

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MARIELLE JORDANE DA SILVA

AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS E DO DESEMPENHO DAS MÁQUINAS
DE CORRENTE CONTÍNUA COM E SEM A UTILIZAÇÃO DOS
ENROLAMENTOS DE INTERPOLOS

FORMIGA - MG

2016

MARIELLE JORDANE DA SILVA

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS E DO DESEMPENHO DAS MÁQUINAS
DE CORRENTE CONTÍNUA COM E SEM A UTILIZAÇÃO DOS
ENROLAMENTOS DE INTERPOLOS**

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

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

FORMIGA - MG

2016

MARIELLE JORDANE DA SILVA

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS E DO DESEMPENHO DAS MÁQUINAS
DE CORRENTE CONTÍNUA COM E SEM A UTILIZAÇÃO DOS
ENROLAMENTOS DE INTERPOLOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto Federal Campus Formiga, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: ____ de _____ de _____.

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Msc. Mariana Guimarães dos Santos

Prof^a. Msc. Ana Paula Lima dos Santos

Prof. Dr. Renan Souza Moura

Dedico este trabalho a minha família, em especial aos meus pais, que sempre estiveram presentes, me apoiando em todas as dificuldades.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me dado sabedoria, paciência e acima de tudo por estar comigo em todas as dificuldades, ajudando-me a superá-las. Sem Ele, nada disso teria sido possível.

Agradeço, de forma especial, à minha mãe Maria Vera de Araújo Silva e ao meu pai Olinto Martins da Silva, por não medirem esforços para que eu pudesse levar meus estudos adiante.

Ao meu irmão Alexsander, todos os meus familiares e amigos que estiveram sempre presentes comigo.

Agradeço a minha orientadora Msc. Mariana Guimarães dos Santos pela paciência, dedicação e esforço que possibilitaram que eu realizasse este trabalho.

E enfim, a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, seja de forma direta ou indireta, muito obrigada.

RESUMO

As atividades industriais estão exigindo cada vez mais máquinas elétricas robustas, de alta confiabilidade, boa eficiência e que não sofram variações significativas devido ao acoplamento de cargas. Neste contexto, as principais escolhas normalmente são os motores de indução trifásicos que atendem a essas características por meio da utilização dos inversores de frequência. No entanto, em algumas aplicações específicas, tais como: processos de laminação, máquinas têxteis e em veículos de tração, os motores CC apresentam melhor desempenho, tornando-se a melhor opção. As máquinas CC, em função do seu princípio de funcionamento e aspectos construtivos, podem apresentar faiscamento no processo de comutação, que além de perdas, podem apresentar riscos a ambientes industriais classificados como perigosos, que exigem equipamentos que não provoquem centelhas. O uso do enrolamento do interpolo nas máquinas CC consiste em uma técnica capaz de melhorar o desempenho e a vida-útil dessas máquinas. O interpolo possui a função de compensar o efeito da reação da armadura, o qual provoca uma queda da tensão terminal gerada, no caso dos geradores, e um aumento na variação da velocidade, no caso dos motores. Além disso, o interpolo possui a finalidade de diminuir o faiscamento do anel comutador, uma vez que esse enrolamento auxilia no processo de comutação, impedindo assim o desgaste excessivo das escovas e do comutador. O presente trabalho apresenta uma análise do desempenho das máquinas CC com e sem a utilização do interpolo, visto que os efeitos da reação da armadura e de uma comutação incorreta são significativos e devem ser considerados na avaliação de desempenho das mesmas. Tal análise é realizada com base em experimentos práticos realizados no laboratório de máquinas do IFMG – campus Formiga.

Palavras-chave: Máquinas de corrente contínua. Reação da armadura. Enrolamento do interpolo. Análise do desempenho.

ABSTRACT

Industrial activities are requiring more and more robust electrical machines, with great reliability and good efficiency, and with no significant changes due to the coupling loads. Therefore, three-phase induction motors are one of the main options available that are able to meet these specifications by using frequency inverters. However, in some specific applications, such as lamination processes, textile machines and traction vehicles, DC motors have better performance, turning on to be the best option. DC machines, due to their operating principle and constructive aspects, may present sparking during the switching process, which besides losses may present risks to industrial environments classified as dangerous, requiring equipments that do not cause sparking. The use of interpole winding in CC machines consists of a technique to improve the performance and increase the life-cycle of these machines. The interpole is designed to compensate the effect of armature reaction, which causes a voltage drop in the total voltage generated, for generators case, and an increase in the speed variation, for motors case. Also, the interpole works reducing the sparking in the commutator, since this winding also works on the switching process, preventing excessive wear of the brushes and commutator. This paper presents an analysis of CC machines performance, with and without the use of interpole, considering that armature reaction effects and an incorrect switching are important events that should be taken into account for evaluating their performance. This analysis is performed based on laboratory practices at IFMG - Campus Formiga.

Keywords: Direct current machines. Armature reaction. Interpole winding. Performance analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Características de um gerador CC em derivação e excitação independente.	15
Figura 2 - Universo tecnológico dos motores elétricos.....	19
Figura 3 - Enrolamento de campo-série e campo-shunt.....	21
Figura 4 - Corte de uma máquina CC.	22
Figura 5 - Condutor movendo-se em um campo magnético, gerando uma fem induzida.	23
Figura 6 - Princípio de funcionamento de um motor CC.....	25
Figura 7 - Tensão induzida na espira em movimento no interior do campo magnético.	26
Figura 8 - Circuito equivalente do gerador do tipo composto longo.	27
Figura 9 - Circuito equivalente excitação independente.	27
Figura 10 - Forma típica de uma curva de magnetização de uma máquina CC.	28
Figura 11 - Circuito equivalente série.....	29
Figura 12 - Circuito equivalente shunt.....	30
Figura 13 - Circuito equivalente composto curto.	31
Figura 14 - Circuito equivalente composto longo.	31
Figura 15 - Fluxo da armadura produzido pela corrente de armadura.....	33
Figura 16 - Interação entre os fluxos da armadura e polar, os quais resultam em um campo magnético que desloca a linha de neutro.....	33
Figura 17 - Extremidades polares com alta relutância.	34
Figura 18 - Esquema da laminação do campo a fim de compensar o efeito da reação da armadura.....	35
Figura 19 - Comparação do deslocamento da linha neutra do gerador em relação ao motor. .	35
Figura 20 - Neutralização da fmm da armadura por meio de enrolamentos.	36
Figura 21 - Conjunto didático: máquina síncrona acoplada à máquina CC.....	39
Figura 22 - Placa da máquina CC.	41
Figura 23 - Gerador shunt excitação independente, sem interpolo.	41
Figura 24 - Gerador shunt auto-excitado, sem interpolo.....	42
Figura 25 - Gerador série, sem interpolo.....	42
Figura 26 - Gerador composto, sem interpolo.....	43
Figura 27 - Motor shunt excitação independente, sem interpolo.	45
Figura 28 - Motor shunt auto-excitado, sem interpolo.....	45
Figura 29 - Motor composto, sem interpolo.....	46

Figura 30 - Comparação da tensão de um gerador shunt excitação independente, com e sem interpolo.	48
Figura 31 - Comparação da tensão de um gerador shunt auto-excitado, com e sem interpolo.	48
Figura 32 - Comparação da tensão de um gerador composto cumulativo, com e sem interpolo.	49
Figura 33 - Comparação da tensão de um gerador série, com e sem interpolo.	51
Figura 34 - Comparação das características de carga-tensão dos geradores CC, sem interpolo.	53
Figura 35 - Comparação das características de carga-tensão dos geradores CC, com interpolo.	54
Figura 36 - Comparação das características de torque-carga das diferentes configurações dos motores CC, sem interpolo.	60
Figura 37 - Comparação das características de torque-carga das diferentes configurações dos motores CC, com interpolo.	61
Figura 38 - Comparação das características de carga-velocidade das diferentes configurações dos motores CC, sem interpolo.	62
Figura 39 - Comparação das características carga-velocidade das diferentes configurações dos motores CC, com interpolo.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis medidas nos ensaios dos geradores shunt e composto, com e sem interpolo.	47
Tabela 2 - Variáveis medidas no ensaio do gerador série, com e sem interpolo.....	50
Tabela 3 - Regulação de tensão dos geradores, com e sem interpolo.....	52
Tabela 4 - Comportamento do torque e da corrente de armadura dos geradores, com e sem interpolo, de acordo com a variação de carga.	55
Tabela 5 - Comportamento da velocidade e da corrente de armadura dos motores, com e sem interpolo, de acordo com a variação de carga.	57
Tabela 6 - Regulação de velocidade dos motores, com e sem interpolo.....	59

SUMÁRIO

1 VISÃO GERAL DO TRABALHO.....	13
1.1 Introdução	13
1.2 Tema	16
1.2 Problema	16
1.3 Justificativa	17
1.4 Hipótese	17
1.5 Objetivos	17
1.5.1 Objetivo geral	18
1.5.2 Objetivos específicos.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Máquinas Elétricas	19
2.2 Máquinas CC.....	20
2.2.1 Aspectos construtivos.....	20
2.2.2 Princípio de funcionamento.....	22
2.2.2.1 Lei de Faraday da indução eletromagnética	23
2.2.2.2 Lei de Lenz.....	24
2.2.2.3 Funcionamento do motor CC	24
2.2.2.4 Funcionamento do gerador CC.....	25
2.3 Circuito equivalente da máquina CC.....	26
2.3.1 Excitação independente	27
2.3.2 Auto-excitado.....	28
2.3.2.1 Série	29
2.3.2.2 Derivação	30
2.3.2.3 Composto	30
2.4 Comutação	32
2.5 Reação da armadura.....	32
2.6 Compensação para o efeito da reação da armadura.....	34
2.6.1 Extremidade de pólos com alta relutância.....	34
2.6.2 Redução no fluxo da armadura	34
2.6.3 Ajuste da linha neutra.....	35
2.6.4 Enrolamentos de compensação/interpolo	36

2.7 Rendimento da máquina CC	37
2.8 Perdas em uma máquina CC	37
3 MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1 Geradores CC	39
3.2 Motores CC	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1 Geradores CC	47
4.1.1 Comparação das características carga-tensão dos geradores.....	53
4.2 Motores CC	55
4.2.1 Comparação das características torque-carga dos motores CC	59
4.2.3 Comparação das características carga-velocidade dos motores CC	61
5 CONCLUSÃO	63
5.1 Propostas para trabalhos futuros	64
REFERÊNCIAS	65

1 VISÃO GERAL DO TRABALHO

1.1 Introdução

As máquinas elétricas podem ser classificadas de acordo com o tipo de alimentação, contínua ou alternada, e de acordo com o tipo de conversão de energia, sendo motores ou geradores. Motores elétricos são dispositivos que transformam energia elétrica em energia mecânica. Já os geradores convertem energia mecânica em elétrica (FITZGERALD *et al*, 2006) (SIMONE e CREPPE, 2002).

Os motores elétricos desempenham um papel muito importante no progresso da humanidade, isso se deve principalmente à sua extrema versatilidade. Dessa forma, podem ser utilizados nos mais variados campos de aplicação, sendo considerado o meio mais eficiente para a transformação de energia elétrica em mecânica (VOGES, 2011).

O motor de corrente contínua possui uma significativa parcela do mercado de motores elétricos, sendo utilizado em diversas aplicações, tais como: indústria química e petroquímica, indústrias siderúrgicas, processos de laminação, máquinas têxteis, em veículos de tração, entre outras (WEG, 2012).

O ano de 1866 pode ser considerado o ano de nascimento da máquina elétrica, pois foi nesta data que o cientista alemão Werner Siemens desenvolveu o primeiro gerador de corrente contínua auto-induzido. Essa máquina é considerada o último estágio de um processo de estudos e pesquisas sobre esse tema, visto que vários outros cientistas levaram quase três séculos em busca desse conhecimento. Em 1879, a firma Siemens e Halske apresentou na feira industrial de Berlim a primeira locomotiva acionada por um motor elétrico de 2 kW. No entanto, pelo seu alto custo de fabricação e vulnerabilidade em serviço, devido ao comutador, muitos cientistas buscaram desenvolver motores elétricos mais baratos, mais robustos e com menor custo de manutenção (ABIMAQ, 2006) (WEG, 2003).

Os esforços dos pesquisadores, tais como Nicola Tesla, Galileu Ferraris e do Michael Von Dolivo Dobrowolsky não se restringiram somente ao aperfeiçoamento do motor de corrente contínua, mas também ao desenvolvimento de sistemas de corrente alternada (ABIMAQ, 2006) (WEG, 2003).

A máquina CC é constituída, basicamente, pelo enrolamento de campo (paralelo e série), localizado no estator, o qual é responsável pela produção do fluxo principal, fundamental para o funcionamento da máquina. No rotor estão localizados os enrolamentos de armadura, responsáveis pela condução da corrente que dá origem ao torque (motor) ou pela

condução da corrente necessária para o mecanismo de indução de tensão (gerador). Durante o funcionamento das máquinas CC, existe um fenômeno denominado “reação da armadura”, o qual distorce o fluxo principal, provocando perdas, gerando faiscamento e diminuindo a vida útil da máquina (FITZGERALD *et al*, 2006).

Segundo KOSOW, a reação da armadura consiste na distorção do fluxo polar devido ao fluxo produzido na armadura. Essa distorção provoca o deslocamento da linha neutra e consequente saturação magnética em um dos lados do pólo fixo da máquina. Dessa forma, resulta em um centelhamento mais acentuado e um fluxo resultante com menor intensidade. Esses efeitos provocam perdas consideráveis tanto no desgaste físico das partes constituintes, como comutador e escovas, quanto no desempenho da máquina CC, principalmente no que se refere à utilização de cargas elevadas.

As maiores vantagens das máquinas CC baseiam-se na grande variedade de características de operação, principalmente no que se refere ao regime permanente, devido aos diferentes tipos de métodos de excitação dos enrolamentos de campo. Sendo assim, as máquinas CC podem ser classificadas em série, shunt e composta (longa e curta) (FITZGERALD *et al*, 2008).

A avaliação do desempenho das máquinas CC é distinta para geradores e motores. Nos geradores, espera-se que o valor da tensão gerada não sofra variações devido à inserção de carga, ou seja, o gerador deve possuir uma boa regulação de tensão. No entanto, conforme apresenta a Figura 1, o valor da tensão terminal decresce, em maior ou menor intensidade, de acordo com o tipo de classificação do gerador utilizado. Para o motor, deseja-se que este não sofra instabilidade devido ao acoplamento de carga, ou seja, que a velocidade do eixo do motor mantenha-se constante (DEL TORO, 1994).

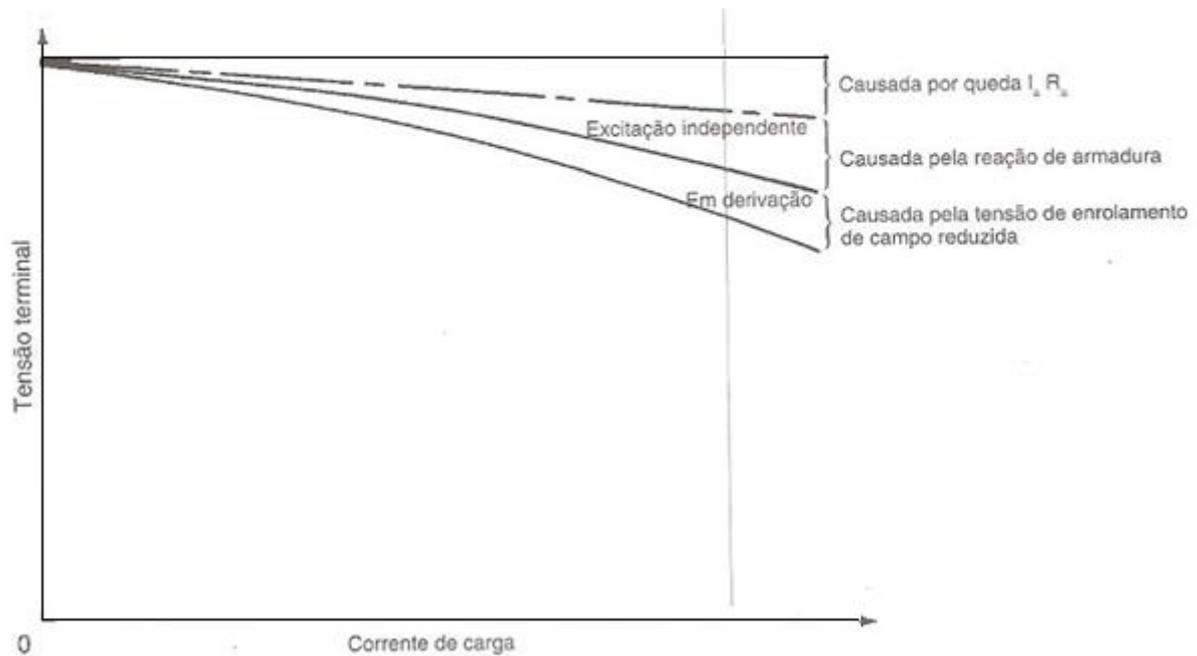


Figura 1 - Características de um gerador CC em derivação e excitação independente.

Fonte: DEL TORO, 1994.

A ocorrência de alguns tipos de perdas é inevitável, visto que a passagem de corrente pelos enrolamentos causa aquecimento, resultando em perdas ôhmicas. No entanto, as perdas causadas pela reação da armadura podem ser minimizadas por intermédio de alguns mecanismos de compensação, normalmente considerados durante o projeto e construção da máquina, seja por técnicas mecânicas ou elétricas.

As técnicas mecânicas consistem em aumentar a relutância nas extremidades dos pólos e utilizar lâminas de campo ranhuradas, bem como o chanframento dessas lâminas, de modo a reduzir o fluxo de armadura. No entanto, essas técnicas apresentam a desvantagem de afetar o fluxo principal, mesmo que em menor intensidade, se comparado ao fluxo produzido na armadura. Em contrapartida, há outra técnica mecânica que não apresenta essa desvantagem, a qual consiste no deslocamento manual da linha neutra. Entretanto, esse deslocamento deve ser realizado em sentidos diferentes dependendo do tipo de operação da máquina, seja ela gerador ou motor, caracterizando-se como uma desvantagem dessa técnica.

Dessa forma, o método mais eficaz, o qual consiste em uma técnica elétrica, baseia-se na utilização de enrolamentos. Esses enrolamentos são posicionados entre os pólos fixos e possuem a finalidade de produzir um fluxo proporcional à corrente da armadura e em sentido contrário ao fluxo da armadura, neutralizando assim, o efeito da reação da armadura (KOSOW, 2008).

O presente trabalho pretende realizar uma análise comparativa do desempenho de uma máquina CC, operando como gerador e como motor, em suas diversas classificações, com e sem o enrolamento de interpolo. Sendo assim, deseja-se verificar a influência prejudicial que a reação da armadura proporciona nas máquinas CC, relacionada tanto ao desempenho quanto ao estado de conservação dessas máquinas.

Para realização dessa análise, serão realizados ensaios na máquina CC, com e sem interpolo, a fim de verificar o comportamento dos geradores e motores CC, devido à variação da carga, em ambas as condições. Dessa forma, por meio deste trabalho, espera-se comprovar os benefícios da utilização do interpolo, relacionados ao aumento do desempenho da máquina e à redução do faiscamento das escovas e do comutador, uma vez que essa redução evita o desgaste excessivo desses componentes, aumentando a vida-útil da máquina.

1.2 Tema

Nas máquinas elétricas existem dois fluxos, o fluxo principal, produzido pelos enrolamentos de campo, e o fluxo da armadura, produzido pela corrente induzida na armadura. A interação entre esses fluxos produz um fluxo resultante, que pode sofrer um deslocamento conhecido como reação da armadura. A eficiência da máquina CC é extremamente prejudicada por esse fenômeno, sendo que, quanto maior a corrente da armadura, maiores os danos causados. Sendo assim, este trabalho propõe a comparação das características das máquinas CC com e sem a utilização de um método de compensação da reação da armadura (interpolo), a fim de analisar os benefícios advindos com o uso desse método.

1.2 Problema

O fluxo da armadura provoca a distorção do fluxo de campo principal da máquina CC, deslocando a linha de neutro magnético onde a comutação deve ocorrer. Esse deslocamento, conhecido como reação da armadura, resulta em vários fatores prejudiciais à máquina, como: diminuição da vida útil, desgaste das escovas, faiscamento, problemas de comutação, entre outros. Além disso, os efeitos da reação da armadura prejudicam, significativamente, o rendimento e o desempenho da máquina CC, devido à redução do fluxo de campo principal, o que provoca uma queda de tensão nos geradores e um aumento na variação da velocidade dos motores, ambos com o acréscimo da carga.

1.3 Justificativa

Existem na literatura diversos métodos de compensação para os efeitos da reação da armadura. Esses métodos consistem em técnicas mecânicas ou elétricas. As técnicas mecânicas apresentam a desvantagem de não contrabalancear os efeitos das correntes e fluxo da armadura de acordo com as elevadas cargas. Assim, em máquinas CC de grande porte, mesmo com a utilização dos métodos mecânicos, as elevadas correntes da armadura produzem fluxo suficiente para provocar a distorção da linha neutra e, conseqüentemente, todos os efeitos causados pela reação da armadura. Dessa forma, a utilização de um método elétrico, denominado interpolo, consiste em uma técnica eficaz aplicada às máquinas CC de diferentes capacidades, podendo ser aplicadas aos motores e geradores de forma satisfatória.

Diante do exposto, a comparação do desempenho das máquinas CC, com e sem o interpolo, é de suma importância, uma vez que as melhorias apresentadas na bibliografia devido ao uso do interpolo são enormes, tanto no que diz respeito à eficiência quanto na conservação da vida útil da máquina.

1.4 Hipótese

O interpolo ou pólo de comutação consiste em uma técnica elétrica utilizada para produzir um fluxo de igual intensidade, porém em sentido contrário, ao fluxo produzido pela corrente da armadura. Dessa forma, esse fluxo neutraliza o fluxo da armadura, impedindo, assim, a ocorrência do efeito da reação da armadura e de todos os efeitos adversos causados por este fenômeno. Dessa forma, estima-se que, por meio da utilização desse método de compensação, o desempenho e a vida-útil dos motores e geradores CC melhorem consideravelmente.

1.5 Objetivos

Apresenta-se aqui o objetivo geral do trabalho e os objetivos específicos, os quais definem o escopo deste trabalho.

1.5.1 Objetivo geral

Comparação do desempenho dos motores e geradores de corrente contínua, com e sem a utilização dos enrolamentos de interpolos.

1.5.2 Objetivos específicos

Apresentam-se aqui os objetivos específicos necessários para que o objetivo geral proposto seja alcançado:

- Estudo sobre o funcionamento das máquinas CC;
- Estudo sobre o efeito da reação da armadura, bem como os métodos para solucionar esse problema;
- Realização de ensaios em diversas configurações do gerador CC, com e sem o interpolo, a fim de avaliar a tensão gerada e, conseqüentemente, a regulação de tensão;
- Realização de ensaios em diversas configurações do motor CC, com e sem o interpolo, a fim de avaliar a velocidade e, conseqüentemente, o torque.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Máquinas Elétricas

A conversão eletromecânica de energia envolve a troca de energia entre um sistema elétrico e um sistema mecânico, e vice-versa. Sendo assim, quando as máquinas elétricas convertem energia mecânica em elétrica, são denominadas geradores. Já, quando ocorre a conversão da energia elétrica em mecânica, esses dispositivos são denominados motores. Além disso, os dispositivos eletromecânicos podem ser classificados de acordo com o tipo de alimentação. Sendo assim, quando o sistema elétrico é energizado com corrente alternada, esses dispositivos são chamados de geradores CA e motores CA. Da mesma forma, quando os dispositivos eletromecânicos são energizados com corrente contínua, eles são denominados geradores CC e motores CC (DEL TORO, 1994) (SÁ e AMORIM, 2014). A Figura 2 apresenta um esquemático sobre a classificação dos motores elétricos.

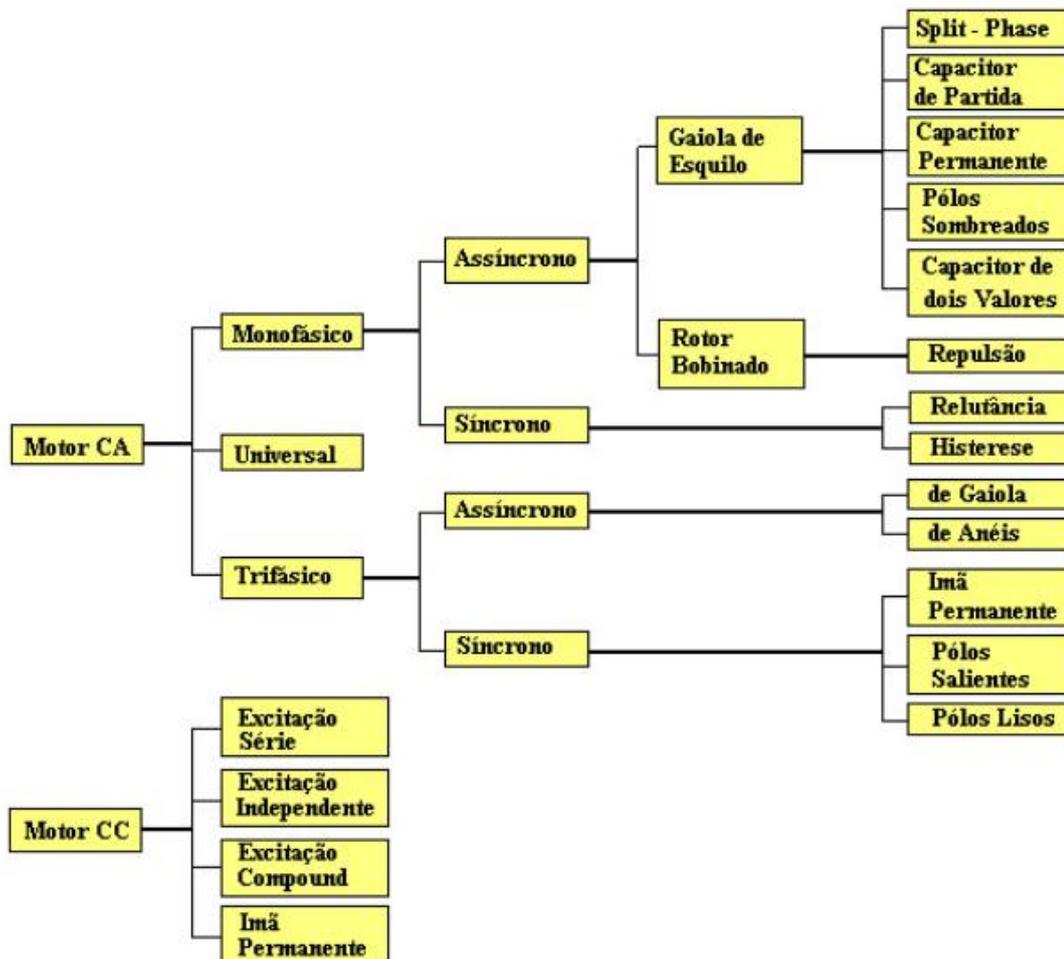


Figura 2 - Universo tecnológico dos motores elétricos.

Fonte: WEG, 2003.

2.2 Máquinas CC

As máquinas CC consistem em máquinas versáteis, visto que podem fornecer torques de partida elevados, assim como torques de aceleração e desaceleração também elevados. Para o gerador, a rotação é suprida por uma máquina primária, ou seja, provêm de uma fonte de energia mecânica, a fim de produzir o movimento relativo entre os condutores e o campo magnético da máquina CC. No caso dos motores, a energia elétrica é suprida aos condutores e ao campo magnético da máquina CC para produzir o movimento relativo entre eles e, assim, produzir energia mecânica. Dessa forma, a energia elétrica é fornecida aos enrolamentos da armadura da máquina, gerando um campo magnético. Esse campo interage com o campo magnético produzido pelos enrolamentos de campo, fazendo surgir uma força eletromotriz que causa a rotação do eixo do motor (DEL TORO, 1994) (FITZGERALD *et al*, 2006) (KOSOW, 2008).

As máquinas elétricas são compostas por uma parte estacionária, denominada estator, e uma parte girante, denominada rotor (REZECK, 2007) (WEG, 2006).

2.2.1 Aspectos construtivos

O estator consiste na parte estática da máquina. É constituído de material ferromagnético envolto por um enrolamento denominado enrolamento de campo. Esse enrolamento possui a função de produzir um campo magnético fixo, a fim de que possa interagir com o campo da armadura. Nos geradores e motores CC, a corrente que circula pelo enrolamento de campo pode ser proveniente da fonte que alimenta a armadura ou de uma fonte separada. O enrolamento de campo pode ser constituído de poucas espiras de fio grosso, denominado campo-série, ou muitas espiras de fio fino, denominado campo-shunt ou derivação. A Figura 3 apresenta um esquemático com os enrolamentos de campo. Os enrolamentos de campo-shunt são responsáveis por produzir o fluxo principal. Enquanto os enrolamentos de campo-série podem aumentar ou diminuir esse fluxo (KOSOW, 2008) (REZECK, 2007) (WEG, 2006).

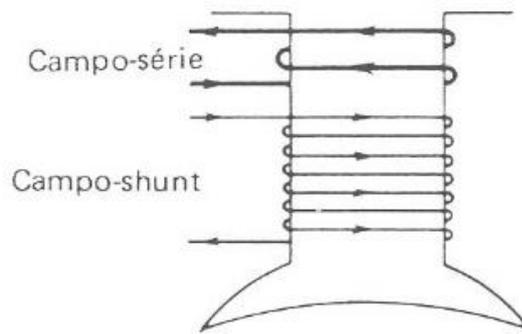


Figura 3 - Enrolamento de campo-série e campo-shunt.

Fonte: KOSOW, 2008.

O estator é constituído por (REZECK, 2007) (WEG, 2007):

- Carcaça: responsável pela condução do fluxo magnético e suporte do conjunto.
- Pólos de excitação: geram o fluxo magnético.
- Pólos de comutação: percorridos pela corrente de armadura, com a finalidade de compensar o efeito da reação da armadura na região de comutação, evitando o deslocamento da linha neutra em carga.
- Enrolamento de compensação: possui a finalidade de compensar a reação da armadura na parte externa do rotor. Dessa forma, evita o aparecimento de faíscas provocadas por uma diferença de potencial entre espiras, devido à distribuição não uniforme da indução no entreferro.
- Escovas: são compostas de material condutor e deslizam sobre o comutador quando este gira, proporcionando assim a ligação elétrica entre a armadura e o exterior.
- Conjunto porta escovas: responsável por alojar as escovas.

O rotor consiste na parte girante da máquina e é construído de um material ferromagnético envolto por um enrolamento denominado enrolamento de armadura. No caso do motor, a armadura recebe a corrente elétrica de uma fonte externa, fazendo com que a armadura entre em movimento. Já, no gerador, a armadura gira por efeito de uma força mecânica externa. O rotor possui as seguintes partes constituintes (REZECK, 2007) (WEG, 2007):

- Rotor com enrolamento: é constituído por chapas de aço silício laminadas, com ranhuras na periferia para acomodar o enrolamento da armadura. Este enrolamento está em contato elétrico com as lâminas do comutador.
- Comutador: consiste em um conversor mecânico que transfere energia ao enrolamento do rotor e é responsável por converter a corrente alternada que circula em sua armadura em corrente contínua, a qual é liberada em seus terminais quando a máquina opera como gerador.
- Eixo: elemento que transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor.

A Figura 4 apresenta uma máquina CC vista internamente por meio de um corte lateral (KOSOW, 2008).

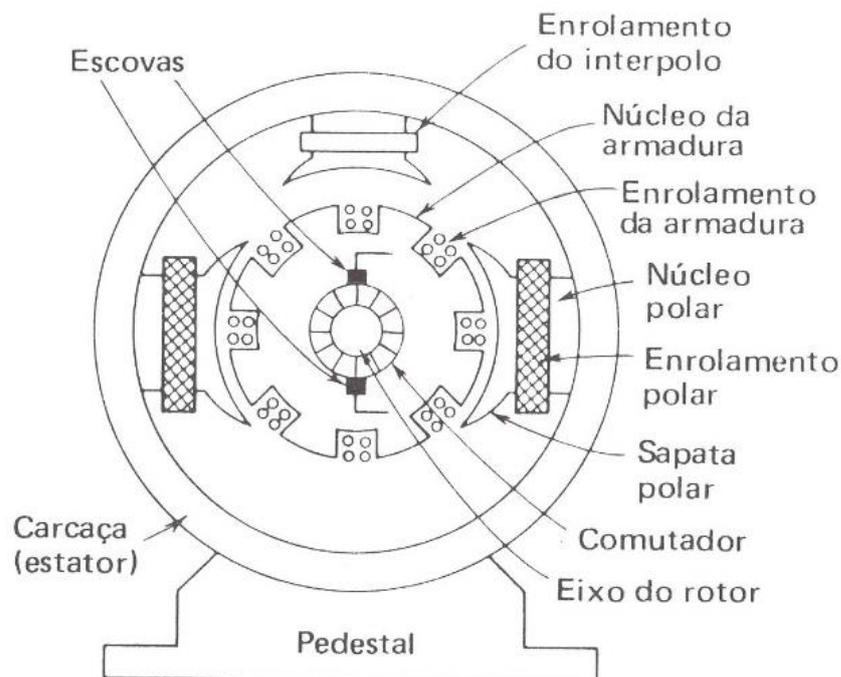


Figura 4 - Corte de uma máquina CC.

Fonte: KOSOW, 2008.

2.2.2 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento das máquinas elétricas baseia-se nos princípios de conversão eletromagnética de energia, tais como a Lei de Faraday e a Lei de Lenz (KOSOW, 2008).

2.2.2.1 Lei de Faraday da indução eletromagnética

Em 1831, Faraday realizou a incomparável descoberta da geração de uma tensão devido ao movimento relativo entre um campo magnético e um condutor de eletricidade. Essa tensão foi denominada tensão induzida, visto que apenas havia o movimento relativo entre o condutor e o campo magnético, não havendo o contato físico entre eles (KOSOW, 2008).

A Figura 5 apresenta um diagrama que exemplifica o princípio da indução eletromagnética. Nessa figura, tem-se um condutor de comprimento l movendo-se em um campo magnético B , a fim de gerar uma força eletromotriz (fem) induzida em seu interior (KOSOW, 2008).

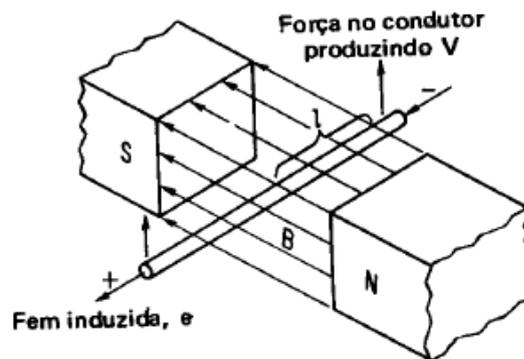


Figura 5 - Condutor movendo-se em um campo magnético, gerando uma fem induzida.

Fonte: KOSOW, 2008.

A fem induzida nesse condutor pode ser calculada por meio da Equação 1 (DEL TORO, 1994).

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = 2 \cdot B \cdot l \cdot v \quad (1)$$

Na qual:

e : representa a tensão induzida no condutor;

$d\Phi$: representa a variação do número de linhas de força magnética concatenadas pelo condutor em um determinado espaço de tempo;

dt : representa o intervalo de tempo no qual $d\phi$ são concatenadas;

B : representa a densidade de campo magnético;

l : representa o comprimento do condutor;

v : representa a velocidade do deslocamento desse condutor no interior do campo magnético.

2.2.2.2 Lei de Lenz

A lei de Lenz estabelece a relação entre os sentidos da fem e da corrente induzida no condutor com a variação do fluxo concatenado que as produziu. Dessa forma, de acordo com essa lei, uma fem induzida, em um circuito fechado, fará com que circule corrente. Essa corrente produzirá um campo magnético que se opõe à variação do fluxo que a induziu. (KOSOW, 2008).

2.2.2.3 Funcionamento do motor CC

O funcionamento de um motor CC baseia-se nas forças produzidas da interação entre o campo magnético, produzido no estator, e a corrente de armadura no rotor. Essas forças tendem a movimentar o condutor em um sentido que depende do campo e da corrente na armadura. No entanto, para que este movimento seja contínuo, é necessária a inversão da corrente nas espiras do rotor, o que é possível com a utilização do comutador de corrente. Este comutador possibilita a circulação de corrente alternada no rotor por meio de uma fonte de corrente contínua (PAIXÃO, 2009) (WEG, 2007).

Assim, o deslocamento do condutor no campo magnético resulta em uma variação do fluxo concatenado em torno desse condutor. Dessa forma, surge tensão induzida, denominada força contra-eletromotriz (f_{cem}), que atua no sentido contrário a tensão aplicada. Este fato está de acordo com a Lei de Lenz, visto que o sentido da tensão induzida opõe-se à força eletromotriz que a originou (PAIXÃO, 2009) (WEG, 2007).

A Figura 6 apresenta as forças que atuam em uma espira imersa em um campo magnético, percorrida pela corrente de armadura, exemplificando o princípio de funcionamento de um motor CC (PAIXÃO, 2009) (WEG, 2007).

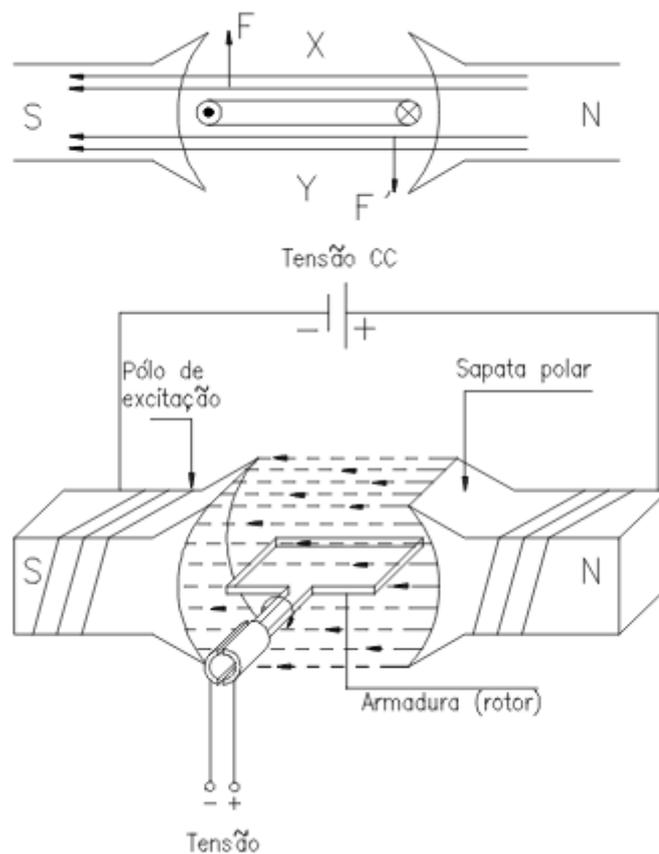


Figura 6 - Princípio de funcionamento de um motor CC.

Fonte: WEG, 2007.

2.2.2.4 Funcionamento do gerador CC

No gerador CC, os enrolamentos de campo, localizados no estator, são alimentados com uma tensão contínua, a fim de produzir um campo magnético fixo. Esse campo magnético corta as espiras do enrolamento de armadura, que gira dentro deste campo por meio de uma ação mecânica. Conforme visto na Lei de Faraday, condutor movendo dentro de um campo magnético, por indução eletromagnética, gera uma tensão induzida. Essa tensão é retificada por meio do comutador e transferida ao meio externo pelas escovas (CARVALHO, 2012).

A Figura 7 apresenta uma espira em movimento no interior de um campo magnético, bem como o gráfico das fem induzidas nas respectivas posições de rotação dessa espira.

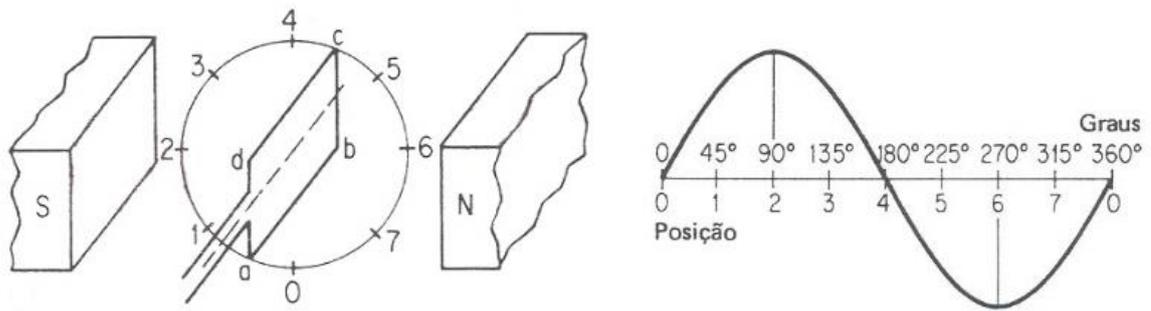


Figura 7 - Tensão induzida na espira em movimento no interior do campo magnético.

Fonte: VILLAR, 2006.

2.3 Circuito equivalente da máquina CC

O modelo do circuito equivalente da máquina CC é o mesmo tanto para motor quanto para gerador, a única diferença consiste no sentido de circulação das correntes. Nesses circuitos, as indutâncias dos enrolamentos são desprezadas. A armadura é modelada por R_a e E_a , que correspondem à resistência e a tensão gerada, respectivamente. Os enrolamentos de campo são modelados por R_f e R_s , os quais correspondem as resistências dos enrolamentos de campo-shunt e campo-série, respectivamente. A tensão de terminal de armadura é modelada por V_t . O reostato externo, R_{fe} , é utilizado a fim de controlar a corrente de campo. As correntes que circulam nesses circuitos são denominadas corrente de armadura (I_a), corrente de campo (I_f) e corrente de carga (I_L) (FITZGERALD *et al*, 2008).

A Figura 8 apresenta o circuito equivalente de um gerador CC composto longo. Por meio desse circuito, é possível obter a relação entre a tensão gerada, em regime permanente, e a tensão de terminal de armadura, representada pela Equação 2. Essa equação pode ser utilizada tanto para motores quanto para geradores, alterando apenas o sinal, sendo negativo para geradores e positivo para motores, visto que o sentido de circulação de corrente é oposto para ambas às configurações da máquina CC (FITZGERALD *et al*, 2008).

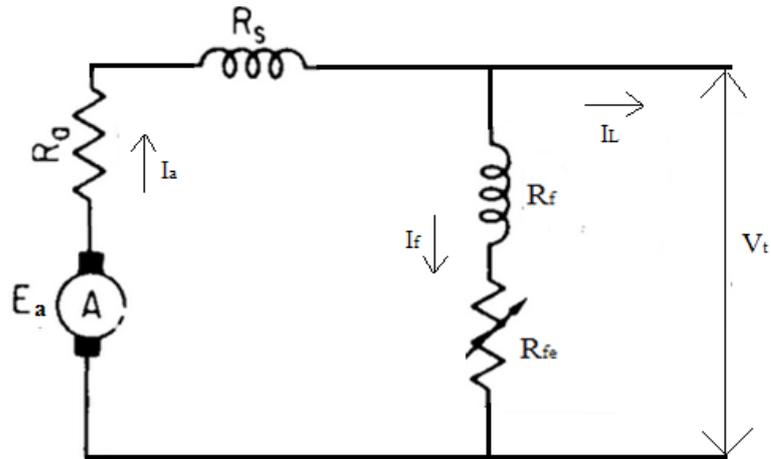


Figura 8 - Circuito equivalente do gerador do tipo composto longo.

Fonte: Adaptado de KOSOW, 2008.

$$V_t = E_a - I_a \cdot (R_a + R_s) \quad (2)$$

Nas máquinas CC, o tipo de excitação do enrolamento de campo proporciona a classificação das mesmas. Sendo assim, as máquinas podem ser classificadas como shunt (excitação independente e auto-excitado), série e composta (FITZGERALD *et al*, 2008).

2.3.1 Excitação independente

Os enrolamentos de campo-shunt são alimentados com uma fonte de corrente contínua independente da armadura, ou seja, a corrente do campo-shunt não provém da armadura, conforme apresentado na Figura 9 (CARVALHO, 2012) (FITZGERALD *et al*, 2008).

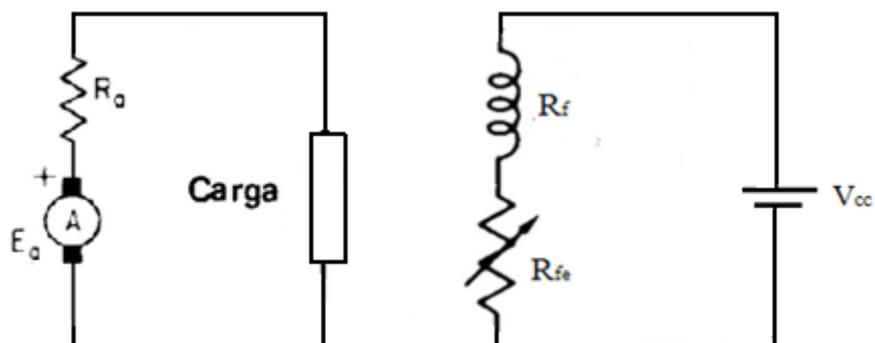


Figura 9 - Circuito equivalente excitação independente.

Fonte: Adaptado de KOSOW, 2008.

2.3.2 Auto-excitado

Neste tipo de classificação, uma parcela da corrente de armadura alimenta os enrolamentos de campo-shunt. Este tipo de alimentação pode ser subdividido em: série, derivação e composto, dependendo do modo de conexão dos enrolamentos de campo (CARVALHO, 2012) (FITZGERALD *et al*, 2008).

Nos geradores auto-excitados, deve haver um magnetismo residual no ferro da máquina, a fim de que se inicie o processo de auto-excitação. A Figura 10 apresenta a forma típica de uma curva de magnetização de uma máquina CC. Nota-se que, quando a corrente de campo (I_f) é nula, o fluxo Φ , e, conseqüentemente a tensão, são diferentes de zero. Esse magnetismo residual é responsável pelo fluxo inicial que intercepta os enrolamentos de armadura. Dessa forma, é induzida uma pequena tensão nesses enrolamentos, produzindo um fluxo maior, devido ao aumento da corrente no enrolamento do campo-shunt. Esse processo continua até que a tensão gerada na armadura seja suficiente para manter a excitação exigida pela máquina (CARVALHO, 2012) (FITZGERALD *et al*, 2008).



Figura 10 - Forma típica de uma curva de magnetização de uma máquina CC.

Fonte: FITZGERALD *et al*, 2008.

2.3.2.1 Série

Neste tipo de ligação, o enrolamento de campo-série é conectado em série com a armadura, conforme apresentado na Figura 11 (CARVALHO, 2012) (FITZGERALD *et al*, 2008).

No caso do gerador, ele só funcionará se tiver uma carga conectada, para existir corrente circulando no circuito (circuito fechado), uma vez que a carga está conectada em série com a armadura e o com o enrolamento de campo-série. Dessa forma, a corrente que circula no circuito varia de acordo com a carga, sendo que, quanto maior a carga, ou seja, menor a resistência equivalente, maior a corrente que circula no circuito e, conseqüentemente, maior a tensão gerada (CARVALHO, 2012) (FITZGERALD *et al*, 2008).

Para os motores, um aumento da carga provoca um aumento da corrente do circuito e do fluxo. Dessa forma, a velocidade tende a diminuir, a fim de manter um equilíbrio entre a tensão aplicada e a tensão gerada. Neste tipo de motor, recomenda-se que os motores sejam energizados com carga, visto que, devido ao torque elevado na partida, motores sem carga atingem elevadas velocidades, podendo causar danos aos mesmos (CARVALHO, 2012) (FITZGERALD *et al*, 2008).

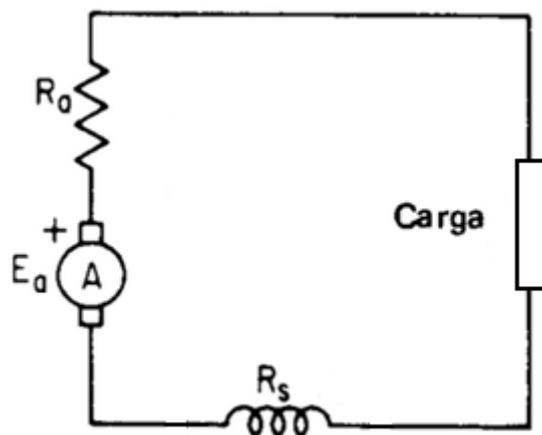


Figura 11 - Circuito equivalente série.

Fonte: Adaptado de KOSOW, 2008.

2.3.2.2 Derivação

Neste tipo de conexão, o enrolamento de campo-shunt é conectado em paralelo com a armadura, conforme apresentado na Figura 12. Dessa forma, este tipo de ligação também pode ser denominado paralelo ou shunt (CARVALHO, 2012) (FITZGERALD *et al*, 2008).

No caso do gerador, um aumento na corrente de carga provoca uma diminuição da tensão de armadura e da tensão na carga. Assim, com a diminuição da tensão de saída, a excitação do campo-shunt também decresce. Dessa forma, a fim de compensar essa queda, é utilizado um reostato de campo-shunt, a fim de controlar a corrente de campo e aumentar a tensão de saída (CARVALHO, 2012) (FITZGERALD *et al*, 2008).

Para os motores sem carga, o fluxo é aproximadamente constante e, conseqüentemente, a velocidade no eixo do motor também é constante. Isso ocorre porque, como a armadura e o enrolamento de campo-shunt estão em paralelo com a fonte de alimentação, não havendo variação dessa alimentação, o fluxo, bem como a rotação, permanecem constantes. No entanto, no motor com carga, ocorre uma diminuição na velocidade, devido à resistência no enrolamento de armadura (CARVALHO, 2012) (FITZGERALD *et al*, 2008).

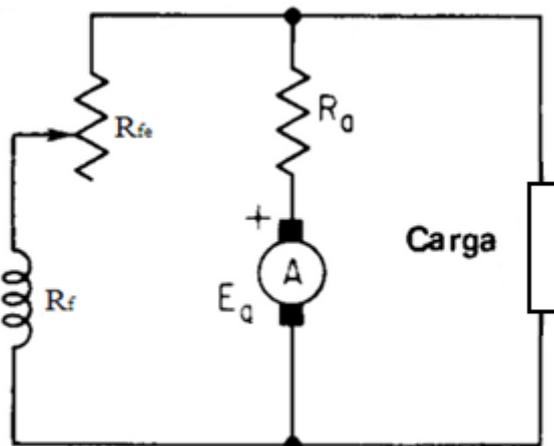


Figura 12 - Circuito equivalente shunt.

Fonte: Adaptado de KOSOW, 2008.

2.3.2.3 Composto

Neste tipo de ligação, o enrolamento de campo-série é conectado em série com a armadura, e o enrolamento de campo-shunt é ligado em paralelo com esse conjunto (armadura e enrolamento de campo-série). Dessa forma, dependendo do esquema de ligação desses

enrolamentos, o gerador composto pode ser classificado em curto ou longo, conforme apresentado nas Figuras 13 e 14, respectivamente (CARVALHO, 2012) (FITZGERALD *et al*, 2008).

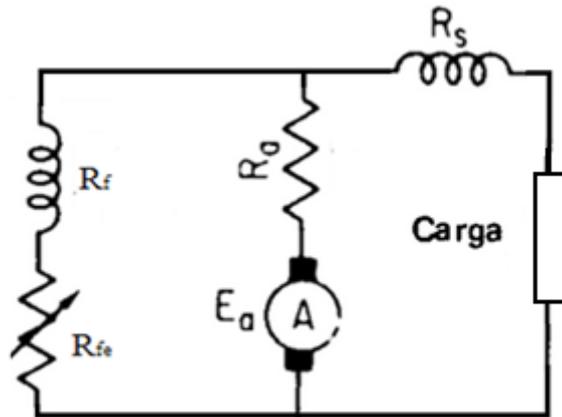


Figura 13 - Circuito equivalente composto curto.

Fonte: Adaptado de KOSOW, 2008.

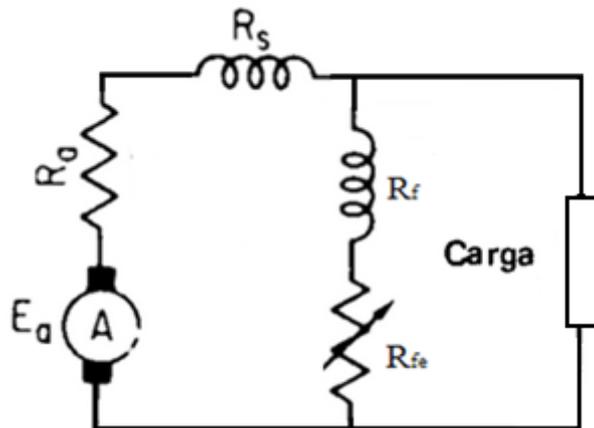


Figura 14 - Circuito equivalente composto longo.

Fonte: Adaptado de KOSOW, 2008.

Além disso, dependendo da direção e do sentido do campo magnético produzido pelo enrolamento de campo-série, pode-se classificar a ligação composta (curta ou longa) em cumulativa ou diferencial. Isso porque o fluxo de um gerador composto resulta do fluxo produzido pelos enrolamentos de campo série e shunt, sendo que o campo-shunt é caracterizado como o maior fluxo, em que o campo-série pode auxiliar ou se opor a esse campo (KOSOW, 2008).

Caso o campo magnético produzido no enrolamento de campo-série seja em sentido oposto ao do campo-shunt, provocando assim uma redução no campo magnético, tem-se a

ligação composto-diferencial. Entretanto, caso o campo magnético produzido no enrolamento de campo-série seja na mesma direção e sentido do campo produzido no enrolamento shunt, proporcionando um aumento do campo resultante, tem-se a ligação composto-cumulativo (CARVALHO, 2012) (FITZGERALD *et al*, 2008) (KOSOW, 2008). Esse tipo de configuração ainda pode ser subdividido em:

- Composto normal: campo série compensa totalmente as perdas. Dessa forma, a tensão a vazio e a plena carga são iguais, ou seja, a regulação de tensão é nula.
- Hipocomposto: campo série auxilia, mas não compensa totalmente as perdas. Dessa forma, a tensão a plena carga é um pouco menor que a tensão a vazio, assim, a regulação de tensão é maior que zero.
- Hipercomposto: campo série, além de compensar as perdas, produz fluxo extra. Dessa forma, a tensão de terminal aumenta com a aplicação da carga, ou seja, a tensão a plena carga é maior que a tensão a vazio, possuindo, assim, uma regulação de tensão negativa.

2.4 Comutação

A comutação tem a função de realizar a transição adequada da corrente de armadura em uma bobina de um valor positivo para um valor negativo, ou seja, realiza a inversão do sentido da corrente. Sendo assim, o comutador e as escovas são responsáveis por transformar a corrente alternada em contínua, no caso dos geradores. Já, no caso dos motores, o comutador e as escovas possuem a função de transformar a corrente contínua em alternada, a fim de promover a rotação dos condutores (DEL TORO, 1994) (KOSOW, 2008).

O processo de comutação é fundamental para o correto funcionamento de uma máquina CC, evitando a corrosão e o desgaste do comutador e das escovas, aumentando o desempenho e a vida útil da mesma (DEL TORO, 1994) (FITZGERALD *et al*, 2008) (OGAWA, 2001).

2.5 Reação da armadura

Em todas as máquinas elétricas, os condutores de armadura produzem um fluxo magnético que é proporcional à corrente de armadura. A Figura 15 ilustra o fluxo magnético

produzido na armadura de uma máquina CC. Esse fluxo é perpendicular ao fluxo polar principal, produzido pelos enrolamentos de campo (KOSOW, 2008) (OGAWA, 2001).

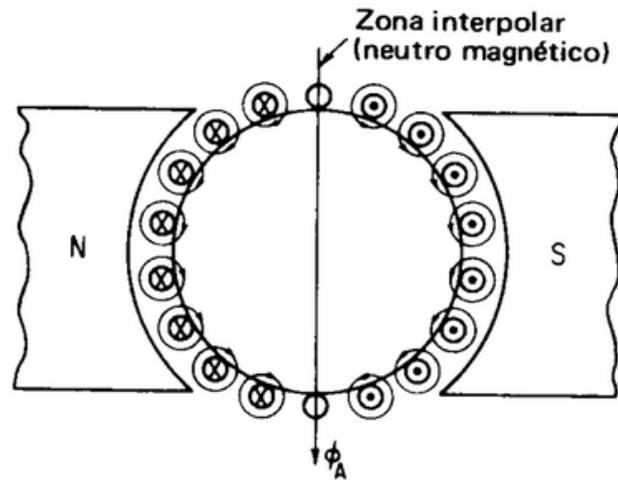


Figura 15 - Fluxo da armadura produzido pela corrente de armadura.

Fonte: KOSOW, 2008.

Assim, em uma máquina elétrica existem dois fluxos, um produzido pela corrente da armadura (ϕ_a) e outro produzido pelos enrolamentos de campo, chamado fluxo polar (ϕ_f). A Figura 16 apresenta o fluxo resultante (ϕ_r) da interação entre esses dois fluxos (KOSOW, 2008).

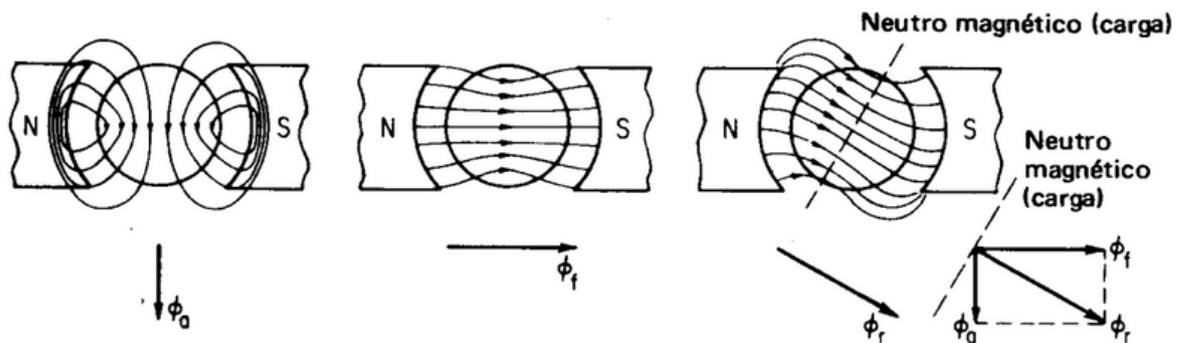


Figura 16 - Interação entre os fluxos da armadura e polar, os quais resultam em um campo magnético que desloca a linha de neutro.

Fonte: KOSOW, 2008.

Nota-se que o ϕ_r está deslocado, o que provoca o deslocamento da linha neutra ou neutro magnético. Essa distorção do fluxo resultante causa uma concentração do fluxo em uma das extremidades do pólo, podendo levar a saturação magnética do mesmo. Além disso, a redução do fluxo principal de campo pode, no caso dos geradores, ser responsável pela queda

de tensão e, no caso dos motores, levar a um aumento da velocidade, ambos associados a um aumento na carga (KOSOW, 2008) (MELO, 2006).

2.6 Compensação para o efeito da reação da armadura

A reação da armadura provoca o deslocamento da linha neutra e a saturação magnética em um dos lados do pólo, ocasionando assim, mais centelhamento e um fluxo resultante menor. Dessa forma, faz-se necessário a utilização de algum método, a fim de que os efeitos da reação da armadura sejam compensados (KOSOW, 2008) (OGAWA, 2001).

2.6.1 Extremidade de pólos com alta relutância

Para impedir a concentração do fluxo em uma das extremidades dos pólos, essas são construídas com um material de alta relutância (maior entreferro). Dessa forma, o fluxo de campo penetra na armadura pelo centro dos pólos, conforme apresenta a Figura 17, impedindo que o fluxo principal de campo e a linha neutra sejam deslocados (KOSOW, 2008).

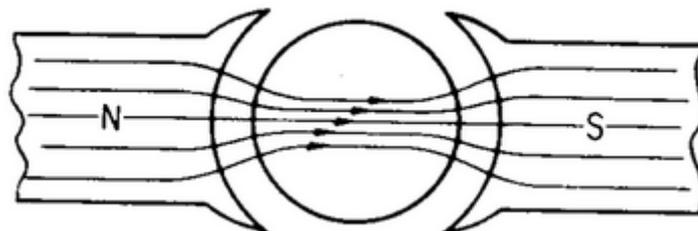


Figura 17 - Extremidades polares com alta relutância.

Fonte: KOSOW, 2008.

2.6.2 Redução no fluxo da armadura

Para diminuir o fluxo da armadura sem reduzir o fluxo de campo principal, utiliza-se uma técnica que consiste em criar uma alta relutância para o fluxo da armadura. Isso ocorre por meio de laminações polares, perfuradas e ranhuradas, e também por meio do chanframento, em que ambos os procedimentos são realizados nas lâminas de campo, conforme mostra a Figura 18. Dessa forma, o fluxo da armadura é reduzido sem provocar alterações significativas no fluxo polar (KOSOW, 2008).

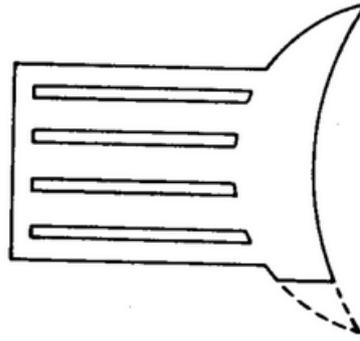


Figura 18 - Esquema da laminação do campo a fim de compensar o efeito da reação da armadura.

Fonte: KOSOW, 2008.

2.6.3 Ajuste da linha neutra

Conforme apresentado no item 2.5, a reação da armadura provoca o deslocamento da linha neutra. Dessa forma, devido a esse deslocamento, o processo de comutação em uma máquina pode não ocorrer no instante correto. Sendo assim, a fim de solucionar esse problema, pode-se realizar o deslocamento das escovas de forma mecânica, para que a comutação ocorra na linha neutra. Esse processo é denominado ajuste de linha neutra (KOSOW, 2008).

Este método apresenta a desvantagem de ter que ajustar a máquina para cada condição de carga específica. Além disso, a distorção da linha neutra ocorre em sentidos opostos, caso a máquina esteja operando como gerador ou como motor, conforme apresenta a Figura 19. Sendo assim, no caso do gerador, é necessário deslocar as escovas no sentido de rotação, diferentemente do que ocorre no motor. Neste caso, as escovas devem ser movimentadas no sentido contrário a rotação (KOSOW, 2008).

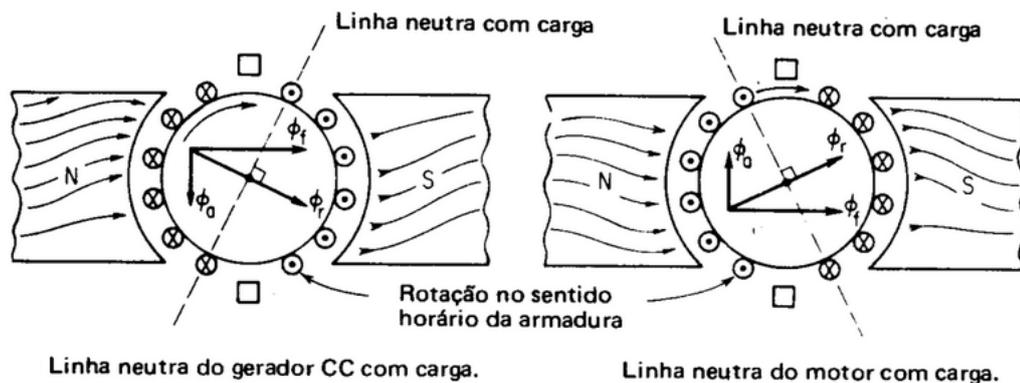


Figura 19 - Comparação do deslocamento da linha neutra do gerador em relação ao motor.

Fonte: KOSOW, 2008.

2.6.4 Enrolamentos de compensação/interpolo

Os métodos mecânicos de compensação do efeito da reação da armadura, mostrados nos itens 2.6.1, 2.6.2 e 2.6.3, apresentam a desvantagem de não levar em consideração a condição de carga. Sendo assim, mesmo utilizando esses métodos, ocorre uma distorção do fluxo em menor ou maior intensidade, de acordo com a carga (KOSOW, 2008).

Dessa forma, a fim de solucionar esse problema, tem-se o método elétrico, no qual o fluxo da armadura é neutralizado por um enrolamento no circuito da armadura, que produz um fluxo que varia com a corrente de armadura. Esse enrolamento é denominado enrolamento de compensação ou interpolo, que é colocado na superfície da região entre os pólos, de forma a produzir uma força magnetomotriz (fmm) igual e oposta à fmm da armadura, conforme apresenta a Figura 20. Assim, se a carga variar, as correntes no circuito da armadura e no enrolamento de compensação variam, neutralizando o fluxo da armadura (KOSOW, 2008) (MELO, 2006).

Dessa forma, esse método de compensação, além de neutralizar o fluxo produzido pelos condutores da armadura, também auxilia no processo de comutação. Assim, não há a necessidade de deslocar as escovas de acordo com as variações da carga e com a aplicação da máquina, seja ela gerador ou motor (KOSOW, 2008).

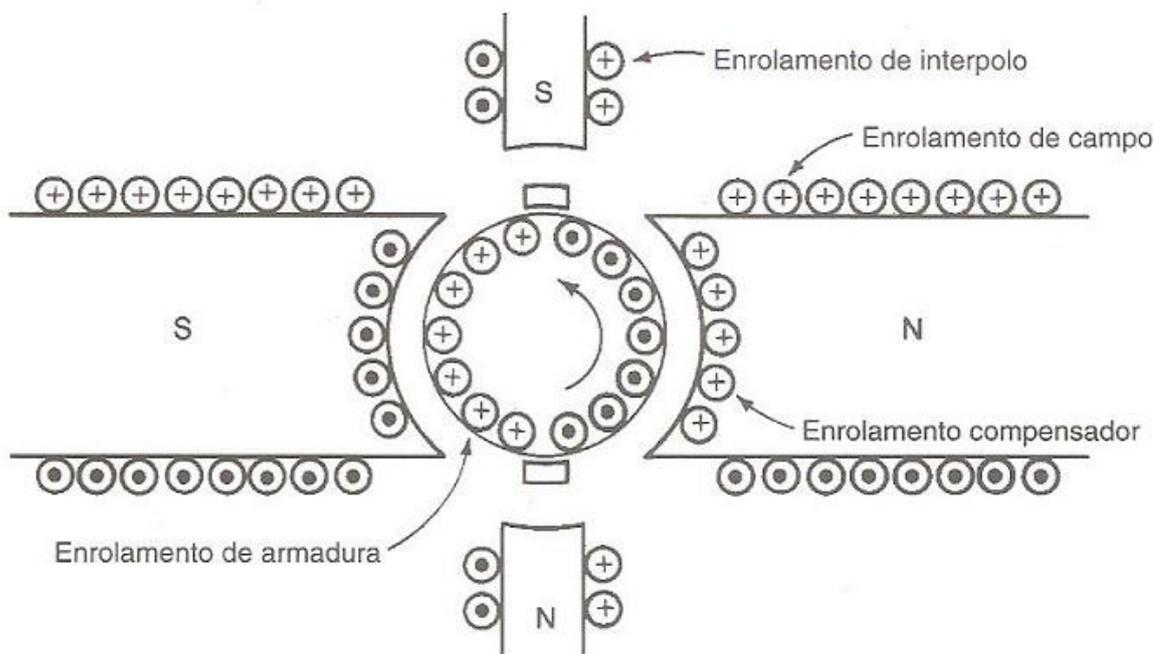


Figura 20 - Neutralização da fmm da armadura por meio de enrolamentos.

Fonte: DEL TORO, 1994.

2.7 Rendimento da máquina CC

Todo processo de conversão de energia, seja ela mecânica para elétrica ou elétrica para mecânica, apresenta perdas que mensuram o rendimento do processo.

A eficiência de uma máquina CC pode ser calculada por meio da Equação 3 (CHAPMAN, 2000) (VILLAR, 2006).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100\% \quad (3)$$

A potência de saída pode ser relacionada com a potência de entrada por meio das perdas que ocorrem durante esse processo de conversão de energia. Sendo assim, a eficiência, que também pode ser denominada rendimento, pode ser calculada por meio da Equação 4 (CHAPMAN, 2000) (VILLAR, 2006).

$$\eta = \frac{P_{in} - \text{perdas}}{P_{in}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Em que:

η : representa o rendimento da máquina CC;

P_{in} : representa a potência de entrada da máquina CC;

P_{out} : representa a potência de saída da máquina CC.

2.8 Perdas em uma máquina CC

As perdas que ocorrem no interior de uma máquina CC durante o seu funcionamento podem ser divididas em perdas no cobre dos circuitos elétricos (enrolamento de armadura e enrolamento de campo), perdas no ferro dos circuitos magnéticos (núcleo do rotor e do estator), perdas mecânicas produzidas pela rotação da máquina e perdas por dispersão (CHAPMAN, 2000) (VILLAR, 2006).

As perdas elétricas ou no cobre ocorrem devido à circulação de corrente elétrica nos enrolamentos tanto de armadura quanto de campo, as quais produzem energia na forma de calor (CHAPMAN, 2000) (VILLAR, 2006).

As perdas no núcleo são as perdas por histerese e por correntes parasitas. As perdas por histerese ocorrem no interior do motor devido a constante reorientação do campo magnético sobre as lâminas de aço-silício. Enquanto que as perdas por correntes parasitas (Foucault) ocorrem devido à produção de calor pelas correntes induzidas no interior do material magnético do estator (MARQUES *et al*, 2007) (SINISCALCHI, 2009).

As perdas mecânicas são produzidas pelos atritos dos rolamentos nos mancais, pelo atrito das escovas sobre o comutador e pelo atrito com o ar (perdas por ventilação). (CHAPMAN, 2000) (VILLAR, 2006).

As perdas por dispersão são aquelas que não se incluem em nenhuma das categorias apresentadas anteriormente. Para a maioria das máquinas, essas perdas são contabilizadas como 1% das perdas totais a plena carga (CHAPMAN, 2000).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no laboratório de máquinas elétricas do IFMG – campus Formiga e foram utilizados instrumentos de medição de grandezas elétricas (multímetros), banco de resistências monofásicas, reostato trifásico, tacômetro e um conjunto de máquinas acopladas (máquina CC e máquina síncrona). A Figura 21 apresenta o conjunto de máquinas acopladas utilizado.



Figura 21 - Conjunto didático: máquina síncrona acoplada à máquina CC.

Fonte: Próprio Autor.

A avaliação da interferência do enrolamento de interpolo nas características e no desempenho das máquinas CC é realizada, primeiramente, para os geradores e, em seguida, para os motores.

3.1 Geradores CC

Para que a máquina CC opere como gerador é preciso utilizar o motor síncrono como fonte de força mecânica, acoplado ao eixo da máquina CC. Sua utilização se justifica pelo fato da máquina síncrona ter como característica uma velocidade constante, assim, a velocidade não influenciará na tensão de saída do gerador, visto que a tensão gerada na armadura pode ser relacionada por meio da Equação 5.

$$E_a = k \cdot \phi \cdot \omega \quad (5)$$

Em que:

E_a : representa a tensão gerada na armadura;

k : representa uma constante característica da máquina;

ϕ : representa o fluxo gerado na máquina;

ω : representa a velocidade de rotação do rotor.

O motor síncrono é ligado em 380 V, conforme especificado nos dados de placa, e, como método de partida, utiliza-se o curto circuito nos enrolamentos da bobina de campo, realizando-se a partida como motor de indução trifásico. Após a partida do motor, o curto é retirado e o sincronismo entre os campos é realizado na máquina síncrona.

O desempenho do gerador CC pode ser avaliado de acordo com a sua regulação de tensão, que é a relação percentual entre a tensão gerada a vazio e com carga, conforme a Equação 6.

$$Reg = \frac{V_{T\text{vazio}} - V_{T\text{carga}}}{V_{T\text{carga}}} \cdot 100\% \quad (6)$$

Na qual:

Reg : representa a regulação de tensão do gerador;

$V_{T\text{vazio}}$: representa a tensão terminal sem carga;

$V_{T\text{carga}}$: representa a tensão terminal (nominal) a plena carga.

Assim, com a máquina CC operando como gerador, são medidos os valores da tensão de terminal e da corrente na carga para os geradores CC (shunt, excitação independente e auto-excitado, série e composto). Para efeito de comparação, os valores de tensão gerada (terminal) são ajustados para um valor equivalente a 150 V, que corresponde a uma tensão menor que a tensão nominal da máquina que é de 220 V. Essa margem de tensão é utilizada a fim de prevenir que a tensão gerada seja superior à tensão nominal, uma vez que para o gerador CC hipercomposto, a tensão gerada aumenta com o acréscimo de carga. No gerador CC série não é possível o ajuste da tensão terminal inicial para o valor especificado, uma vez que, devido a sua ligação, o mesmo não é capaz de gerar tensão a vazio.

Em seguida, as cargas conectadas aos circuitos são modificadas, uniformemente, e os valores da tensão e da corrente na carga são medidos para os diferentes tipos de máquinas.

Vale ressaltar que, para cada configuração da máquina, foram realizados dois ensaios, um com interpolo e outro sem.

A Figura 22 apresenta a máquina CC utilizada para os ensaios, a qual permite a ligação de todos os tipos de máquina CC pelos bornes disponíveis e convenientemente identificados.



Figura 22 - Placa da máquina CC.

Fonte: Próprio autor.

A Figura 23 mostra o esquema de montagem do gerador CC shunt excitação independente.

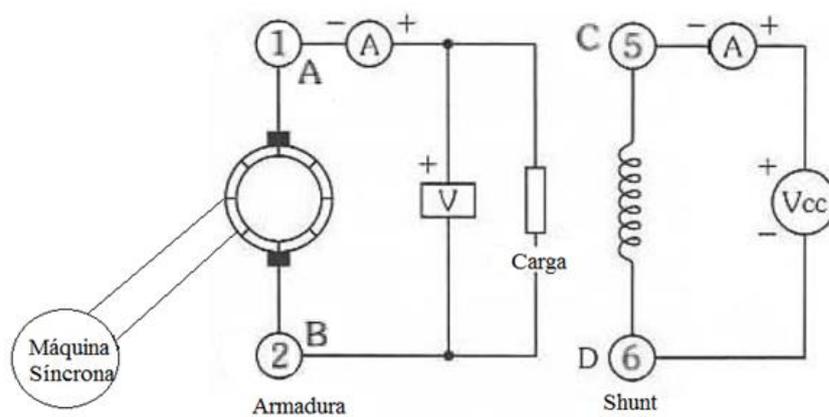


Figura 23 - Gerador shunt excitação independente, sem interpolo.

Fonte: Adaptado de CARVALHO, 2007.

A Figura 24 apresenta o esquema de ligação das conexões de um gerador CC shunt auto-excitado, sem o enrolamento de interpolo.

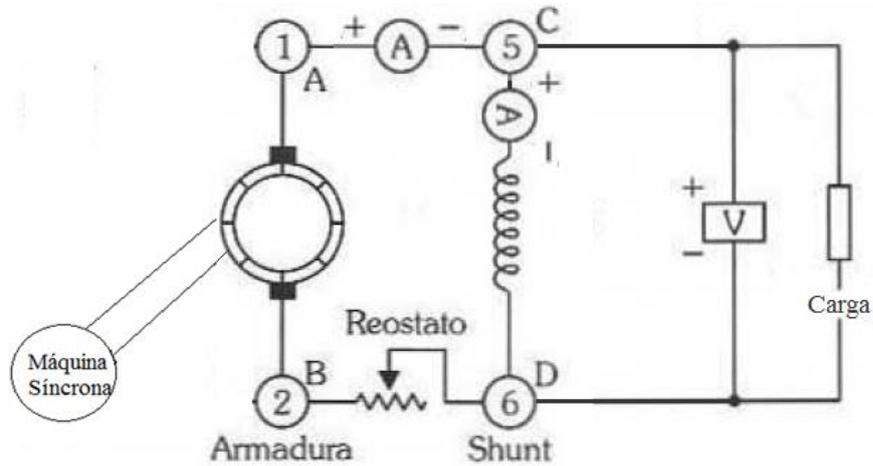


Figura 24 - Gerador shunt auto-excitado, sem interpolo.

Fonte: Adaptado de CARVALHO, 2007.

A Figura 25 apresenta o esquema de ligação das conexões de um gerador CC série, sem o enrolamento de interpolo.

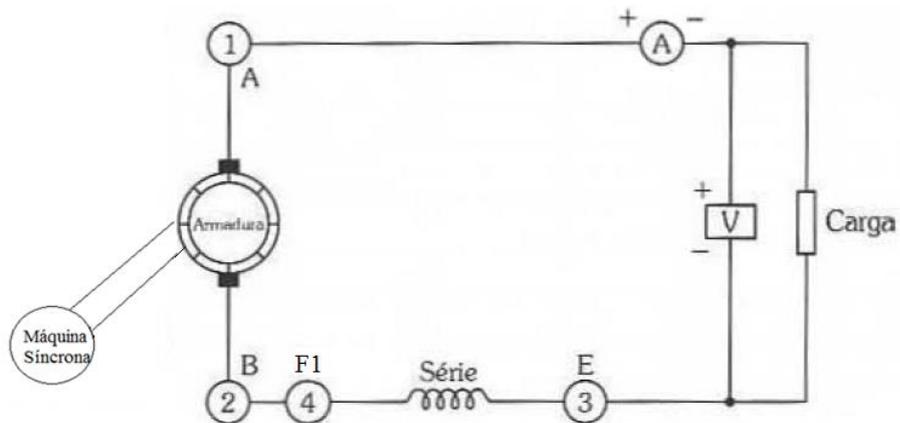


Figura 25 - Gerador série, sem interpolo.

Fonte: Adaptado de CARVALHO, 2007.

A Figura 26 apresenta o esquema de ligação das conexões de um gerador CC composto, sem o enrolamento de interpolo.

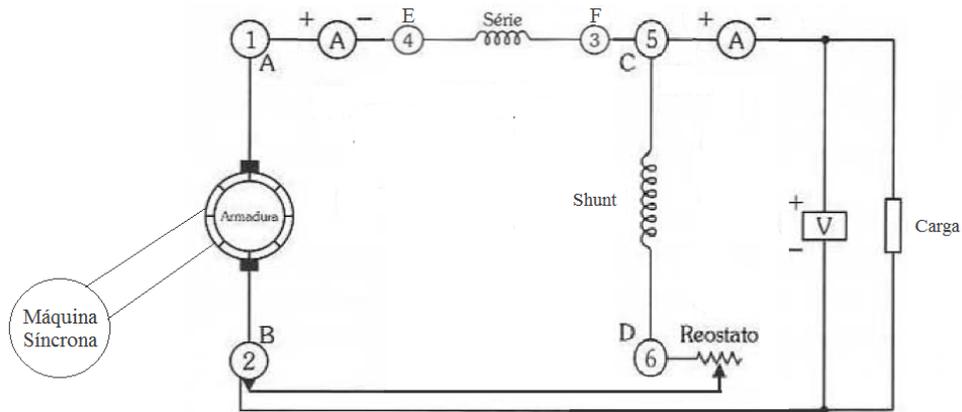


Figura 26 - Gerador composto, sem interpolo.

Fonte: Adaptado de CARVALHO, 2007.

Neste ensaio existe a possibilidade de ligação do gerador composto cumulativo ou diferencial, para tal basta inverter a conexão dos enrolamentos série ou shunt. Apesar da configuração composto diferencial não apresentar aplicação prática, o ensaio de tal configuração é realizado para efeito de comparação com a literatura.

Para execução dos ensaios com o interpolo, basta considerar os circuitos de ligação anteriores com a ligação de armadura nos bornes A e H.

3.2 Motores CC

Para verificar o comportamento do motor CC devido à inserção de carga, faz-se necessário o uso de um equipamento que seja capaz de fornecer e medir a carga acoplada ao motor. Normalmente, a fim de simulação é utilizado o eletrodinamômetro. No entanto, devido à inexistência desse equipamento no laboratório, ou de um similar, para a realização da análise do desempenho dos motores é necessário um ajuste técnico para elaboração desses procedimentos. Dessa forma, é inserida uma carga resistiva trifásica acoplada ao gerador síncrono, o qual está diretamente conectado à máquina CC. Sendo assim, esse conjunto, gerador síncrono e reostato trifásico, representa a carga utilizada a fim de determinar o comportamento do motor CC.

Como não havia um equipamento específico para medição do torque, este é calculado por meio da Equação 7. Para estimação da potência de saída do motor (P_{out}) é utilizada a Equação 3. Dessa forma, por meio do valor da eficiência do motor, o qual é fornecido nos dados de placa do mesmo, e da potência de entrada do motor (P_{in}), a qual é calculada pelo

produto da tensão na armadura (V_a) pela corrente de armadura (I_a), é possível obter o valor estimado da potência de saída.

$$T = \frac{P_{out}}{\omega} \quad (7)$$

Em que:

T : representa o torque em N·m;

P_{out} : representa a potência de saída em W;

ω : representa a velocidade em rpm.

O desempenho do motor CC pode ser avaliado de acordo com a sua regulação de velocidade, que é a relação percentual entre a velocidade do eixo a vazio e com carga, conforme a Equação 8.

$$Reg = \frac{N_{vazio} - N_{carga}}{N_{carga}} \cdot 100\% \quad (8)$$

Na qual:

Reg : representa a regulação de velocidade do motor;

N_{vazio} : representa a velocidade do eixo sem carga;

N_{carga} : representa a velocidade do eixo à plena carga.

Assim, com a máquina CC operando como motor, são medidos os valores de tensão na armadura, da corrente de armadura e da velocidade no eixo para os motores CC (shunt, excitação independente e auto-excitado, e composto). Devido a uma medida de precaução, não foi realizada a montagem do motor série, pois este não pode partir sem carga acoplada. Isso porque, devido ao elevado torque na partida, sem carga, o motor pode atingir velocidades altamente elevadas, o que pode resultar na destruição do motor.

Para efeito de comparação, a tensão na armadura é ajustada para um valor aproximado de 210 V, a qual corresponde a uma tensão menor que a nominal da máquina, a fim de prevenir possíveis danos na máquina CC.

Em seguida, as cargas conectadas aos circuitos são modificadas, uniformemente, e os valores da velocidade, da corrente de armadura e da tensão de armadura são medidos para os diferentes tipos de máquinas.

Vale ressaltar que, para cada configuração da máquina, foram realizados dois ensaios, um com interpolo e o outro sem.

A Figura 27 mostra o esquema de montagem do motor CC shunt excitação independente, sem interpolo.

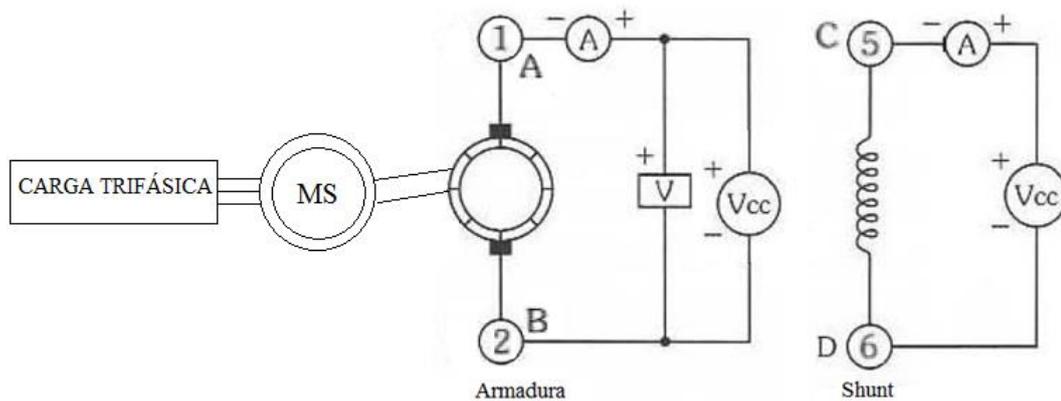


Figura 27 - Motor shunt excitação independente, sem interpolo.

Fonte: Adaptado de CARVALHO, 2007.

A Figura 28 apresenta o esquema de ligação das conexões de um motor CC shunt auto-excitado, sem o enrolamento de interpolo.

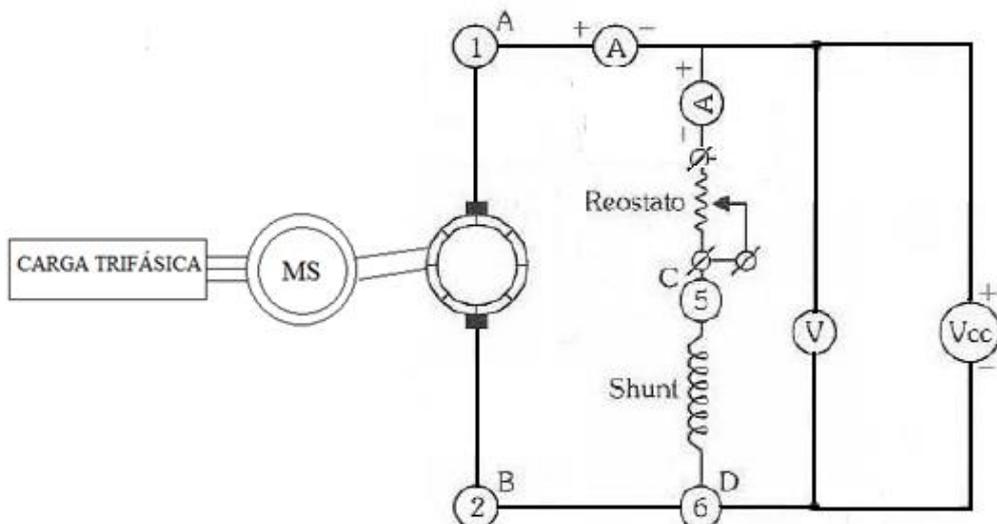


Figura 28 - Motor shunt auto-excitado, sem interpolo.

Fonte: Adaptado de CARVALHO, 2007.

A Figura 29 apresenta o esquema de ligação das conexões de um motor CC composto, sem o enrolamento de interpolo.

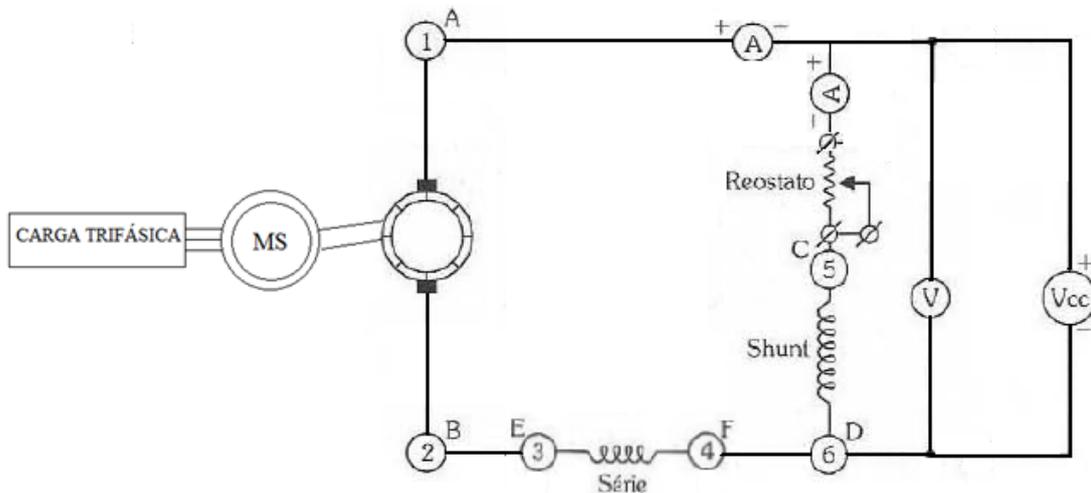


Figura 29 - Motor composto, sem interpolo.

Fonte: Adaptado de CARVALHO, 2007.

Neste ensaio, assim como no gerador CC composto, existe a possibilidade de ligação do motor composto cumulativo ou diferencial. Durante a realização desse ensaio, foi verificado o comportamento da velocidade do motor CC devido à inserção de carga. Dessa forma, ao perceber que a velocidade aumentava com o aumento da carga, caracterizando o motor como diferencial, o enrolamento de campo-série foi invertido de forma a realizar a montagem do motor composto cumulativo. Isso porque o motor composto diferencial possui aplicações limitadas devido ao risco de instabilidade, visto que com o aumento da carga, a corrente de armadura aumenta e, conseqüentemente, aumenta o fluxo produzido pelo enrolamento de campo-série. Dessa forma, como o fluxo série está em oposição ao fluxo produzido pelo enrolamento de campo-shunt, o fluxo total resultante da máquina é reduzido, podendo proporcionar, em certas condições, o disparo do motor. Sendo assim, neste trabalho, como uma medida de segurança, é analisado somente o comportamento do motor composto cumulativo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Geradores CC

A Tabela 1 apresenta os valores de tensão na armadura e da corrente de carga obtidos nos ensaios do gerador de corrente contínua, com e sem interpolo, para as seguintes ligações: shunt, excitação independente e auto-excitado, e composto cumulativo.

Tabela 1 - Variáveis medidas nos ensaios dos geradores shunt e composto, com e sem interpolo.

Shunt								Composto cumulativo			
Excitação independente				Auto-excitado							
sem interpolo		com interpolo		sem interpolo		com interpolo		sem interpolo		com interpolo	
V_t (V)	I_L (A)	V_t (V)	I_L (A)	V_t (V)	I_L (A)	V_t (V)	I_L (A)	V_t (V)	I_L (A)	V_t (V)	I_L (A)
150	0	150	0	150	0	150	0	150	0	150	0
139,8	0,27	146,9	0,28	128,1	0,24	146,7	0,28	143,7	0,27	159,3	0,30
127,8	0,49	145,8	0,56	92,8	0,36	141,2	0,54	134,1	0,52	168,4	0,65
114	0,67	142,3	0,84	62	0,40	137	0,79	123,5	0,72	174,1	1,02

Fonte: Próprio Autor.

A fim de verificar o desempenho dos geradores CC no que diz respeito à regulação de tensão, com e sem interpolo, são apresentadas curvas características de saída para todos os geradores nas duas condições.

A Figura 30 apresenta a característica de saída do gerador CC excitação independente com e sem interpolo.

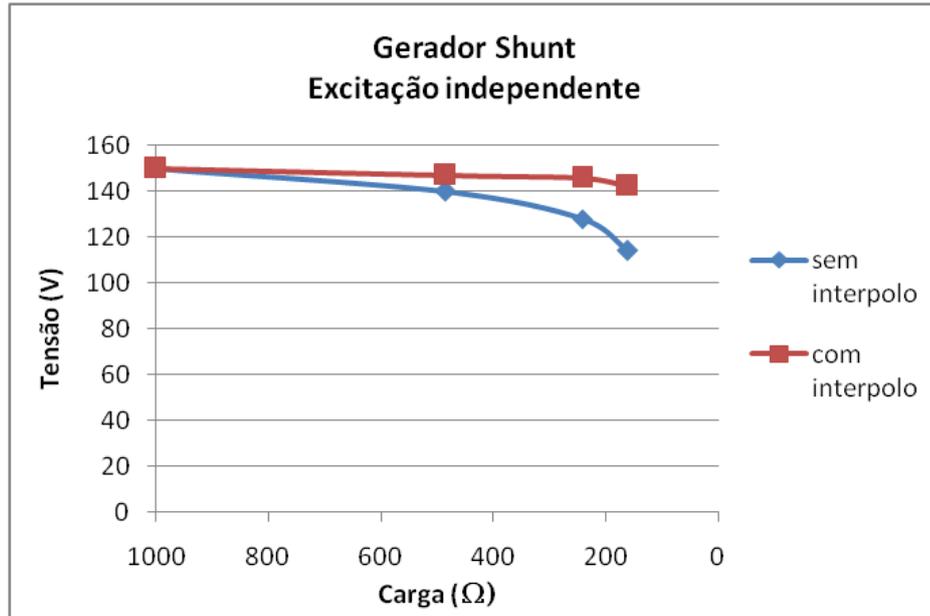


Figura 30 - Comparação da tensão de um gerador shunt excitação independente, com e sem interpolo.

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 31 apresenta a característica de saída do gerador CC shunt auto-excitado com e sem interpolo.

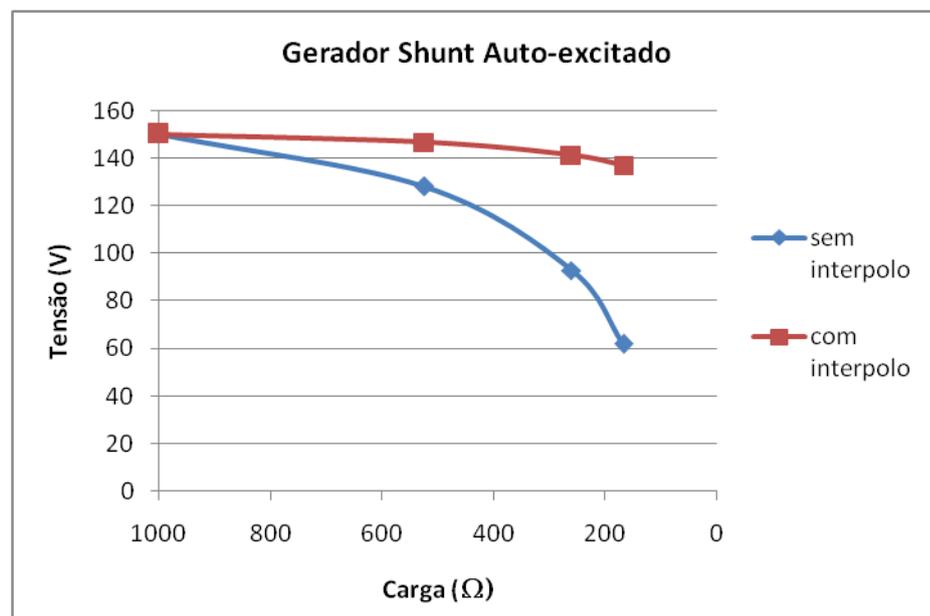


Figura 31 - Comparação da tensão de um gerador shunt auto-excitado, com e sem interpolo.

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 32 apresenta a característica de saída do gerador CC composto cumulativo com e sem interpolo.

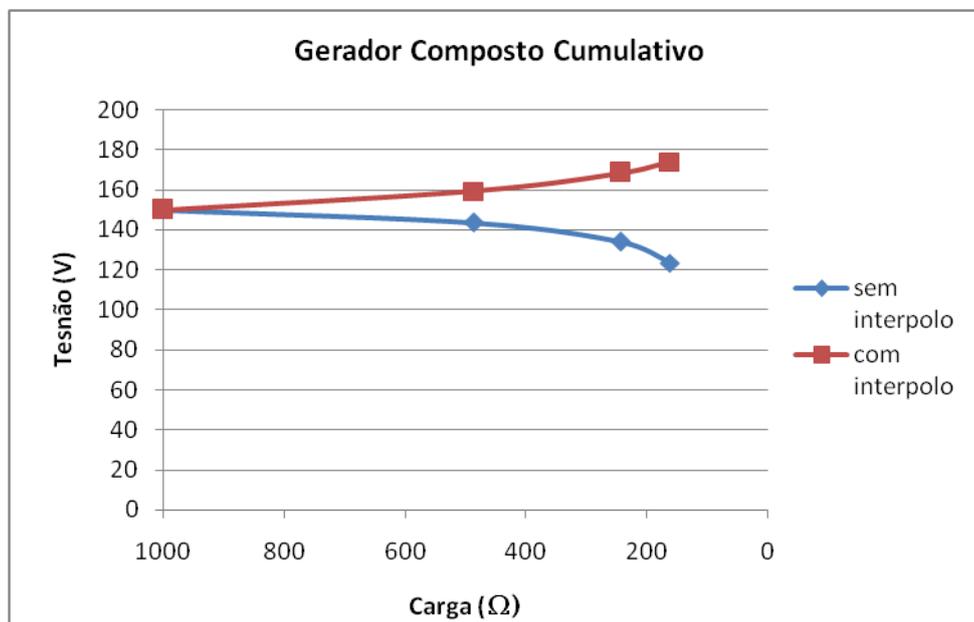


Figura 32 - Comparação da tensão de um gerador composto cumulativo, com e sem interpolo.

Fonte: Próprio Autor.

Nos geradores shunt, auto-excitado e excitação-independente, sem interpolo, observa-se uma queda de tensão maior, para as mesmas condições de carga, devido ao efeito da reação da armadura. Dessa forma, percebe-se que, ao inserir o interpolo, os geradores apresentam uma regulação de tensão muito melhor do que os geradores sem interpolo. Esse fato pode ser justificado com base na literatura, uma vez que o efeito da reação da armadura provoca uma redução do fluxo resultante e, conseqüentemente, do valor da tensão de terminal gerada.

No gerador composto cumulativo, com interpolo, observa-se que a tensão aumenta com o acréscimo de carga. Dessa forma, esse tipo de gerador é classificado como hipercomposto. No entanto, ao realizar o mesmo ensaio, porém sem a utilização do interpolo, percebe-se que a tensão sofre uma redução, com a inserção dos mesmos valores de carga do ensaio com interpolo. Sendo assim, nota-se que devido ao efeito da reação da armadura, o fluxo produzido pelo campo-série não é suficiente para compensar totalmente as perdas desse gerador e, com isso, a tensão na máxima condição de carga adotada no trabalho torna-se menor que a tensão a vazio.

No ensaio do gerador composto, existe a possibilidade de ligação do mesmo como composto diferencial. Neste caso, a tensão gerada sofre uma queda acentuada com a inserção

de carga. Como esta configuração não tem sentido prático, não foi realizado o ensaio com o interpolo.

A regulação de tensão do gerador CC composto diferencial foi calculada por meio da Equação 6, sendo essa equivalente a 451,28%, ou seja, a tensão de terminal teve uma brusca redução ao adicionar carga. Este é um dos fatores que inviabilizam o uso desse tipo de gerador na indústria, visto que este gerador não apresenta um comportamento próximo do gerador ideal.

A Tabela 2 apresenta os valores de tensão na armadura e corrente de carga obtidos no ensaio do gerador CC série, com e sem interpolo, a fim de realizar a comparação do desempenho desse gerador em ambas as condições.

Tabela 2 - Variáveis medidas no ensaio do gerador série, com e sem interpolo.

Série			
sem interpolo		com interpolo	
V_t (V)	I_L (A)	V_t (V)	I_L (A)
20,89	0	20,89	0
22,52	0,04	22,24	0,04
24,64	0,09	26,27	0,1
27,00	0,16	33,83	0,2
29,05	0,23	55,7	0,44
30,79	0,30	105,2	1,05
32,36	0,38	127,1	1,51

Fonte: Próprio Autor.

No gerador CC série sem interpolo, observa-se que, ao inserir carga no circuito, ou seja, diminuindo a resistência equivalente, a corrente do circuito aumenta e, com isso, aumentam o fluxo e tensão de terminal gerada. No entanto, devido ao fluxo da armadura, o

fluxo resultante não teve um aumento expressivo e, conseqüentemente, a tensão gerada não sofreu um aumento significativo.

A inserção do interpolo no circuito desse gerador proporcionou um aumento na tensão gerada, para as mesmas condições de carga do ensaio sem interpolo, conforme apresentado na Tabela 2. Isso porque, como o interpolo produz um fluxo que tende a neutralizar o fluxo produzido pela armadura, o efeito da reação da armadura é compensado. Sendo assim, o fluxo principal da máquina não sofre redução e, conseqüentemente, a tensão gerada aumenta.

A Figura 33 apresenta a característica de saída do gerador CC série com e sem interpolo.

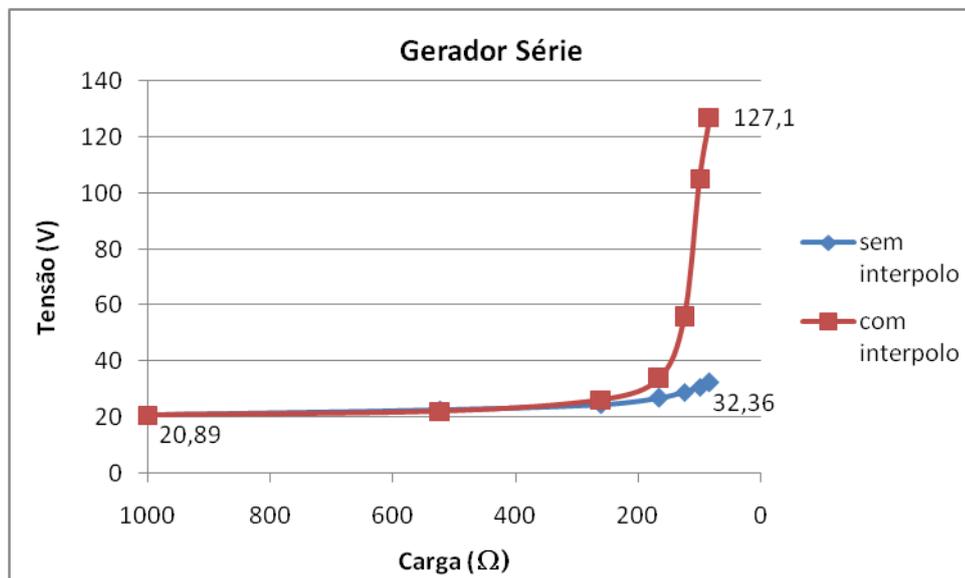


Figura 33 - Comparação da tensão de um gerador série, com e sem interpolo.

Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que o gerador CC série de maneira geral, não é capaz de gerar altos níveis de tensões, sendo utilizados em conjunto com os enrolamentos shunt nos geradores CC compostos, aumentando muito a capacidade de geração de tensão. Avaliando a capacidade de geração de tensão do gerador CC série com e sem interpolo, observa-se que, a variação da carga proporcionou um aumento da tensão gerada nos dois casos. No entanto, com a utilização do interpolo esta tensão foi maior que o triplo da tensão gerada sem interpolo, ou seja, a tensão sofreu um aumento maior que 300%, de 32,36 para 127,1 V, para a mesma condição de carga.

Em todos os ensaios com o gerador CC sem interpolo houve um faiscamento excessivo nas escovas e no comutador. Sendo assim, a quantidade de carga utilizada foi

limitada a fim de evitar possíveis danos à máquina. Entretanto, no ensaio do gerador série sem interpolo, o faiscamento desenvolvido pela máquina ocorreu em menor intensidade, devido ao baixo valor da corrente e, conseqüentemente, da tensão gerada. Sendo assim, pôde-se inserir um maior número de cargas.

Após a inserção do enrolamento de interpolo, para todas as configurações do gerador, não houve faiscamento em nenhuma das condições de carga, contribuindo assim, para o aumento da vida-útil da máquina.

A fim de analisar o desempenho de todos os geradores, em termos quantitativos, são calculados os valores de regulação de tensão, com e sem interpolo, os quais são apresentados na Tabela 3.

A tensão a plena carga é obtida quando a potência do gerador equivale à potência nominal. No entanto, nos ensaios não foi possível obter os valores de tensão gerada a plena carga, devido à limitação do banco de cargas resistivas. Dessa forma, o valor dessa tensão foi obtido, em todos os ensaios, para a mesma condição de carga, sendo este equivalente a 161,1 Ω , de forma a realizar uma padronização.

No gerador série, a regulação de tensão não foi realizada pelo fato desse gerador se comportar como elevador de tensão, ou seja, a tensão aumenta ao adicionar carga em paralelo, conforme observado na Tabela 2.

Tabela 3 - Regulação de tensão dos geradores, com e sem interpolo.

	Shunt				Composto cumulativo	
	Excitação independente		Auto-excitado		sem interpolo	com interpolo
	sem interpolo	com interpolo	sem interpolo	com interpolo		
Reg (%)	31,58	5,41	141,94	9,49	21,46	-13,84

Fonte: Próprio Autor.

Dessa forma, observa-se que, no gerador shunt excitação independente sem interpolo, a regulação de tensão foi equivalente a 31,58%. No entanto, ao inserir o enrolamento de interpolo no circuito, percebe-se uma redução no valor da regulação de tensão, visto que no ensaio com interpolo a regulação foi de 5,41%.

Para o gerador shunt auto-excitado sem interpolo, a regulação de tensão obtida foi muito ruim, correspondente a 141,94%. Ao inserir o interpolo nesse gerador, a regulação de

tensão foi equivalente a 9,49%. Sendo assim, observa-se uma redução significativa no valor da regulação de tensão em comparação com o ensaio sem interpolo.

No ensaio do gerador composto cumulativo sem interpolo, a regulação de tensão obtida foi de 21,46%. Assim, a tensão sofre uma redução devido à variação de carga no circuito. Entretanto, ao inserir o interpolo, a regulação de tensão foi de -13,84%. Dessa forma, percebe-se que como a regulação de tensão foi menor que zero, esse gerador é classificado como hipercomposto, visto que a tensão a plena carga sofreu um aumento em comparação com a tensão a vazio.

Sendo assim, por meio dos valores da regulação de tensão, com e sem interpolo, apresentados na Tabela 3, é possível comprovar a eficácia da utilização do interpolo, visto que esse enrolamento provocou a redução na regulação de tensão em todos os tipos de gerador CC abordados neste trabalho. Além disso, verifica-se que na ausência do interpolo, no caso do gerador composto cumulativo, o efeito da reação da armadura é tão significativo que até modifica as características desse tipo gerador, visto que com interpolo, a regulação de tensão é negativa, e sem interpolo, ela se torna positiva.

4.1.1 Comparação das características carga-tensão dos geradores

A Figura 34 apresenta a comparação das características carga-tensão das diversas configurações dos geradores, sem interpolo.

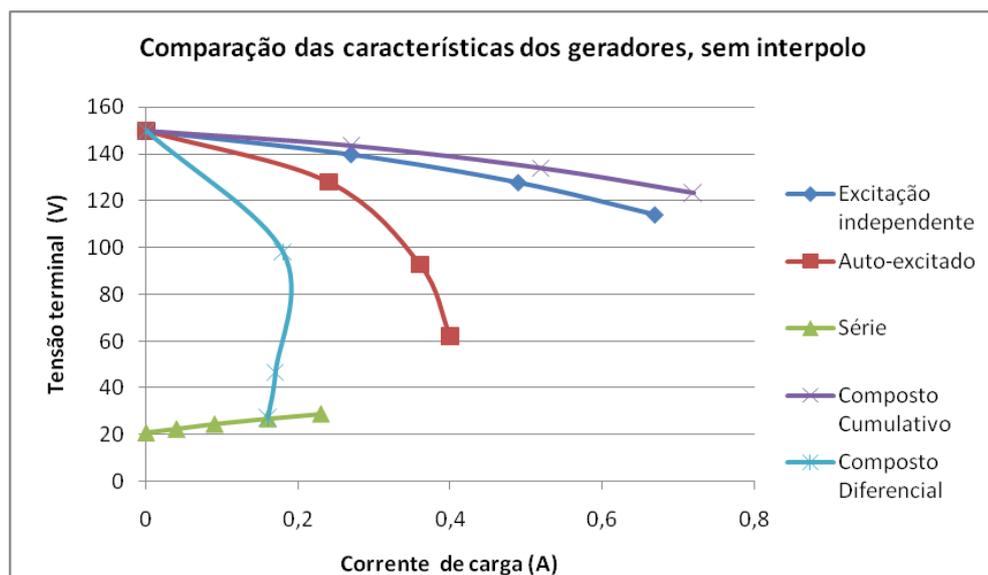


Figura 34 - Comparação das características de carga-tensão dos geradores CC, sem interpolo.

Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que em todas as configurações dos geradores, exceto no gerador série, a tensão de terminal gerada reduz devido à aplicação de cargas crescentes, sendo algumas quedas mais significativas e outras menos.

O gerador série apresenta um comportamento contrário, visto que a tensão gerada aumenta com a inserção de carga, ou seja, esse tipo de gerador comporta-se como um elevador de tensão.

Percebe-se que todos os perfis de curvas estão de acordo com os perfis encontrados na literatura, como por exemplo, em KOSOW, 2008.

Ao inserir o interpolo nas diversas configurações dos geradores, observa-se uma diminuição na queda de tensão. A Figura 35 apresenta a comparação das características carga-tensão dos geradores com interpolo.

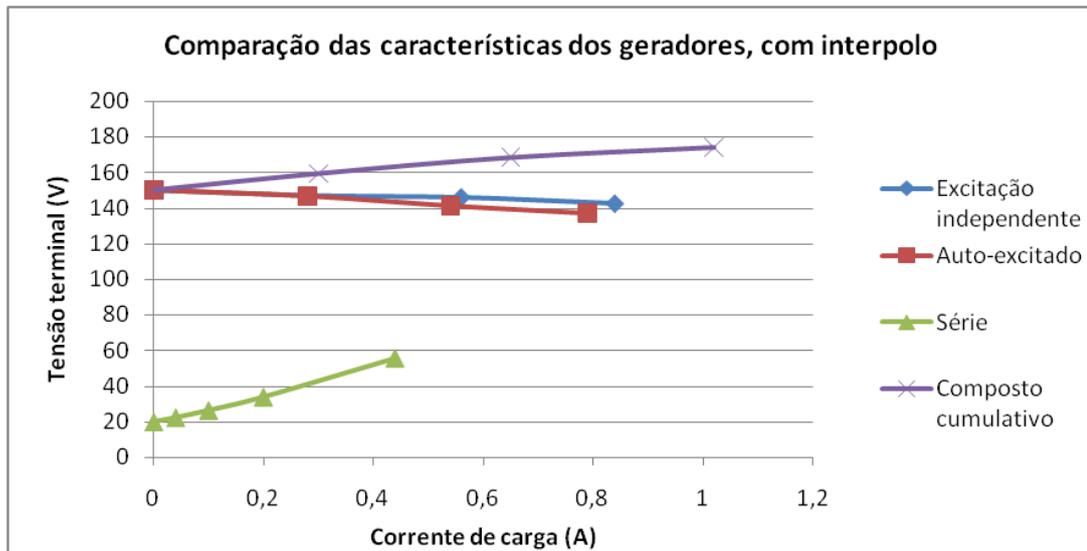


Figura 35 - Comparação das características de carga-tensão dos geradores CC, com interpolo.

Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que houve uma melhora considerável no valor da tensão gerada na máxima condição de carga adotada, em todas as configurações dos geradores.

No caso do gerador série, observa-se que a inserção do interpolo no circuito provocou um aumento da tensão gerada, melhorando a eficiência desse gerador.

4.2 Motores CC

A Tabela 4 apresenta os valores do torque e da corrente de armadura obtidos nos ensaios do motor de corrente contínua, com e sem interpolo, para as seguintes ligações: shunt, excitação independente e auto-excitado, e composto cumulativo.

Tabela 4 - Comportamento do torque e da corrente de armadura dos geradores, com e sem interpolo, de acordo com a variação de carga.

Shunt								Composto cumulativo			
Excitação independente				Auto-excitado							
sem interpolo		com interpolo		sem interpolo		com interpolo		sem interpolo		com interpolo	
T (N·m)	I _a (A)	T (N·m)	I _a (A)	T (N·m)	I _a (A)	T (N·m)	I _a (A)	T (N·m)	I _a (A)	T (N·m)	I _a (A)
0,27	0,33	0,27	0,34	0,73	0,75	0,62	0,67	0,71	0,72	0,60	0,63
0,28	0,34	0,28	0,35	0,75	0,77	0,64	0,69	0,74	0,75	0,63	0,66
0,31	0,37	0,30	0,37	0,76	0,78	0,65	0,7	0,77	0,76	0,65	0,67
0,33	0,39	0,31	0,38	0,80	0,81	0,67	0,72	0,78	0,78	0,67	0,68
0,36	0,43	0,33	0,4	0,85	0,86	0,68	0,73	0,81	0,8	0,69	0,71
0,37	0,44	0,34	0,42	0,87	0,88	0,71	0,77	0,84	0,83	0,72	0,74
0,39	0,46	0,369	0,45	0,88	0,89	0,74	0,79	0,85	0,84	0,75	0,76
0,40	0,47	0,373	0,46	0,89	0,9	0,76	0,81	0,89	0,87	0,76	0,77
0,52	0,61	0,464	0,57	1,00	1,02	0,84	0,91	0,99	0,96	0,82	0,85
0,87	1,01	0,744	0,9	1,37	1,48	1,02	1,17	1,37	1,34	1,05	1,13

Fonte: Próprio Autor.

Dessa forma, percebe-se que em todas as configurações do motor CC com interpolo, abordadas neste trabalho, para as mesmas condições de carga, o torque desenvolvido pelos motores apresenta-se menor se comparado com o ensaio sem interpolo. Isso porque, no ensaio com interpolo, a corrente de armadura também é menor, conforme apresentado na Tabela 4. Sendo assim, como o torque é proporcional a corrente de armadura, conforme as Equações 9 e 10, uma redução na corrente de armadura provoca uma consequente redução no torque.

$$T = k \cdot (\phi_f + \phi_s) \cdot I_a \quad (9)$$

$$T = k \cdot \phi_f \cdot I_a \quad (10)$$

Onde:

T : representa o torque desenvolvido pelo motor;

k : representa uma constante característica da máquina;

ϕ_f : representa o fluxo produzido pelo enrolamento de campo-shunt da máquina;

ϕ_s : representa o fluxo produzido pelo enrolamento de campo-série da máquina;

I_a : representa a corrente de armadura.

Além disso, durante a realização de todos os ensaios, os motores apresentaram faiscamento, nas escovas e no comutador, durante todo o seu funcionamento. Essa situação se agravava à medida que a carga era aumentada. Entretanto, devido à utilização do interpolo, os motores não apresentaram centelhamento, em nenhuma das variações da carga, até mesmo na máxima condição de carga adotada. Dessa forma, comprova-se que, por meio do uso do interpolo, a vida-útil do motor é otimizada, contribuindo significativamente para um aumento no estado de conservação do motor, uma vez que esse enrolamento evita o desgaste excessivo da escova e do comutador.

A Tabela 5 apresenta os valores da velocidade e da corrente de armadura obtidos nos ensaios do motor de corrente contínua, com e sem interpolo, para as seguintes ligações: shunt, excitação independente e auto-excitado, e composto cumulativo.

Tabela 5 - Comportamento da velocidade e da corrente de armadura dos motores, com e sem interpolo, de acordo com a variação de carga.

Shunt								Composto cumulativo			
Excitação independente				Auto-excitado							
sem interpolo		com interpolo		sem interpolo		com interpolo		sem interpolo		com interpolo	
ω (rpm)	I_a (A)	ω (rpm)	I_a (A)	ω (rpm)	I_a (A)	ω (rpm)	I_a (A)	ω (rpm)	I_a (A)	ω (rpm)	I_a (A)
1849	0,33	1868	0,34	1544	0,75	1601	0,67	1529	0,72	1569	0,63
1823	0,34	1842	0,35	1532	0,77	1599	0,69	1513	0,75	1565	0,66
1816	0,37	1826	0,37	1528	0,78	1598	0,7	1480	0,76	1546	0,67
1800	0,39	1825	0,38	1512	0,81	1594	0,72	1475	0,78	1532	0,68
1757	0,43	1799	0,4	1481	0,86	1583	0,73	1463	0,8	1526	0,71
1742	0,44	1784	0,42	1478	0,88	1579	0,77	1445	0,83	1498	0,74
1720	0,46	1764	0,45	1463	0,89	1561	0,79	1432	0,84	1485	0,76
1708	0,47	1776	0,46	1457	0,9	1557	0,81	1419	0,87	1476	0,77
1612	0,61	1694	0,57	1424	1,02	1532	0,91	1365	0,96	1454	0,85
1419	1,01	1505	0,9	1400	1,48	1507	1,17	1285	1,34	1395	1,13

Fonte: Próprio Autor.

Observa-se na Tabela 5 um comportamento similar em todos os ensaios realizados no motor CC, nos quais ocorreu uma redução na velocidade de rotação do eixo à medida que a carga aumentava, devido ao aumento da corrente de armadura. No entanto, nos ensaios com interpolo, a variação da velocidade (a vazio e na máxima carga adotada) apresentou-se menor em comparação com os ensaios sem interpolo.

No motor CC shunt, devido à utilização do interpolo, a variação da velocidade do motor apresentou uma redução menor em comparação com o ensaio sem interpolo, com o aumento da carga. Isso porque, sem o interpolo, ocorre o efeito da reação da armadura,

causando uma diminuição do fluxo polar e um conseqüente aumento da velocidade. Quanto maior a corrente de armadura, maior o efeito da reação da armadura. No entanto, ao se inserir o interpolo, esse efeito é compensado; assim, o fluxo polar mantém-se constante. A Equação 11 apresenta a relação entre o fluxo e a corrente de armadura na velocidade do motor CC shunt.

$$N = K \cdot \frac{V_a - I_a R_a}{\phi_f} \quad (11)$$

Na qual:

N : representa a velocidade do eixo do motor;

K : representa uma constante característica da máquina;

ϕ_f : representa o fluxo do campo-shunt da máquina;

I_a : representa a corrente de armadura;

R_a : representa a resistência do enrolamento de armadura;

V_a : representa a tensão aplicada na armadura.

No motor composto cumulativo, observa-se que, ao adicionar carga no circuito, a velocidade do motor apresenta uma redução maior do que o motor shunt auto-excitado. Isso porque, como o fluxo do motor composto cumulativo é obtido pela soma dos fluxos shunt e série, um aumento na corrente da armadura, provoca um aumento no fluxo série e, conseqüentemente, uma redução na velocidade, conforme apresentado na Equação 12. Sendo assim, a velocidade nesse tipo de motor apresenta uma redução tanto pelo aumento da corrente de armadura quanto pelo aumento do campo-série, sendo que ambos estão diretamente relacionados.

$$N = K \cdot \frac{V_a - I_a (R_a + R_s)}{\phi_f + \phi_s} \quad (12)$$

Em que:

ϕ_s : representa o fluxo do campo-série da máquina.

A fim de analisar o desempenho dos motores, em termos quantitativos, são calculados os valores de regulação de velocidade, com e sem interpolo, os quais são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Regulação de velocidade dos motores, com e sem interpolo.

Reg (%)	Shunt				Composto cumulativo	
	Excitação independente		Auto-excitado		sem interpolo	com interpolo
	sem interpolo	com interpolo	sem interpolo	com interpolo		
	30,30	24,12	10,29	6,24	18,99	12,47

Fonte: Próprio Autor.

No motor shunt excitação independente sem interpolo, a regulação de velocidade obtida foi de 30,30%, assim, percebe-se que a velocidade sofre uma redução considerável devido à variação de carga. No entanto, para as mesmas condições de carga, com a utilização do interpolo, a regulação de velocidade foi equivalente a 24,12%.

A regulação de velocidade obtida no motor shunt auto-excitado sem interpolo foi de 10,29%. No entanto, ao adicionar o interpolo nesse motor, a regulação de velocidade foi equivalente a 6,24%.

No motor composto cumulativo sem interpolo, a regulação de velocidade obtida foi de 18,99%. Entretanto, com o interpolo, a regulação de velocidade foi de 12,47%.

Observa-se que o motor shunt auto-excitado é o que apresenta menor valor de regulação, visto que esse tipo de motor possui como característica apresentar velocidade quase constante com a variação da carga. Já o motor composto possui a característica de apresentar uma regulação mais pobre que a do motor shunt auto-excitado, sendo assim, sua regulação é expressa em maior percentagem.

Além disso, nota-se que a utilização do enrolamento de interpolo, em todas as configurações do motor, proporcionou uma considerável redução na regulação de velocidade. Dessa forma, os motores apresentam um melhor desempenho com a inserção desse mecanismo de compensação do efeito da reação da armadura.

4.2.1 Comparação das características torque-carga dos motores CC

A Figura 36 apresenta a comparação das características de torque-carga dos motores shunt, excitação-independente e auto-excitado, e do motor composto cumulativo, sem interpolo. Nota-se que, para as mesmas condições de carga, o motor cumulativo apresenta um maior torque. Isso porque, nessa configuração, o fluxo no interior da máquina é maior, visto

que esse é obtido pela soma dos fluxos produzidos pelos enrolamentos de campo-shunt e série, conforme apresentado na Equação 9. No motor shunt, porém, o torque é obtido somente pelo fluxo shunt, conforme mostra a Equação 10.

O motor composto cumulativo, partindo a vazio, possui um torque próximo ao do motor shunt auto-excitado. No entanto, como o fluxo do campo-série é função da corrente de armadura, um aumento nessa corrente, devido ao acréscimo de carga, provoca um aumento maior no torque do motor composto do que do motor shunt, visto que no motor composto, o torque é proporcional ao fluxo do campo-série e à corrente de armadura. Dessa forma, a curva de torque do motor composto cumulativo é sempre mais elevada que a do motor shunt, para a mesma corrente de armadura.

Além disso, observa-se que a curva de torque do motor shunt excitação independente é inferior às curvas dos outros motores. Isso porque, no ensaio desse motor, a fonte de corrente contínua do enrolamento de campo foi fixada em 80%, o que produziu uma corrente de campo de 0,21 A, a qual foi inferior à corrente de campo dos outros motores. Dessa forma, devido a uma corrente de campo menor, o fluxo produzido por esse motor também é menor e, conseqüentemente, o torque desenvolvido.

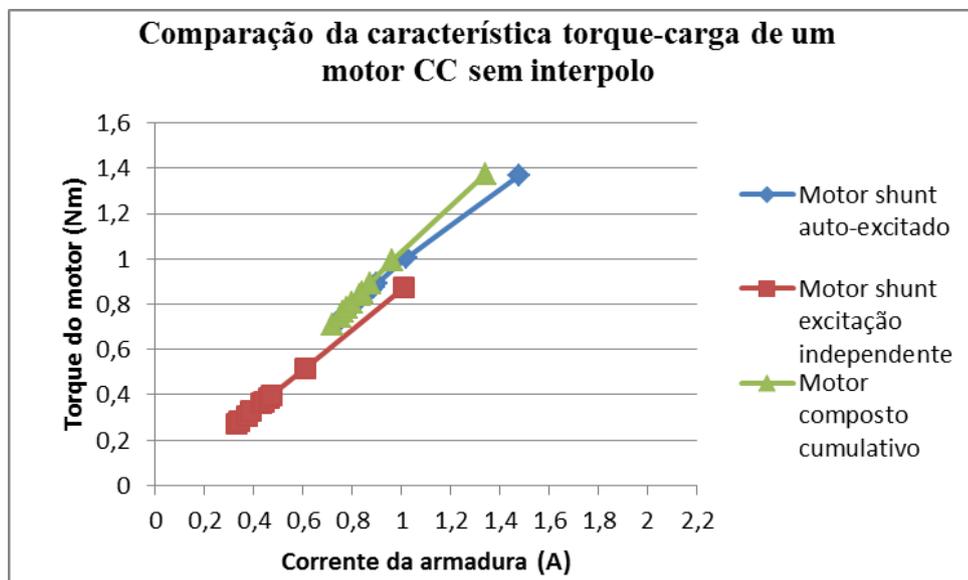


Figura 36 - Comparação das características de torque-carga das diferentes configurações dos motores CC, sem interpolo.

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 37 apresenta a comparação das características de torque-carga dos motores shunt, excitação-independente e auto-excitado, e do motor composto cumulativo, com

interpolo. Observa-se que, em todas as configurações dos motores, a corrente de armadura e, conseqüentemente, o torque desenvolvido pelos motores com interpolo foram menores em comparação com os ensaios sem interpolo. Dessa forma, percebe-se que, para as mesmas condições de carga, os motores apresentaram um desempenho melhor com a utilização do interpolo.

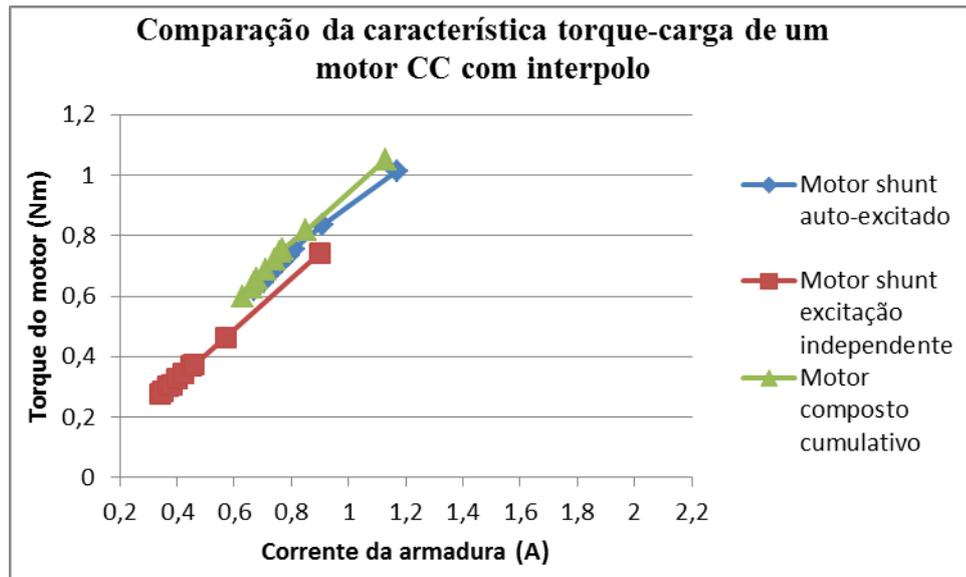


Figura 37 - Comparação das características de torque-carga das diferentes configurações dos motores CC, com interpolo.

Fonte: Próprio Autor.

4.2.3 Comparação das características carga-velocidade dos motores CC

A Figura 38 apresenta a comparação das características de carga-velocidade dos motores shunt, excitação-independente e auto-excitado, e do motor composto cumulativo, sem interpolo. Nota-se que a velocidade do motor composto cumulativo reduz em maior proporção que a do motor shunt auto-excitado. Isso porque, de acordo com a equação básica da velocidade de um motor composto cumulativo, representada pela Equação 12, a velocidade é inversamente proporcional ao fluxo da máquina, e, nesse tipo de motor, o fluxo resultante é maior.

Além disso, nota-se que a curva da velocidade do motor shunt excitação independente é maior que a dos outros tipos de motores. Isso porque a corrente de campo nesse ensaio foi menor e, conseqüentemente, o fluxo produzido por esse motor. Dessa forma, como o fluxo e a velocidade são inversamente proporcionais, quanto menor o fluxo, maior é a velocidade desenvolvida pelo motor.

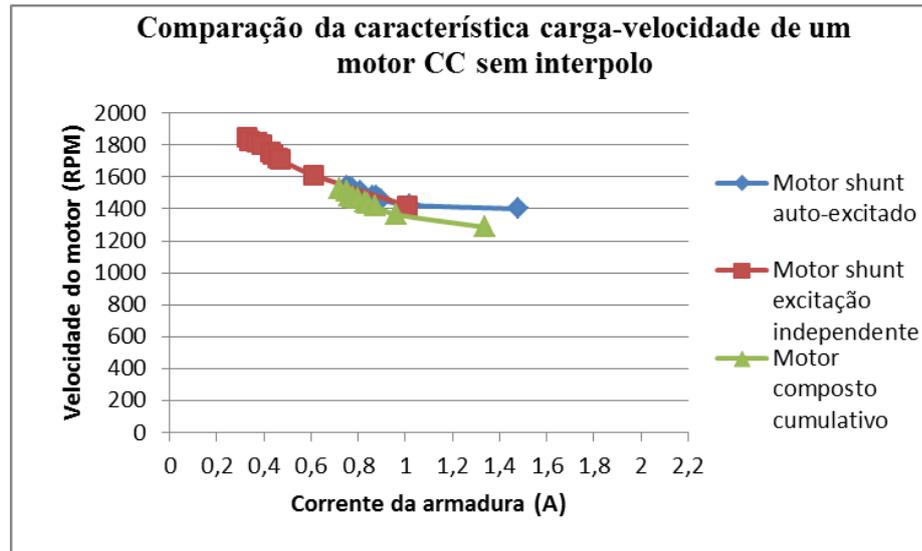


Figura 38 - Comparação das características de carga-velocidade das diferentes configurações dos motores CC, sem interpolo.

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 39 apresenta a comparação das características de carga-velocidade dos motores shunt, excitação-independente e auto-excitado, e do motor composto cumulativo, com interpolo. Observa-se que, em todas as configurações dos motores, a corrente de armadura foi menor em comparação com o ensaio sem interpolo.

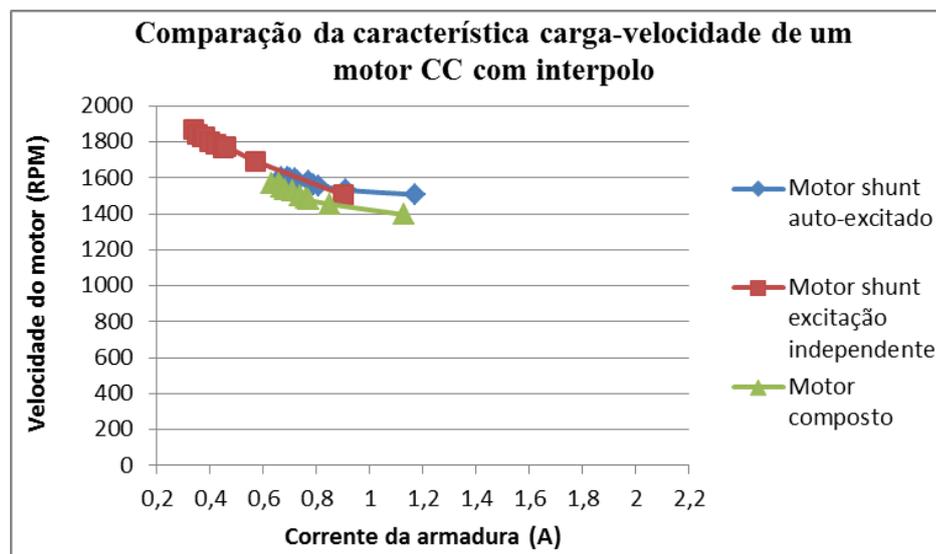


Figura 39 - Comparação das características carga-velocidade das diferentes configurações dos motores CC, com interpolo.

Fonte: Próprio Autor.

Percebe-se que todos os perfis de curvas, tanto de velocidade quanto de torque, estão de acordo com os perfis encontrados na literatura.

5 CONCLUSÃO

As atividades industriais estão exigindo, em seus processos, máquinas elétricas que apresentam boa eficiência e que não sofram variações significativas devido ao acoplamento de cargas. No entanto, apesar dos avanços tecnológicos terem proporcionado sistemas que estão substituindo as máquinas CC, existem aplicações específicas nas quais as máquinas CC apresentam melhor desempenho, tornando-se a melhor opção. Dessa forma, a análise do desempenho de tais máquinas em diversas condições de carga é extremamente relevante, sendo o objeto de estudo deste trabalho.

No desempenho das máquinas CC, é de suma importância analisar o efeito da reação da armadura, visto que durante o funcionamento normal dessas máquinas, esse efeito é bastante significativo. Dessa forma, por meio deste trabalho foi possível analisar o desempenho das máquinas CC, operando como gerador e como motor, em suas diversas configurações, com e sem o enrolamento de interpolo.

A reação da armadura prejudica o processo de comutação das máquinas CC, uma vez que distorce o fluxo resultante que é fundamental para o funcionamento deste equipamento. Esse efeito pode provocar centelhamento excessivo nas escovas e no comutador, contribuindo para a diminuição da vida-útil da máquina, além de impedir a instalação da mesma em determinados tipos de ambientes, como por exemplo, em ambientes que contêm gases explosivos. A utilização dos enrolamentos de interpolos mostra-se uma opção para a redução do centelhamento mesmo em condições com elevados valores de carga.

Além disso, verifica-se que o desempenho da máquina CC, operando como gerador ou como motor, é otimizado com a inserção do interpolo no circuito. Nos geradores, o interpolo contribui para uma estabilidade do valor da tensão, a qual não apresenta alterações significativas com a variação da carga, ou seja, observa-se uma melhora significativa na regulação de tensão. No caso dos motores, a utilização desse mecanismo de compensação proporciona uma redução na variação da velocidade na presença de carga. Além disso, o torque desenvolvido pelos motores com interpolo é menor em comparação aos motores sem interpolo, para as mesmas condições de carga.

Dessa forma, por meio deste trabalho é possível comprovar a eficácia da utilização do interpolo, tanto no que se refere ao processo de comutação quanto ao desempenho da máquina CC.

5.1 Propostas para trabalhos futuros

Esse trabalho evidencia a contribuição do enrolamento de interpolo para a melhoria da vida útil e do desempenho das máquinas CC. No entanto, outras características de interesse para o estudo das máquinas CC podem ser analisadas em trabalhos futuros, podendo-se destacar os seguintes:

- Avaliação do desempenho das máquinas CC com ajuste de linha neutra;
- Estudo da interferência da reação da armadura nos métodos de controle de velocidade de motores CC.

REFERÊNCIAS

- ABIMAQ. **A História das máquinas**. Disponível em: <
<http://www.abimaq.org.br/Arquivos/Html/Publica%C3%A7%C3%B5es/Livro-A-historia-das-maquinas-70-anos-Abimaq.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2016.
- CARVALHO, Geraldo. **Máquinas elétricas**. São Paulo: Érica, 2007.
- CHAPMAN, S. J. **Maquinas eléctricas**. 3.ed. Bogotá: McGraw Hill, 2000.
- DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Prentice-Hall do Brasil, 1994.
- FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006
- KOSOW, Irving Lionel. **Máquinas elétricas e transformadores**. São Paulo: Globo, 2008.
- MARQUES, Milton César Silva; HADDAD, Jamil; MARTINS, A. R. S. **Eficiência Energética: teoria & prática**. Itajubá: Fupai, 2007.
- MELO, Bruno Mattos Souza de Souza. **Modelagem e simulação de uma máquina elétrica de corrente contínua levando-se em consideração os efeitos de reação de armadura**. 2006. 149 f. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- OGAWA, Carlos. **Otimização do projeto de máquinas de corrente contínua utilizando algoritmos genéticos**. 2001. 117 f. Tese (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- PAIXÃO, Jacqueline Pinho. **Controle de velocidade de motores elétricos**. 2009. 62 f. Monografia (Especialização em Automação Industrial) - Programa de Pós - Graduação em Automação industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- REZECK, Ricardo Mohallem. **Otimização de um sistema de frenagem dinâmica em uma máquina de corrente contínua de excitação independente, na ocorrência de uma falta de energia elétrica**. 2007. 89 f. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
- SÁ, Leonardo Leal de; AMORIM, Renato Canuto Medeiros. **Identificação e projeto de controladores aplicados em um motor CC**. 2014. 99 f. Monografia - Departamento de Engenharia Eletrônica, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- SIMONE, Gilio Aluisio; CREPPE, Renato Crivellari. **Conversão eletromecânica de energia**. São Paulo: Érica, 2002.
- SINISCALCHI, Roberto Teixeira. **Determinação do rendimento de hidrogeradores utilizando técnicas de termografia infravermelha**. 2009. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.
- VILLAR, Gileno José de Vasconcelos. **Geradores e Motores CC**. 2006.

VOGES, **Manual de motores elétricos**. Disponível em: < www.voges.com.br/download.php?path=_images/materiais/PDF/PDF_128...pdf >. Acesso em: 27 jul. 2016.

WEG. **Características e especificações de motores de corrente contínua e conversores CA/CC**. Disponível em: < <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-3-caracteristicas-e-especificacoes-de-motores-de-corrente-continua-conversores-ca-cc-artigo-tecnico-portugues-br.pdf> >. Acesso em: 08 ago. 2016.

WEG. **Motores de corrente contínua**. Disponível em: < <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-corrente-continua-50005370-catalogo-portugues-br.pdf> >. Acesso em: 08 ago. 2016.

WEG. **Varição de velocidade**. Disponível em: < <http://www.abraman.org.br/arquivos/43/43.pdf> > Acesso em: 08 ago. 2016.