

**INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
ANA CAROLINA SILVA CASTRO**

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL DIDÁTICA PARA SIMULAÇÃO DE
MÁQUINAS ELÉTRICAS DE CORRENTE CONTÍNUA**

FORMIGA – MG

2018

ANA CAROLINA SILVA CASTRO

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL DIDÁTICA PARA SIMULAÇÃO DE
MÁQUINAS ELÉTRICAS DE CORRENTE CONTÍNUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof.^a Msc. Mariana Guimarães dos Santos

FORMIGA – MG

2018

Castro, Ana Carolina Silva.
621.3 Ferramenta Computacional Didática para Simulação de Máquinas Elétricas de Corrente Contínua / Ana Carolina Silva Castro. -- Formiga : IFMG, 2018.
75p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Lobato Campos
Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Formiga.

1. Ferramenta Didática. 2. GUIDE. 3. Máquinas Elétricas de Corrente Contínua. 4. MATLAB. 5. Simulação Computacional.

CDD 621.3

ANA CAROLINA SILVA CASTRO

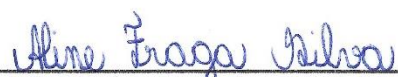
FERRAMENTA COMPUTACIONAL DIDÁTICA PARA SIMULAÇÃO DE
MÁQUINAS ELÉTRICAS DE CORRENTE CONTÍNUA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto
Federal de Minas Gerais como requisito para
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Elétrica.

Avaliado em: 13 de junho de 2018.
Nota: 9,40

BANCA EXAMINADORA


Prof.^a Msc. Mariana Guimarães dos Santos - Orientadora


Prof.^a Aline Fraga Silva - Avaliadora


Prof. Msc. Patrick Santos de Oliveira - Avaliador

Dedico este trabalho a todos que
contribuíram direta ou indiretamente
para que ele se realizasse, e a todos
que dele possam vir a se beneficiar.

RESUMO

As máquinas elétricas estão presentes em quase todas as atividades que envolvem a manipulação de cargas em ambientes industriais, comerciais e residenciais. Sendo assim, o estudo do funcionamento destes dispositivos é fundamental para diversos cursos de graduação, como o curso de engenharia elétrica e automação, por exemplo. Neste contexto, a associação entre os conhecimentos teóricos e práticos auxilia no estudo dos alunos e na forma de lecionar dos professores. No entanto, muitas vezes não é possível realizar todas as situações teóricas nos laboratórios. Nestes casos, a utilização da simulação computacional surge como uma ferramenta eficiente, capaz de apresentar as curvas fundamentais, em todas as condições de carga existentes, para o estudo das máquinas de forma didática. Neste contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um programa de simulação do comportamento de máquinas elétricas de corrente contínua, realizado na ferramenta *MATLAB*®, que apresenta as curvas características de saída das cinco principais configurações de máquinas CC (excitação independente, *shunt*, série, composta cumulativa e composta diferencial). O modelo desenvolvido é baseado nas equações de regime permanente de tais equipamentos e o objetivo foi obter curvas de interesse prático, facilmente encontradas nas principais literaturas do ramo. Para tornar a experiência de uso do programa mais didática e funcional, foi desenvolvida uma interface gráfica com a *GUIDE* do *MATLAB*®. A ferramenta computacional é validada por meio de comparação com curvas da literatura e com medições realizadas em laboratório, apresentando resultados satisfatórios.

Palavras chave: Simulação Computacional, Ferramenta Didática, Máquinas Elétricas de Corrente Contínua.

ABSTRACT

The electric machines are present in almost all the activities that involve the manipulation of loads in industrial, commercial and residential environments. Therefore, the study of the operation of these devices is fundamental for several undergraduate courses, such as the course of electrical engineering and automation, for example. In this context, the association between theoretical and practical knowledge assists in the study of students and in the way teachers teach. However, it is often not possible to perform all theoretical situations in laboratories. In these cases, the use of computer simulation appears as an efficient tool, able to present the fundamental curves, in all the existing load conditions, for the study of the machines in a didactic way. In this context, this work presents the development of a simulation program for the behavior of DC electric machines, performed in the *MATLAB®* tool, which presents the characteristic output curves of the five main configurations of DC machines (independent excitation, *shunt*, series, cumulative compound and differential compound). The model developed is based on the equations of permanent regime of such equipment and the objective was to obtain curves of practical interest, easily found in the main literature of the field. To make the experience of using the program more educational and functional, a graphic interface was developed with the *GUIDE* of *MATLAB®*. The computational tool is validated by means of comparison with curves of the literature and with measurements made in the laboratory, showing satisfactory agreement.

Keywords: Computational Simulation, Didactic Tool, Direct Current Electric Machines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circuito equivalente da máquina excitação independente	20
Figura 2 - Circuito equivalente da máquina <i>shunt</i>	20
Figura 3 - Circuito equivalente da máquina série	21
Figura 4 - Circuito equivalente da máquina composta	21
Figura 5 - Análise gráfica do gerador <i>shunt</i>	23
Figura 6 - Análise gráfica do gerador composto cumulativo.....	25
Figura 7 - Análise gráfica do gerador composto diferencial	25
Figura 8 - Obtenção gráfica da tensão de saída do gerador composto cumulativo...26	
Figura 9 - Obtenção gráfica da tensão de saída do gerador composto diferencial ...26	
Figura 10 - Máquina utilizada nos testes em laboratório	31
Figura 11 - Fluxograma do algoritmo dos motores excitação independente e <i>shunt</i> 34	
Figura 12 - Fluxograma do algoritmo do motor série.....	34
Figura 13 - Fluxograma do algoritmo dos motores compostos cumulativo e diferencial	35
Figura 14 - Fluxograma do algoritmo do gerador excitação independente.	35
Figura 15 - Fluxograma do algoritmo do gerador <i>shunt</i>	36
Figura 16 - Fluxograma do algoritmo do gerador série	36
Figura 17 - Fluxograma do algoritmo dos geradores compostos cumulativo e diferencial.....	37
Figura 18 - Interface inicial	38
Figura 19 - Interface principal.....	39
Figura 20 - Dados de entrada.....	40
Figura 21 - Ferramentas de controle gráfico	41
Figura 22 - Visualização da máquina	42
Figura 23 - Instruções principais	42
Figura 24 - Sobre o programa	43
Figura 25 - Simulação das curvas de saída dos geradores excitação independente (vermelha pontilhada) e <i>shunt</i> (preta contínua).....	46
Figura 26 - Comparação entre as curvas de saída dos geradores <i>shunt</i> e excitação independente	46

Figura 27 - Simulação das curvas de saída do gerador composto cumulativo com 75 (em azul), 100 (em vermelho) e 150 (em verde) espiras em série	47
Figura 28 - Curvas teóricas de saída dos geradores composto cumulativos	48
Figura 29 - Simulação das curvas de saída dos geradores composto diferencial (em vermelho) e shunt (em azul).....	49
Figura 30 - Curva de saída teórica do gerador composto diferencial	49
Figura 31 - Curvas de saída do gerador excitação independente: simulada (azul contínua) e prática (preta pontilhada)	50
Figura 32 - Curvas de saída do gerador <i>shunt</i> : simulada (azul contínua) e prática (preta pontilhada)	51
Figura 33 - Curvas de saída do gerador série: simulada (azul contínua) e prática (preta pontilhada)	52
Figura 34 - Simulação do gerador série para uma faixa maior de valores	53
Figura 35 - Curva de saída teórica do gerador série	53
Figura 36 - Simulação das curvas de saída dos motores <i>shunt</i> (vermelha pontilhada) e composto cumulativo (azul contínua).....	54
Figura 37 - Comparação entre as curvas de saída teóricas dos motores composto cumulativo e derivação ou shunt.....	55
Figura 38 - Simulação do controle de velocidade por resistência de campo do motor shunt	56
Figura 39 - Curvas teóricas do controle de velocidade por resistência de campo do motor shunt	56
Figura 40 - Simulação do controle de velocidade por tensão de entrada do motor shunt	57
Figura 41 - Curvas teóricas do controle de velocidade por tensão de entrada do motor shunt	57
Figura 42 - Simulação do controle de velocidade por resistência de armadura do motor shunt	58
Figura 43 - Curvas teóricas do controle de velocidade por resistência de armadura do motor shunt	59
Figura 44 - Simulação da curva de saída dos motores excitação independente e <i>shunt</i>	60
Figura 45 - Curva teórica de saída dos motores excitação independente e <i>shunt</i>	60
Figura 46 - Curva de saída do motor série do exemplo teórico.....	62

Figura 47 - Simulação da curva de saída do motor série do exemplo teórico	63
Figura 48 - Simulação da curva de saída do motor série do laboratório	64
Figura 49 - Curva teórica de saída do motor série	64
Figura 50 - Simulação da curva de saída do motor composto diferencial	65
Figura 51 - Curva de saída teórica do motor composto diferencial	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados nominais da máquina.....	32
Tabela 2 - Curva de magnetização do motor série.....	61
Tabela 3 - Dados para o levantamento da curva de magnetização da máquina.....	73
Tabela 4 - Dados de saída do gerador em excitação independente	74
Tabela 5 - Dados de saída do gerador em derivação	74
Tabela 6 - Dados de saída do gerador série	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	15
1.1.1	Relevância do Trabalho	16
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	Estrutura do Trabalho	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Máquinas de Corrente Contínua	18
2.1.1	Máquinas em Excitação Independente e <i>Shunt</i>	22
2.1.2	Máquina Série	23
2.1.3	Máquina Composta em Derivação Longa	24
2.1.4	Regulação de Tensão e Velocidade	27
2.2	Modelagem de Máquinas CC	28
2.3	Ferramentas Utilizadas na Simulação de Máquinas CC	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	Modelagem dos Motores de Corrente Contínua	32
3.2	Desenvolvimento da Interface	37
3.2.1	Interface de Inicialização	37
3.2.2	Interface Principal	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Resultados dos Geradores CC	45
4.1.1	Geradores em Excitação Independente e <i>Shunt</i>	45
4.1.2	Geradores Compostos Cumulativo e Diferencial	47
4.2	Validação dos Geradores CC	50
4.2.1	Gerador CC em Excitação Independente	50
4.2.2	Gerador CC <i>Shunt</i>	51
4.2.3	Gerador CC Série	51
4.3	Resultados dos Motores CC	54
4.3.1	Motores CC Composto Cumulativo e <i>Shunt</i>	54
4.3.2	Controle de Velocidade do Motor <i>Shunt</i>	55
4.4	Validação dos Motores CC	59
4.4.1	Motores em Excitação Independente e <i>Shunt</i>	59
4.4.2	Motor Série	61

4.4.3 Motor Composto Diferencial.....	65
5 CONCLUSÃO.....	67
5.1 Trabalhos Futuros.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas são dispositivos conversores de energia que estão presentes em quase todas as aplicações industriais e atividades que envolvem a manipulação de cargas. As máquinas podem ser classificadas, conforme o seu tipo de alimentação, em máquinas de corrente contínua (CC) ou máquinas de corrente alternada (CA). Ambas encontram aplicações em diferentes atividades (FOWLER, 2013). No que diz respeito às máquinas elétricas, existe ainda uma classificação conforme o fluxo de energia da mesma, em motores (conversão de energia elétrica em mecânica) ou geradores (conversão da energia mecânica em elétrica). No caso das máquinas de corrente contínua, há uma classificação dos motores e geradores conforme a alimentação do seu enrolamento de campo em: excitação independente, série, *shunt* e composto cumulativo ou diferencial (KOSOW, 2000; FITZGERALD et al., 2014).

Devido à sua versatilidade, as máquinas de corrente contínua encontram grande aplicação, principalmente como motores, em atividades como laminação de metal, indústria têxtil, prensas, veículos de tração, guinchos e guindastes, dentre outros (DEL TORO, 1999).

O estudo das máquinas de corrente contínua engloba conhecimentos a respeito do seu princípio de funcionamento, tipos de acionamentos e avaliação de suas características para diferentes condições de carga. Muitas vezes, o ensino de conhecimentos desta natureza é de difícil compreensão por parte dos alunos, principalmente no que diz respeito à associação entre conhecimentos teóricos e práticos (FARIAS, 2017).

O modelo de ensino adotado na educação de engenharia e encontrado na maioria das universidades é fortemente dependente do professor, das técnicas de ensino e dos recursos institucionais. Na busca por técnicas de ensino e de aprendizagem mais eficientes, os professores buscam ensinar os conceitos teóricos associados a habilidades práticas e, neste contexto, o uso de simulação computacional como ferramenta pedagógica está cada vez mais presente nas práticas docentes, possibilitando uma dinâmica de ensino que promove um aprendizado mais significativo e motivador (KHALIL, 2012; LODER et al., 2007).

Na engenharia elétrica, as ferramentas computacionais são muito utilizadas para simulação de problemas e na modelagem de equipamentos e sistemas. No entanto, muitas vezes, essas ferramentas não são exploradas como método de aprendizagem nas universidades, sendo aplicadas em poucas disciplinas do curso. Uma das razões que limita a utilização de tais ferramentas é que o desenvolvimento da modelagem dos equipamentos e sistemas requer um tempo de estudo que normalmente é incompatível com a carga horária e ementa das disciplinas.

Assim, o desenvolvimento prévio de ferramentas computacionais capazes de simular o comportamento de sistemas e equipamentos para diferentes situações pode tornar a utilização da simulação computacional uma ferramenta de aprendizagem viável para algumas disciplinas (MARCHETTO et al., 2016). Neste caso, a modelagem de tais dispositivos permitiria ao aluno uma visualização do comportamento de tais máquinas em situações que não são possíveis em laboratório. Além disso, é possível confrontar os conhecimentos teóricos, com as medições práticas de bancada e com os resultados obtidos pela simulação. Esse tipo de abordagem, além de desenvolver habilidades computacionais, estimula e motiva a aprendizagem dos alunos (PEREIRA, 2016; BELHOT et al., 2001).

Diante do exposto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um programa de simulação do comportamento de máquinas elétricas de corrente contínua, implementado no *software MATLAB®*, que apresenta as curvas características de saída das cinco principais configurações (excitação independente, *shunt*, série, composto cumulativo e composta diferencial), integrado a uma interface gráfica elaborada com a ferramenta *GUIDE* do próprio *software*, a fim de tornar a experiência de uso do programa mais didática e funcional.

Vale destacar que a intenção do modelo está na operação de tais dispositivos em regime permanente e na extração de curvas características práticas encontradas nas bibliografias utilizadas para o ensino destas máquinas. A maioria dos artigos encontrados na literatura utiliza o modelo da máquina de corrente contínua no domínio do tempo e apresenta como resultados, curvas dinâmicas, formas de onda de tensões, torques e correntes (ALVARADO, 2012; CRESPO et al., 2010; MELO, 2006; YILDIZ, 2012). Tais resultados são relevantes para o estudo das máquinas elétricas de corrente contínua, no entanto, as curvas obtidas neste trabalho mostram-se mais adequadas didaticamente.

1.1 Justificativa

A busca por melhorias nos métodos de ensino e aprendizagem deve ser constante para aumentar a compreensão das teorias associadas ao funcionamento de máquinas elétricas, dispositivos eletromagnéticos estáticos e não estáticos, e diminuir o índice de reprovação dos alunos (PEREIRA et al., 2016).

A realização de simulações permite uma compreensão clara do funcionamento de diferentes tipos de máquinas elétricas estudadas nos cursos de engenharia elétrica, sem a necessidade da implementação prática de montagens que podem, muitas vezes, ser complexas e caras. Analogamente, utilizam-se simulações em quase todas as atividades industriais, seja para construção e desenvolvimento de um equipamento, ou na análise do comportamento de um determinado dispositivo sob diferentes situações de operação. Assim, o desenvolvimento de habilidades de programação e simulação de sistema, torna-se importante tanto no ambiente acadêmico, quanto no ambiente de trabalho.

As máquinas elétricas são os principais equipamentos utilizados nos ambientes industriais para acionamento de cargas mecânicas, o que torna o seu aprendizado fundamental para os cursos de engenharia elétrica. Para um aprendizado completo e eficiente na área de máquinas elétricas, é necessário introduzir nas ementas das disciplinas a parte de simulação, permitindo que o aluno consiga simular e analisar os resultados buscando as melhores condições de operação do sistema sob estudo (BOTURA; DUARTE; VERALDO, 2016).

Desta forma, o acesso a uma interface gráfica de fácil manipulação, capaz de simular quaisquer condições de carga nas diversas configurações de máquinas CC, projetando resultados coerentes com as curvas características de interesse didático, abre um leque de possibilidades de testes a serem realizados pelo aluno e potencializa seu aprendizado.

1.1.1 Relevância do Trabalho

A relevância do trabalho proposto está na elaboração de uma ferramenta de simulação computacional de máquinas elétricas CC, que forneça resultados e curvas alinhadas com o interesse didático, para complementar as aulas de laboratório de disciplinas dos cursos de engenharia elétrica, como, por exemplo, Máquinas e Acionamentos Elétricos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional didática para simulação do comportamento de máquinas elétricas de corrente contínua em regime permanente.

1.2.2 Objetivos Específicos

São definidos os seguintes objetivos específicos para a consolidação do objetivo geral:

1. Revisão dos modelos matemáticos existentes.
2. Escolha do modelo mais apropriado para as máquinas de corrente contínua.
3. Escolha do *software* de programação mais adequado para implementação dos modelos escolhidos.
4. Desenvolvimento da ferramenta computacional.
5. Medições em laboratório e comparação com os resultados obtidos computacionalmente.
6. Desenvolvimento da interface com o usuário.
7. Validação do modelo proposto e da ferramenta desenvolvida.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho de conclusão de curso é composto por 5 capítulos. No capítulo 1, é realizada uma introdução do trabalho, com as justificativas e relevância do tema sob estudo, bem como a descrição dos objetivos gerais e específicos. O capítulo 2 apresenta o referencial teórico que embasa o trabalho e mostra os principais conceitos necessários para sua compreensão. Já o capítulo 3, descreve o passo a passo da metodologia utilizada e a interface gráfica desenvolvida. No capítulo 4, são explanados e discutidos os resultados alcançados, que incluem as modelagens, as implementações computacionais e as validações de cada configuração de máquina CC. Por fim, o capítulo 5 conclui a obra e mostra o nível de assertividade dos resultados em relação ao objetivo principal.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Máquinas de Corrente Contínua

A principal aplicação das máquinas de corrente contínua é como motores devido a facilidade de controle de velocidade sob diversas condições e carga. Em comparação com outras máquinas elétricas, o motor CC apresenta relativa complexidade construtiva e, por conseguinte, baixa robustez de operação (AGUIAR, 2009).

Com a evolução da eletrônica de potência, os motores de corrente contínua vêm sendo substituídos por motores de indução trifásicos, no entanto, em algumas aplicações, os motores CC ainda são a escolha mais adequada (BOTURA; DUARTE; VERALDO, 2016).

Os motores de corrente contínua possuem enrolamentos de campo localizados no estator que são alimentados por corrente contínua, criando um campo magnético fixo. Os enrolamentos de armadura também são alimentados com corrente contínua, e a interação entre os condutores da armadura com o campo magnético fixo criado no estator produz o torque mecânico que é disponibilizado no eixo da máquina (KOSOW, 2000). As principais configurações de excitação das máquinas CC são: série, paralelo e composta, sendo a forma como o enrolamento de campo é excitado, a diferença para cada configuração.

Quando é necessária potência em corrente contínua, pode-se utilizar um gerador CC ou um gerador CA associado a retificadores. Apesar de esta última opção ser tendência nas aplicações, o gerador CC ainda apresenta uma vantagem que consiste na sua possibilidade de atuar também como motor apenas invertendo o fluxo de energia. Segundo Sleon (2016), para que seja realizado o mesmo processo na máquina CA com retificadores, é preciso equipá-la com um sistema mais complexo.

No gerador CC, o enrolamento de campo é excitado com corrente contínua. Quando o enrolamento de armadura, presente no rotor e submetido à rotação do torque de entrada, corta as linhas de força geradas no estator, uma força eletromotriz com característica senoidal é induzida na armadura. Por meio da retificação mecânica

realizada pelo comutador, a tensão alternada é transformada em contínua e entregue à carga (CREPPE; SIMONE, 2002).

O modelo elétrico que representa o comportamento das máquinas de corrente contínua é baseado na interação entre o estator e o rotor da máquina. Operando como gerador ou como motor, o modelo de circuito equivalente é representado com parâmetros de resistências e fonte de tensão, pois em regime permanente as indutâncias podem ser negligenciadas (GLOWACZ; GLOWACZ, 2007). Também devido ao aspecto construtivo, variações paramétricas de ordem elétrica não são observadas (COSTA et al, 2008).

Neste trabalho, a modelagem desenvolvida é baseada nos parâmetros do circuito elétrico equivalente, com intuito de obter curvas de interesse prático para o estudo de tais equipamentos. O modelo elétrico simples é derivado da constituição básica do motor CC que se resume na interação de duas estruturas magnéticas controladas ou excitadas eletricamente de forma direta.

A possibilidade de excitação dos campos *shunt* e série, juntos ou independentes, torna viável a implementação de configurações de máquinas com características distintas. Existem basicamente quatro formas de excitação dos campos série e *shunt*: excitação independente, *shunt*, série e composta. No circuito equivalente, para a máquina operando como motor, a corrente de armadura circula da armadura para os terminais de saída. Já como gerador, a corrente flui no sentido inverso (VILLAR, 2006).

As Figuras 1 a 4 mostram os circuitos equivalentes de cada configuração de máquina e as equações que estabelecem as principais relações oriundas dos respectivos circuitos equivalentes e das análises pertinentes a cada máquina. As Equações (1), (2), (3), (10) e (15) são relativas ao funcionamento da máquina CC como gerador. Já as Equações (4), (5), (6), (8), (9) e (11), estão associadas ao funcionamento como motor. As Equações (7), (12), (13) e (14) são válidas para ambos os modos de operação. Vale ressaltar que as equações de torque desprezam as perdas rotacionais.

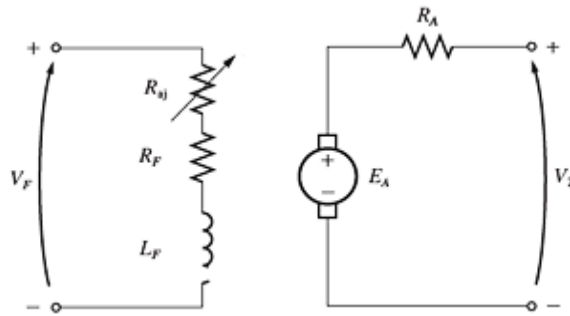


Figura 1 - Circuito equivalente da máquina excitação independente
Fonte: Chapman, 2013

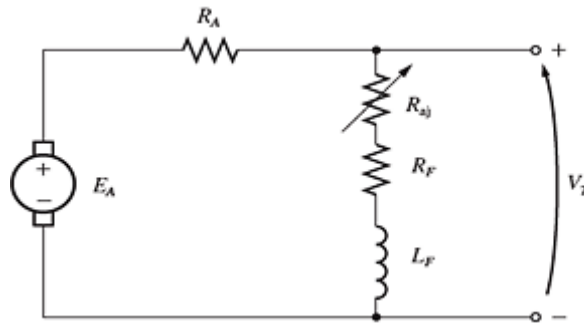


Figura 2 - Circuito equivalente da máquina *shunt*
Fonte: Chapman, 2013.

$$V_T = E_A - I_A R_A \quad (1)$$

$$R_F = \frac{V_T}{I_F} \quad (2)$$

$$E_A - V_T = I_A R_A \quad (3)$$

$$T_{Des} = \frac{K_e}{R_A} (V_T - K_e \omega_m) \quad (4)$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \quad (5)$$

$$E_A = V_T - I_A R_A \quad (6)$$

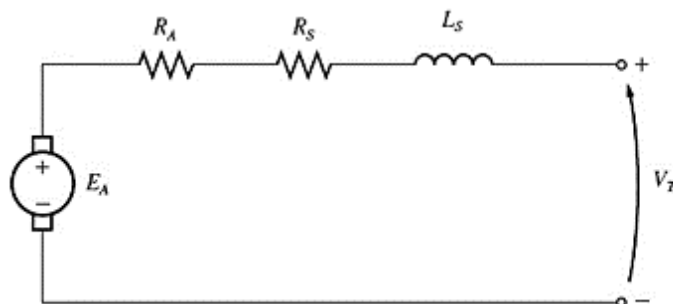


Figura 3 - Circuito equivalente da máquina série
Fonte: Chapman, 2013.

$$F_{MM} = N_{SE} I_A \quad (7)$$

$$T_{Des} = \frac{E_A I_A}{\omega_m} \quad (8)$$

$$E_A = V_T - I_A (R_A + R_S) \quad (9)$$

$$V_T = E_A - I_A (R_A + R_S) \quad (10)$$

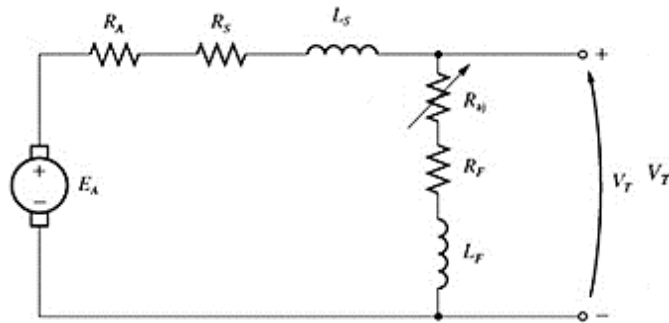


Figura 4 - Circuito equivalente da máquina composta
Fonte: Chapman, 2013.

$$E_A = V_T - I_A (R_A + R_S) \quad (11)$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \quad (12)$$

$$I_{eq} = \frac{N_{SE}}{N_F} I_A \quad (13)$$

$$I_F^* = I_F \pm I_{eq} \quad (14)$$

$$V_T = E_A - I_A (R_A + R_S) \quad (15)$$

Nas Equações (1) a (15): V_F , I_F e R_F é a tensão, a corrente e a resistência no enrolamento de campo; E_A , R_A e I_A é a tensão induzida, a resistência e a corrente de armadura; V_T é a tensão terminal; ω_m é a velocidade angular do rotor; T_{Des} é o torque desenvolvido; F_{MM} é a força magnetomotriz; N_{SE} e N_F é o número de espiras por polo no enrolamento série e *shunt*; R_S é a resistência do enrolamento série; I_{eq} e I_F^* é a corrente equivalente e a corrente efetiva total do campo em derivação; K_e é uma constante da máquina, que pode ser calculada por E_A/ω_n (Chapman, 2013; Hambley, 2014).

A seguir, da seção 2.1.1 à 2.1.3, as características principais de cada configuração de máquina são comentadas, relacionando-as aos seus respectivos circuitos equivalentes e equações de modelagem.

2.1.1 Máquinas em Excitação Independente e *Shunt*

A curva de saída dos motores excitação independente e *shunt* é representada por uma curva linear decrescente, como pode ser analisado por meio da Equação (4).

A Equação (1) evidencia como a tensão de saída do gerador em excitação independente é influenciada pela queda de tensão na armadura. A característica terminal desta máquina diferencia-se da tensão de saída constante devido à queda na resistência de armadura. Assim, a curva se apresenta como uma reta linear que decresce a partir da tensão a vazio ao longo da variação de carga. Segundo Hambley (2014), uma das vantagens do gerador em excitação independente consiste na possibilidade de variação da sua tensão de saída para uma ampla faixa de valores de ajuste da corrente de campo.

Como vantagem em relação ao gerador em excitação independente, o gerador *shunt* não necessita de fonte externa para alimentar seu enrolamento de campo. A tensão gerada inicial surge nesta máquina devido ao seu fluxo magnético residual (DIAS; LOBOSCO, 1988). No entanto, o gerador *shunt* demonstra pior nível de regulação de tensão, tendo em vista que, além da queda de tensão na armadura, há também o enfraquecimento de campo causado pela diminuição da corrente de campo *shunt*, que contribui com o decréscimo da tensão de saída.

No gerador *shunt*, a corrente de campo da máquina depende de sua tensão terminal. Assim, a obtenção de sua característica de saída necessita, além das Equações (2) e (3), de uma análise gráfica como a ilustrada na Figura 5, onde são indicadas duas curvas que relacionam a corrente de campo com a tensão induzida e com a tensão terminal. A Equação (3) mostra que a diferença entre a tensão de magnetização e a tensão de saída resulta no produto entre a corrente e a resistência de armadura. Esta observação está ilustrada na Figura 5, na qual a queda $I_A R_A$ é mostrada entre as curvas.

Para que a tensão terminal do gerador *shunt* seja encontrada, é preciso localizar no gráfico em qual ponto a queda $I_A R_A$ se encaixa perfeitamente entre as curvas para uma determinada carga. Neste ponto, a tensão indicada pela curva linear equivale à tensão terminal da máquina. Podem ser encontrados no máximo dois

pontos em cada caso. Quando isto ocorre, a tensão terminal consiste no ponto que está mais próximo da tensão à vazio da máquina (CHAPMAN, 2013).

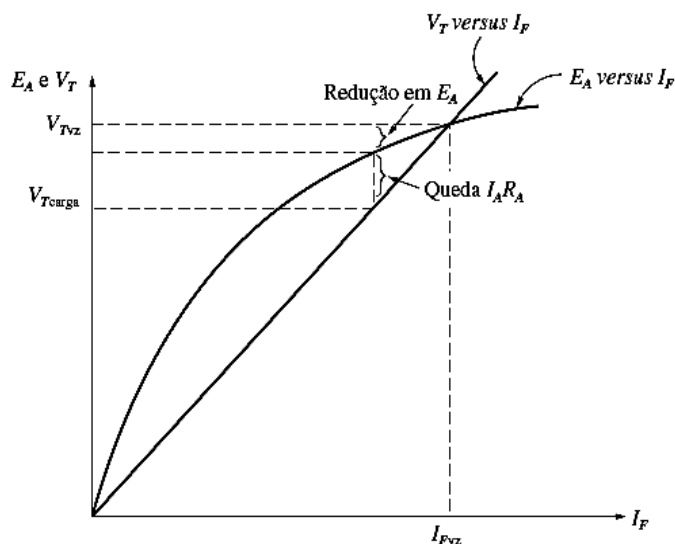


Figura 5 - Análise gráfica do gerador *shunt*
Fonte: Chapman, 2013.

2.1.2 Máquina Série

A máquina série possui enrolamento de campo com número relativamente baixo de espiras e resistência pequena em série com o enrolamento de armadura (CARVALHO, 2007). Assim, a corrente de armadura, de campo e de carga são sempre as mesmas.

Na partida, o motor série tende a atingir valores altíssimos de torque e a vazio sua velocidade dispara. O torque de partida torna-se limitado devido aos efeitos de saturação da máquina. A velocidade sem carga restringe-se devido às perdas rotacionais causadas pela resistência do ar e pelas correntes de fuga que aumentam com o acréscimo da velocidade (CHAPMAN, 2013). No entanto, a velocidade a vazio pode se tornar perigosa a ponto de requisitar dispositivos de remoção de potência elétrica, nos casos em que a carga é desconectada (MATSH, 1972).

A característica terminal do gerador série se assemelha à curva de magnetização das máquinas CC. Como a vazio não há corrente de campo, a tensão apresentada nesta condição é proveniente do fluxo residual presente na máquina (VILLAR, 2006).

Com o aumento de carga, a princípio, E_A prevalece sobre a queda de tensão nas resistências de armadura e série, e a tensão terminal aumenta. Quando a máquina atinge a saturação e E_A se torna aproximadamente constante, o efeito da queda nas resistências passa a prevalecer e a tensão terminal tende a cair. Este efeito, associado à reação de armadura da máquina, provoca uma queda brusca na tensão até que ela atinge valor nulo para determinado valor de carga (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

2.1.3 Máquina Composta em Derivação Longa

As máquinas CC compostas possuem tanto os enrolamentos série quanto o enrolamento *shunt* na sua conexão. Na configuração composta com *shunt* curto, o campo em derivação é conectado em paralelo aos terminais da armadura, já na composta com *shunt* longo, o campo série é conectado diretamente à armadura e o campo *shunt* é ligado ao campo série, conforme apresentado na Figura 4. Se os efeitos de ambos os campos se somarem, diz-se que a máquina é composta cumulativa. No entanto, se o efeito do campo série for subtraído do campo *shunt*, a máquina é classificada como composta diferencial (HUBERT, 1991).

Como mencionado em Fraile (2003), pode-se considerar que o motor composto cumulativo reúne as vantagens do motor *shunt* e do motor série. Na partida, ele apresenta torque considerável, assim como o motor série. A vazio, sua velocidade não dispara indefinidamente, assim como o motor *shunt*.

No motor composto diferencial, quando a corrente de armadura aumenta, o fluxo diminui. Esta diminuição provoca o aumento da velocidade que, por sua vez, faz com que a corrente drenada de carga aumente ainda mais, o que amplifica I_A , diminui o fluxo e, conseqüentemente, colabora com o aumento da velocidade. Desta forma, a velocidade deste tipo de motor tende a disparar com o aumento de carga, tornando-o instável e inadequado para aplicações práticas (VILLAR, 2006).

Assim como no gerador *shunt*, a obtenção da característica de saída do gerador composto necessita também de uma análise gráfica, devido ao fato de que os parâmetros de entrada do gerador composto dependem diretamente da saída (a corrente de campo *shunt* depende da tensão terminal).

No gerador composto, a queda de tensão total nas resistências série e de armadura depende da corrente de armadura, assim como a corrente equivalente I_{eq} , definida na Equação (14). Ambas (queda $I_A(R_A+R_S)$ e I_{eq}) formam os dois lados de um triângulo no gráfico que relaciona a curva de magnetização, na velocidade de acionamento considerada, e a curva linear de R_F , como mostram as Figuras 6 e 7. O ponto onde este triângulo se encaixa perfeitamente entre a reta da resistência *shunt* e a curva de magnetização determina a tensão terminal do gerador (CHAPMAN, 2013).

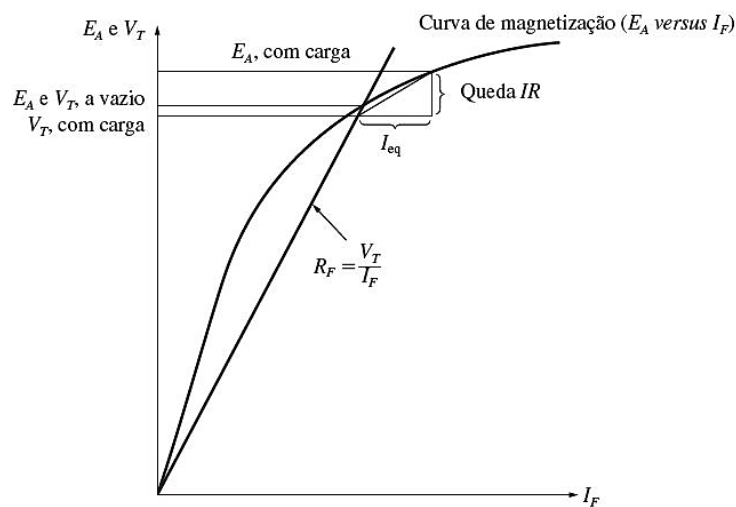


Figura 6 - Análise gráfica do gerador composto cumulativo
Fonte: Chapman, 2013.

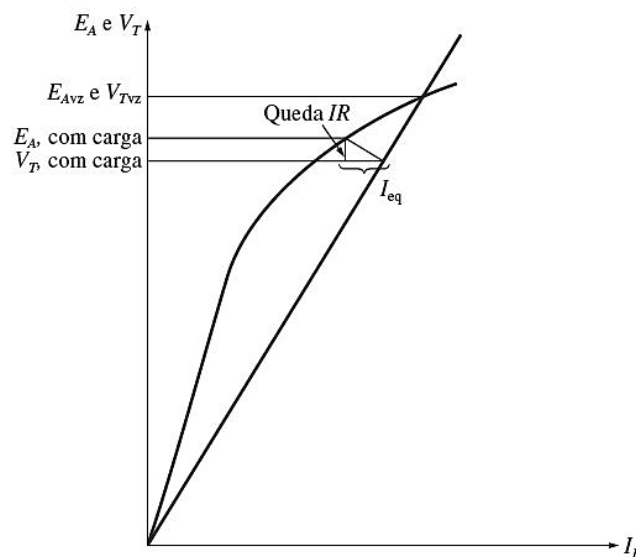


Figura 7 - Análise gráfica do gerador composto diferencial
Fonte: Chapman, 2013.

As Figuras 8 e 9 ilustram a forma como é realizada a construção gráfica da curva característica de saída do gerador composto cumulativo e diferencial,

respectivamente. Nas duas figuras é possível observar que, em cada ponto onde o triângulo se encaixa, a tensão V_T é coletada e definida como a tensão terminal.

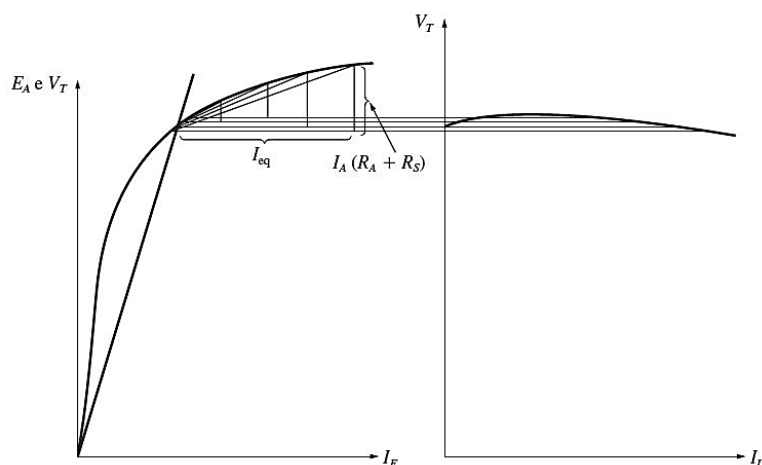


Figura 8 - Obtenção gráfica da tensão de saída do gerador composto cumulativo
Fonte: Chapman, 2013.

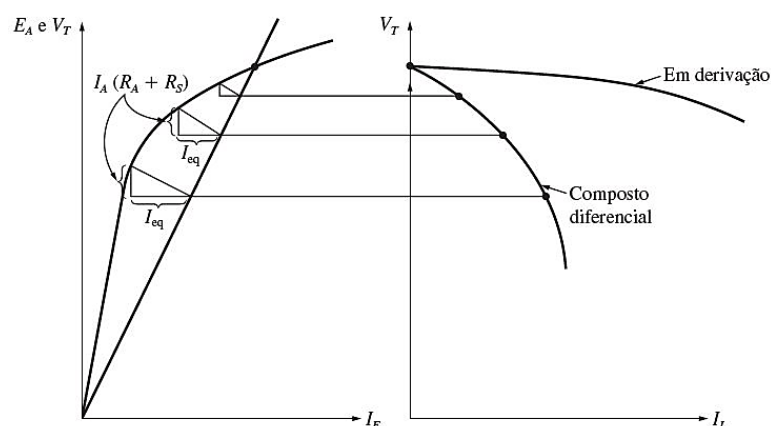


Figura 9 - Obtenção gráfica da tensão de saída do gerador composto diferencial
Fonte: Chapman, 2013.

O gerador composto cumulativo pode ser classificado como hipocomposto, normal ou hipercomposto. O primeiro é caracterizado por possuir baixo número de espiras por polo no enrolamento série. A vazia, sua tensão coincide com o valor da tensão nominal da máquina, mas, com o aumento de carga, a tensão decresce e, em carga plena, apresenta tensão inferior à nominal. O gerador cumulativo normal possui valor maior que o anterior de espiras série e, com o aumento de carga, sua tensão se eleva, porém, a plena carga, atinge o valor nominal da máquina. Já o hipercomposto possui número de espiras série superior ao gerador normal e, além de sua tensão aumentar com o acréscimo de carga, ela assume valor acima do nominal a plena carga (DEL TORO, 1999).

No gerador composto diferencial, com o aumento da carga, a tensão tende a cair devido à queda resistiva e também pela diminuição da força magnetomotriz (a força magnetomotriz do campo série aumenta e esta é subtraída da força magnetomotriz do campo *shunt*). A partir deste efeito de superposição, a tensão da máquina cai drasticamente, apresentando uma regulação de tensão consideravelmente mais pobre que a do gerador *shunt*, como pode ser visto na Figura 9.

2.1.4 Regulação de Tensão e Velocidade

A regulação de tensão e de velocidade são parâmetros muito importantes para avaliar o desempenho de motores e geradores. Em algumas aplicações, é necessário que a tensão ou a velocidade de saída mantenha-se aproximadamente constante com o aumento de carga (HAMBLEY, 2014). Para avaliar o nível de variação destes parâmetros, pode-se calcular a sua regulação, apresentadas nas Equações (16) e (17).

$$\text{Regulação de Tensão} = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \quad (16)$$

$$\text{Regulação de Velocidade} = \frac{n_{NL} - n_{FL}}{n_{FL}} \quad (17)$$

Nas Equações (16) e (17): V_{NL} é a tensão sem carga, V_{FL} é a tensão de carga plena (i.e., com corrente de carga nominal máxima), n_{NL} é a velocidade sem carga e n_{FL} é a velocidade de carga plena (HAMBLEY, 2014).

Assim, uma regulação positiva, mostra que o parâmetro decresce com o aumento de carga, e uma regulação negativa, mostra que ele se eleva com o mesmo aumento. Um valor pequeno de regulação é considerado melhor, no sentido de que a tensão ou a velocidade de saída da máquina se mantém mais constante (KOSOW, 2000).

2.2 Modelagem de Máquinas CC

A maioria dos trabalhos que abordam a modelagem de máquinas CC fundamenta suas análises no modelo básico de máquina CC, no qual a máquina funciona sob excitação independente (ALVARADO, 2012; ILDIZ, 2012; PINHEIRO, 2017; ZACCARIAN, 2017). A modelagem pode ser realizada sob o ponto de vista do motor controlado pela corrente de campo e do motor controlado pela corrente de armadura (PINHEIRO, 2017). No caso em que o motor é controlado pela corrente de armadura, ou seja, quando a corrente de campo é considerada constante, o modelo equivale ao de um motor CC de ímã permanente (KENZO, 2015). No gerador CC, o modelo básico difere da representação matemática do motor CC apenas devido à mudança de sinal da corrente de armadura e ao fato de que, ao invés da variação do torque de carga, considera-se a variação da impedância de carga (HEY, 1997).

Tradicionalmente, são utilizadas as seguintes hipóteses simplificadoras na modelagem de máquinas de corrente contínua: (i) a saturação magnética é desprezível, (ii) a força magnetomotriz da armadura não tem componente segundo o eixo direto, (iii) a comutação é um fenômeno linear e (iv) os enrolamentos de interpolos não introduzem variações na corrente de armadura. Em conjunto, essas hipóteses desconsideram o efeito da reação de armadura, que é importante em casos específicos que envolvem o regime transitório (MELO, 2006). Além disso, em análises de regime permanente para máquinas CC, as indutâncias do circuito de armadura e do circuito de campo podem ser negligenciadas, uma vez que a indutância pode ser modelada como um curto-circuito (PINHEIRO, 2017).

Assim sendo, considera-se conveniente adotar as simplificações citadas acima no desenvolvimento da modelagem proposta, uma vez que o objetivo é modelar o comportamento em regime permanente.

2.3 Ferramentas Utilizadas na Simulação de Máquinas CC

Segundo Aguiar (2009), o *MATLAB*® tem se mostrado um *software* computacional eficiente para modelagem e simulação dos motores de corrente contínua. O *SIMULINK* é uma ferramenta para a modelagem, simulação e análise de

sistemas dinâmicos que oferece alta integração com o ambiente *MATLAB*®. Esta ferramenta consegue executar simulação em tempo contínuo, de sistemas lineares e não-lineares (ALVARADO, 2012).

Além disso, o *SIMULINK* fornece uma interface para a construção de modelos de diagramas de blocos, e pode ser sincronizada com a *GUIDE* do *MATLAB*® (WEBER, 2015). No entanto, a sincronização entre a programação realizada diretamente em linhas de código no *prompt* do *MATLAB*® e a interface mostra-se consideravelmente mais simples e flexível.

A facilidade que o diagrama de blocos do *SIMULINK* fornece ao usuário representa uma mudança radical em relação aos pacotes de simulação anteriores que exigiam a formulação de equações diferenciais em uma determinada linguagem. Após a definição de um modelo, é possível realizar a simulação por meio do próprio *SIMULINK* ou através de comandos introduzidos diretamente na área de trabalho do *MATLAB*®. Utilizando-se blocos específicos da ferramenta, pode-se visualizar os resultados da simulação enquanto está sendo executada. Esses resultados podem ser transferidos para o espaço de trabalho do *MATLAB*®, a fim de posterior processamento e visualização (ALVARADO, 2012). Além de tudo isso, como o *MATLAB*® é um *software* comercial, ele possui alta confiabilidade de resultados.

O *ECOSIMPRO*, apesar de mostrar-se uma ferramenta com menos potencialidades em relação ao *MATLAB*®, também apresenta vantagens para a simulação de sistemas dinâmicos, tais como: elevado nível de abstração; permite implementar modelos sofisticados de forma simples; possui uma ferramenta de desenho (*EcoDiagram*) e uma ferramenta de visualização de resultados (PERUCHO, 2010).

Os *softwares* *Xcos-Scilab* e *Open Modelica* representam uma alternativa *open source* em relação a *softwares* comerciais, como o *MATLAB*® e o *ECOSIMPRO*, para a simulação de máquinas de corrente contínua (CRESPO, 2010).

Devido às vantagens citadas acima, à facilidade de acesso e à familiaridade com o *software*, o *MATLAB*® foi a ferramenta escolhida para o desenvolvimento deste trabalho.

3 METODOLOGIA

Inicialmente é realizada uma revisão dos modelos matemáticos e a escolha do mais apropriado para máquinas de corrente contínua, considerando a finalidade didática do *software*. Assim, são adotados os modelos resultantes das simplificações comentadas na seção 2.2, como a desconsideração das indutâncias no circuito equivalente.

Os modelos matemáticos descritos na seção 2.1, considerando-se todas as simplificações admitidas, são implementados no ambiente *MATLAB®* para obtenção da ferramenta computacional. A rotina é criada por meio de linhas de código inseridas diretamente no *prompt* do *MATLAB®*. Assim, a comunicação do código com a ferramenta de interface gráfica, *GUIDE*, tornou-se mais simples que a interação apresentada pelo *Simulink* com a mesma. É desenvolvida uma função computacional para cada configuração de máquina a ser implementada, baseada nas equações matemáticas desenvolvidas na seção 2.1, resultando no total de dez funções.

A Equação (18) apresenta a relação entre as tensões induzidas na armadura e suas correspondentes velocidades de operação, para distintas condições. Esta equação explicita a proporcionalidade entre as duas grandezas, tornando-se essencial para a modelagem de todas as configurações de máquinas CC.

$$\frac{E_{A1}}{E_{A2}} = \frac{n_1}{n_2} \quad (18)$$

Na Equação (18): E_{A1} e E_{A2} é a tensão de magnetização nas velocidades n_1 e n_2 , respectivamente (Hambley, 2014).

Adicionalmente, as Equações (19) e (20) são utilizadas como base para o desenvolvimento da modelagem dos geradores e motores CC. A Equação (19) relaciona a tensão induzida na armadura com a velocidade de operação da máquina, enquanto a Equação (20) relaciona a corrente de armadura com o torque desenvolvido.

$$E_A = K\phi\omega_m \quad (19)$$

$$T_{Des} = K\phi I_A \quad (20)$$

Nas Equações (19) e (20): K é uma constante que depende dos parâmetros de projeto da máquina e Φ é o fluxo magnético produzido por cada polo do estator (Hambley, 2014).

Para que o modelo apresente curvas de interesse prático que possam reproduzir os resultados experimentais verificados nas práticas laboratoriais, é necessário o conhecimento prévio da curva de magnetização de cada máquina. Esta é obtida por meio de ensaios em uma das máquinas CC do laboratório de Máquinas Elétricas do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) - *Campus* Formiga, identificada pelo código 04120314 e ilustrada na Figura 10. Detalhes sobre o procedimento para obtenção da curva de magnetização e os valores medidos no ensaio estão apresentados no Anexo I.



Figura 10 - Máquina utilizada nos testes em laboratório
Fonte: Própria autora.

Os parâmetros de números de espiras por polo nos enrolamentos série e *shunt*, necessários para modelagem das máquinas série e composta, são estimados utilizando-se dados de máquinas semelhantes e de mesmo porte, apresentados em (CHAPMAN, 2013). A Tabela 1 apresenta todos os dados citados anteriormente e as especificações nominais da máquina CC.

Tabela 1 - Dados nominais da máquina

Corrente nominal de armadura (A) - operação como gerador	1,68
Corrente nominal de armadura (A) - operação como motor	2,2
Corrente nominal de campo (A)	0,3
Velocidade nominal (rpm)	1800
Tensão Nominal (V)	220
Resistência de Armadura (Ω) - com interpolo	11,5
Resistência de Armadura (Ω) - sem interpolo	7,8
Resistência de Campo <i>Shunt</i> (Ω)	733,33
Resistência de Campo Série (Ω)	4,3
Potência Nominal (W)	3700
Rendimento	0,75
Número de espiras por polo do enrolamento série	125
Número de espiras por polo do enrolamento <i>shunt</i>	1500

Fonte: Própria Autora.

As Equações (18), (19), e (20), juntamente com as equações específicas de cada tipo de máquina apresentadas na seção 2.1 e com a curva de magnetização obtida pelo ensaio, formam a base da modelagem desenvolvida. O processo de implementação computacional de cada máquina é apresentado a seguir.

3.1 Modelagem dos Motores de Corrente Contínua

No código desenvolvido, primeiramente é necessário o carregamento de um arquivo em Excel com os dados da curva de magnetização da máquina (incluindo correntes de campo, tensões de magnetização e a velocidade na qual a curva foi obtida) e a inserção dos dados de entrada específicos para cada configuração de máquina. Em seguida, o algoritmo relaciona as equações de cada máquina, a fim de plotar a curva característica de saída.

Quanto aos dados de entrada, a resistência e o vetor de valores de corrente de armadura, que representa a variação de carga, são parâmetros necessários em todas as máquinas. Enquanto os geradores requerem a velocidade de acionamento, os motores necessitam da tensão de entrada. Apenas na máquina em excitação independente é preciso inserir a tensão do enrolamento *shunt*. A máquina série é a única que não requer a resistência de campo *shunt* como dado de entrada. O parâmetro de resistência do enrolamento série é necessário apenas nas máquinas

série e composta. Os números de espiras no enrolamento série e *shunt* são indispensáveis para a máquina composta, enquanto para as outras máquinas são desnecessários.

Os fluxogramas indicados nas Figuras 11 a 17 demonstram o passo a passo realizado pelo algoritmo em busca da obtenção da característica terminal dos motores: em excitação independente e *shunt* (Figura 11), série (Figura 12), compostos cumulativo e diferencial (Figura 13) e nos geradores: em excitação independente (Figura 14), *shunt* (Figura 15), série (Figura 16) e compostos cumulativo e diferencial (Figura 17).

Para a máquina série, é necessário adaptar a curva de magnetização coletada de forma a transformar a corrente de campo em força magnetomotriz, por meio da Equação (21), conforme apresentado em Chapman (2013).

$$F_{MM} = N_{SE} \times \frac{I_{AN}}{I_{FN}} \times I_F \quad (21)$$

Na Equação (21): I_{AN} é a corrente nominal de armadura, I_{FN} é a corrente nominal de campo e I_F é a corrente de campo da curva de magnetização original.

A diferença entre as máquinas compostas cumulativa e diferencial no âmbito da programação consta no sinal considerado para a corrente efetiva total do campo em derivação, evidenciada na Equação (14). Na máquina composta cumulativa, o sinal da equação é positivo, já na máquina composta diferencial, o sinal é negativo.

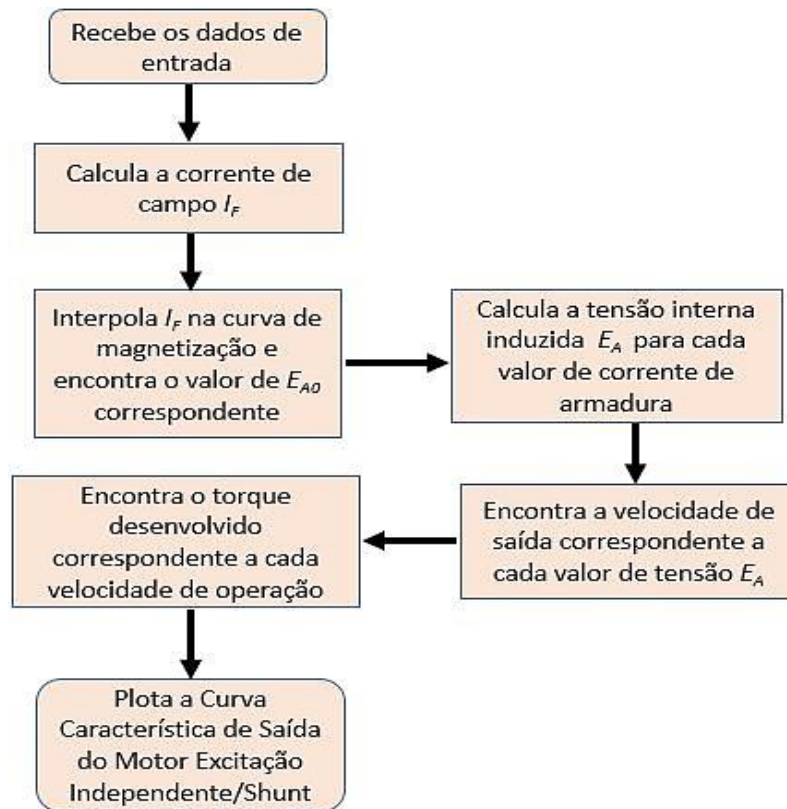


Figura 11 - Fluxograma do algoritmo dos motores excitação independente e *shunt*
 Fonte: Própria autora.

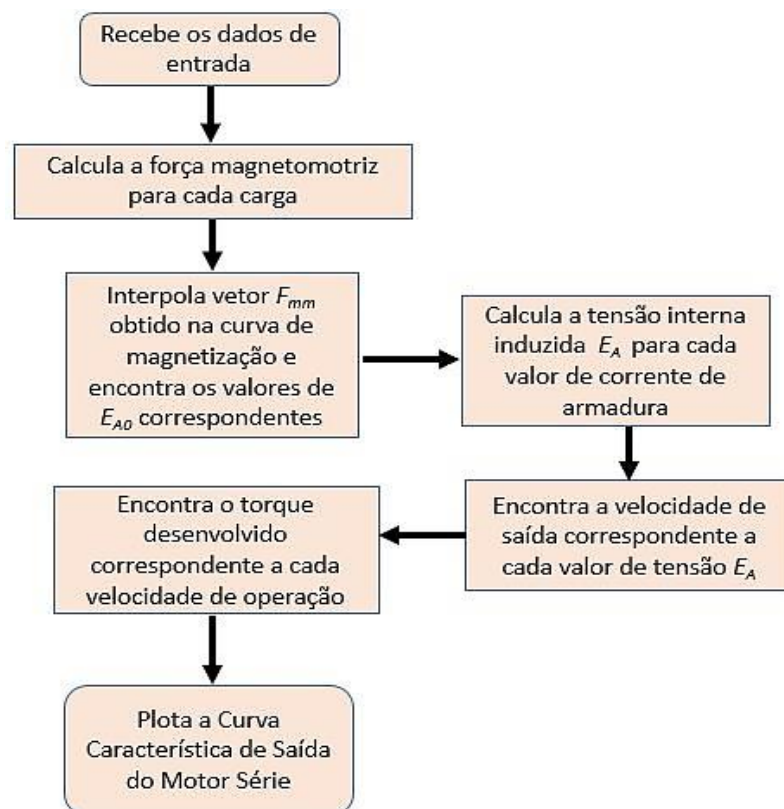


Figura 12 - Fluxograma do algoritmo do motor série.
 Fonte: Própria autora.

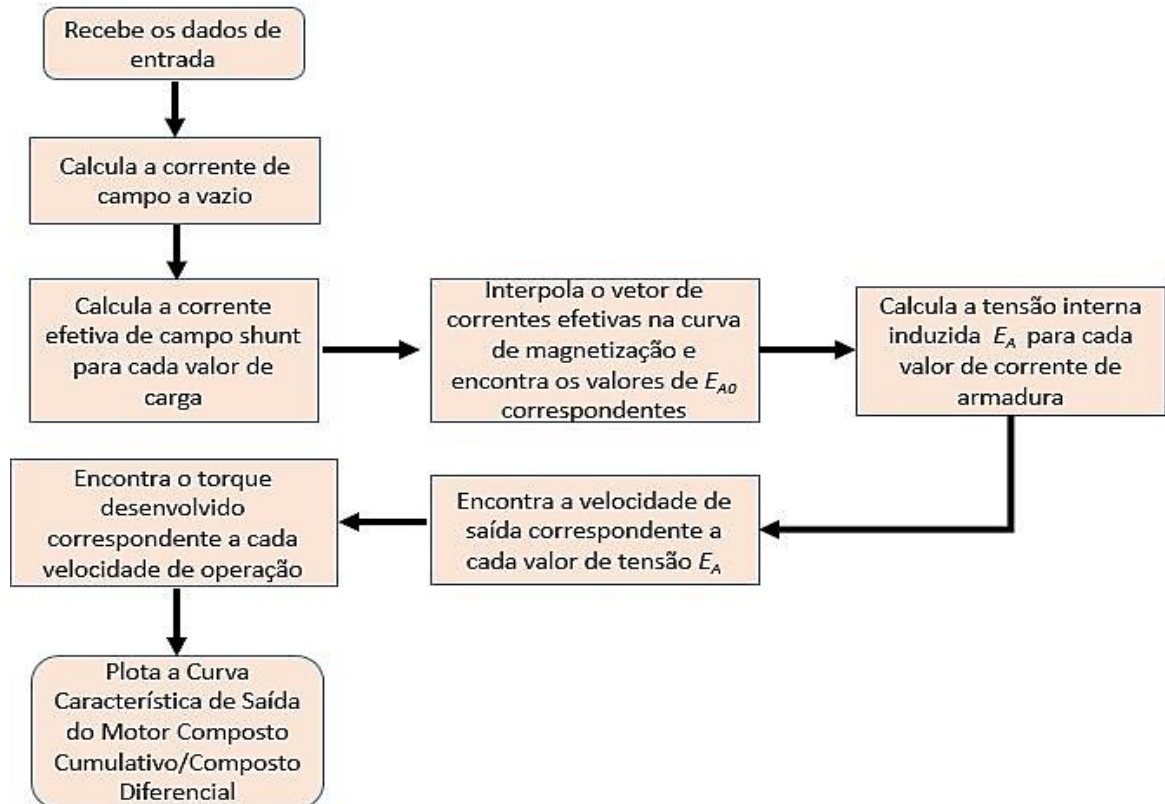


Figura 13 - Fluxograma do algoritmo dos motores compostos cumulativo e diferencial
Fonte: Própria autora.

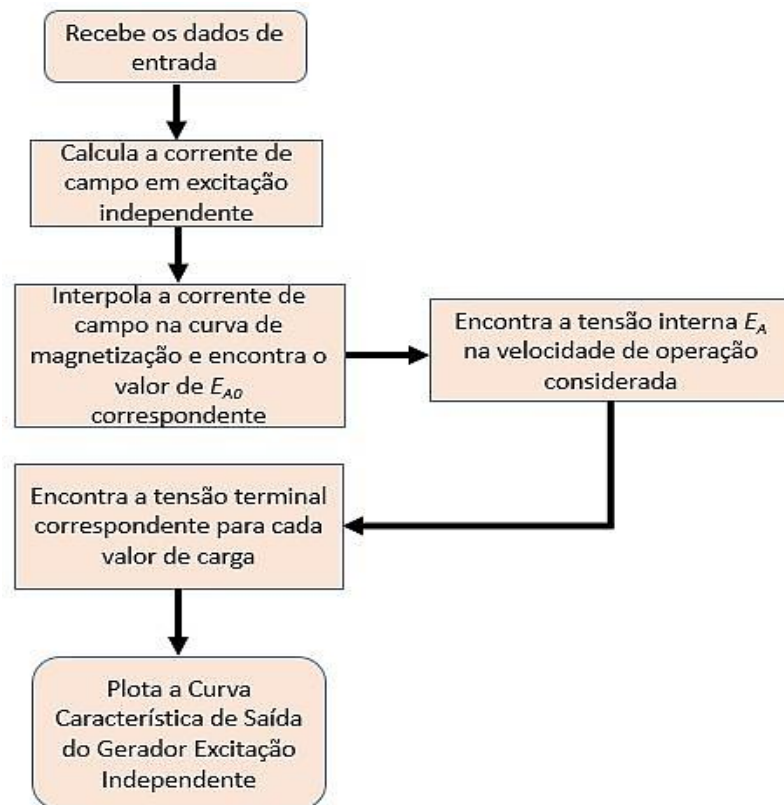


Figura 14 - Fluxograma do algoritmo do gerador excitação independente.
Fonte: Própria autora.

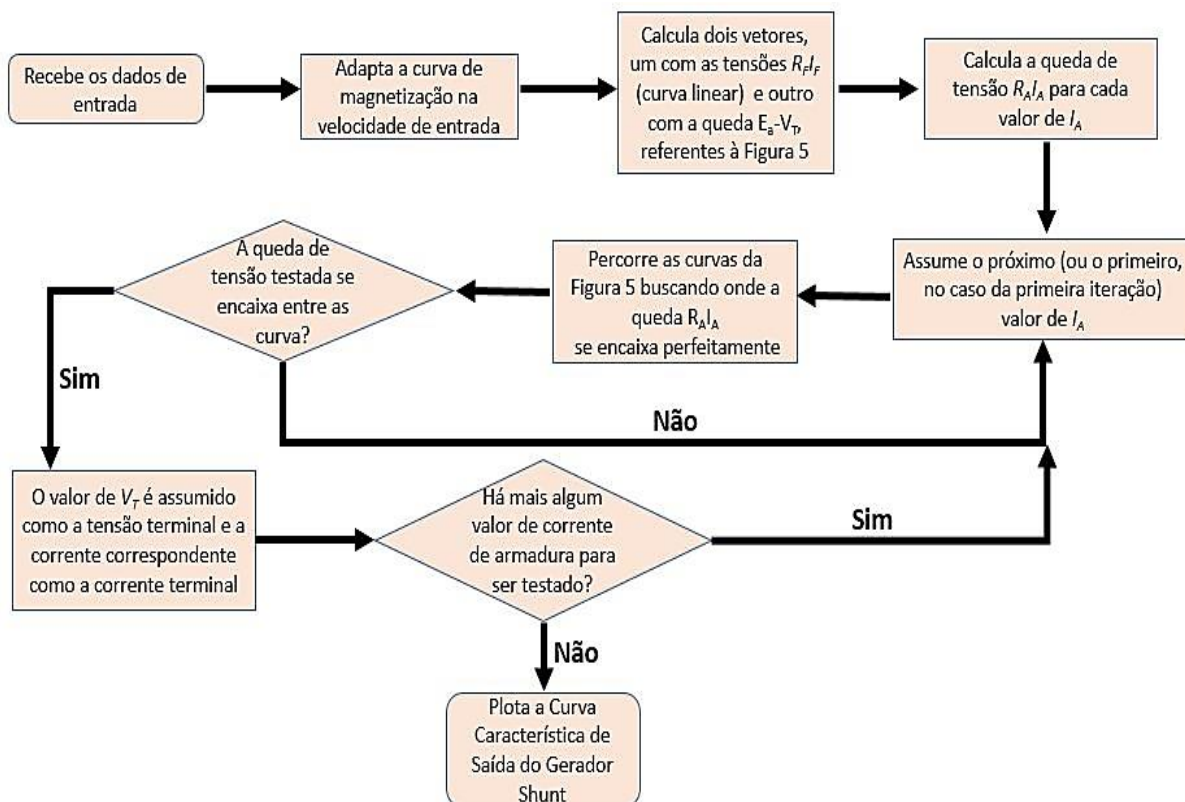


Figura 15 - Fluxograma do algoritmo do gerador *shunt*

Fonte: Própria autora.

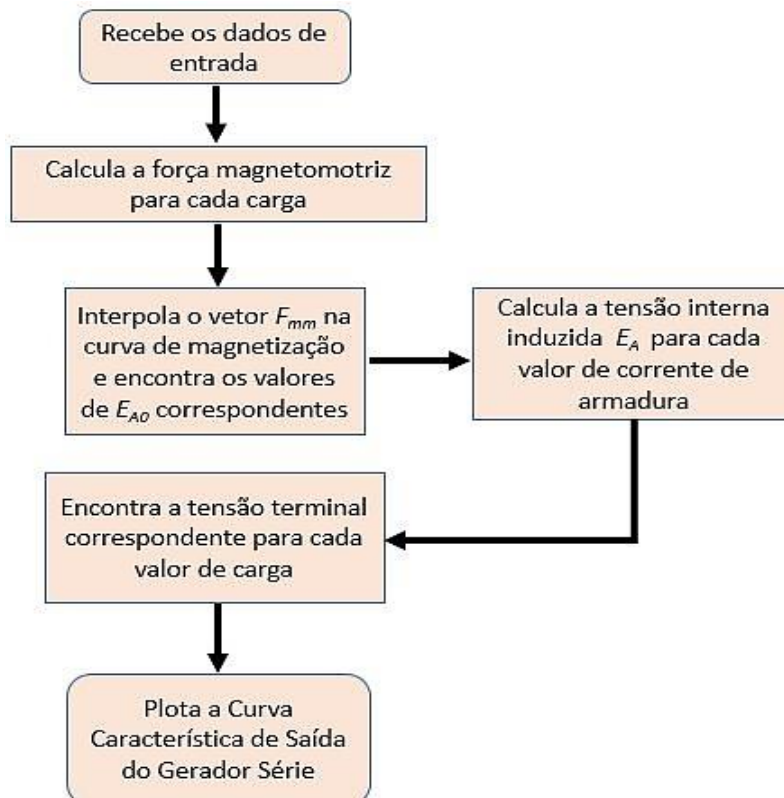


Figura 16 - Fluxograma do algoritmo do gerador série

Fonte: Própria autora.

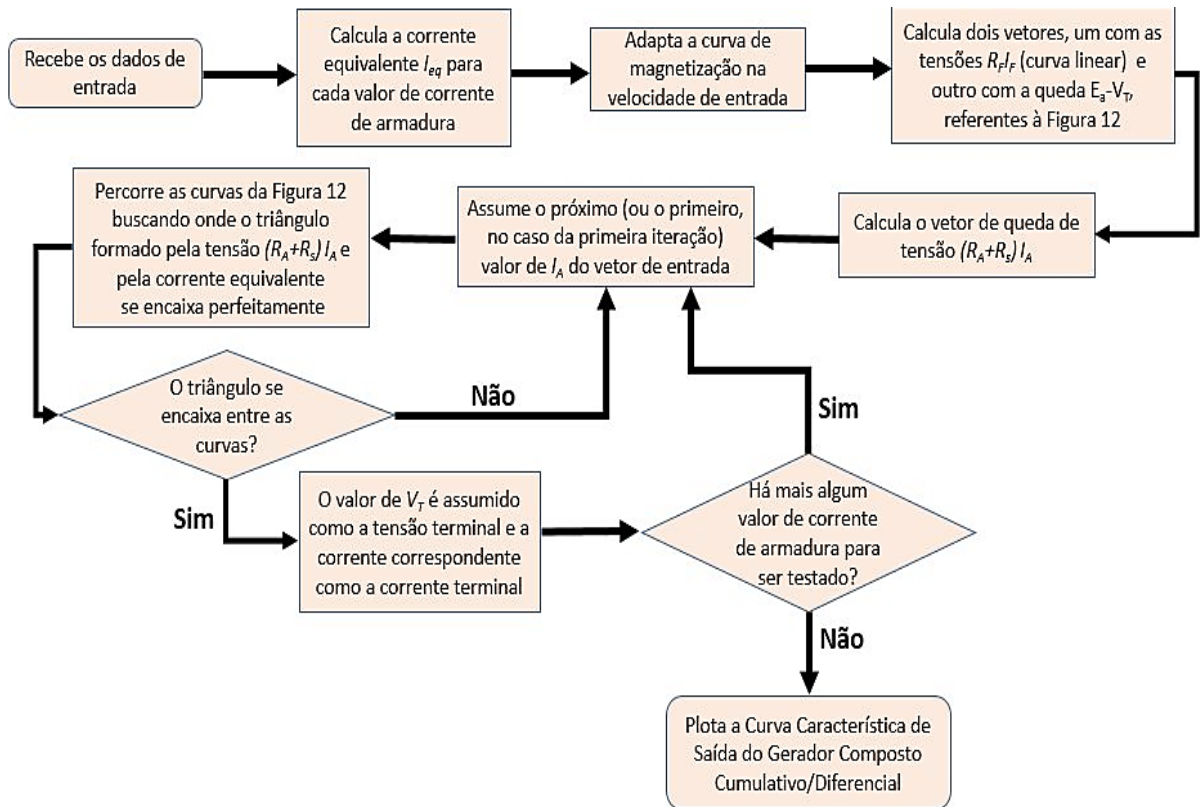


Figura 17 - Fluxograma do algoritmo dos geradores compostos cumulativo e diferencial
Fonte: Própria autora.

3.2 Desenvolvimento da Interface

A interface com o usuário é elaborada com a ferramenta *GUIDE* do *MATLAB*® e organizada em vários blocos de acordo com cada função a ser executada pelo programa. O *software* é batizado de *MCSim – Simulador de Máquinas de Corrente Contínua*. A interface principal, que contém toda a funcionalidade de simulação das máquinas, comunica com outras interfaces complementares, como a interface “Start” (inicialização do *software*), a interface “About” (descreve sucintamente a criação o programa) e a interface “Instructions” (fornece instruções complementares). A seguir, cada interface é descrita.

3.2.1 Interface de Inicialização

A Interface de abertura, indicada na Figura 18, inicializa o programa, mostra a última data de alteração e a atual versão do programa.



Figura 18 - Interface inicial
Fonte: Própria autora.

3.2.2 Interface Principal

A Figura 19 apresenta uma visão da interface principal do programa. Basicamente, as subdivisões desta interface consistem em: Dados de Entrada, Curva de Magnetização, Curva Característica de Saída do Motor, Curva Característica de Saída do Gerador, Instruções Principais, Controle de Eixos, Visualização da Máquina e Regulação de Tensão/Velocidade.

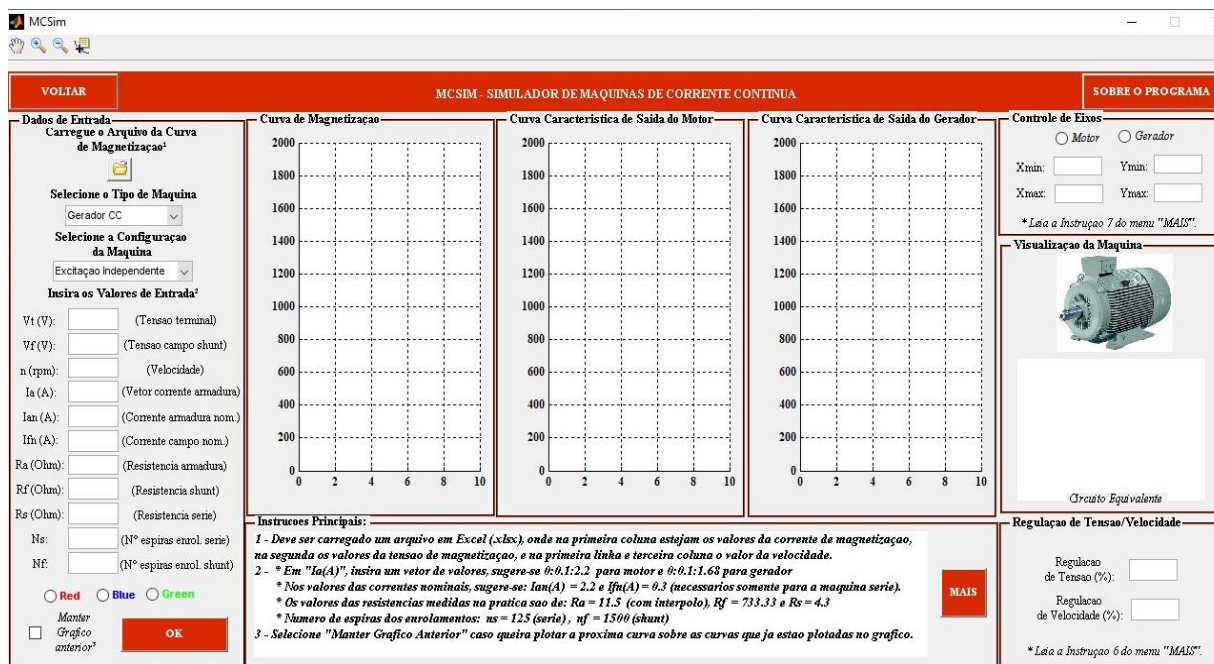



Figura 19 - Interface principal
Fonte: Própria autora.

3.2.2.1 Dados de Entrada

A Figura 20 ilustra a seção “Dados de Entrada”. Nesta, primeiramente pede-se para selecionar o arquivo Excel (.xlsx) da curva de magnetização da máquina CC. Neste arquivo, é necessário que na primeira coluna constem os valores da corrente de magnetização, na segunda os valores da tensão de magnetização, e na primeira linha/terceira coluna o valor da velocidade. Os dados da curva de magnetização são obtidos dos ensaios da máquina CC em laboratório. O procedimento para execução destes ensaios é apresentado em (DEL TORO, 1999). Recomenda-se que a medição seja realizada com intervalos pequenos.

Dados de Entrada
 Carregue o Arquivo da Curva de Magnetização⁴



Selecione o Tipo de Máquina
 Gerador CC

Selecione a Configuração da Máquina
 Excitação Independente

Insira os Valores de Entrada²

V_t (V): (Tensão terminal)
 V_f (V): (Tensão campo shunt)
 n (rpm): (Velocidade)
 I_a (A): (Vetor corrente armadura)
 I_{an} (A): (Corrente armadura nom.)
 I_{fn} (A): (Corrente campo nom.)
 R_a (Ohm): (Resistência armadura)
 R_f (Ohm): (Resistência shunt)
 R_s (Ohm): (Resistência série)
 N_s: (N° espiras enrol. série)
 N_f: (N° espiras enrol. shunt)

Red Blue Green

Manter Gráfico anterior³

Figura 20 - Dados de entrada
 Fonte: Própria autora.

Em seguida, é necessário selecionar o tipo de máquina (gerador ou motor) e a configuração da máquina (excitação independente, *shunt*, série, composta cumulativo ou composta diferencial).

Os valores dos parâmetros de entrada podem ser inseridos nos campos logo abaixo, onde tanto as especificações do circuito equivalente da máquina (R_A , R_S e R_F) e as especificações construtivas (N_S e N_F) quanto os valores de entrada aos quais a máquina é submetida (V_T , V_F e n) são solicitados. Os parâmetros necessários são habilitados de acordo com o tipo de máquina escolhido. Na entrada referente à corrente de armadura I_A (A), deve-se inserir um vetor de valores, para avaliar a variação de carga de acordo com a faixa de plotagem da curva característica. Em R_A deve ser considerada a soma entre a resistência de armadura e a resistência de interpolo, tendo em vista que o programa desconsidera a reação de armadura. A

inserção de todos os dados de entrada necessários é obrigatória para plotar a curva, já a escolha da cor e o controle de eixos é opcional.

A plotagem dos gráficos pode ser configurada com algumas funções presentes no final da seção de “Dados de Entrada”. É possível selecionar o botão “Red”, “Blue” ou “Green”, para plotar a curva em vermelho, azul ou verde, respectivamente. Se nenhuma opção for selecionada, o gráfico é plotado na cor preta.

Com a opção “Manter Gráfico Anterior” selecionada, é possível plotar a próxima curva sobre as curvas que já estão plotadas no gráfico. A quantidade de curvas plotadas em um mesmo gráfico é ilimitada e definida de acordo com o desejo do usuário.

3.2.2.2 Configurações e Funcionalidades Adicionais

- (A) Além das configurações possíveis na seção “Dados de Entrada” para plotar as curvas de saída, como a escolha da cor e a plotagem do próximo gráfico sobre o anterior, também é possível controlar os limites dos eixos na seção “Controle de Eixos”, escolhendo-se o intervalo de visualização do gráfico, de acordo com os valores de interesse.
- (B) Para facilitar a observação do comportamento de cada curva, pode-se utilizar as ferramentas disponíveis de movimento do gráfico, zoom e coleta pontual de dados, presentes na parte superior da tela, como mostra a Figura 21.



Figura 21 - Ferramentas de controle gráfico
Fonte: Própria autora.

- (C) Ao selecionar o tipo e a configuração de máquina a ser simulada, automaticamente na seção “Visualização da Máquina” da interface principal, é apresentado o circuito equivalente da máquina escolhida, como mostra a Figura 22. Por efeitos de limitação de tamanho da interface, pode ser que o

circuito apareça com a nitidez comprometida. Neste caso, basta utilizar a ferramenta de zoom para melhorar a visualização.

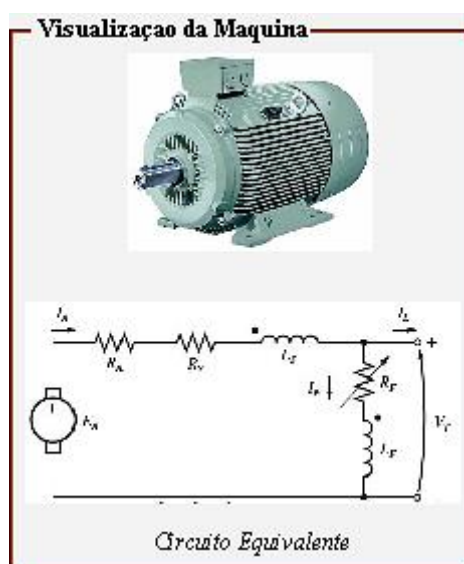


Figura 22 - Visualização da máquina
Fonte: Própria autora.

(D) No setor “Instruções Principais”, indicado na Figura 23, constam as informações precípuas para a correta utilização do *software*. Os valores nominais mencionados são da máquina CC utilizada para validar o programa.

Instruções Principais:

- 1 - Deve ser carregado um arquivo em Excel (*.xlsx*), onde na primeira coluna estejam os valores da corrente de magnetização, na segunda os valores da tensão de magnetização, e na primeira linha e terceira coluna o valor da velocidade.
- 2 - * Em "*I_a(A)*", insira um vetor de valores, sugere-se 0:0.1:2.2 para motor e 0:0.1:1.68 para gerador
 - * Nos valores das correntes nominais, sugere-se: $I_{an}(A) = 2.2$ e $I_{fn}(A) = 0.3$ (necessários somente para a máquina série).
 - * Os valores das resistências medidas na prática são de: $R_a = 11.5$ (com interpolação), $R_f = 733.33$ e $R_s = 4.3$
 - * Número de espiras dos enrolamentos: $n_s = 125$ (série), $n_f = 1500$ (shunt)
- 3 - Selecione "Manter Gráfico Anterior" caso queira plotar a próxima curva sobre as curvas que já estão plotadas no gráfico.




Figura 23 - Instruções principais
Fonte: Própria autora.

(E) Sempre que uma configuração de máquina é simulada, aparece automaticamente, na aba “Regulação de Tensão/Velocidade”, o valor da regulação de tensão, no caso de geradores, e o valor da regulação de

velocidade, no caso de motores. Estes parâmetros podem ser calculados por meio das Equações (16) e (17).

- (F) A interface “About”, mostrada na Figura 24, é acessada através do botão “Sobre o Programa”, na parte superior da interface principal, e descreve de forma sucinta o que é o *MCSim*, seu propósito e seus idealizadores.



Figura 24 - Sobre o programa
Fonte: Da própria autora.

- (G) Clicando-se no botão “MAIS”, no campo “Instruções Principais”, surge a tela de “Instruções Complementares”, apresentada na Figura 25. A interface contém uma série de instruções para auxiliar o usuário na utilização do programa. Todos os sete itens destas instruções já foram comentados no decorrer deste trabalho.

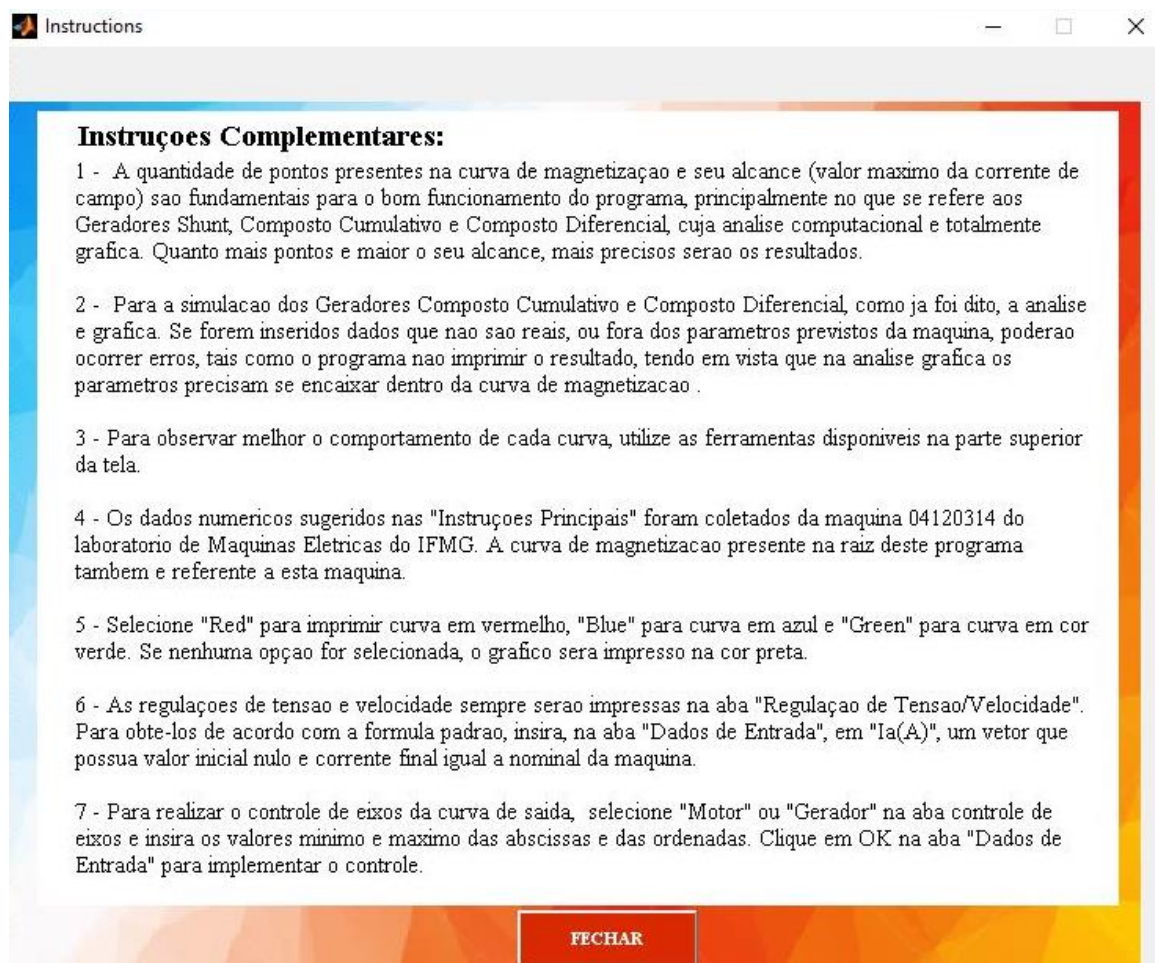


Figura 25 - Instruções complementares
Fonte: Da própria autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como o objetivo do trabalho é simular o comportamento das máquinas CC em regime permanente com curvas de interesse prático e didático, este capítulo apresenta as curvas típicas de geradores e motores obtidas a partir da simulação no *software*, considerando as cinco configurações estudadas, sendo elas: excitação independente, *shunt*, série e composta. É utilizada a configuração e parâmetros reais de uma das máquinas CC do Laboratório de Máquinas Elétricas do IFMG - *Campus* Formiga, descrita na seção 3. Estes resultados são comparados com resultados de medição e com simulações de outros autores (Chapman, 2013; Hambley, 2014), a fim de validar a ferramenta desenvolvida.

4.1 Resultados dos Geradores CC

4.1.1 Geradores em Excitação Independente e *Shunt*

A Figura 25 apresenta as curvas características dos geradores CC em excitação independente e *shunt*, obtidas por simulação computacional, em um mesmo gráfico. Estas são curvas clássicas para os estudos dos geradores CC. Percebe-se que ambas partem do mesmo ponto (tensão a vazio) e que a queda da curva do gerador *shunt* é mais acentuada que a queda do gerador excitação independente, ou seja, a regulação de tensão deste último é melhor. Este resultado é coerente com os resultados encontrados na literatura, como mostra a Figura 26, onde a linha tracejada que se refere à queda $I_A R_A$ representa a saída do gerador em excitação independente e a linha contínua que se refere ao efeito do enfraquecimento de campo representa a característica do gerador *shunt*, mostrando que a diferença entre as duas máquinas está associada à natureza das perdas elétricas envolvidas nos dois processos.

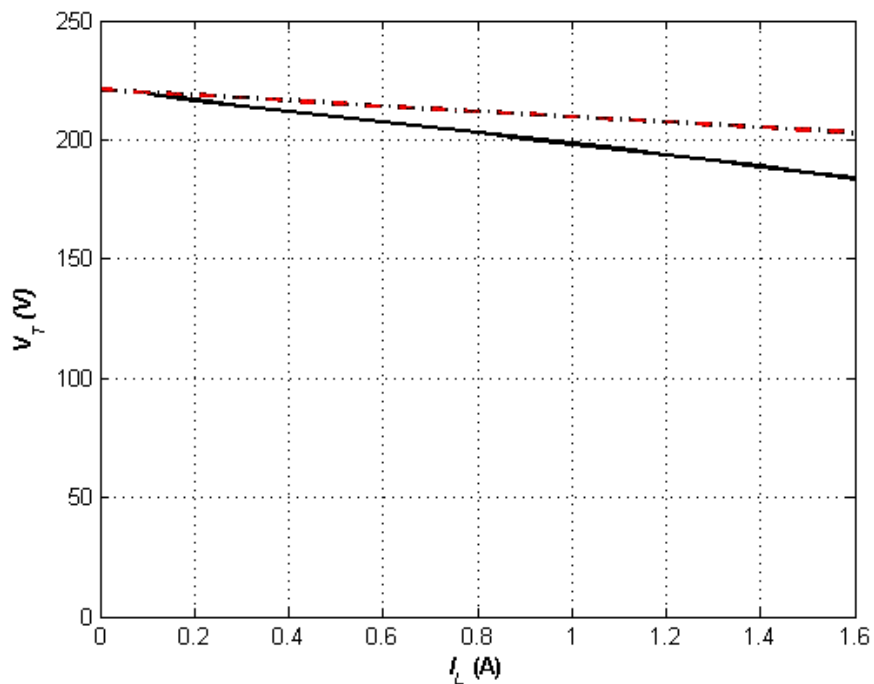


Figura 25 - Simulação das curvas de saída dos geradores excitação independente (vermelha pontilhada) e *shunt* (preta contínua)
Fonte: Própria autora.

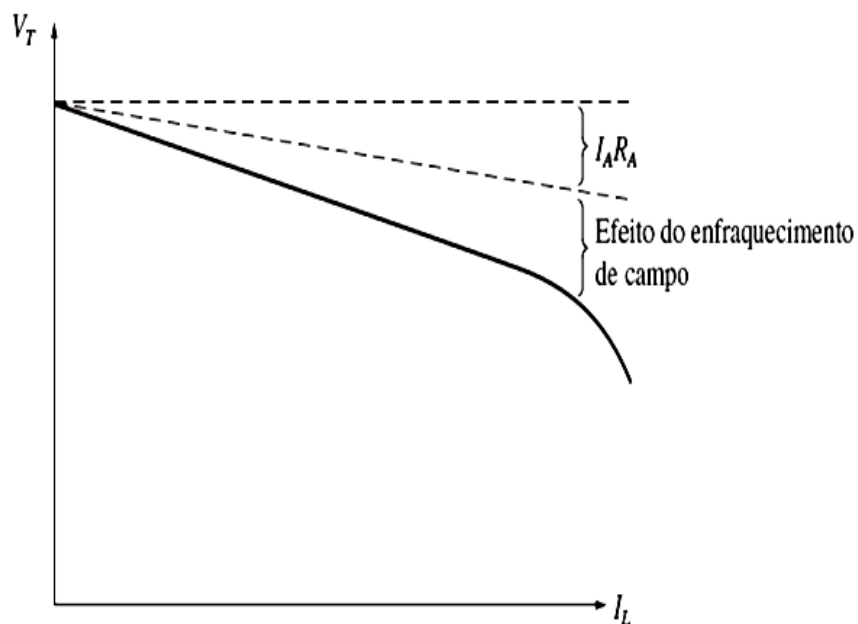


Figura 26 - Comparação entre as curvas de saída dos geradores *shunt* e excitação independente
Fonte: Hambley, 2014.

4.1.2 Geradores Compostos Cumulativo e Diferencial

Para avaliar o comportamento do gerador CC composto cumulativo, a Figura 27 apresenta os resultados das simulações das curvas de saída de três geradores compostos cumulativos com *shunt* longo, cujo número de espiras por polo no enrolamento série é de 75, 100 e 150, da curva inferior para a curva superior, respectivamente.

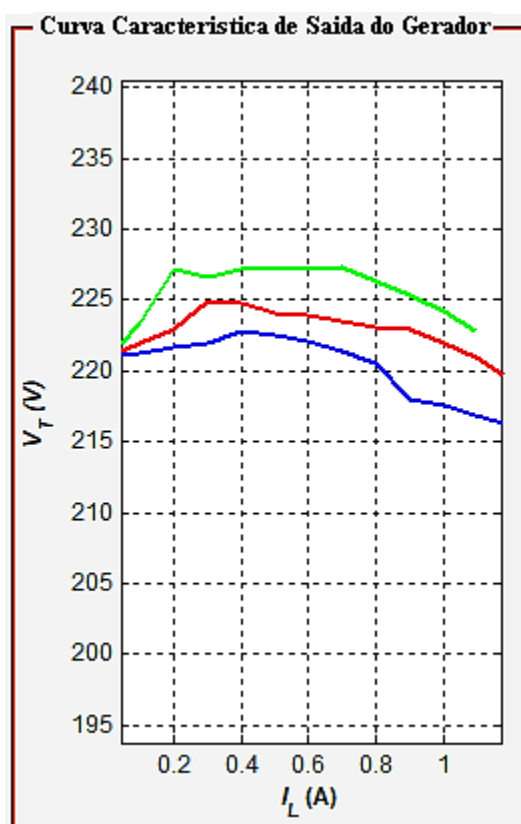


Figura 27 - Simulação das curvas de saída do gerador composto cumulativo com 75 (em azul), 100 (em vermelho) e 150 (em verde) espiras em série

No gerador que possui menos espiras em série, a queda resistiva prevalece e a tensão tende a cair, como verificado na Figura 27, mas não tão acentuadamente quanto um gerador *shunt*. No gerador que possui valor mediano de espiras, a tensão terminal inicialmente se eleva, mas em seguida decresce. Na segunda curva de baixo para cima da Figura 27, este comportamento pode ser visualizado de forma aproximada. Por fim, no gerador com maior número de espiras em série, a princípio a tensão terminal aumenta com a elevação da carga, e este aumento prevalece por uma faixa maior que o gerador anterior. Assim, verifica-se que, a vazio, as curvas para

ambos os geradores se iniciam no valor de tensão nominal da máquina (220 V), porém, o aumento do número de espiras série faz com que a curva apresente maiores valores de tensão ao longo da variação de carga.

Comparando-se a Figura 27 à Figura 28, percebe-se a semelhança entre ambas, comprovando que quanto menor o número de espiras série, mais decrescente a curva se torna, o que verifica a validade dos resultados obtidos computacionalmente.

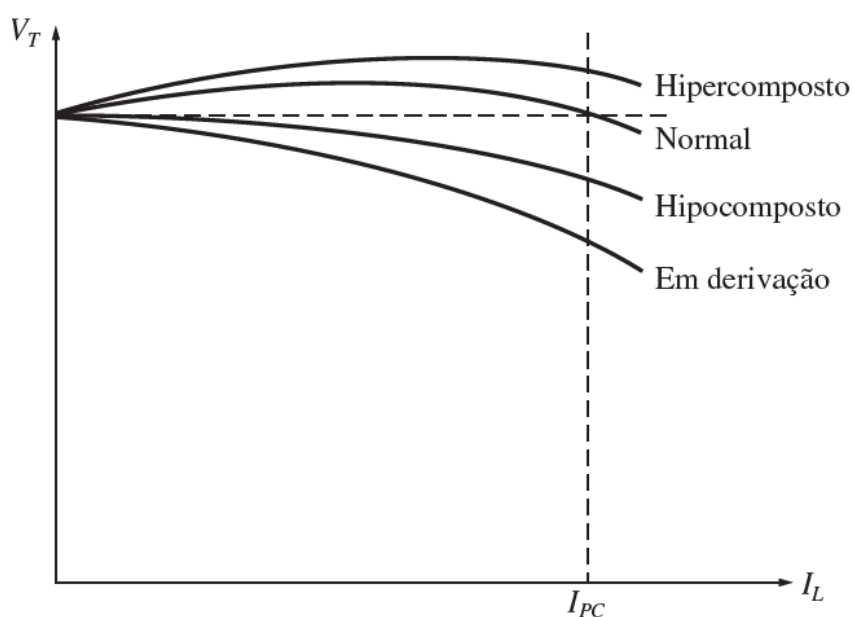


Figura 28 - Curvas teóricas de saída dos geradores composto cumulativos
Fonte: Chapman, 2013

Para análise do comportamento do gerador CC composto diferencial, a Figura 29 mostra a simulação da curva de saída desta máquina e a curva do gerador *shunt* para efeito de comparação, ambas submetidas aos dados laboratoriais.

No gerador composto diferencial, com o aumento da carga, a tensão tende a cair devido à queda resistiva e também pela diminuição da força magnetomotriz (a força magnetomotriz do campo série aumenta e é subtraída da força magnetomotriz do campo *shunt*). A partir deste efeito de superposição, a tensão da máquina tende a cair drasticamente. A curva inferior mostrada na Figura 29 ilustra esta queda. Percebe-se o quão acentuado é o declínio da curva do gerador diferencial, quando comparada a do gerador *shunt*, e também pode-se observar que ambas partem da mesma tensão a vazio (220 V).

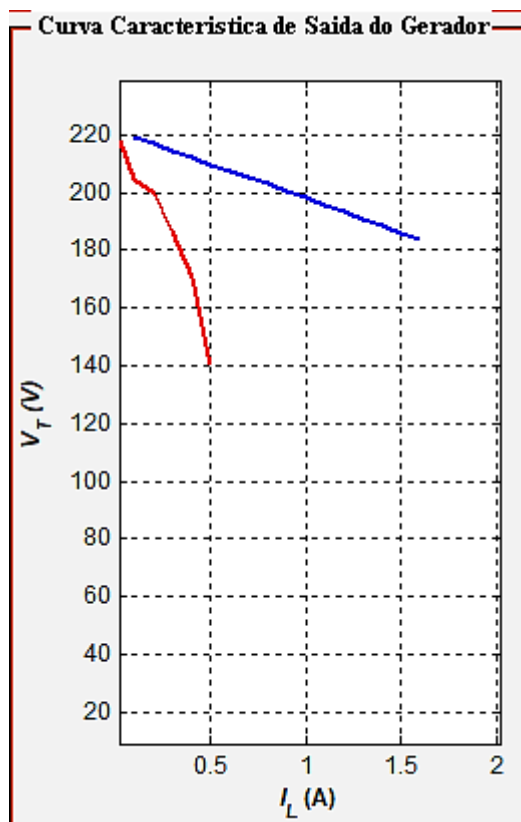


Figura 29 - Simulação das curvas de saída dos geradores composto diferencial (em vermelho) e *shunt* (em azul)
Fonte: Própria autora.

A Figura 30 mostra a característica de saída do gerador composto diferencial, em relação a saída do gerador em derivação, dada por Chapman (2013). É possível constatar o mesmo comportamento apresentado pelas curvas obtidas na simulação.

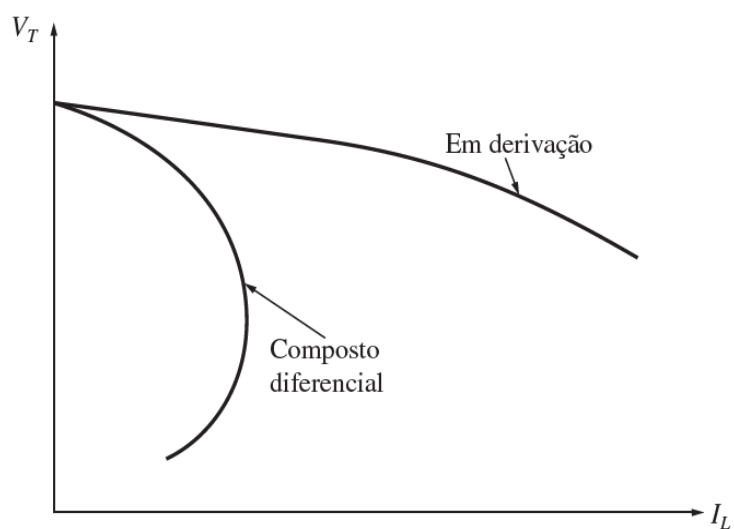


Figura 30 - Curva de saída teórica do gerador composto diferencial
Fonte: Chapman, 2013.

4.2 Validação dos Geradores CC

Comparando as curvas obtidas de cada gerador separadamente às curvas encontradas na literatura, observa-se um comportamento semelhante. Adicionalmente, os resultados simulados são comparados aos resultados de medição real e apresentados a seguir.

4.2.1 Gerador CC em Excitação Independente

A Figura 31 apresenta a comparação entre os resultados de simulação e de medição para o gerador CC em excitação independente. Percebe-se que as curvas praticamente se superpõem. O maior erro percentual apresentado entre os resultados foi de 4,5%. Considera-se que este erro pode ser proveniente das perdas e variações, de natureza elétrica e mecânica, que ocorrem na prática e que não são modeladas.

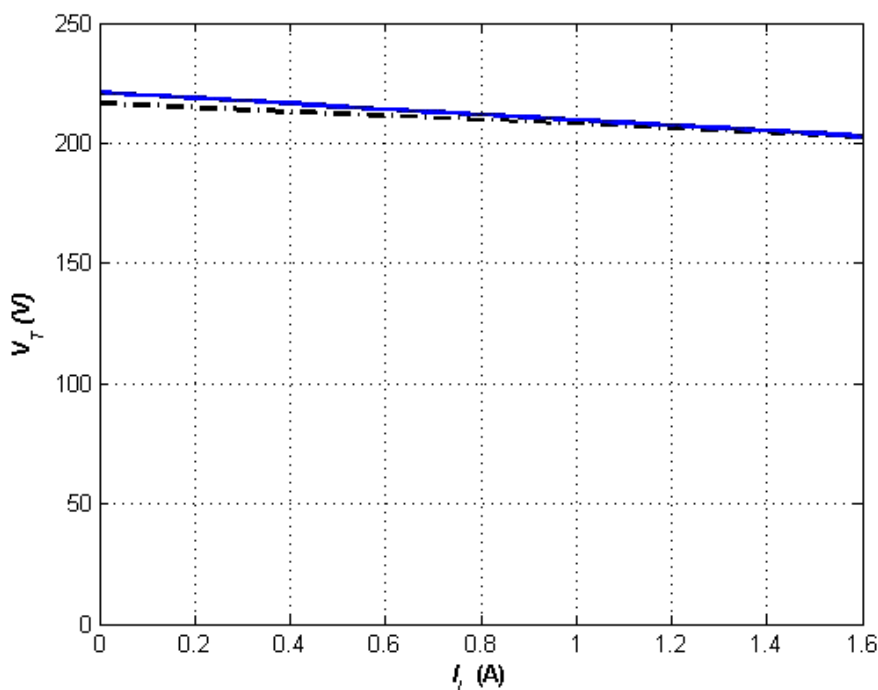


Figura 31 - Curvas de saída do gerador excitação independente: simulada (azul contínua) e prática (preta pontilhada)
Fonte: Própria autora.

4.2.2 Gerador CC *Shunt*

A Figura 32 mostra a curva simulada do gerador *shunt* e a curva da mesma máquina obtida através dos dados de medição, com ambas submetidas a condições de entrada iguais. Assim como no gerador anterior, percebe-se o mesmo comportamento entre as duas curvas. É verificada uma diferença percentual máxima de 7,5%.

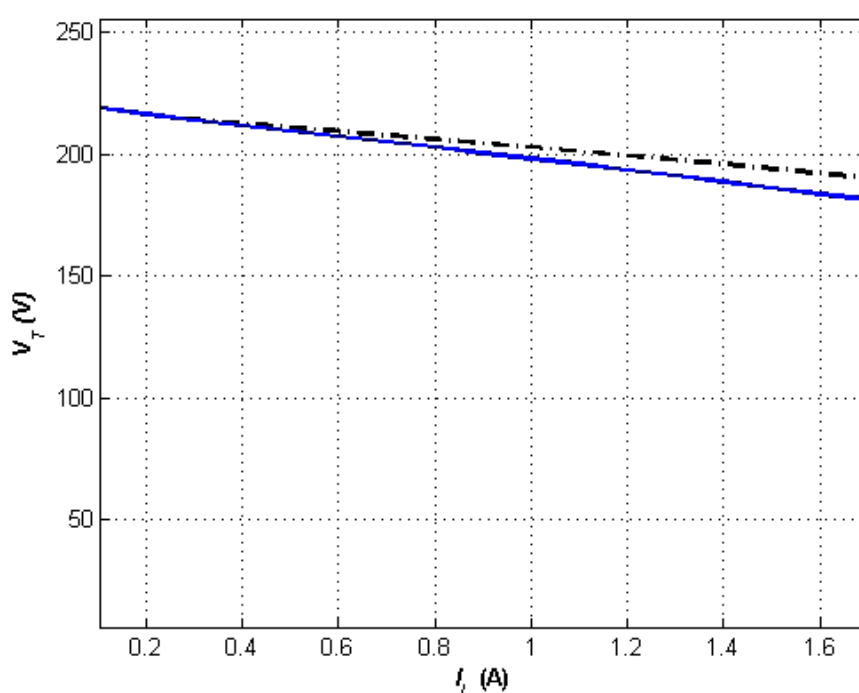


Figura 32 - Curvas de saída do gerador *shunt*: simulada (azul contínua) e prática (preta pontilhada)

Fonte: Própria autora.

4.2.3 Gerador CC Série

A Figura 33 mostra os gráficos do gerador série plotado pelo simulador e obtido com os dados de laboratório. A diferença apresentada entre as curvas varia de 0 a 7 V, mantendo-se nessa faixa ao longo do gráfico, de forma que o erro percentual varia de 24,26% a 5,78%, com o aumento da tensão de saída terminal. A vazios, a curva simulada apresenta uma tensão de 15,2 V, enquanto a máquina real indica 20,07 V. Ambas correspondem ao fluxo residual do enrolamento série, responsável pela tensão

de saída do gerador na ausência de carga. Com o aumento da corrente drenada, ocorre o aumento da corrente no enrolamento série, e, conseqüentemente, o aumento da tensão induzida interna, resultando nas curvas ascendentes apresentadas na Figura 33.

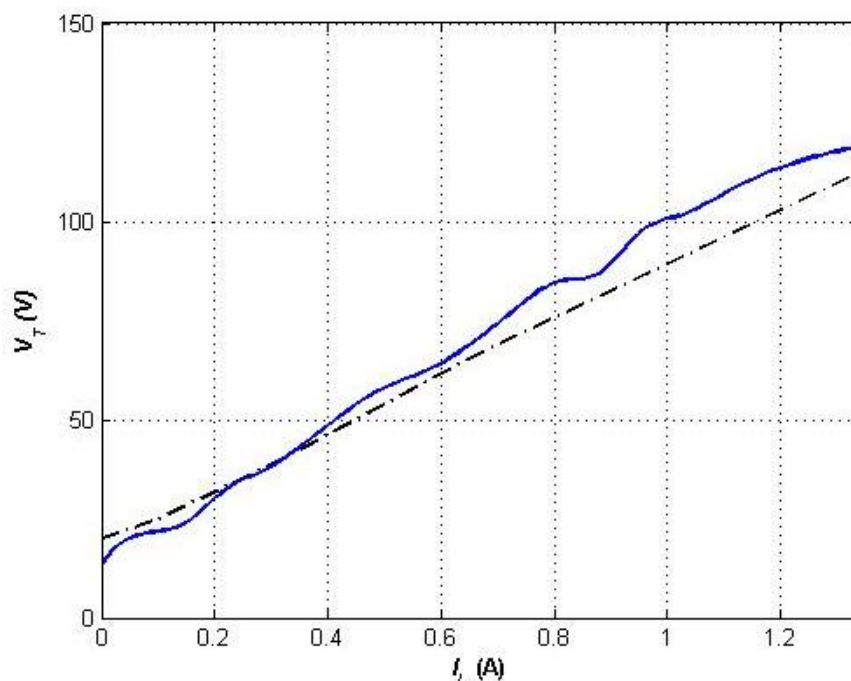


Figura 33 - Curvas de saída do gerador série: simulada (azul contínua) e prática (preta pontilhada)
Fonte: Própria autora.

Na Figura 34, também é apresentada a simulação do gerador série, porém testado em uma faixa maior de valores de corrente de carga. Já a Figura 35, mostra a curva característica teórica de saída do mesmo gerador, indicando o efeito da queda $R_{A/A}$ e da reação de armadura. Ao comparar ambas as figuras, é possível perceber a semelhança comportamental e a forma como a queda na resistência de armadura faz com que a tensão terminal tenda a cair e se estabilizar. Como foi considerada a utilização de interpolo e, assim, a não influência do efeito da reação de armadura, a faixa da Figura 35 onde mostra uma acentuada queda resultante da reação de armadura, não ocorre quando se aumenta o alcance da curva característica gerada pelo simulador. Vale destacar que a curva teórica não considera o fluxo residual da máquina, por isso, inicia-se com tensão nula.

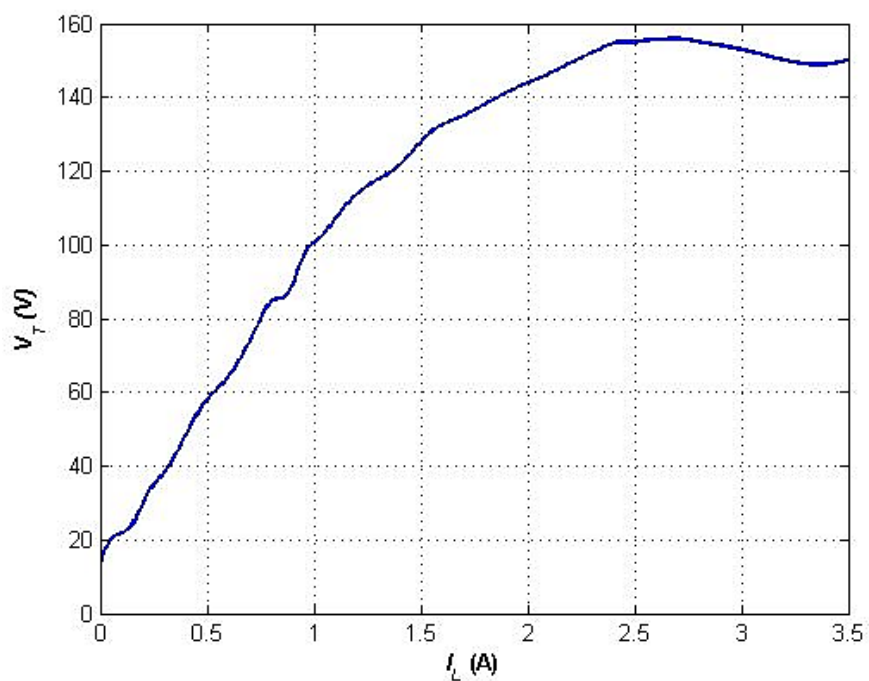


Figura 34 - Simulação do gerador série para uma faixa maior de valores
Fonte: Própria autora.

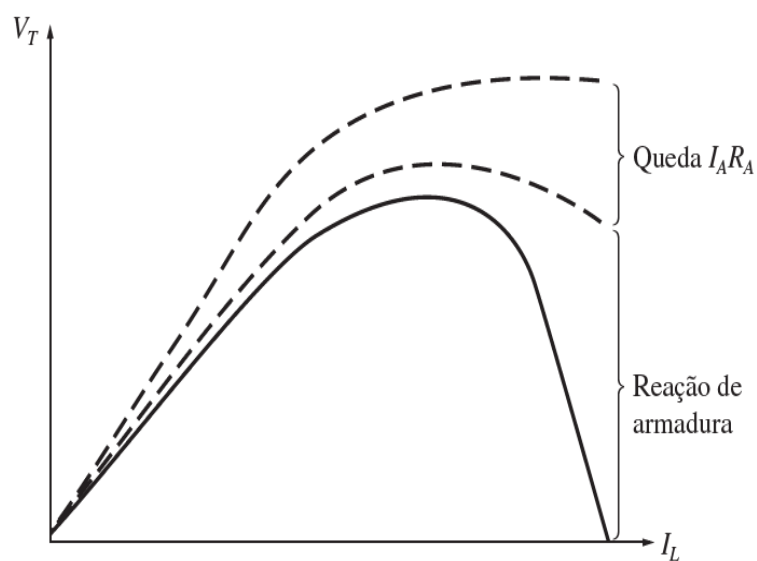


Figura 35 - Curva de saída teórica do gerador série
Fonte: Chapman, 2013.

4.3 Resultados dos Motores CC

4.3.1 Motores CC Composto Cumulativo e *Shunt*

Os comportamentos das curvas de saída simuladas do motor composto cumulativo e do motor *shunt* são mostrados na Figura 36. A vazio, as duas máquinas possuem a mesma velocidade. Com cargas pequenas, os comportamentos de ambas são semelhantes, pois a baixa drenagem da corrente de carga torna o efeito do enrolamento série pequeno. À medida que a carga aumenta, o efeito do campo série torna-se cada vez mais determinante, fazendo com que o restante da curva se assemelhe ao comportamento do motor série. Pode-se perceber que o motor composto cumulativo não dispara sua velocidade quando está sem carga (1800 rpm, a vazio) e possui grande desempenho de torque na partida (curva tendendo a valores muito mais altos que o motor *shunt* para velocidade nula).

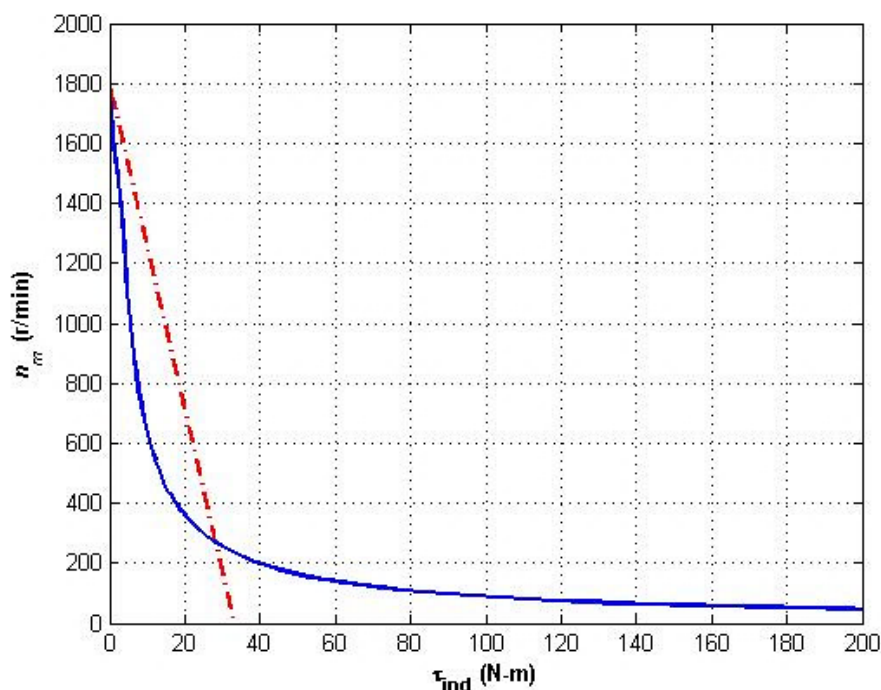


Figura 36 - Simulação das curvas de saída dos motores *shunt* (vermelha pontilhada) e composto cumulativo (azul contínua)

Fonte: Própria autora.

A Figura 37 mostra as curvas típicas de saída do motor *shunt* e do motor composto cumulativo, com a mesma velocidade a vazio. Comparando-se esta figura

à Figura 36, constata-se a mesma característica comportamental. Assim, mostra-se que todas as verificações percorridas para as curvas simuladas condizem com as previsões teóricas.

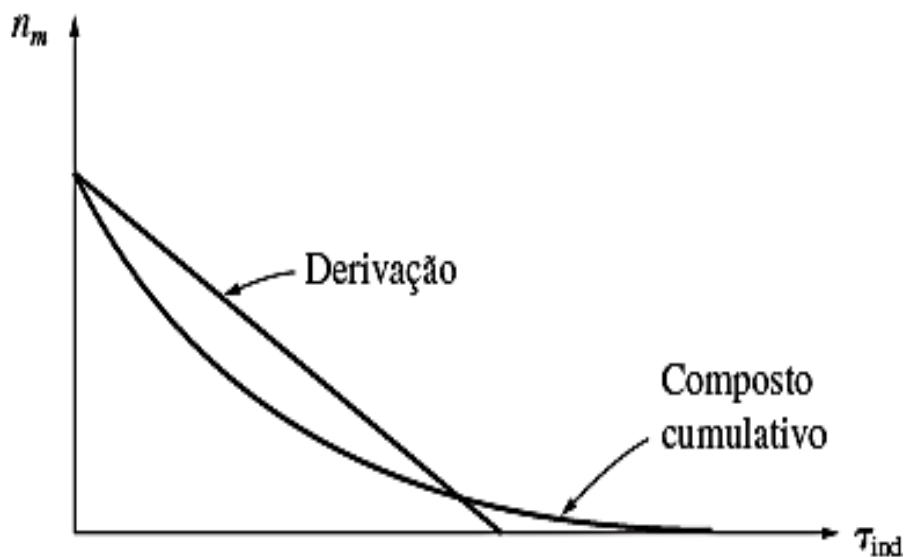


Figura 37 - Comparação entre as curvas de saída teóricas dos motores composto cumulativo e derivação ou *shunt*
Fonte: Chapman, 2013.

4.3.2 Controle de Velocidade do Motor *Shunt*

Na Figura 38, são apresentadas duas curvas de saída do motor *shunt*, onde foram utilizadas as resistências de campo de $733,33 \Omega$ e 800Ω , nas curvas de baixo para cima, respectivamente. Com isso, percebe-se que o aumento de R_F causa um aumento da velocidade desenvolvida pelo motor *shunt*, como é comprovado pelas curvas teóricas mostradas na Figura 39.

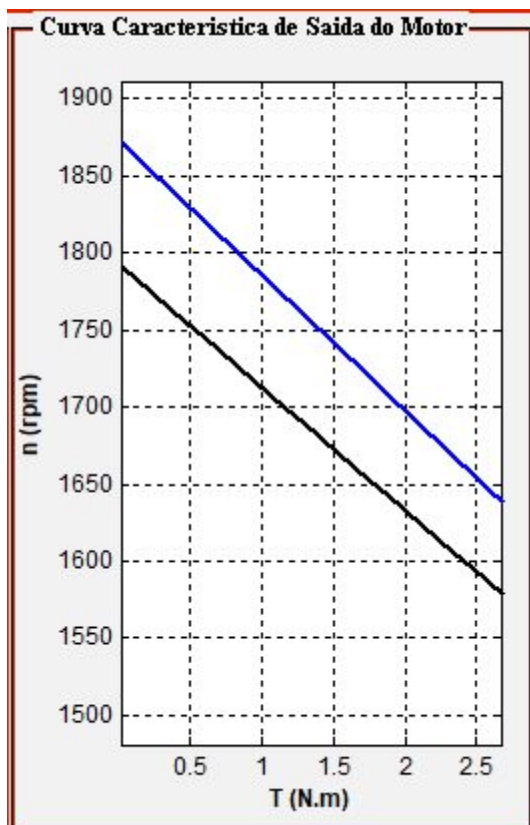


Figura 38 - Simulação do controle de velocidade por resistência de campo do motor *shunt*
Fonte: Própria autora.

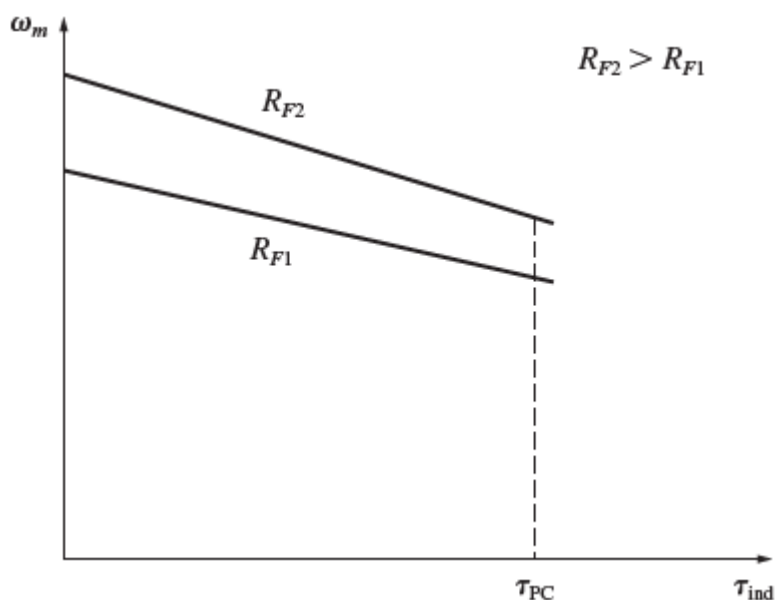


Figura 39 - Curvas teóricas do controle de velocidade por resistência de campo do motor *shunt*
Fonte: Chapman, 2013.

Na Figura 40, são mostradas duas curvas do motor *shunt*, submetido aos valores nominais de entrada, exceto na tensão de entrada, nas quais são utilizados os valores de 180 V e 230 V, nas curvas de baixo para cima, respectivamente.

Percebe-se que o aumento da tensão de entrada causa um aumento de velocidade no motor *shunt*. A Figura 41 corrobora, pela referência teórica, a verificação feita anteriormente.

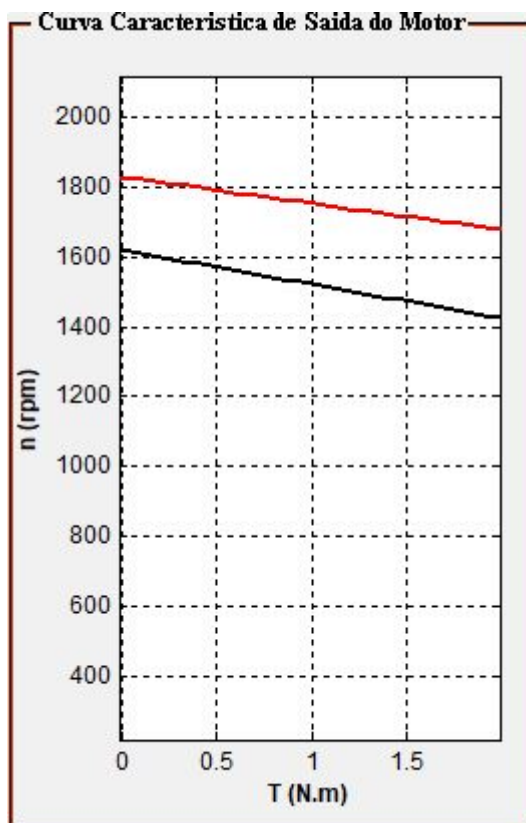


Figura 40 - Simulação do controle de velocidade por tensão de entrada do motor *shunt*
Fonte: Própria autora.

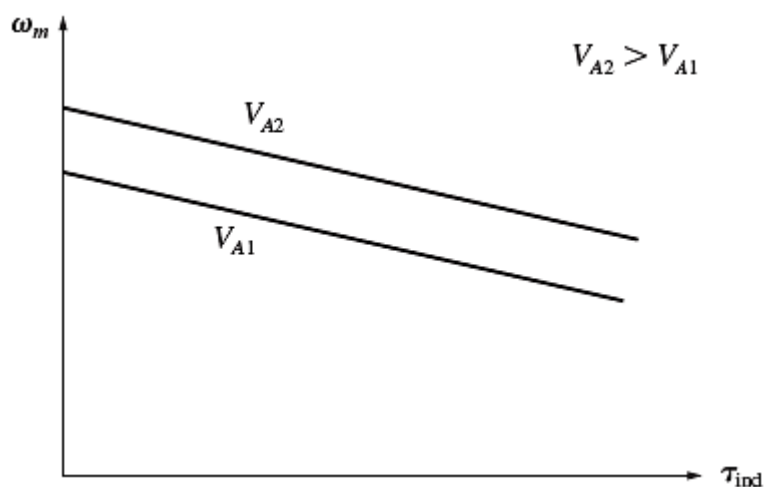


Figura 41 - Curvas teóricas do controle de velocidade por tensão de entrada do motor *shunt*
Fonte: Chapman, 2013.

Na Figura 42, são ilustradas quatro curvas do motor derivação, com os mesmos dados de entrada nominais, exceto na resistência de armadura, nas quais são utilizados os valores de 35 Ω , 30 Ω , 25 Ω e 20 Ω , nas curvas de baixo para cima, respectivamente. Verifica-se que a diminuição da resistência de armadura causa um aumento na velocidade deste tipo de máquina, de forma que a velocidade a vazio é a mesma nos quatro casos (1800 rpm), porém distinta com o aumento de carga. A Figura 60 mostra o mesmo comportamento ratificado pela referência teórica.

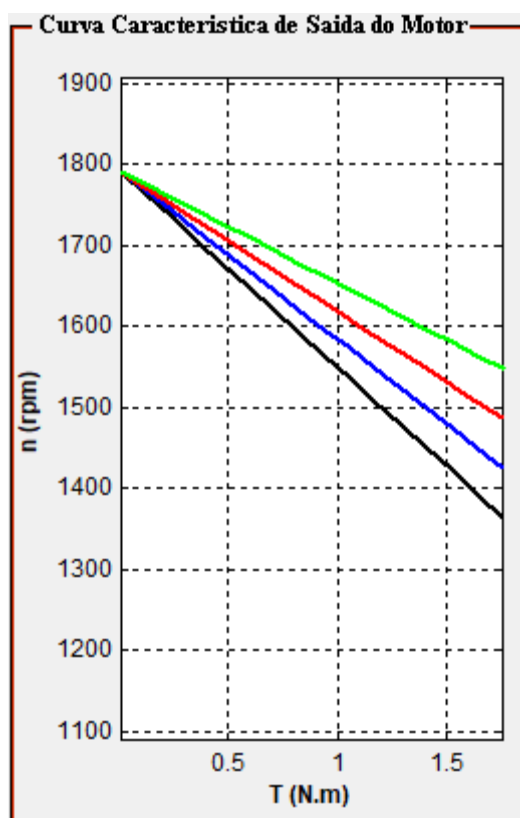


Figura 42 - Simulação do controle de velocidade por resistência de armadura do motor *shunt*
Fonte: Própria autora.

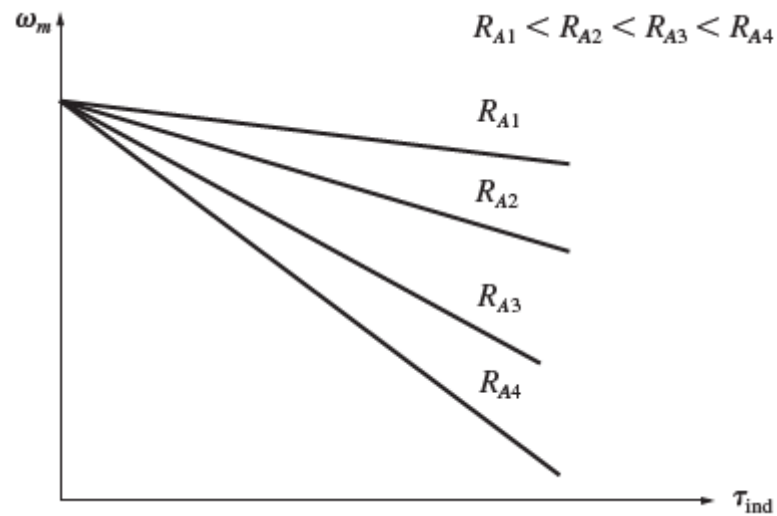


Figura 43 - Curvas teóricas do controle de velocidade por resistência de armadura do motor *shunt*
 Fonte: Chapman, 2013.

4.4 Validação dos Motores CC

4.4.1 Motores em Excitação Independente e *Shunt*

Os motores excitação independente e *shunt* possuem a mesma modelagem matemática e a mesma implementação computacional, logo apresentam características de saída equivalentes, como a curva mostrada na Figura 44. Por meio desta figura, percebe-se que, a vazio (torque nulo), a velocidade da máquina é de 1800 rpm (velocidade nominal) e que, com o aumento da carga, a velocidade cai linearmente até que, entre 20 N.m e 25 N.m, atinge valor nulo. Assim, os máximos valores de torque ocorrem para velocidades menores.

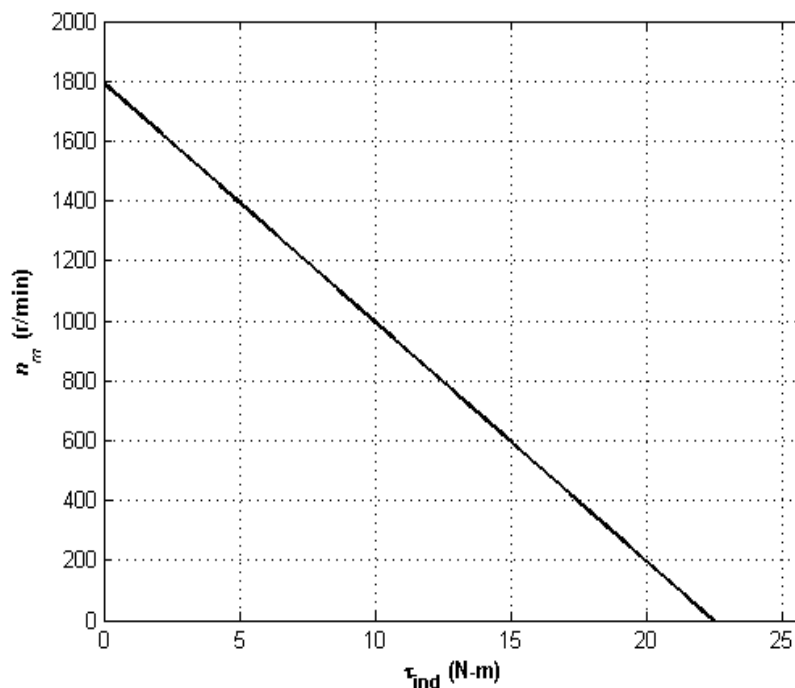


Figura 44 - Simulação da curva de saída dos motores excitação independente e *shunt*
Fonte: Própria autora.

Comparando-se as Figuras 44 e 45, percebe-se que os comportamentos das curvas são semelhantes e pode-se concluir que a simulação computacional dos motores *shunt* e excitação independente atendem à previsão teórica.

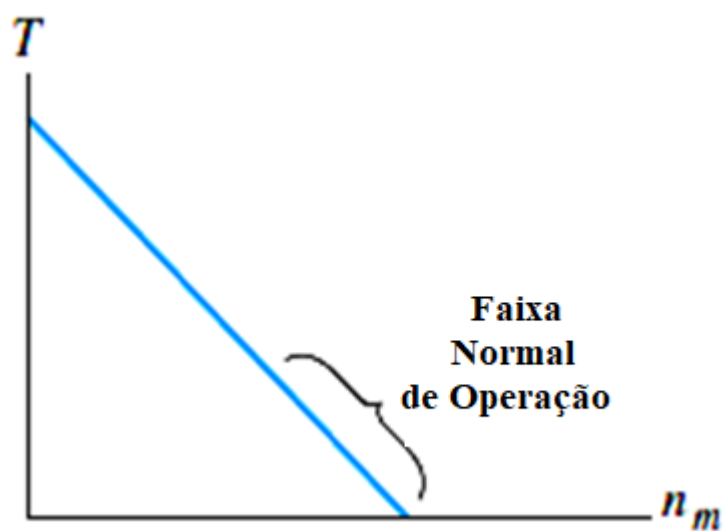


Figura 45 - Curva teórica de saída dos motores excitação independente e *shunt*
Fonte: Hambley, 2014.

4.4.2 Motor Série

Para validar o motor série, utiliza-se um exemplo dado por Chapman (2013) e explanado a seguir.

Uma máquina CC série possui tensão nominal de 250 V, resistência série total (considerando armadura, interpolo e enrolamento série) de 0,08 Ω e número de espiras por polo série igual a 25. Os dados da curva de magnetização da máquina são fornecidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Curva de magnetização do motor série

Rotação (rpm):	1200
F_{mm} (A.e)	V_A(V)
0	0
333	21,0000
667	42,0000
1000	63,0000
1333	84,0000
1667	105,3330
2000	126,3330
2333	146,0000
2667	163,6670
3000	180,0000
3333	195,0000
3667	209,0000
4000	221,3330
4333	232,3330
4667	241,6670
5000	250,0000
5333	257,0000
5667	263,0000
6000	267,6670
6333	271,6670
6667	275,0000
7000	277,6670
7333	279,8330
7667	281,5000
8000	283,1670
8333	284,8330
8667	286,5000
9000	287,6670
9333	288,5000
9667	289,0000
10000	289,2500

Fonte: Chapman, 2013.

A Figura 46 mostra a característica de saída do motor descrito acima. Verifica-se que quando o torque tende a zero, ou seja, na ausência de carga mecânica, a velocidade da máquina tende a infinito. Sabendo-se que a corrente nominal de

armadura é de 400 A, pode-se constatar que quando o torque atinge seu valor nominal (próximo de 400 N.m), a velocidade de operação da máquina também é próxima à nominal (1200 rpm).

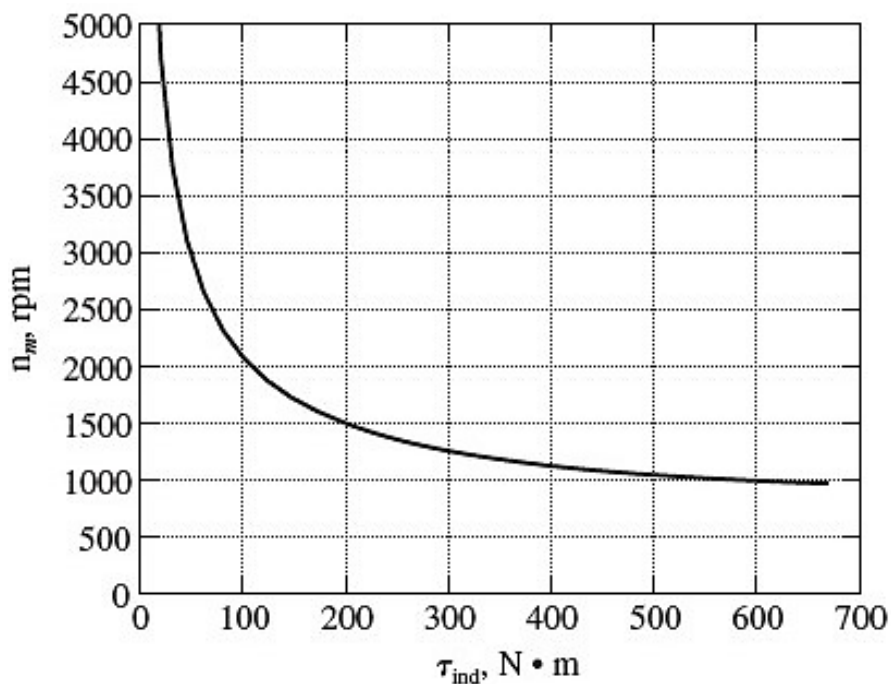


Figura 46 - Curva de saída do motor série do exemplo teórico
Fonte: Hambley, 2014.

As mesmas condições de entrada do exemplo anterior, foram inseridas no código computacional desenvolvido para o motor série. A característica de saída obtida é mostrada na Figura 47. É possível verificar o mesmo comportamento da Figura 46, pois as curvas tiveram resultados idênticos, o que valida o funcionamento do algoritmo.

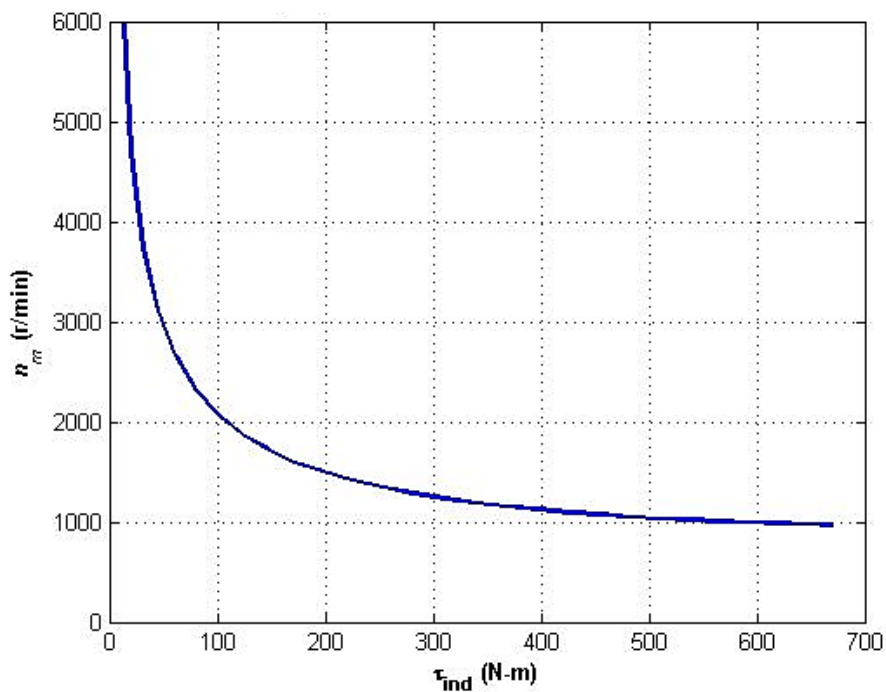


Figura 47 - Simulação da curva de saída do motor série do exemplo teórico
Fonte: Própria autora.

Os dados de laboratório também foram inseridos para simulação no código do motor CC série. A curva obtida é apresentada na Figura 48. Lembrando-se que a corrente nominal de armadura é de 2,2 A, pode-se constatar que quando o torque atinge seu valor nominal (próximo de 2,2 N.m), a velocidade de operação da máquina também é próxima à nominal (1800 rpm).

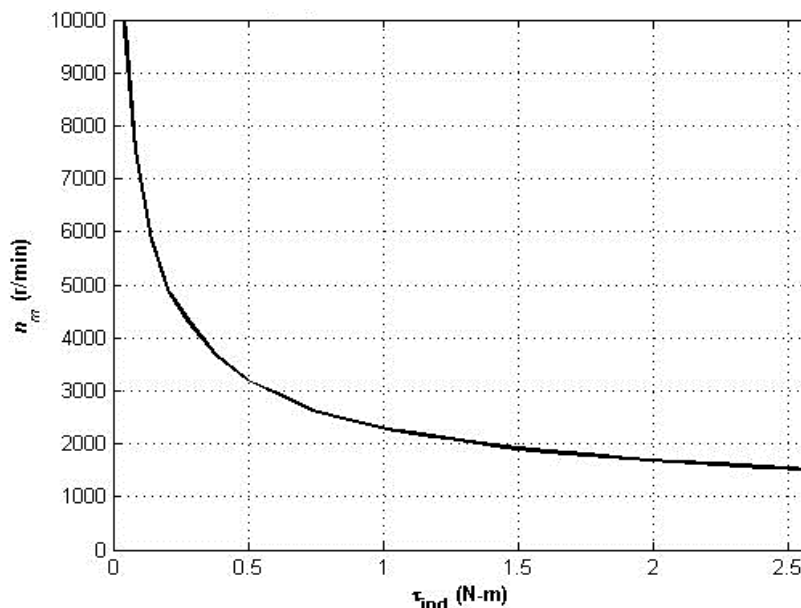


Figura 48 - Simulação da curva de saída do motor série do laboratório
Fonte: Própria autora.

Por fim, a Figura 49 mostra o comportamento da curva de saída de motores em série. Esta curva, quando comparada com as curvas obtidas via simulação nas Figura 47 e 48, valida o código desenvolvido. Adicionalmente, ela mostra a região da faixa normal de operação do motor discutido, que coincide com faixa na qual localiza-se a operação nominal nas análises anteriores.

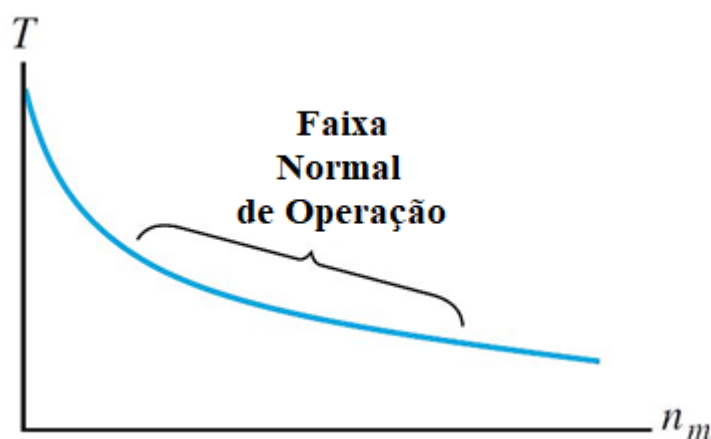


Figura 49 - Curva teórica de saída do motor série
Fonte: Hambley, 2014.

4.4.3 Motor Composto Diferencial

O resultado da simulação do motor CC composto diferencial com derivação longa está ilustrado na Figura 50. Percebe-se que, a vazio, a máquina opera na velocidade nominal de 1800 rpm. Com o aumento da carga, nota-se uma elevação cada vez mais brusca na velocidade.

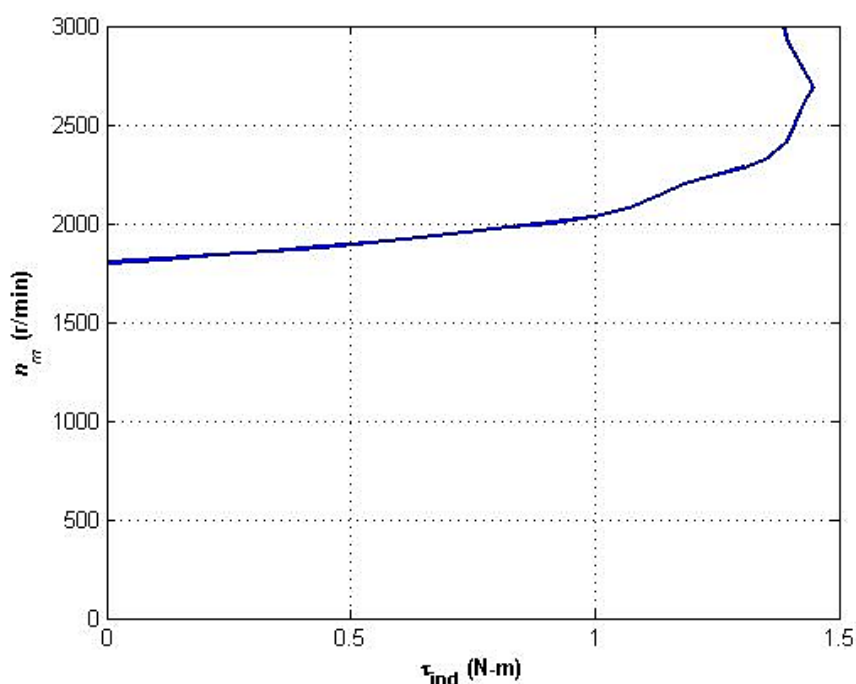


Figura 50 - Simulação da curva de saída do motor composto diferencial
Fonte: Própria autora.

A Figura 51 indica a curva característica de saída típica para um motor diferencial. Percebe-se a semelhança entre esta curva e aquela apresentada na Figura 50. Algumas passagens da curva simulada não se mostram tão suaves quanto a da curva teórica, porém, no geral, os comportamentos mostram-se similares. O procedimento de cálculo interno do programa, por meio dos dados vetoriais na análise gráfica, é responsável por fazer com que ocorra este tipo de comportamento.

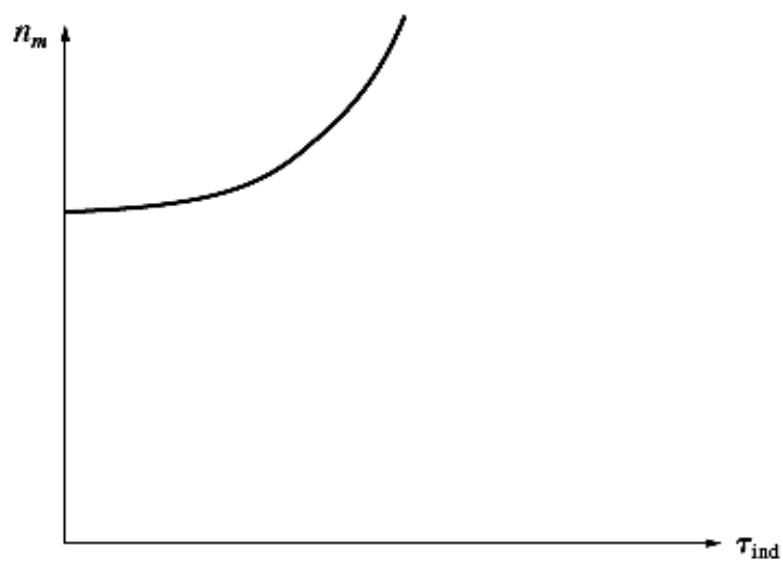


Figura 51 - Curva de saída teórica do motor composto diferencial
Fonte: Hambley, 2014.

5 CONCLUSÃO

A ferramenta computacional é desenvolvida com base nas equações que modelam o comportamento das máquinas de corrente contínua (geradores e motores) em regime permanente. O objetivo é produzir curvas de interesse prático ao estudo de tais dispositivos. Os resultados de simulações computacionais, gerados com a utilização da ferramenta computacional desenvolvida, mostram-se coerentes com as curvas obtidas nas principais referências bibliográficas utilizadas no estudo das máquinas elétricas de corrente contínua. Além disso, tais resultados são comparados com medições realizadas em ensaios executados em laboratório.

No que diz respeito aos geradores, pode-se perceber que a regulação de tensão do gerador em excitação independente é melhor do que a do gerador *shunt*, tal fato coincide com resultados da literatura e pode ser explicado pelo fato de não haver redução do fluxo do campo *shunt* para atendimento da carga. O gerador *shunt*, por sua vez, apresenta regulação de tensão superior ao do gerador composto diferencial, pois além da queda de tensão nas resistências, este último também é submetido à diminuição da força magnetomotriz. Os geradores compostos, com o aumento do número de espiras por polo do enrolamento série, elevaram sua curva de tensão terminal, tendo em vista que a força magnetomotriz do enrolamento série torna-se mais determinante para valores maiores de espiras.

Com relação aos motores, a simulação computacional permitiu a avaliação do desempenho dos motores para condições de carga impossíveis de se reproduzir nas aulas práticas de máquinas elétricas, do laboratório do IFMG - *Campus* Formiga. Analisando-se os resultados dos motores *shunt* e excitação independente, observa-se que a relação entre o torque e a velocidade pode ser considerada linear e inversamente proporcional, ou seja, os maiores valores de torque são obtidos para velocidades menores. O motor composto, para pequenas cargas, apresenta comportamento semelhante ao do motor *shunt* e, para cargas maiores, comportamento próximo ao do motor série. No motor *shunt*, tanto o aumento da resistência de campo quanto o aumento da tensão de entrada, elevam a velocidade de saída. Já o aumento da resistência de armadura, diminui a curva característica de velocidade. O motor composto diferencial apresenta aumento brusco da velocidade de saída com o aumento de carga, reiterando sua característica de instabilidade e

difícil aplicação prática. Estas verificações são explicitadas nos livros (CHAPMAN, 2013; DEL TORO, 1999; FITZGERALD, 2014; HAMBLEY, 2014) sobre este assunto e validam os resultados encontrados.

Com o *software* desenvolvido, há inúmeras opções de simulação e de investigação do comportamento de cada máquina para situações diversas, o que torna este programa uma ferramenta de grande potencial para tornar o aprendizado de máquinas elétricas CC mais flexível e efetivo.

5.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, sugere-se:

- O desenvolvimento da mesma metodologia utilizada neste projeto voltada para a simulação computacional de máquinas elétricas de indução e síncronas.
- Análise mais aprofundada da implementação computacional dos geradores CC *shunt* e composto, a fim de aumentar a precisão dos resultados do programa.
- A inserção do efeito da reação de armadura nos códigos para que seja visualizada a influência deste parâmetro nas características de saída das máquinas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M. L. **Apostila Modelos Dinâmicos de Máquinas Elétricas**. Notas de Aulas, SEL 5738, USP, São Carlos, 2009.

ALVARADO, M. S. **Modelo matemático de un motor de corriente continua separadamente excitado**: Control de velocidad por corriente de armadura. Latin-American Journal of Physics Education, Vol. 6, No. 1, pp. 155-161, mar. 2012.

BELHOT, R. V.; FIGUEIREDO, R. S.; MALAVÉ, C. O. **O uso da simulação no ensino de engenharia**. Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2001.

BOTURA, C. A.; DUARTE JÚNIOR, J. A.; VERALDO JÚNIOR, L. G. O Ensino de Engenharia por Projetos: Ensino Superior Brasileira na Iniciativa CDIO. In: **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**. Apresentação Oral. Porto Alegre, 2016.

CARVALHO, Geraldo. **Máquinas elétricas**. São Paulo: Érica, 2007.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Porto Alegre: AMGH, 2013.

COSTA, V. M.; FREITAS, A. A. M.; REIS, A. K. C.; SILVA, G. S. Modelagem do motor de corrente contínua acionado por retificadores totalmente controlados operando na região de enfraquecimento de campo no ambiente de Matlab/Simulink. **VI CEEL**.

CREPPE, R.; SIMONE, G. A. **Conversão Eletromecânica de Energia**. São Paulo: Érica, 2002.

CRESPO, D. L.; GUINGLA, D. A. Modelamiento y Simulación de un Motor/Generador Eléctrico de Corriente Continua Controlado por Campo/Armadura y con Carga. **Espol**, pp. 1-5, 2010.

DEL TORO, V. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. São Paulo: LTC, 1999.

DIAS, L. P. C.; LOBOSCO, O. S. **Motores Elétricos: Seleção de Aplicação**. McGraw-Hill, 1988.

FARIAS, A. T. **Modelo Dinâmico de Motores de Indução como Instrumento para o Ensino de Maquinas Elétricas**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: McGraw-Hill, 2017. V

FRAILE, M. J. **Maquinas eléctricas**, 5ta Ed. España: Mc Graw Hill, 2003.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência**. Porto Alegre: AMGH, 2014.

FOWLER, R. **Fundamentos de Eletricidade: Corrente Contínua e Magnetismo**. Porto Alegre: AMGH, 2013. V

GLOWACZ Z, GLOWACZ W. Mathematical model of DC motor for analysis of commutation of processes. In: **Int symposium on diagnostics for electric machines, power electronics and drives**. Cracow: 2007.

HAMBLEY, A. R. **Electrical Engineering, Principles and Applications**. New Jersey: Pearson, 2014.

HEY, H. L (1997). **Modelagem Matemática de Sistemas Dinâmicos: Gerador CC**. Disponível em: < coral.ufsm.br/gepoc/renes/Templates/arquivos/elc418/elc418-cap4.pdf >. Acesso em: 15 Fev. 2018.

HUBERT, C. I. **Electric Machines**. Macmillian Publishing Company, 1991.

KENZO, S (2015). **Modelagem de Motor corrente contínua CC**. Disponível em: < https://pdfs.semanticscholar.org/af0a/746dd6026c80fba20ae787c2_cd799e >. Acesso em: 18 Fev. 2018.

KHALIL, F. R. O uso da tecnologia de simulação na prática docente do ensino superior. **XVI Encontro Nacional de Didática e Práticas de Ensino**. Campinas: UNICAMP, 2012.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 14. ed. Rio de Janeiro: Globo, 2000.

LODER, L. L.; BENDER. F. A. O uso de programas de simulação em cursos de engenharia: possibilidades e necessidades. **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, 2007.

MARCHETTO FILHO, G.; PINHEIRO, D. D.; CARATI, E. G. Ambiente de Simulação de Acionamento de Motores de Indução com Controle Vetorial. **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, 2016.

MATSCH, L. W. **Eletromagnetic and Eletromechnical Machines**, Intext Educational Publisher. San Francisco, California: College Division of Intext, 1972.

MELO, B. M. S. **Modelagem e Simulação de uma Máquina Elétrica de Corrente Contínua levando-se em Consideração os Efeitos de Reação de Armadura**. São Paulo: Dissertação de Mestrado, 2006.

PEREIRA, L. S. et al. Melhorias Didáticas nas Disciplinas de Máquinas Elétricas, Conversão Eletromecânica de Energia e Máquinas Síncronas. In: **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**. Apresentação Oral. Porto Alegre, 2016.

PERUCHO, R. G. **Simulación de Un Motor de CC con Ecosimpro**: Proyecto de Simulación. Universidad Politécnica de Madrid, DISAM, jan. 2004.

PINHEIRO, J. R. **Função de Transferência de um Motor CC. Função de Transferência Motor-Carga controlado pelo campo**. Disponível em: <www.ufsm.br/gepoc/renes/Templates/arquivos/elc1031/ELC1031.L2.5.pdf>. Acesso em: 11 Jan. 2018.

SLEON, G. R (2016). **Electric Generator: Direct Current Generators**. Disponível em:<<https://www.britannica.com/technology/electric-generator/Direct-current-generators>>. Acesso em: 18 mai. 2018.

VILLAR, G. J. V. **Geradores e Motores CC (Máquinas de Corrente Contínua)**. Mossoró - RN: CEFETRN, 2006.

WEBER, F. J.; MORALES, P. D. **Modelo Matemático Motor DC Conexión Independiente**. Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil: Trabalho de Conclusão de Curso, 2015.

YILDIZ, A. B. Electrical equivalent circuit based modeling and analysis of direct current motors. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, n. 43, p. 1043-1047, Jun. 2012.

ZACCARIAN, L (1997). **DC motors:** Dynamic Model and Control Techniques. Disponível em: < <https://pdfs.semanticscholar.org/af0a/746dd6026c80fba20ae787c2cd799e>>. Acesso em: 18 Fev. 2018.

ANEXO I - Dados de Laboratório

Os parâmetros do circuito elétrico equivalente foram obtidos na folha de ensaios da máquina CC disponibilizada no laboratório e conferidos com medições realizadas com multímetro. Devido à inviabilidade de abertura da máquina e à ausência de alguns dados na folha de especificação da mesma, os números de espiras por polo nos enrolamentos série e *shunt* foram estimados a partir de valores de máquinas aproximadamente do mesmo porte encontradas em alguns exemplos (Chapman, 2013).

Os dados da curva de magnetização foram coletados configurando-se a máquina como gerador excitação independente e acionando-a a 1800 rpm. Variou-se a corrente de campo de 0 a 0,30 A, com um passo de cerca de 0,01 A, sabendo-se que a precisão da curva seria imprescindível para o bom funcionamento do programa. Tais dados estão expostos na Tabela 3. Percebe-se que tensão máxima atingida é próxima à tensão nominal (220 V), tendo em vista que se tomou o cuidado de elevar a corrente de excitação até 0,30 A e de acionar a máquina a 1800 rpm durante toda a prática, ambos sendo valores nominais. Estes dados foram utilizados em todas as simulações realizadas, exceto onde especifica-se o contrário.

Tabela 3 - Dados para o levantamento da curva de magnetização da máquina

Rotação (rpm):	1800	
I_F (A)	V_F (V)	V_A (V)
0	0	15,75
0.01	9,15	26,79
0.02	12,89	31,31
0.03	21,06	43
0.04	26,23	50,8
0.05	32,35	60,7
0.06	39,08	71,7
0.07	44,5	80,4
0.08	48,7	87
0.09	54,6	96,3
0.10	62,4	107,5
0.11	69,1	117,1
0.12	72,1	121
0.13	82,6	135
0.14	88	141,6
0.15	94,5	149,3
0.17	106,4	162,6
0.19	115,5	171,9
0.21	130,9	185,4
0.23	141,9	193,7

0.25	154,4	201,8
0.27	167,8	209,7
0.29	181,5	216,9
0.30	190,3	220,9

Fonte: Própria autora.

Posteriormente, foram realizadas medições, utilizando-se multímetros e tacômetro, na máquina operando como gerador em excitação independente, *shunt*, série, composto cumulativo e composto diferencial. No entanto, apenas os dados relativos às três primeiras máquinas foram utilizados para validação dos códigos, pois na configuração composta os testes foram realizados em derivação curta, enquanto a implementação computacional foi desenvolvida considerando-se derivação longa.

As Tabelas 4, 5, e 6 mostram os dados de saída da máquina acionada como gerador e conectada em excitação independente, derivação e série, respectivamente. Foram medidas a tensão terminal V_T , a corrente de saída I_L , a corrente de armadura I_A , a corrente de campo *shunt* I_F , a tensão induzida interna E_A e a tensão no enrolamento série V_S , no caso do motor série. Percebe-se uma leve queda de tensão entre E_A e V_T , como já se espera devido a queda na resistência do enrolamento, e uma queda um pouco maior entre estes dois parâmetros no gerador série, tendo em vista que a resistência do enrolamento série também contribui. Também pode-se constatar que a tensão terminal decresce em todas as configurações, exceto na conexão série, o que coincide com as previsões teóricas. A característica detalhada das curvas de saída gerada por estes dados foi discutida no capítulo 4.

Tabela 4 - Dados de saída do gerador em excitação independente

I_F (A)	0.29	
I_A (A)	V_A (V)	V_T (V)
0	216.9	216.6
0.41	213.5	212.9
0.82	210	209.5
1.21	206.6	205.9
1.61	202.8	202.2

Fonte: Própria autora.

Tabela 5 - Dados de saída do gerador em derivação

V_T (V)	I_L (A)	I_F (A)	E_A (V)
214.8	0	0.29	215.0
208.5	0.39	0.27	209
202.3	0.78	0.26	202.9
196	1.15	0.25	196.5
189.4	1.5	0.24	190.1

Fonte: Própria autora.

Tabela 6 - Dados de saída do gerador série

I_A (A)	V_T (V)	E_A (V)	V_s (V)
0	20.07	20.07	0
0.04	22.12	22.31	0,179
0.1	25.14	25.56	0.415
0.17	29.81	30.61	0.747
0.3	38.55	40	1.307
0.66	66.2	69.3	2.84
1.34	112.5	118.6	5.72

Fonte: Própria autora.

Tomou-se o cuidado de testar a máquina da mesma forma como os programas dos geradores foram desenvolvidos, ou seja, com os parâmetros de entrada fixos e com a variação de carga sendo representada pela mudança na corrente de armadura. Isto foi feito adicionando-se na saída do gerador um banco de resistências capaz de variar a carga. No mais, a máquina foi acionada em seus valores nominais e coletaram-se, entre outros parâmetros, suas tensões e correntes de saída.

Os motores não foram testados devido à inviabilidade de variação do torque de carga nas máquinas disponíveis, tendo em vista que a saída do programa consiste na curva característica de torque por velocidade e que a validação necessitaria destes mesmos dados.