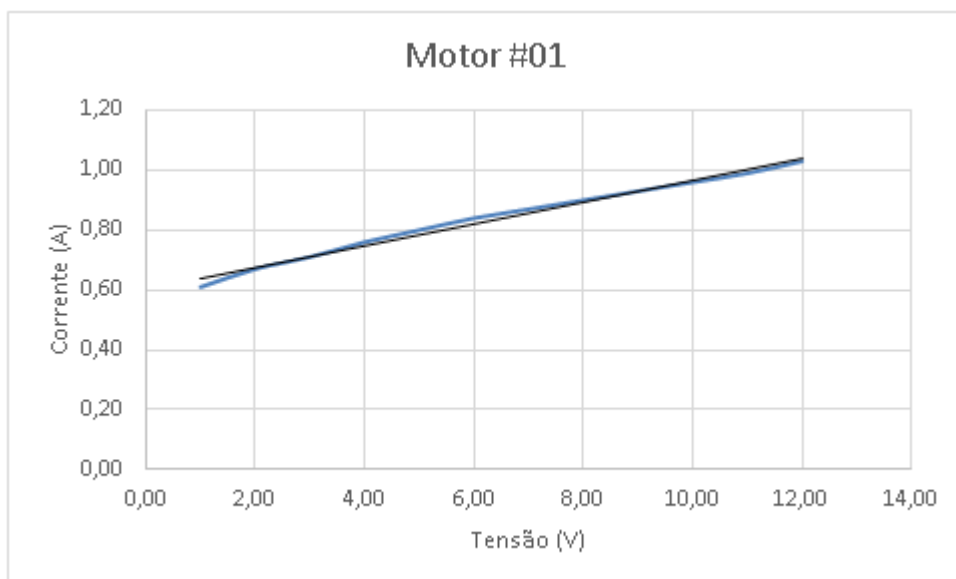


Figura 18: gráfico / corrente (A) x tensão (Va) - motor#01

Controle de velocidade				
Va (V)	Ia (A)	Ra (Ω)	velocidade (rpm)	ω (rad/s)
0,00	0,00	0,43	0	0,000
1,00	0,58	0,43	140	14,861
2,00	0,68	0,43	340	35,605
3,00	0,74	0,43	520	54,454
4,00	0,79	0,43	717	75,084
5,00	0,84	0,43	915	95,819
6,00	0,89	0,43	1113	116,553
7,00	0,95	0,43	1307	136,869
8,00	1,00	0,43	1513	158,441
9,00	1,05	0,43	1714	179,490
10,00	1,09	0,43	1925	201,586
11,00	1,12	0,43	2110	220,959
12,00	1,17	0,43	2317	242,636

Tabela 5: controle de velocidade - motor #02

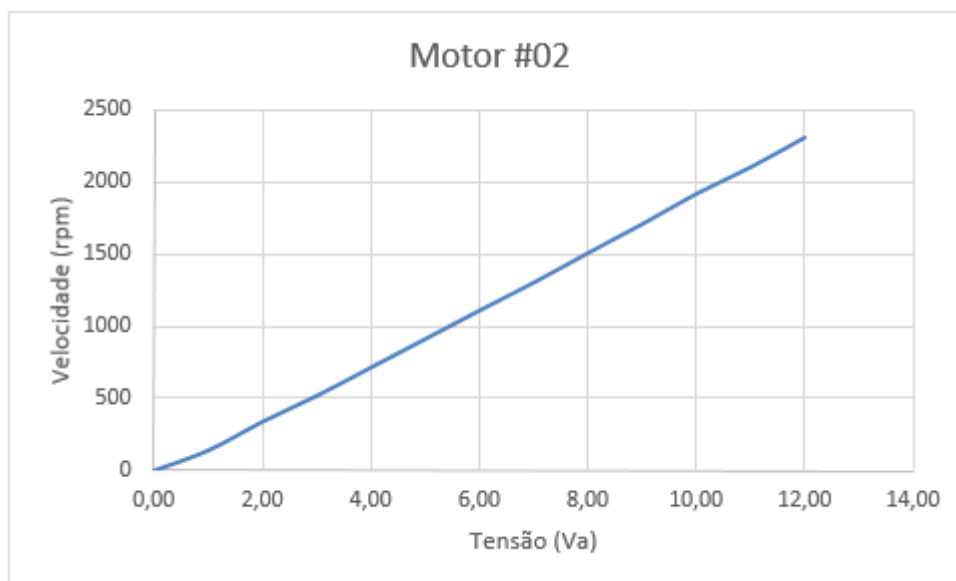


Figura 19: gráfico / velocidade (rpm) x tensão (Va) - motor#02

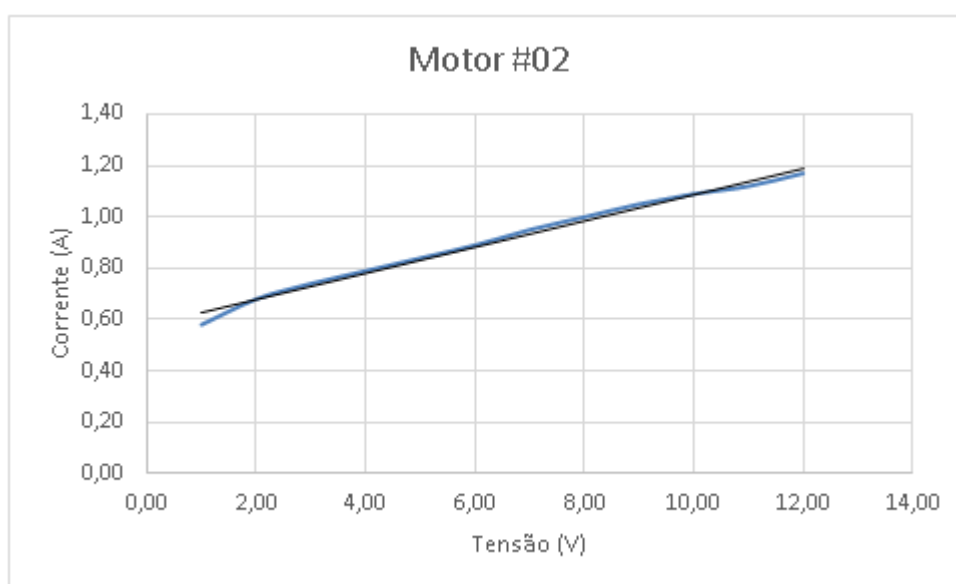


Figura 20 - gráfico / corrente (A) x tensão (Va) - motor#02

Dos resultados obtidos, foi possível perceber o comportamento linear dos parâmetros, um em função do outro. Isso foi verificado graficamente nas figuras 18 e 20, nas quais são apresentadas duas retas: uma azul, que representa o comportamento real da corrente em função da tensão aplicada; e uma cinza, que é uma reta teórica linearizada, que foi deduzida a partir da tendência linear da reta azul.

3.4 DETERMINAÇÃO DA AÇÃO GERADORA DO MOTOR.

3.4.1 Introdução

Quando é aplicada uma tensão nos terminais de um motor CC, o mesmo tende a produzir torque e apresentar rotação; desta forma, os condutores no rotor apresentam movimentação relativa ao campo magnético em que estão inseridos. Assim, uma tensão é induzida nos condutores da armadura, gerando uma força que se opõe ao movimento inicial da máquina. Esse fenômeno é definido como ação geradora de uma máquina elétrica, ou também força contra eletromotriz (KOSOW, 2005).

3.4.2 Objetivos

Estudar o comportamento da ação geradora de um motor de corrente contínua com ímãs permanentes com aplicação na indústria automotiva.

3.4.3 Método e aplicação

Para determinar os valores da ação geradora dos motores em teste, foi utilizado o método analítico. Com as tabelas 4 e 5, foi possível deduzir os valores de E_c , para cada nível de tensão da tabela, aplicando a formulação $E_c = V_a - R_a \cdot I_a$.

3.4.4 Resultados

Ação geradora					
Va (V)	Ia (A)	Ra (Ω)	velocidade (rpm)	ω (rad/s)	Ec (V)
0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00
1,00	0,61	0,43	135,00	14,14	0,74
2,00	0,67	0,43	314,00	32,88	1,71
3,00	0,71	0,43	514,00	53,83	2,69
4,00	0,76	0,43	710,00	74,35	3,67
5,00	0,80	0,43	916,00	95,92	4,66
6,00	0,84	0,43	1124,00	117,71	5,64
7,00	0,87	0,43	1310,00	137,18	6,63
8,00	0,90	0,43	1525,00	159,70	7,61
9,00	0,93	0,43	1730,00	181,17	8,60
10,00	0,96	0,43	1932,00	202,32	9,59
11,00	0,99	0,43	2140,00	224,10	10,57
12,00	1,03	0,43	2320,00	242,95	11,56

Tabela 6: ação geradora - motor #01

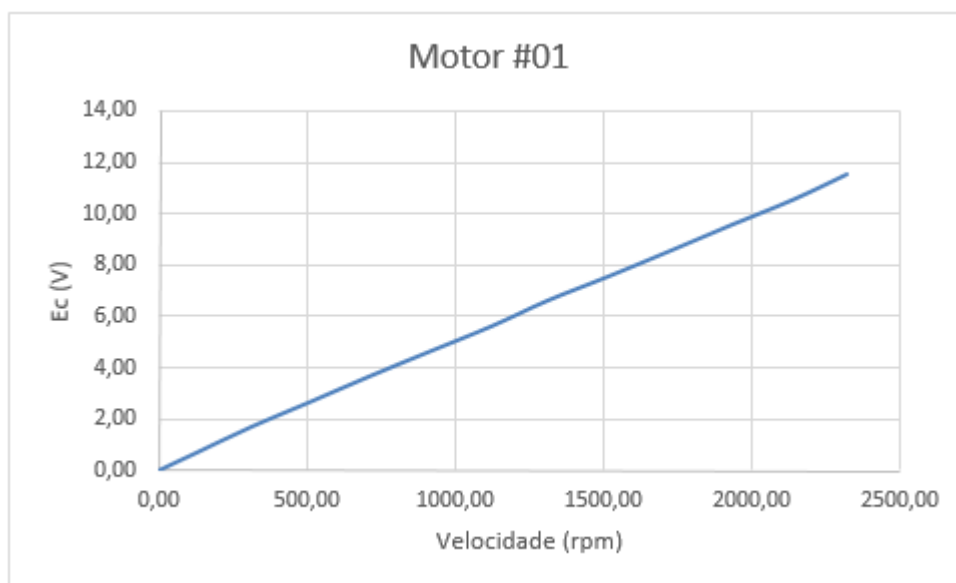


Figura 21: gráfico / Ec (V) x velocidade (rpm) – motor #01

Ação geradora					
Va (V)	Ia (A)	Ra (Ω)	velocidade (rpm)	ω (rad/s)	Ec (V)
0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00
1,00	0,58	0,43	140,00	14,66	0,75
2,00	0,68	0,43	340,00	35,60	1,71
3,00	0,74	0,43	520,00	54,45	2,68
4,00	0,79	0,43	717,00	75,08	3,66
5,00	0,84	0,43	915,00	95,82	4,64
6,00	0,89	0,43	1113,00	116,55	5,62
7,00	0,95	0,43	1307,00	136,87	6,59
8,00	1,00	0,43	1513,00	158,44	7,57
9,00	1,05	0,43	1714,00	179,49	8,55
10,00	1,09	0,43	1925,00	201,59	9,53
11,00	1,12	0,43	2110,00	220,96	10,52
12,00	1,17	0,43	2317,00	242,64	11,50

Tabela 7: ação geradora - motor #02

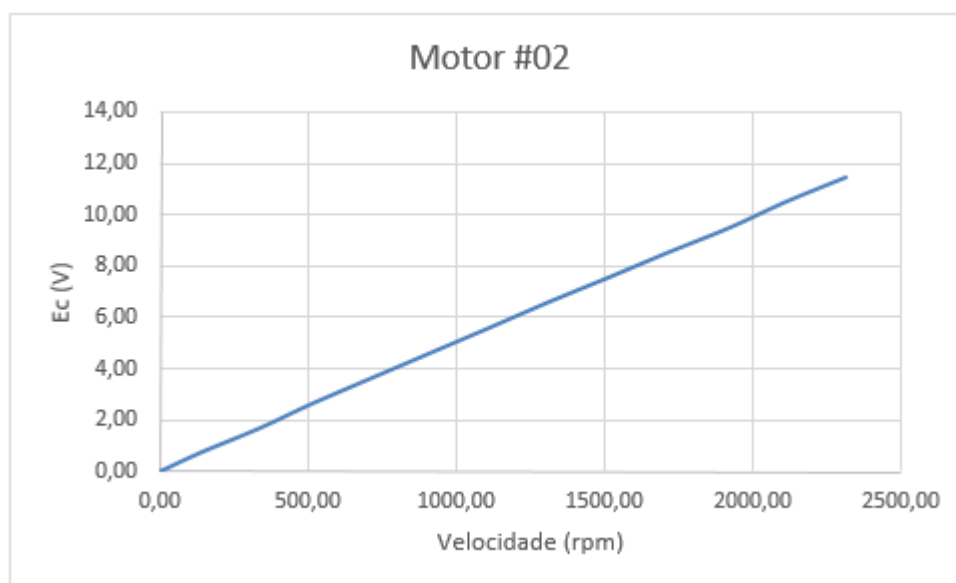


Figura 22: gráfico / Ec (V) x velocidade (rpm) – motor#02

3.5 RENDIMENTO

3.5.1 Introdução

A ação geradora E_c é um dado importante para a obtenção do rendimento e da potência desenvolvida pelo eixo do motor.

Analisando a formulação geral de um motor CC, pode-se observar que:

$$V_a = E_c + R_a \cdot I_a$$

A tensão V_a , aplicada aos terminais do motor se divide em duas parcelas, E_c (ação geradora) e $R_a \cdot I_a$, sendo que essa última representa a queda de tensão nos enrolamentos de cobre.

Multiplicando os dois lados da equação por I_a teremos:

$$V_a \cdot I_a = E_c \cdot I_a + R_a \cdot I_a^2$$

Para Kosow (2005), a formulação acima pode ser interpretada como a potência elétrica $V_a \cdot I_a$, a qual é aplicada nos terminais da armadura que é suprida pelo motor, parte dela representa a potência dissipada pelo circuito de armadura $R_a \cdot I_a^2$, e o restante, $E_c \cdot I_a$, é a potência desenvolvida, ou também definida por Fitzgerald (2006) como potência eletromagnética.

Fitzgerald (2006) afirma que a potência eletromagnética representa a potência responsável por produzir torque no eixo do motor e se diferencia da potência elétrica $V_a \cdot I_a$ pelas perdas no circuito de armadura $R_a \cdot I_a^2$.

A relação entre potência eletromagnética e a potência elétrica $\frac{E_c \cdot I_a}{V_a \cdot I_a}$, pode ser simplificada para $\frac{E_c}{V_a}$. Dessa forma, quanto maior a porcentagem da ação geradora E_c em relação à tensão aplicada aos terminais da armadura V_a , maior será o rendimento do motor (KOSOW, 2005).

3.5.2 Objetivos

Determinar o comportamento do rendimento do motor em função da variação da velocidade, tendo em vista que o rendimento é definido por $\frac{E_c}{V_a}$ e E_c é função da velocidade.

3.5.3 Método e aplicação

Utilizando as tabelas do tópico anterior, nas quais foram apresentados os valores de E_c para cada nível de tensão aplicado foi possível adicionar mais uma coluna e fazer o quociente da coluna de E_c pela coluna de V_a , e assim determinar o comportamento do rendimento dos motores #01 e #02.

3.5.4 Resultados

Rendimento							rendimento (%)
V_a (V)	I_a (A)	R_a (Ω)	velocidade (rpm)	ω (rad/s)	E_c (V)		
0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	
1,00	0,61	0,43	135,00	14,14	0,74	73,77	
2,00	0,67	0,43	314,00	32,88	1,71	85,60	
3,00	0,71	0,43	514,00	53,83	2,69	89,82	
4,00	0,76	0,43	710,00	74,35	3,67	91,83	
5,00	0,80	0,43	916,00	95,92	4,66	93,12	
6,00	0,84	0,43	1124,00	117,71	5,64	93,98	
7,00	0,87	0,43	1310,00	137,18	6,63	94,66	
8,00	0,90	0,43	1525,00	159,70	7,61	95,16	
9,00	0,93	0,43	1730,00	181,17	8,60	95,56	
10,00	0,96	0,43	1932,00	202,32	9,59	95,87	
11,00	0,99	0,43	2140,00	224,10	10,57	96,13	
12,00	1,03	0,43	2320,00	242,95	11,56	96,31	

Tabela 8: rendimento elétrico - motor #01

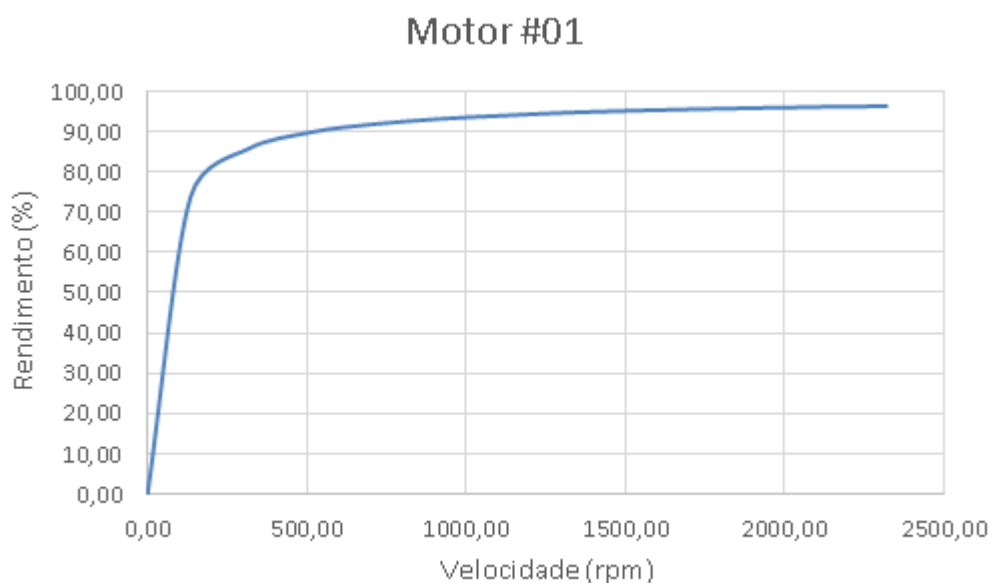


Figura 23: gráfico / rendimento (%) x velocidade (rpm) – motor #01

Rendimento						
Va (V)	Ia (A)	Ra (Ω)	velocidade (rpm)	ω (rad/s)	Ec (V)	rendimento (%)
0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	0,58	0,43	140,00	14,66	0,75	75,06
2,00	0,68	0,43	340,00	35,60	1,71	85,38
3,00	0,74	0,43	520,00	54,45	2,66	89,39
4,00	0,79	0,43	717,00	75,08	3,66	91,51
5,00	0,84	0,43	915,00	95,82	4,64	92,78
6,00	0,89	0,43	1113,00	116,55	5,62	93,62
7,00	0,95	0,43	1307,00	136,87	6,59	94,16
8,00	1,00	0,43	1513,00	158,44	7,57	94,63
9,00	1,05	0,43	1714,00	179,49	8,55	94,98
10,00	1,09	0,43	1925,00	201,59	9,53	95,31
11,00	1,12	0,43	2110,00	220,96	10,52	95,62
12,00	1,17	0,43	2317,00	242,64	11,50	95,81

Tabela 9: rendimento elétrico - motor #02

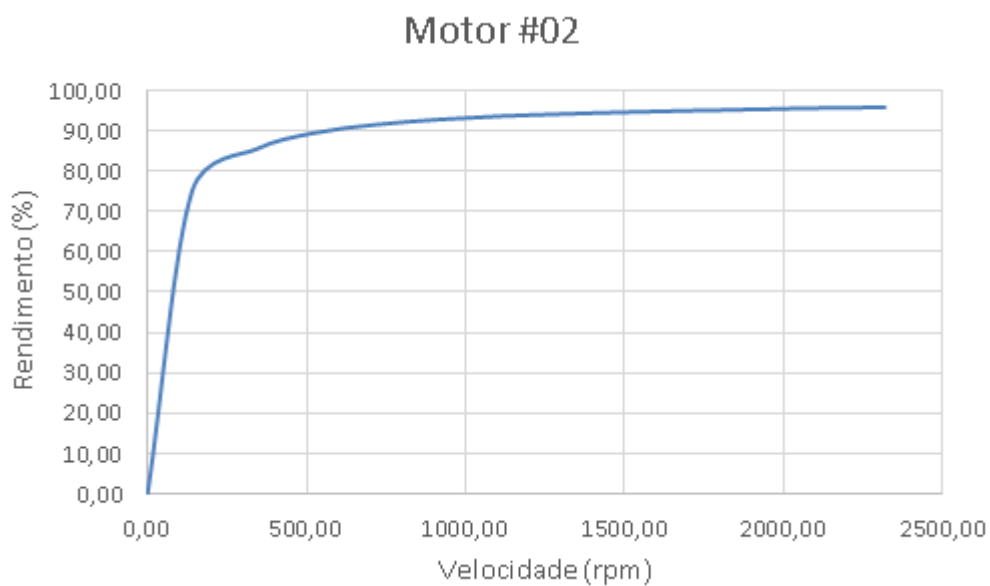


Figura 24: gráfico / rendimento (%) x velocidade (rpm) – motor #02

Com os gráficos apresentados anteriormente, pode-se deduzir que quanto mais próximo dos parâmetros nominais os motores estiverem operando, mais próximo estarão do máximo rendimento.

4. SIMULAÇÃO

4.1 Introdução

O diagrama abaixo representa o circuito equivalente de um motor CC de ímãs permanentes para situações transitórias e também para regime permanente. É representado também o sistema equivalente mecânico do eixo do motor.

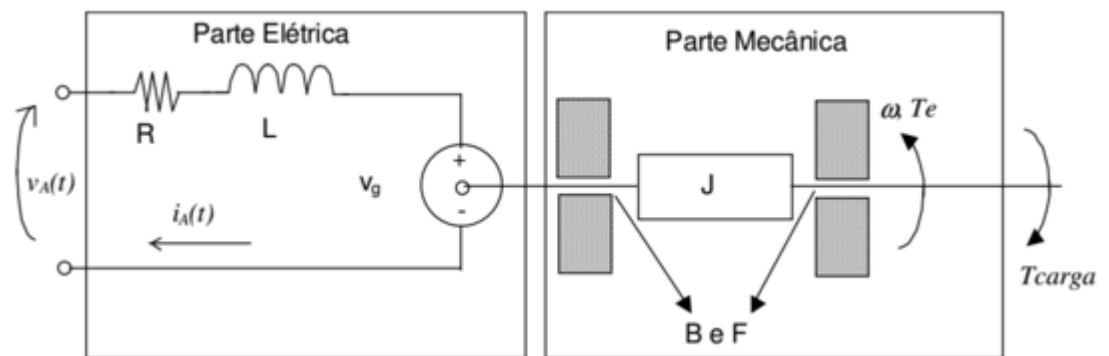


Figura 25: diagrama eletromecânico do motor CC a ímãs permanentes

Fonte: Labtrix (2011)

Onde: $V_a = R_a \cdot I_a + L \frac{dI_a}{dt} + E_c$ (1) → (parte elétrica)

$$E_c = K_e \cdot \omega$$
 (2)

$$T_e = j \frac{d\omega}{dt} + B_v \cdot \omega + F$$
 (3) → (parte mecânica)

$$T_e = K_t \cdot I_a$$
 (4)

V_a = tensão nos terminais da armadura (V);

R_a = resistência da armadura (Ω);

I_a = corrente do circuito da armadura (A);

L = indutância do circuito da armadura (H);

E_c = ação geradora / força contra eletromotriz (V);

K_e = constante da força contra eletromotriz (V.s/rad);

ω = velocidade angular (rad/s);

T_e = torque eletromagnético (Nm);

J = momento polar de inercia (Kgm^2);

Bv = coeficiente de atrito viscoso (Nms/rad);

F = coeficiente de atrito seco (Nm);

Kt = constante de torque (Nm/A);

4.2 Determinação de Ke (constante de força contra eletromotriz).

Uma vez que a ação geradora pode ser definida como $Ec = K\Phi N$, e para motores de corrente contínua com ímãs permanentes o fluxo magnético Φ é constante, a constante Ke é o produto de $K \cdot \Phi$ (LABTRIX, 2011). Dessa forma, transformando a velocidade N (rpm) para ω (rad/s), a formulação fica da seguinte maneira:

$$Ec = Ke \cdot \omega$$

Assim Ke fica definida como:

$$Ke = \frac{Ec}{\omega} \text{ (V.s/rad)}$$

Para Fitzgerald (2006), Ke é a constante de conjugado do motor que é uma função de sua geometria e de suas características magnéticas de excitação.

As tabelas com os parâmetros dos motores que foram coletados nos procedimentos do capítulo anterior foram utilizadas para a determinação dos parâmetros necessários para o procedimento de simulação. Assim, dividindo a coluna da ação geradora Ec , pela velocidade angular ω , foi possível determinar a constante Ke .

Constante K_e							
V_a (V)	I_a (A)	R_a (Ω)	velocidade (rpm)	ω (rad/s)	E_c (V)	rendimento (%)	K_e (V.s/rad)
0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000
1,00	0,61	0,43	135,00	14,14	0,738	73,770	0,052
2,00	0,67	0,43	314,00	32,88	1,712	85,595	0,052
3,00	0,71	0,43	514,00	53,83	2,695	89,823	0,050
4,00	0,76	0,43	710,00	74,35	3,673	91,830	0,049
5,00	0,80	0,43	916,00	95,92	4,656	93,120	0,049
6,00	0,84	0,43	1124,00	117,71	5,639	93,980	0,048
7,00	0,87	0,43	1310,00	137,18	6,626	94,656	0,048
8,00	0,90	0,43	1525,00	159,70	7,613	95,163	0,048
9,00	0,93	0,43	1730,00	181,17	8,600	95,557	0,047
10,00	0,96	0,43	1932,00	202,32	9,587	95,872	0,047
11,00	0,99	0,43	2140,00	224,10	10,574	96,130	0,047
12,00	1,03	0,43	2320,00	242,95	11,557	96,309	0,048

Tabela 10: determinação constante K_e - motor #01

Constante K_e							
V_a (V)	I_a (A)	R_a (Ω)	velocidade (rpm)	ω (rad/s)	E_c (V)	rendimento (%)	K_e (V.s/rad)
0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000
1,00	0,58	0,43	140,00	14,66	0,751	75,060	0,051
2,00	0,68	0,43	340,00	35,60	1,708	85,380	0,048
3,00	0,74	0,43	520,00	54,45	2,682	89,393	0,049
4,00	0,79	0,43	717,00	75,08	3,660	91,508	0,049
5,00	0,84	0,43	915,00	95,82	4,639	92,776	0,048
6,00	0,89	0,43	1113,00	116,55	5,617	93,622	0,048
7,00	0,95	0,43	1307,00	136,87	6,592	94,164	0,048
8,00	1,00	0,43	1513,00	158,44	7,570	94,625	0,048
9,00	1,05	0,43	1714,00	179,49	8,549	94,983	0,048
10,00	1,09	0,43	1925,00	201,59	9,531	95,313	0,047
11,00	1,12	0,43	2110,00	220,96	10,518	95,622	0,048
12,00	1,17	0,43	2317,00	242,64	11,497	95,808	0,047

Tabela 11: determinação da constante K_e - motor #02

Logo, com os valores de K_e para cada nível de tensão, foi possível calcular uma média dos valores e determinar o valor da constante para as amostras em estudo.

Constante K_e	
Motor #01	0,0488 V.s/rad
Motor #02	0,0483 V.s/rad

Tabela 12: constante K_e - motores #01 e #02

4.3 Determinação de Bv (coeficiente de atrito viscoso) e F (coeficiente de atrito seco).

O amortecimento viscoso é proveniente do atrito viscoso, o qual representa o atrito proveniente de uma peça sólida e um fluido viscoso, que é entreposto entre as peças móveis de um sistema mecânico. Tem-se como exemplo dessa situação o atrito que ocorre entre um eixo e o seu mancal de deslizamento. (IME-USP, 2015)

Logicamente, o amortecimento seco é proveniente do atrito seco, que ocorre quando entram em atrito dois corpos sólidos sem que haja algum fluido entre os dois corpos. (IME-USP, 2015)

O coeficiente de atrito viscoso e o coeficiente de atrito seco foram determinados a partir do gráfico do torque eletromagnético T_e em função da velocidade angular ω .

Sabe-se que:

$$T_e = Kt \cdot I_a$$

Portanto, para motores CC de ímãs permanentes, em que a constante de torque Kt pode ser considerada igual a constante da força contra eletromotriz K_e , pois para esse tipo de motores a corrente que passa na armadura não interfere no valor quantitativo do fluxo magnético; utilizou-se a tabela do item anterior, multiplicando a última coluna, de K_e , pela segunda, de I_a , para determinar o valor do torque eletromagnético T_e para cada nível de tensão da tabela.

Torque eletromagnético								
Va (V)	Ia (A)	Ra (Ω)	velocidade (rpm)	ω (rad/s)	Ec (V)	rendimento (%)	Ke (V.s/rad)	Te (N.m)
0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000
1,00	0,61	0,43	135,00	14,14	0,738	73,770	0,052	0,030
2,00	0,67	0,43	314,00	32,88	1,712	85,595	0,052	0,033
3,00	0,71	0,43	514,00	53,83	2,695	89,823	0,050	0,035
4,00	0,76	0,43	710,00	74,35	3,673	91,830	0,049	0,037
5,00	0,80	0,43	916,00	95,92	4,656	93,120	0,049	0,039
6,00	0,84	0,43	1124,00	117,71	5,639	93,980	0,048	0,041
7,00	0,87	0,43	1310,00	137,18	6,626	94,656	0,048	0,042
8,00	0,90	0,43	1525,00	159,70	7,613	95,163	0,048	0,044
9,00	0,93	0,43	1730,00	181,17	8,600	95,557	0,047	0,045
10,00	0,96	0,43	1932,00	202,32	9,587	95,872	0,047	0,047
11,00	0,99	0,43	2140,00	224,10	10,574	96,130	0,047	0,048
12,00	1,03	0,43	2320,00	242,95	11,557	96,309	0,048	0,050

Tabela 13: determinação do torque eletromagnético - motor #01

Torque eletromagnético								
Va (V)	Ia (A)	Ra (Ω)	velocidade (rpm)	ω (rad/s)	Ec (V)	rendimento (%)	Ke (V.s/rad)	Te (N.m)
0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000
1,00	0,58	0,43	140,00	14,66	0,751	75,060	0,051	0,028
2,00	0,68	0,43	340,00	35,60	1,708	85,380	0,048	0,033
3,00	0,74	0,43	520,00	54,45	2,682	89,393	0,049	0,036
4,00	0,79	0,43	717,00	75,08	3,660	91,508	0,049	0,038
5,00	0,84	0,43	915,00	95,82	4,639	92,776	0,048	0,041
6,00	0,89	0,43	1113,00	116,55	5,617	93,622	0,048	0,043
7,00	0,95	0,43	1307,00	136,87	6,592	94,164	0,048	0,046
8,00	1,00	0,43	1513,00	158,44	7,570	94,625	0,048	0,048
9,00	1,05	0,43	1714,00	179,49	8,549	94,983	0,048	0,051
10,00	1,09	0,43	1925,00	201,59	9,531	95,313	0,047	0,053
11,00	1,12	0,43	2110,00	220,96	10,518	95,622	0,048	0,054
12,00	1,17	0,43	2317,00	242,64	11,497	95,808	0,047	0,057

Tabela 14: determinação do torque eletromagnético - motor #02

Agora observando a equação (3), exposta na introdução desse tópico, temos que o torque eletromagnético é função do momento polar de inércia que multiplica a

variação da velocidade pelo tempo, mais o atrito viscoso que multiplica a velocidade angular mais o atrito seco do eixo da máquina.

$$Te = j \frac{d\omega}{dt} + Bv. \omega + F$$

Mas como Ke e Ia , parâmetros que foram utilizados para a determinação de Te , foram coletados e deduzidos para estágios estáveis de tensão (0 V, 1 V, 2 V, até 12 V), não havendo variação da velocidade angular pelo tempo nesses instantes, logo é possível afirmar que o termo $j \frac{d\omega}{dt} = 0$. Assim, a formulação acima fica reduzida da seguinte forma.

$$Te = Bv. \omega + F$$

Observando a equação e comparando-a com a equação do primeiro grau $Y(X) = AX + C$ é possível determinar por analogia que a função Y é Te , o coeficiente angular A é o atrito viscoso B e o coeficiente linear C é o atrito seco F .

Assim, traçando o gráfico de Te em função de ω é possível observar o comportamento da curva e, por regressão linear, cuja operação objetiva determinar a relação entre dois conjuntos numéricos, foi possível deduzir valores aproximados de B e F .

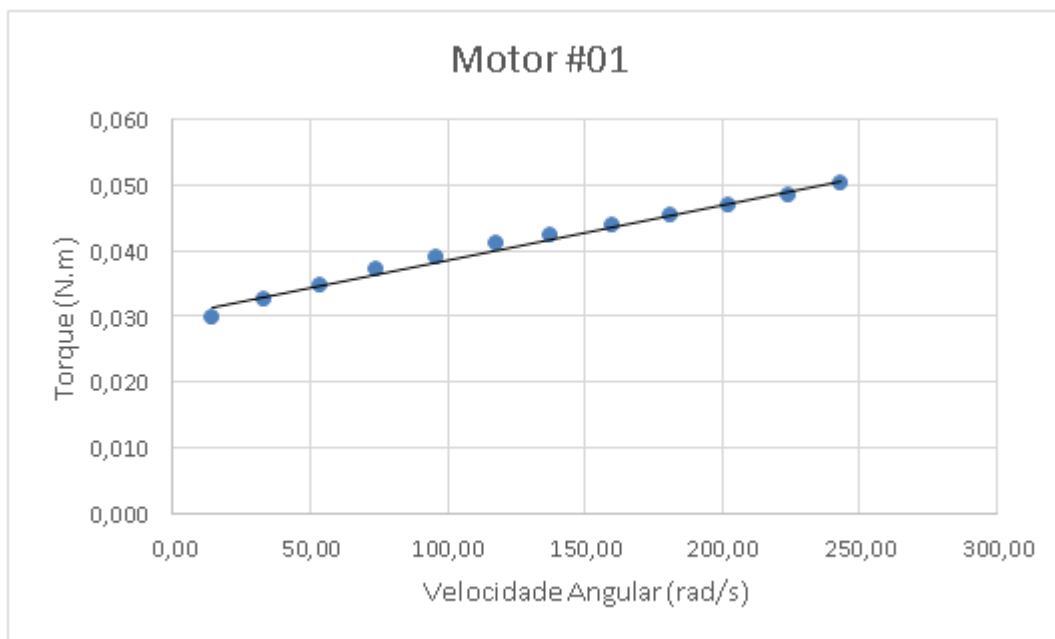


Figura 26: gráfico / torque ($N.m$) x velocidade angular (rad/s) - motor #01

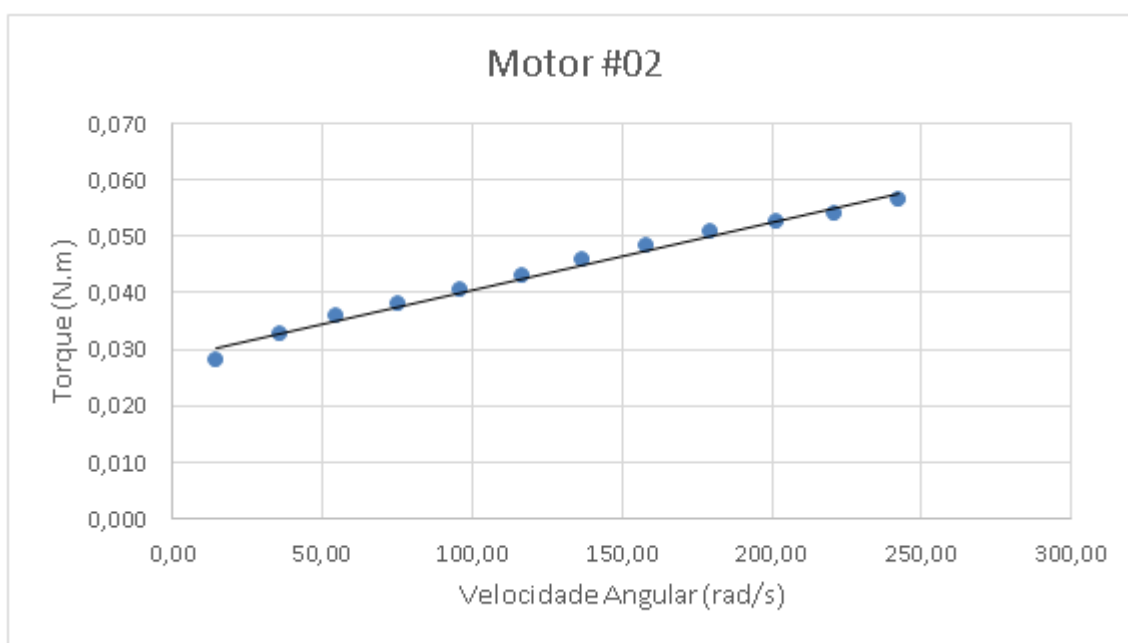


Figura 27: gráfico / torque ($N.m$) x velocidade angular (rad/s) - motor #02

Assim como feito anteriormente, a partir de valores reais, neste caso os valores de torque, pontos em azul no gráfico, foi traçada uma reta teórica que mostra o comportamento linear desta variável.

Agora, com o auxílio do Excel, na aba de **dados** na opção **análise de dados**, clicando na opção **regressão**, foi possível entrar com os valores da coluna de ω e da coluna de T_e das tabelas 13 e 14 e assim determinar os valores de B e F para os motores aqui estudados.

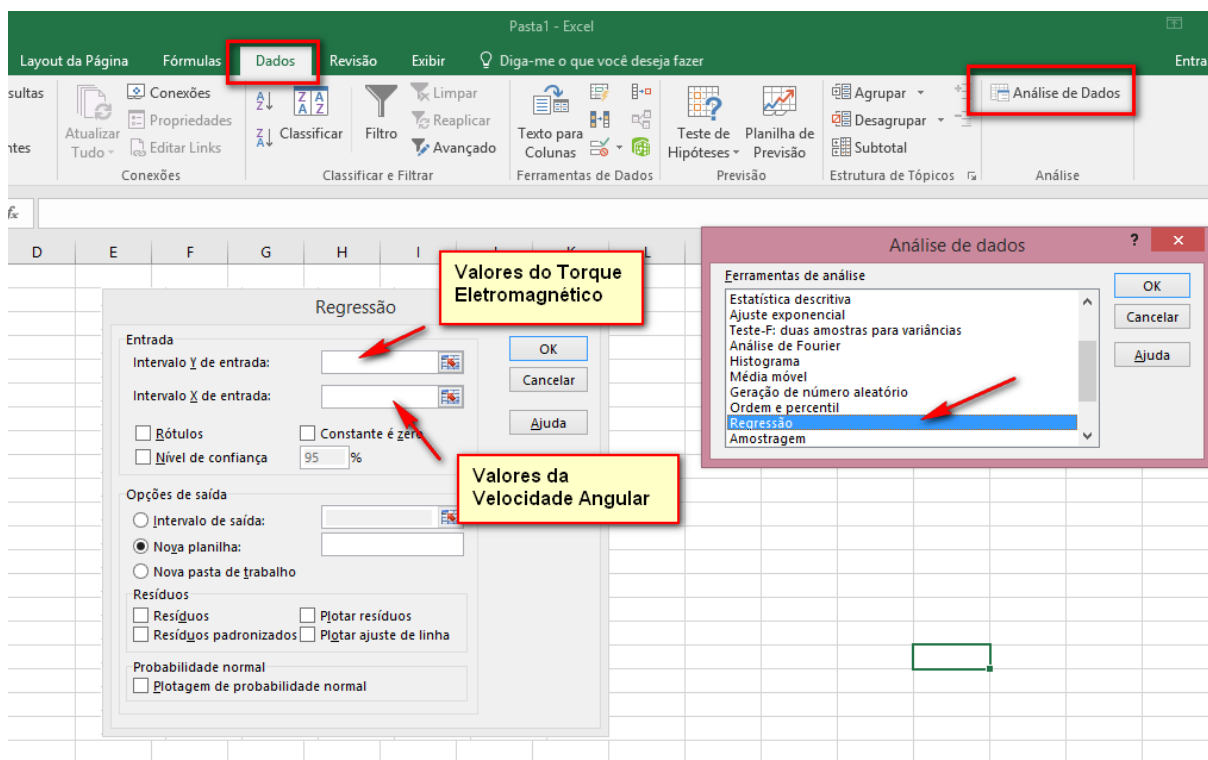


Figura 28: regressão linear

Coeficientes de atrito	
Atrito Seco (F)	0,03015008 Nm
Atrito Viscoso (Bv)	8,4448E-05 Nms/rad

Tabela 15: coeficientes de atrito - motor #01

Coeficientes de atrito	
Atrito Seco (F)	0,02857232 Nm
Atrito Viscoso (Bv)	0,00011983 Nms/rad

Tabela 16: coeficientes de atrito- motor #02

4.4 Determinação de J (momento polar de inércia)

O momento polar de inércia em um sistema rotativo quantifica a massa distribuída ao redor do eixo de rotação. Dessa maneira, quanto maior for o valor de J , logicamente maior será a massa distribuída ao redor do eixo e, por consequência, mais difícil será girar o eixo da máquina. (COSTA, 2010)

Para determinar o valor da constante polar de inércia foi realizado um ensaio que se baseia na resposta transiente do sistema mecânico do motor.

Analisando a equação 3, quando o torque eletromagnético for zero, teremos a seguinte equação:

$$0 = j \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega + F$$

Resolvendo a equação diferencial é possível determinar que:

$$\omega = \omega_0 \cdot e^{-t/t_m} - \frac{F}{B} (1 - e^{-t/t_m})$$

$$t_m = J/B$$

Essa fórmula foi deduzida considerando o torque eletromagnético igual a zero, pois o ensaio que determina o valor de J consiste em energizar o motor até que ele atinja a sua velocidade nominal e em seguida tirar a energia dos seus terminais, fazendo com que o torque eletromagnético caia para zero, e assim registrar o tempo necessário para que o eixo da máquina pare.

Com os valores de ω (velocidade final igual a zero), ω_0 (velocidade nominal do motor), t (tempo necessário para que o motor pare), F e B (parâmetros determinados anteriormente), foi possível calcular o valor de t_m (constante de tempo mecânica do rotor) e deduzir o valor da constante polar de inércia para os motores em estudo.

Para determinar o valor de t das amostras #01 e #02, foi utilizado um cronômetro, que foi acionado no momento em que os motores foram desligados e

desacionado quando o eixo motor parou de rodar. O valor de t para as duas amostras foi de aproximadamente 0,8 s.

A seguir apresenta-se o valor da constante polar de inércia dos motores #01 e #02.

Momento polar de inércia	
J	3,4383E-05 Kg.m ²

Tabela 17: momento polar de inércia - motor #01

Momento polar de inércia	
J	4,87889E-05 Kg.m ²

Tabela 18: momento polar de inércia - motor #02

4.5 Determinação da indutância (L)

A indutância do enrolamento da armadura foi determinada com uma ponte RLC.

Indutância	
L	1,046 mH

Tabela 19: indutância - motor #01

Indutância	
L	1,054 mH

Tabela 20: indutância - motor #02

4.6 Simulação com o *Simulink*

Para realizar a simulação no software Matlab, foi utilizado o diagrama de blocos proposto pelo manual da Labtrix.

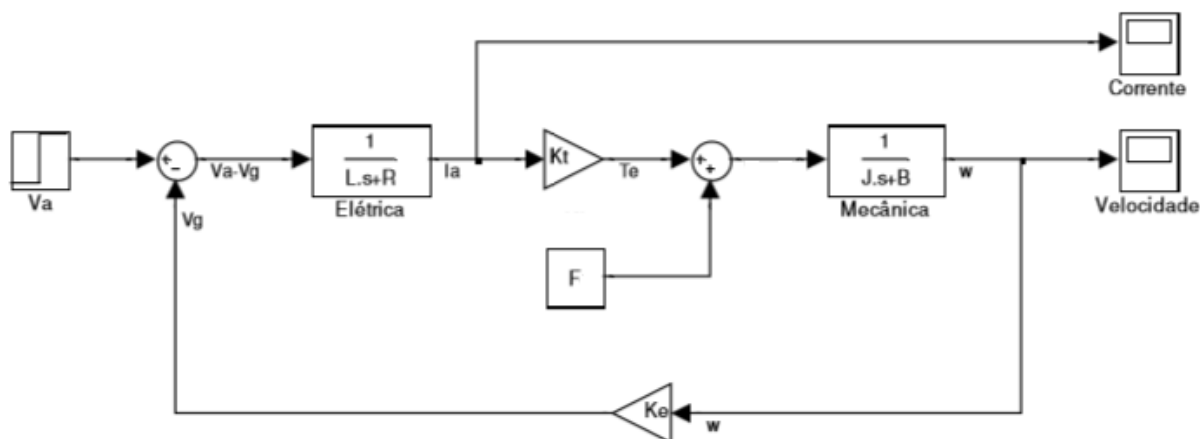


Figura 29: diagrama de blocos para simulação

Fonte: Labtrix (2011)

Os parâmetros que foram determinados até este item, foram inseridos manualmente nos blocos do sistema.

4.6.1 Resposta ao degrau de 12 V

Com objetivo de verificar, por meio de uma ferramenta computacional, no caso o Matlab, a assertividade dos parâmetros de simulação levantados até o momento, assim como fazer a verificação dos parâmetros de corrente e velocidade determinados no processo de caracterização, a simulação foi feita visando obter a resposta da corrente e da velocidade dos motores em função da tensão de 12 V, que é a tensão nominal de operação dessas máquinas.

Na sequência, apresenta-se graficamente a resposta da corrente e da velocidade dos motores #01 e #02, em função do degrau de 12 V.

Parâmetros de simulação	
L	1,046 mH
Ra	0,43 Ω
Ke	0,04881162 Vs/rad
Bv	8,4448E-05 Nms/rad
F	0,03015008 Nm
J	3,4383E-05 Kgm ²

Tabela 21: parâmetros de simulação - motor #01

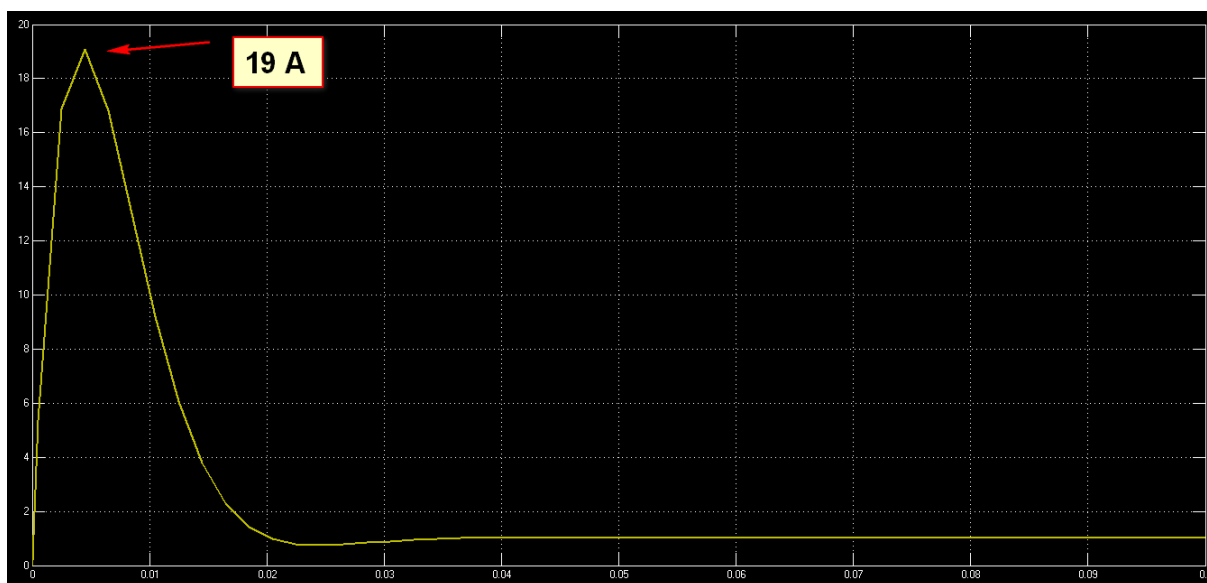


Figura 30: resposta transitória e permanente da corrente da armadura - motor #01

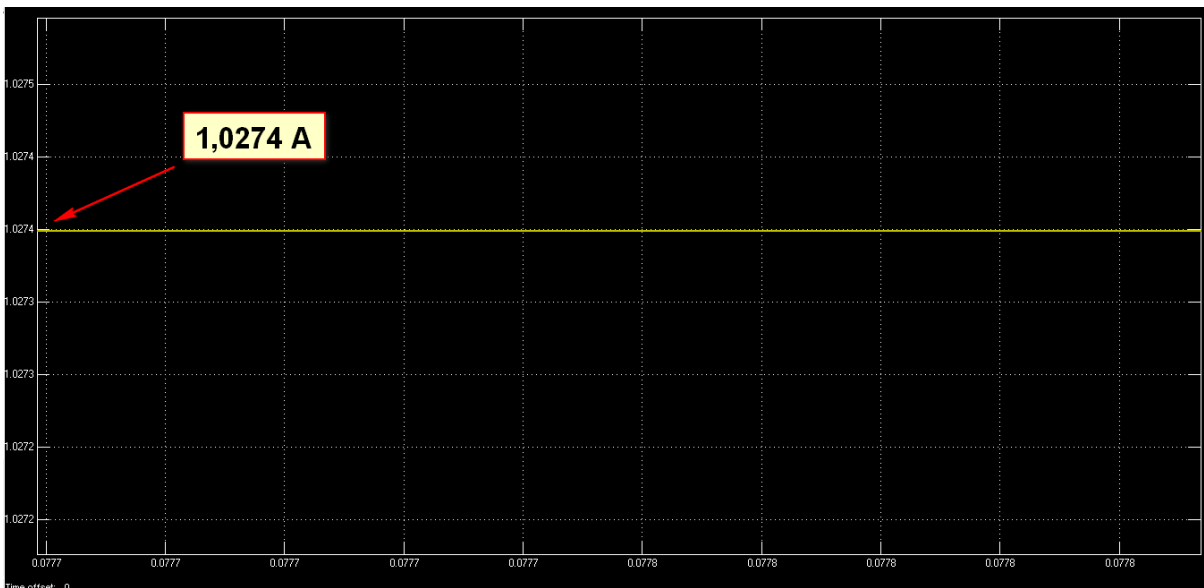


Figura 31: resposta em regime permanente da corrente da armadura - motor #01

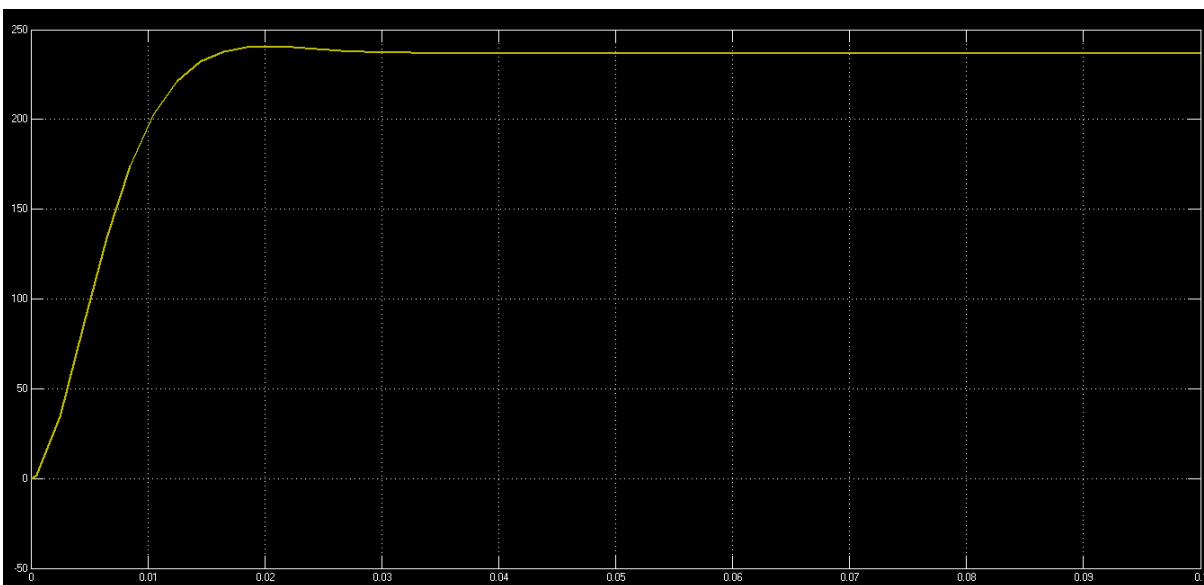


Figura 32: resposta transitória e em regime permanente da velocidade angular - motor #01

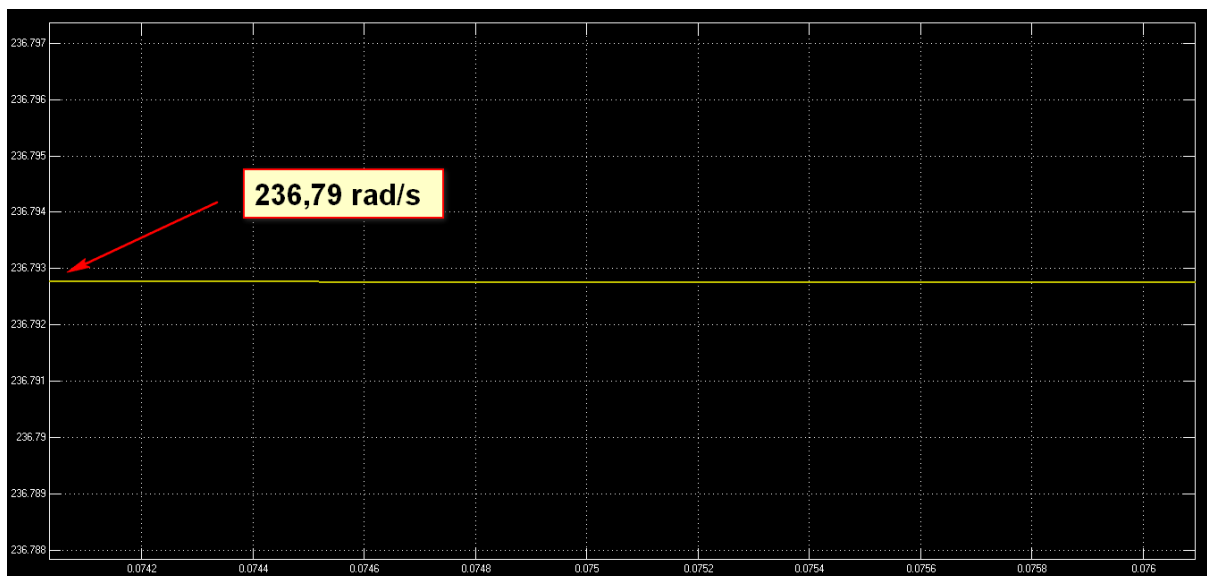


Figura 33: resposta em regime permanente da velocidade angular – motor #01

Parâmetros de simulação	
L	1,054 mH
Ra	0,43 Ω
Ke	0,0482997 Vs/rad
Bv	0,00011983 Nms/rad
F	0,028572316 Nm
J	4,87889E-05 Kgm ²

Tabela 22: parâmetros de simulação - motor #02

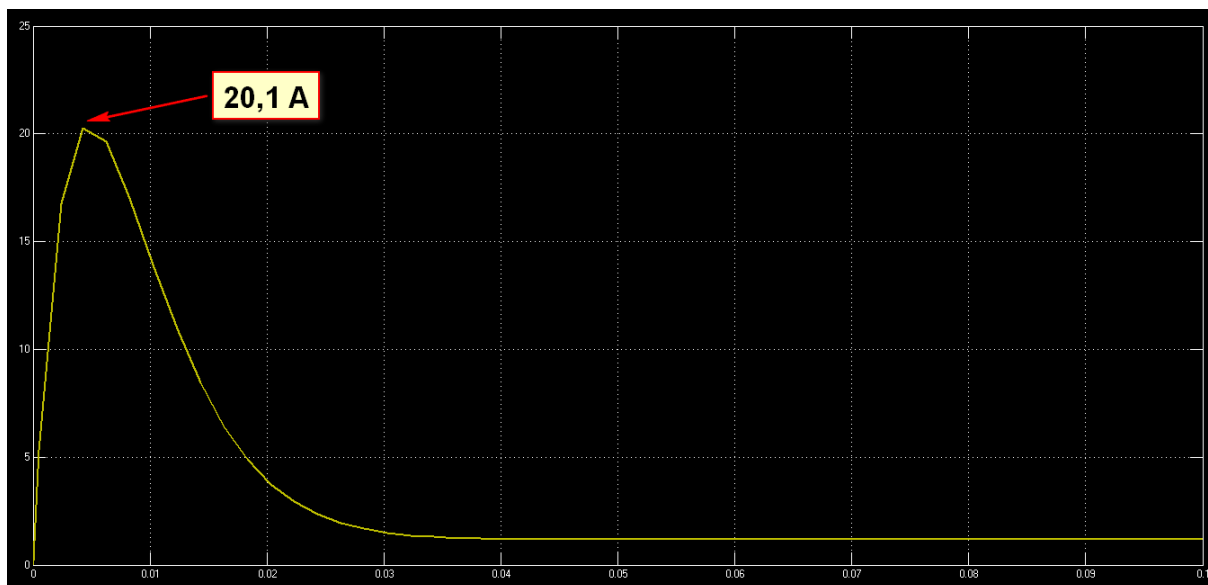


Figura 34: resposta transitória e em regime permanente da corrente da armadura - motor #02

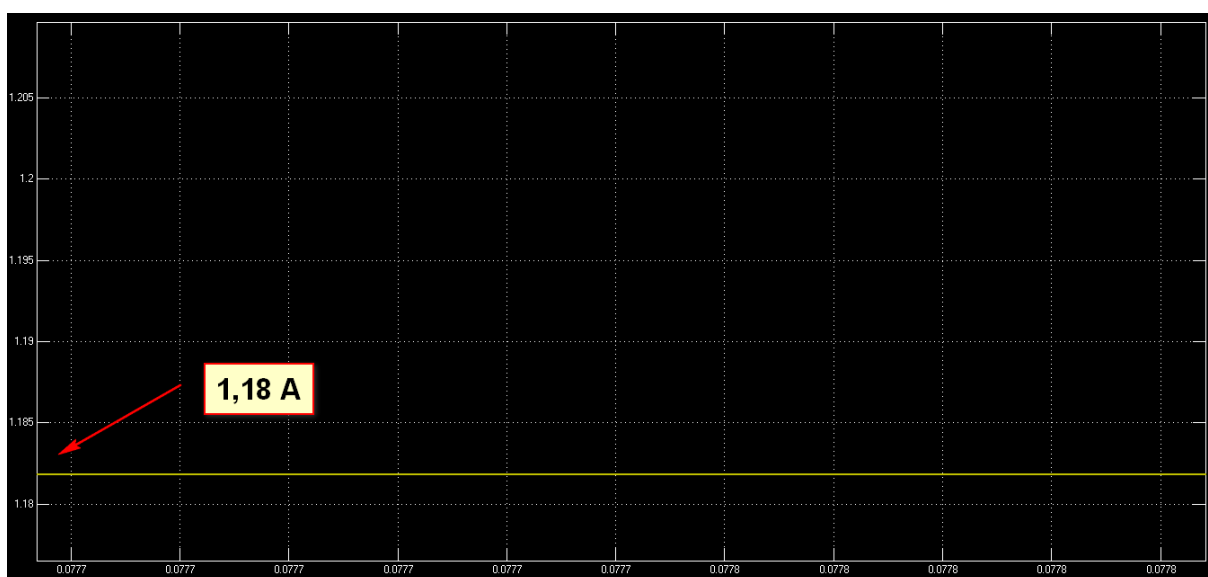


Figura 35: resposta em regime permanente da corrente da armadura - motor #02

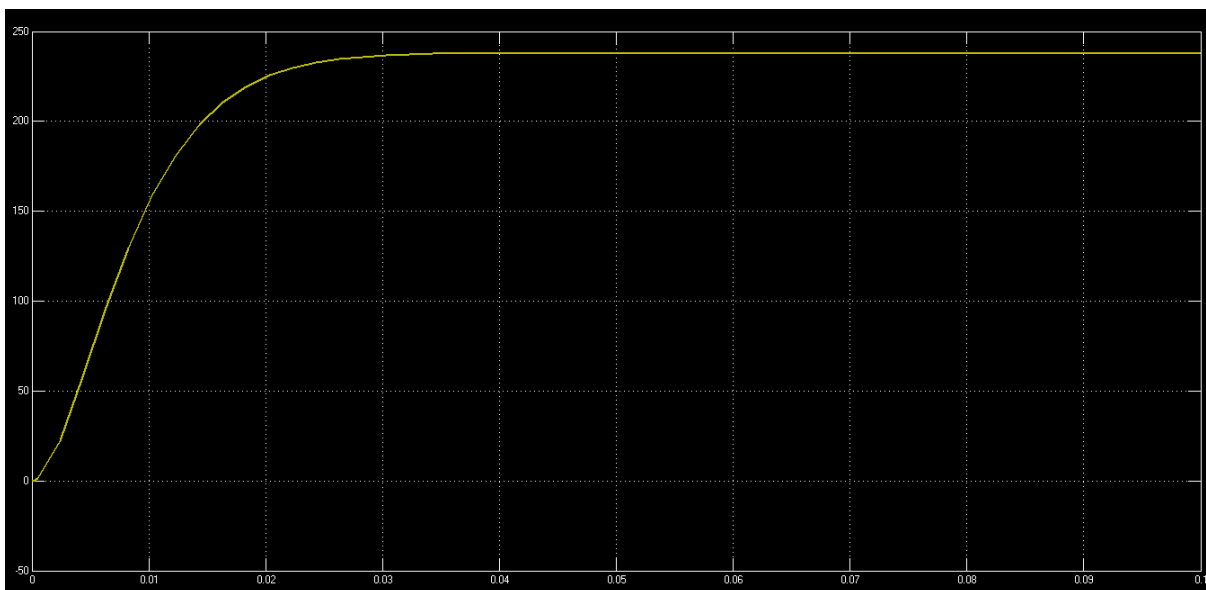


Figura 36: resposta transitória e em regime permanente da velocidade angular - motor #02

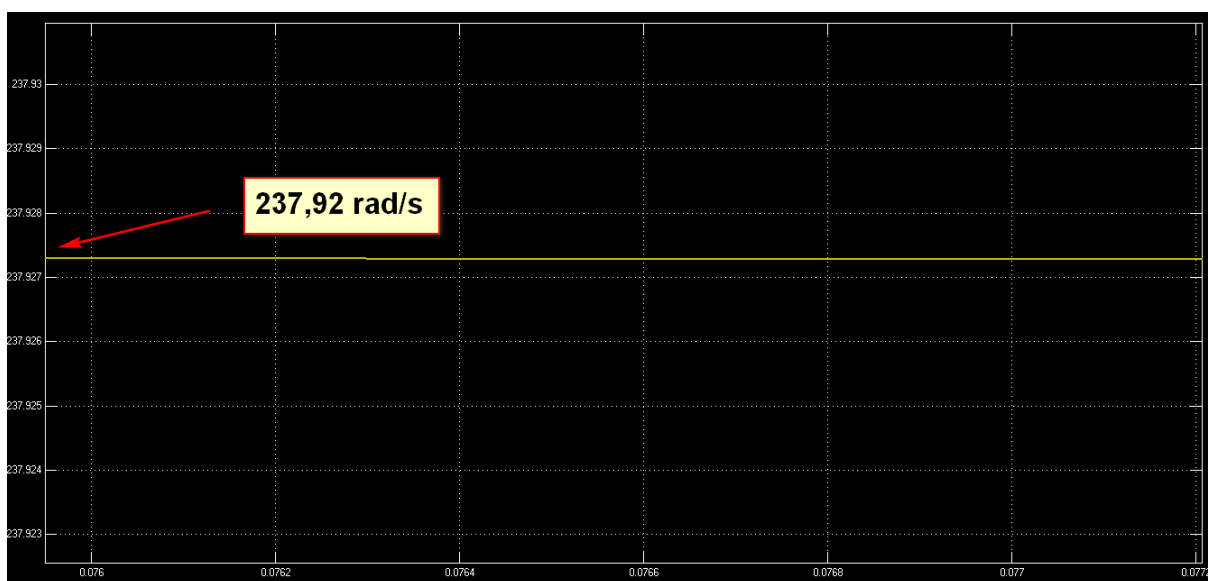


Figura 37: resposta em regime permanente da velocidade angular - motor #02

Segue-se apresentando quatro tabelas com o erro percentual das medidas referentes à velocidade (rad/s) e corrente (A), obtidas em bancada e em ambiente de simulação.

Erro percentual da corrente		
Caracterização	1,03 A	0,25%
Simulação	1,0274 A	

Tabela 23: erro percentual da corrente - motor #01

Erro percentual da velocidade		
Caracterização	242,95 rad/s	2,54%
Simulação	236,79 rad/s	

Tabela 24: erro percentual da velocidade - motor #01

Erro percentual da corrente		
Caracterização	1,17 A	0,85%
Simulação	1,18 A	

Tabela 25: erro percentual da corrente - motor #02

Erro percentual da velocidade		
Caracterização	242,64 rad/s	1,95%
Simulação	237,92 rad/s	

Tabela 26: erro percentual da velocidade - motor #02

Ponderando, para fins de experimento, a indutância do circuito de armadura igual a zero, foi possível determinar graficamente a corrente de pico para tal situação.

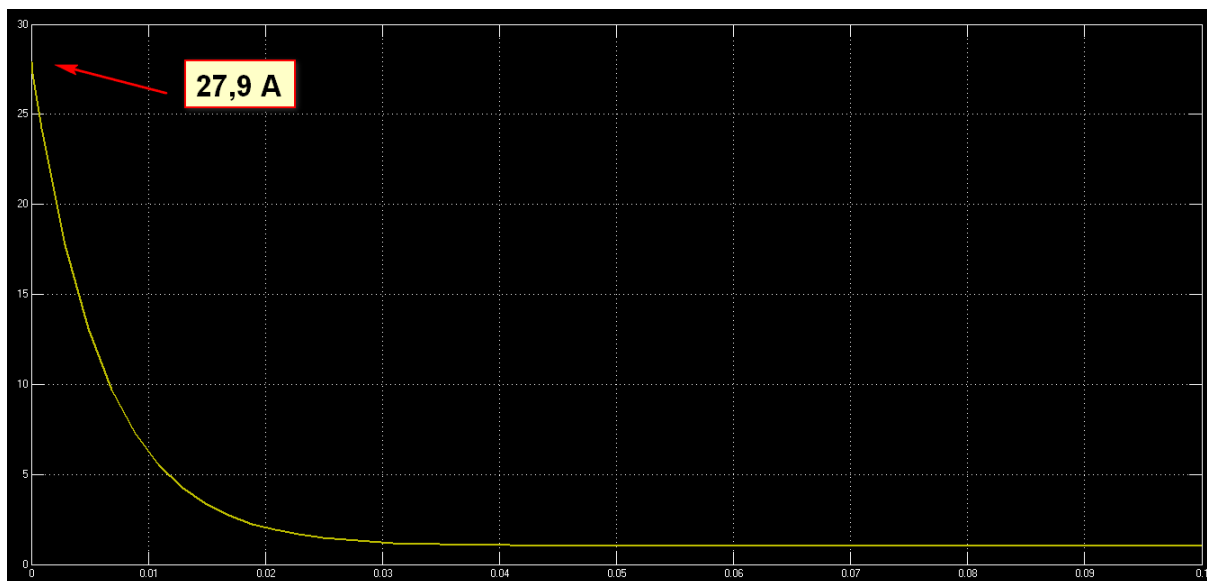


Figura 38: pico da corrente da armadura para $L = 0$ - motor #01

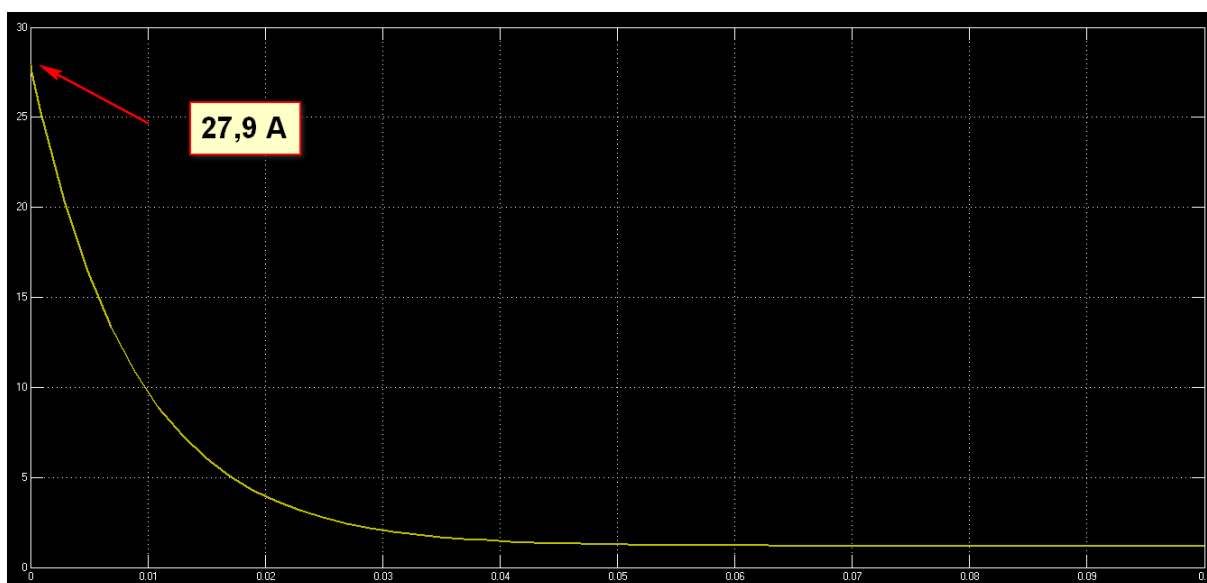


Figura 39: pico da corrente da armadura para $L=0$ - motor #02

É nítida a diferença da resposta transiente para a situação em que a indutância é considerada nula, se comparada à resposta quando se considera a indutância do circuito da armadura. É possível verificar essa divergência no valor da corrente de pico encontrada nas simulações. Isso ocorre porque, se considerado o valor da indutância na simulação, no momento transiente, o enrolamento se comporta como uma espira, gerando um fluxo magnético que produz uma corrente

que se opõe à corrente da armadura. Dessa maneira, é possível constatar que além da ação geradora, que em regime permanente gera uma corrente que se opõe à corrente da armadura, a indutância da armadura, no momento de transiente, apresenta a mesma função.

Já para as simulações em que não foi considerada a indutância da armadura, foi possível perceber um valor de pico superior quando comparado com as simulações anteriores; isso ocorre devido à ausência da indutância no momento do transitório. Outro fato que vale salientar é que, logo que é ligado o motor, a rotação do eixo da máquina é nula, não havendo influência da ação geradora nesse momento, portanto não há nenhum efeito ou elemento que restrinja a corrente no transitório.

Nesse sentido, a corrente de pico para tal situação pode ser definida da seguinte forma:

$$I_a = \frac{V_a - (E_c + BD)}{R_a}$$

Considerando $BD = 0$ e $E_c = 0$, I_a fica definida da seguinte maneira:

$$I_a = \frac{V_a}{R_a}$$

$$I_a = \frac{12}{0,43}$$

$$I_a = 27,9 A$$

5. INSTRUMENTOS E FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

O presente trabalho teve o auxílio de instrumentos de medição elétrica, assim como ferramentas computacionais para o seu desenvolvimento.

Em nível computacional foi utilizado o Excel, que desempenhou papel fundamental para elaboração de planilhas, gráficos e operações matemáticas como regressão linear. Além do Excel, foi utilizado o Word para formalização da escrita do trabalho. Para apresentar os esquemas elétricos, foi utilizado um software de desenho elétrico nomeado como *Schemeit*. Para a edição das tabelas, no que diz respeito aos efeitos gráficos, foi utilizado o *Fast Stone Image Vewer*. Já para a simulação foi utilizado o software *Matlab* que disponibiliza a opção Simulink para montagem do sistema de blocos.

Os instrumentos utilizados para realizar os estudos em bancada foram emprestados pelo SEMAP (Setor de Manutenção e Patrimônio) da UTFPR e utilizados na sala C-004 da mesma instituição.

A seguir é apresentada uma tabela com o nome dos instrumentos utilizados, junto aos seus códigos de identificação.

INSTRUMENTAÇÃO			
INSTRUMENTOS	MARCA	CÓDIGO	LOCAL DO EMPRÉSTIMO
Fonte	ICEL	17580	SEMAP
Multímetro / Amperímetro	MINIPA	14009	SEMAP
Multímetro / Voltímetro	MINIPA	33689	SEMAP
Ponte RLC	MINIPA	18529	SEMAP
Tacômetro	ICEL - TC 5035	22052015	SEMAP
Variac Monofásico	-	12500348	SEMAP
Ponte Retificadora	-	11150005	SEMAP

Tabela 27: instrumentação

6. CONCLUSÕES

Como já mencionado, os motores utilizados como amostras para o desenvolvimento desse trabalho foram colhidos de um conjunto de seis motores CC de ímãs permanentes doados pela empresa Brose do Brasil.

Os seis motores são de aplicação específica, sendo dois deles de aplicação HVAC sem carga acoplada ao eixo, outros dois de aplicação HVAC já com carga acoplada ao eixo e dois motores do tipo *cooling*.

A seguir são apresentados os motores doados



Figura 40: motores HVAC sem carga no eixo



Figura 41: motores HVAC com carga no eixo



Figura 42: motores *cooling*

Devido à necessidade de fixar os motores para que se possa operá-los com segurança, foi elaborado um sistema para que se pudessem ser fixados os aparelhos.

A seguir são apresentadas imagens do sistema já com os motores fixados.



Figura 43: suporte de fixação - visão geral



Figura 44: suporte de fixação - visão de cima

O presente trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de um motor CC com ímãs permanentes com aplicação específica na indústria automotiva, dando relevância a suas características construtivas e também suas características elétricas.

Do grupo de motores doados pela empresa Brose, foram escolhidos apenas os que não apresentam carga no eixo, figura - 40, pois esses motores não excedem a potência máxima da fonte CC disponível no SEMAP, as quais podem fornecer uma potência de até 90 W , com tensão e corrente que variam de 0 a 30 V e 0 a 3 A .

Os motores HVAC com carga e os *collings*, para serem energizados em 12 V , necessitam de um sistema com ponte retificadora e variac, pois a corrente supera o valor de 3 A . Contudo, o sistema de retificação insere no circuito da máquina de corrente contínua uma componente AC, a qual poderia vir a prejudicar a veracidade dos estudos realizados nesse trabalho.

A única exceção feita para utilização do sistema de retificação foi no procedimento de medição da resistência da armadura, pois com o rotor travado a corrente da fonte CC, perante uma mínima variação da tensão, lacra no seu valor nominal. Assim, tal situação limitaria a coleta de pelo menos cinco valores de $I_a(\text{A})$ e $V_a(\text{V})$ para o cálculo de R_a .

Outro fato importante a ser ressaltado nesse trabalho, é que para efeito de cálculo, foi considerado todos os valores sem a utilização de técnicas de arredondamento, visando alcançar ao máximo a assertividade dos cálculos.

Assim, o presente trabalho se encerra cumprindo com todos os objetivos gerais e específicos que foram propostos no primeiro capítulo. Foram detalhadas

todas as partes constituintes do motor CC de ímãs permanentes com aplicação na indústria automotiva, dando ênfase ao sistema de excitação utilizado por tais aparelhos.

A nível prático foram levantados os parâmetros necessário para a compreensão do funcionamento elétrico dos motores aqui estudados; e para finalizar, a simulação comprovou a qualidade e a assertividade dos dados, apresentando valores muito próximos dos que foram coletados na prática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANOCIBAR, Hector Rolando. **Alternativa para caracterização de ímãs permanentes com destacada anisotropia magnetocristalina sem desmagnetização irreversível.** 2011. 237 f. Tese (Programa de Pós Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

BRITO, et al. **Detecção de falhas em motores elétricos através da análise de corrente e análise de fluxo magnético.** UFSJ-MG.

BROSE DO BRASIL LTDA. **Products.** Disponível em:
<http://www.brose.com/ww/en/pub/company/international_locations/locations_of_production/america/curitiba.htm> Acesso em 28 Mai. 2014

CASTRO, Ângela. R. M. de. **Textura cristalográfica e avaliação de domínios magnéticos em ímãs de Pr Fe B .** 2001. 184 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2001.

CORAL.UFSM. **Materiais magnéticos.** Disponível em:
<http://coral.ufsm.br/cograça/graca9_1.pdf> Acesso em 02 Set. 2015.

COSTA, José E. **Apontamento de máquinas elétricas** Disponível em:
<http://www.enautica.pt/publico/professores/Baptista/Inst_Elec/MaquinasElectricas_total.pdf> Acesso em 13 Nov. 2015.

FÁBRICA DO PROJETO. **Manual HV e HVAC.** Disponível em:
<<http://www.fabricadoprojeto.com.br/2010/04/manual-hvac-heating-ventilation-and-air-conditioning/>> Acesso em 25 Mai. 2014

FITZGERALD, A. E; JUNIOR, C. K.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas.** 6. ed. Porto Alegre :Bookman, 2006.

FERREIRA, Éliner Affonso. **Estudo das propriedades magnéticas e da microestrutura em ímãs permanentes à base de Pr-Fe-B-Nb Obtidos pelos processos HD e HDDR.** 2008. 141 f. Dissertação (Programa de Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2008.

GIERAS, Jacek F; WING, Mitchell. **Permanente magnet motor technology: Design and Applications.** 2. ed. Nova York: Marcel Dekker. 2002.

HAMEYER, Kay; BELMANS, Ronnie J. M. **Permanent magnet excited brushed DC motors**. IEEE Transactions On Industrial Electronics, v. 43, n. 2, Abril 1996. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>> Acesso em: 24 de Setembro de 2015.

ISANONIO. **Máquinas elétricas girantes**. Disponível em: <http://profisanonio.blogspot.com.br/2011/10/maquinas-eletricas-girantes.html>> Acesso em: 06 Jul. 2014

IME-USP. **Elementos de um sistema mecânico** Disponível em: http://www.ime.usp.br/~oda/contents/01Matem%E1tica/01Sistemas%20Din%E2micos/04_Elem_Sist_Mec.pdf > Acesso em 13 Nov. 2015.

JOHNSON ELECTRIC. **Motor PMCC**. Disponível em: <http://www.johnsonelectric.com/pt/index.html>> Acesso em 27 Mai. 2014.

KOSOW, Irving I. **Máquinas elétricas e transformadores**. 15. ed. São Paulo: Globo S.A, 2005.

LABTRIX. **Manual do aluno**: Conjunto Servomecanismo modelo DVC26. Itatiba, SP, 2011.

LUCIANO, Benedito A. SILVA, Sissi A. **Sobre os ímãs permanentes e suas aplicações na eletroeletrônica**. Disponível em: http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/nogueira/materiais/Sobre_IMAS_Permanentes_Artigo.pdf> Acesso em 01 Set. 2015.

MARTIGNONI, Alfonso. **Ensaio de máquinas elétricas**. Porto Alegre: Globo, 1980.

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.

STRNAT, Karl J. **Modern permanent magnets for**. Proceedings of the IEEE, v. 78, n. 6, Junho 1990. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>> Acesso em: 24 de Setembro de 2015.

Só Física. **Resistência elétrica**. Disponível em: <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Eletromagnetismo/Eletrodinamica/resistencia.php>> Acesso em 10 out. 2015.

VINCENT, D. T. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: LTC, 1999.