

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**INOVAÇÕES NO PROJETO DE GERADORES A
RELUTÂNCIA VARIÁVEL COM ESTUDO DAS
INFLUÊNCIAS
DA SATURAÇÃO MAGNÉTICA E DAS
INDUTÂNCIAS MÚTUAS**

RENATO JAYME DIAS

ABRIL DE 2017

RENATO JAYME DIAS

INOVAÇÕES NO PROJETO DE GERADORES A RELUTÂNCIA VARIÁVEL COM ESTUDO DAS INFLUÊNCIAS DA SATURAÇÃO MAGNÉTICA E DAS INDUTÂNCIAS MÚTUAS

Tese apresentada por **Renato Jayme**

Dias à Faculdade de Engenharia

Elétrica para a obtenção do título de

Doutor em Engenharia Elétrica pela

Universidade Federal de Uberlândia.

Área de concentração: Máquinas
Elétricas e Aterramentos Elétricos.

Orientador: Prof. Darizon Alves de
Andrade, PhD. UFU

Coorientador: Prof. Augusto Fleury
Veloso da Silveira, Dr. UEG

**Uberlândia
2017**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

D541i
2017 Dias, Renato Jayme, 1984-
 Inovações no projeto de geradores a relutância variável com estudo das influências da saturação magnética e das indutâncias mútuas / Renato Jayme Dias. - 2017.
 200 f. : il.

 Orientador: Darizon Alves de Andrade.
 Coorientador: Augusto Fleury Veloso da Silveira.
 Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
 Inclui bibliografia.

 1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Máquinas elétricas - Projetos e construção - Teses. I. Andrade, Darizon Alves de, 1956- II. Silveira, Augusto Fleury Veloso da, 1953- III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.3

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**INOVAÇÕES NO PROJETO DE GERADORES A
RELUTÂNCIA VARIÁVEL COM ESTUDO DAS
INFLUÊNCIAS
DA SATURAÇÃO MAGNÉTICA E DAS
INDUTÂNCIAS MÚTUAS**

Tese apresentada por **Renato Jayme Dias** à Faculdade de Engenharia Elétrica para a obtenção do título de **Doutor em Engenharia Elétrica** pela Universidade Federal de Uberlândia.

Aprovada em 20 de abril de 2017, pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Darizon Alves de Andrade, PhD – UFU – Orientador
Prof. Augusto Fleury Veloso da Silveira, Dr – UEG – Coorientador
Prof. José Roberto Camacho, PhD – UFU
Prof. Luciano Martins Neto, Dr – UFU
Prof. Marcos Antônio Arantes de Freitas, Dr – IFG
Prof. Rui Vagner Rodrigues da Silva, Dr – IFG – Suplente

Uberlândia, 20 de abril de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**INOVAÇÕES NO PROJETO DE GERADORES A
RELUTÂNCIA VARIÁVEL COM ESTUDO DAS
INFLUÊNCIAS
DA SATURAÇÃO MAGNÉTICA E DAS
INDUTÂNCIAS MÚTUAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por Renato Jayme

Dias visando à obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Prof. Darizon Alves de Andrade, PhD
Orientador

Prof. Alexandre Cardoso, Dr
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Jaime Rosa Dias e Dionéia Alves da Silva Dias, os quais são responsáveis por tudo que faço e tudo que sou.

Aos meus irmãos Fábio Jayme Dias, Greice Ferreira Barbosa Fonseca Dias e Naya Patrícia Dias, que sempre estão comigo me dando força e amor.

Ao meu sobrinho Fernando Fonseca Dias, pelo carinho e companheirismo.

E principalmente, dedico esse trabalho à minha mulher, Rejane Carmo Rezende Dias, e à minha filha, Beatriz Rezende Dias; que são minha base e força, minha paz e minha esperança.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus colegas de Laboratório e de Instituição:

Ao Charles dos Santos Costa, à Beatriz Reis dos Santos, à Nayane Moura Neris e à Heliana Candida Cardoso, pela ajuda e dedicação – imprescindíveis - de cada um. Sem esse grupo, meu doutorado seria impossível.

Ao meu orientador Prof. Darizon Alves de Andrade, por acreditar nesse trabalho, pela paciência e pela perseverança.

Ao meu coorientador, Prof. Augusto Fleury Veloso da Silveira, pelo amor paterno depositados em mim e no trabalho.

À empresa, JD Prestacional, por ceder espaço físico para montar o laboratório e pelo patrocínio na compra de equipamentos.

À Cinara Fagundes, pela atenção, pela empatia, pela amizade e por sua seriedade nos trabalhos do programa da pós-graduação.

E, principalmente, agradeço à minha companheira de pesquisa e de vida, Camille Reátegui Silva, pela dedicação - tão brilhante e plena - em todas as etapas desse trabalho.

INOVAÇÕES NO PROJETO DE GERADORES A RELUTÂNCIA VARIÁVEL COM ESTUDO DAS INFLUÊNCIAS DA SATURAÇÃO MAGNÉTICA E DAS INDUTÂNCIAS MÚTUAS

Resumo: Este trabalho tem o objetivo de apresentar inovações no projeto de Geradores a Relutância Variável nas configurações 6x4 e 6x6. Foi proposta uma metodologia específica para projeto de geradores, com estudo das Influências da Saturação Magnética e das Indutâncias Mútuas. Esses estudos – quando comparados com a metodologia clássica de projeto – indicam a necessidade de haver modificações na estrutura e nas dimensões desses conversores, tendo como intuito o aumento de rendimento.

Pode-se concluir que as modificações propostas provocaram um aumento significativo da saturação magnética e das indutâncias mútuas no período de excitação. Esse acréscimo na saturação, diminuirá a variação de fluxo magnético nesse período, causando a diminuição do conjugado necessário para mover o gerador. Essa diminuição de necessidade de conjugado provocou o aumento do rendimento.

Palavras-chave: Projeto de Máquinas Elétricas, Gerador a Relutância Variável, Rendimento, Indutâncias Mútuas, Saturação Magnética.

INOVATIONS ON SWITCHED RELUCTANCE GENERATORS DESIGN THROUGH THE STUDY OF MAGNETIC SATURATION AND MUTUAL INDUCTANCES INFLUENCES

Abstract: This paper aims to present innovations in design of a Switched Reluctance Generator in settings 6x4 and 6x6. A specific methodology for generators design is proposed, based on the study of magnetic saturation and mutual inductances influences. These studies - when compared to classical methodology design - indicate the need for modifications on structure and dimensions of these converters with the intention of increasing the efficiency.

It must be concluded that the proposed modifications cause a significant increment on magnetic saturation and mutual inductances at excitation period. This saturation increasing decreases the magnetic flux variation at this moment, causing the reduction of required torque to move the generator. So, the decrease of this required torque provokes the increasing efficiency.

Keywords: Electric Machines Design, Switched Reluctance Generator, Efficiency, Mutual Inductances, Magnetic Saturation.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL E APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

1.1	- Considerações iniciais.....	1
1.2	- Revisão Bibliográfica.....	4
1.3	- Objetivo do Trabalho.....	8
1.4	- Apresentação do Conteúdo do Trabalho.....	9

CAPÍTULO 2 - REVISÃO DOS PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTOS - UMA ETAPA PRÉ-PROJETO

2.1	- Introdução	11
2.2	- Estrutura das Máquinas a Relutância Variável	12
2.3	- Princípios de acionamento das Máquinas a Relutância Variável	13
2.3.1	- Gerador a Relutância Variável 6x4	14
2.3.2	- Máquina a Relutância Variável Monofásica (6x6)	17
2.4	- Conversão de Energia em uma MRV.....	20
2.5	- Efeitos dos ângulos de disparo nas MRV.....	21
2.6	- Consequências do perfil de indutância nas MRV	22
2.7	- Conclusões	22

CAPÍTULO 3 - MODELAGEM MATEMÁTICA - PRIMEIRO PASSO DO PROJETO

3.1	- Introdução.....	23
-----	-------------------	----

3.2 - Equacionamento das Forças mecânicas e das tensões elétricas de uma MRV	
.....	23
3.3 - Equacionamento das tensões de uma MRV com três enrolamentos no estator	
.....	26
3.4 - Equacionamento das Forças de uma MRV com três enrolamentos	28
3.5 - Conclusão	30
CAPÍTULO 4 - PROJETO ELETROMECAÂNICO DE MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL - SEGUNDO PASSO DO PROJETO	

4.1 - Introdução	31
4.2 - MRV de 735,6 VA (Gerador) ou 1 cv (motor)	32
4.2.1 - Escolha do Ângulo do Polo do Estator	36
4.2.2 - Obtenção do Comprimento do Entreferro	37
4.2.3 - Altura da culatra do Estator	37
4.2.4 - Diâmetro Externo do Estator	40
4.2.5 - Largura do Polo do Estator	40
4.2.6 - Largura do Polo do Rotor	41
4.2.7 - Cálculo do Ângulo do Polo do Rotor	41
4.2.8 - Cálculo da Altura do Polo do Rotor	42
4.2.9 - Altura da culatra do Rotor	42
4.2.10 - Diâmetro do Eixo do Motor	43
4.2.11 - Altura do Pólo do Estator	43
4.3 - Desenhos das lâminas de uma MRV	44
4.3.1 - Desenhos das lâminas do estator de uma MRV	44
4.4 - Cálculo do número de espiras de cada fase	47

4.4.1	- Finalizações do projeto.....	51
4.5	- Conclusões.....	51

CAPÍTULO 5 – PERFIL DE INDUTÂNCIA PRÓPRIA E MÚTUA USANDO O FEMM - TERCEIRO PASSO DO PROJETO

5.1	- Introdução	52
5.2	- FEMM	53
5.2.1	- FEMM passo a passo – Pré-processamento	53
5.2.2	- Definição do Problema	54
5.2.3	- Importando o Desenho do AUTOCAD	55
5.2.4	- Definição de características	56
5.2.5	- Definição de propriedades	57
5.3	- Resultados	64
5.3.1	- Indutância Própria em Relação à Posição Angular	68
5.3.2	- Indutância Própria em Relação à Corrente	52
5.3.3	- Visualização da Indutância Própria	68
5.3.4	- Visualização das Indutâncias Mútuas	72
5.4	- Sobre as indutâncias encontradas e como usá-las	75
5.5	- Conclusão.....	75

CAPÍTULO 6 – SIMULAÇÃO DE UMA MRV - QUARTO PASSO DO PROJETO

6.1	- Introdução.....	76
6.2	- Simulação das Máquinas a Relutância Variável	77
6.2.1	- Obtenção do Perfil de Indutância	77

6.2.2	- Simulação das Bobinas de uma MRV	78
6.2.3	- Solução de uma equação (3.26) de uma MRV	79
6.2.4	- Simulação do conversor <i>half-bridge</i> no modo Gerador	82
6.2.5	- Disparo das chaves	83
6.3	- Resultados de Simulação	85
6.3.1	- MRV acionada como Gerador	86
6.3.1.2	- Tensões na MRV acionada como Gerador	90
6.4	- Rendimento	96
6.5	- Conclusões.....	96

CAPÍTULO 7 – PROPOSTA DE MELHORIAS NO PROJETO - ETAPA DE INOVAÇÕES

7.1	- Introdução	98
7.2	- Estudo do rendimento de GRV	98
7.2.1	- Ângulo de disparo	99
7.3	- Novas Etapas no Projeto	100
7.3.1	- Estudo da Saturação magnética	100
7.3.2	- Indutâncias Mútuas	107
7.3.3	- Capacitor de Carga	108
7.4	- Simulação de Novo Projeto de GRV	109
7.4.1	- Simulação do Novo Projeto de GRV 6x4	109
7.4.2	- Simulação de Novo Projeto de GRV 6x6	115

7.5	- Conclusão	120
------------	--------------------------	------------

CAPÍTULO 8 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS - ÚLTIMO PASSO - EXECUÇÃO DO PROJETO

8.1	- Introdução	121
8.2	- Objetivos	121
8.3	- Bancada de Testes experimentais	121
8.4	- Construção das máquinas	125
8.4.1	- Corte das lâminas	125
8.4.2	- Preparação e empilhamento das lâminas	127
8.4.3	- Enrolamento e isolamento das bobinas	128
8.4.4	- Empilhamento das lâminas do rotor	129
8.4.5	- Testes elétricos	129
8.4.6	- Aspectos mecânicos da bancada	129
8.5	- Resultados experimentais	130
8.5.1	- Resultados experimentais do Gerador a Relutância 6x4 Padrão e 6x4 Modificado	130
8.5.1.2	- Rendimento do GRV 6x4 Padrão e do GRV 6x4 Modificado	138
8.5.2	- Resultados experimentais do Gerador a Relutância 6x6 Padrão e 6x6 Modificado	139
8.5.2.2	- Rendimento do GRV 6x6 Padrão e do GRV 6x6 Modificado	147
8.6	- Conclusões	148

CAPÍTULO 9 – CONCLUSÕES

9.1 - Conclusões finais	149
--------------------------------------	------------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	151
---	------------

ANEXOS

A - Tabela de fios AWG	160
B - Projetos de Pesquisa e Artigos Aprovados relacionados a esse Trabalho	162
C - Programa que Calcula as Indutâncias e suas Derivadas	166
D - Fotos da bancada	170
E - Detalhes sobre o uso do FEMM (Script LUA).....	172

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Fig. 2.1 – Desenho da seção transversal de uma MRV 6x4, mostrando o enrolamento da fase A.	12
Fig.2.2 – Seção transversal de uma MRVM 6x6, mostrando uma parte do enrolamento da fase A.	13
Fig.2.3 – Carcaça, sensor óptico e disco de posicionamento.	14
Fig.2.4 – Conversor half-bridge trifásico.	15
Fig.2.5 – Fase A em -4,7 graus em uma MRV(6x4).	15
Fig.2.6 – Fase A em 25,3 graus em uma MRV(6x4).	16
Fig.2.7 – Tensão e corrente na fase de uma MRV 6x4.	16
Fig.2.8 – Perfil de indutância de uma MRV 6x4.	17
Fig.2.9 – Conversor half-bridge monofásico.	18
Fig.2.10 – Fase A em -7,7° do acoplamento em uma MRV 6x6.	19
Fig.2.11 – Fase A em 16,3o em uma MRV 6x6.	19
Fig.2.12 – Tensão e corrente em uma bobina de uma MRV 6x6.	20
Fig.2.13 – Perfil de indutância de uma MRV 6x6.	20

CAPÍTULO 3

Fig.3.1 – Desenho da seção transversal de uma MRV 6x4, mostrando o enrolamento da fase A.	24
--	-----------

CAPÍTULO 4

Fig. 4.1- Densidade de fluxo magnético em uma MRV 6x6.	38
Fig.4.2- Perfil das lâminas do estator de uma MRV.	39
Fig. 4.3- Desenho da lâmina da estator da MRV 6x6 e 6x4.	45
Fig. 4.4- Desenho da lâmina do rotor da MRV 6x4.	46
Fig. 4.5- Desenho da lâmina do rotor da MRV 6x6.	47
Fig. 4.6- Densidade de fluxo magnético x intensidade de campo magnético em materiais magnéticos.	49

CAPÍTULO 5

Fig.5.1- Página inicial do FEMM.	53
Fig.5.2- Definição do tipo de Problema.	54
Fig.5.3- Definição dos Parâmetros do Problema.	55
Fig.5.4- Definição da Tolerância de Importação de Arquivos DXF.	55
Fig.5.5 - Lâminas de uma MRV 6x4 Importadas de Arquivos DXF e apresentadas na interface do modo Pré-Processador.	56
Fig. 5.6 - Janela para definição das características do problema.	56
Fig.5.7- Biblioteca de Materiais.	58
Fig. 5.8 - Biblioteca de materiais.	59
Fig. 5.9 - Propriedades do aço M-19 e do fio de cobre 10 AWG.	59
Fig.5.10 - Definição da Propriedade dos Materiais Escolhidos.	60
Fig.5.11 - Propriedade dos Circuitos.	60
Fig.5.12 - Condições de Contorno.	61

Fig.5.13 - Propriedade dos Circuitos.	61
Fig.5.14-Bloco para Adicionar materiais no Desenho.	62
Fig.5.15-Bloco para Escolher os Materiais no Desenho.	62
Fig.5.16-Criação da Malha no Desenho.	62
Fig.5.17- Malha no Desenho.	63
Fig.5.18- Execução do Programa.	63
Fig.5.19- Visualização dos Resultados.	63
Fig.5.20- Execução do Programa.	63
Fig.5.21 - Execução do Programa.	64
Fig. 5.22 - Superfície de indutâncias próprias da fase A da MRV 6x4 em estudo.	65
Fig. 5.23 - Superfície de indutâncias próprias de uma bobina da fase A da MRV 6x6 em estudo.	66
Fig. 5.2 – Desenho da seção transversal de uma MRV 6x4, mostrando o enrolamento da fase A na posição zero.	67
Fig. 5.25– Desenho da seção transversal de uma MRV 6x6, mostrando o enrolamento de uma das bobinas da fase A na posição zero.	67
Fig.5.26- Representação gráfica da densidade de fluxo (B) para uma corrente de 5A MRV 6X4.	68
Fig.5.17- Representação gráfica da densidade de fluxo (B) para uma corrente de 5A MRV 6X6.	69
Fig.5.28- Representação gráfica da densidade de fluxo (B) para uma corrente de 25A MRV(6x4).	69

Fig.5.29- Representação gráfica da densidade de fluxo (B) para uma corrente de 25A MRV 6X6.	70
Fig.5.30- Representação gráfica da densidade de fluxo (B) para uma corrente de 45A MRV 6X4.	70
Fig.5.31- Representação gráfica da densidade de fluxo (B) para uma corrente de 45A MRV 6X6.	71
Fig.5.32 - Legenda com a variação da densidade de fluxo (B).	71
Fig.5.33 - Superfície de indutâncias mútuas da fase A na bobina da fase B da MRV 6x4.	72
Fig.5.34 - Superfície de indutâncias mútuas da fase A na bobina da fase C da MRV 6x4.	73
Fig.5.35 - Superfície de indutâncias mútuas da bobina energizada da fase A na bobina defasada 60° da MRV 6x6.	74
Fig.5.36 - Superfície de indutâncias mútuas da bobina energizada da fase A na bobina defasada 120° da MRV 6x6.	74

CAPÍTULO 6

Fig. 6.1-Fonte de Corrente Controlada por Sinal.	77
Fig. 6.2-Bloco de solução da equação (3.26).	78
Fig.6.3 – Conversor half-bridge para um gerador.	82
Fig.6.4 – Conversor <i>half-bridge</i> para gerador no SIMULINK.	82
Fig.6.5 – Disparos das chaves de uma MRV 6x4 (Gerador).	83
Fig.6.6 – Corrente na MRV 6x4 sem as mútuas (Gerador).	85
Fig.6.7 – Corrente na MRV 6x4 com as mútuas (Gerador).	86

Fig.6.8 – Corrente na MRV 6x6 sem as mútuas (Gerador).	86
Fig.6.9 – Corrente na MRV 6x6 com as mútuas (Gerador).	87
Fig.6.10 – Corrente na MRV 6x4 sem as mútuas (Gerador com uma fase desligada).	87
Fig.6.11 – Corrente na MRV 6x4 com as mútuas (Gerador com uma fase desligada).	88
Fig.6.12 – Corrente na MRV 6x6 sem as mútuas (Gerador com uma fase desligada).	88
Fig.6.13 – Corrente na MRV 6x6 com as mútuas (Gerador com uma fase desligada).	88
Fig.6.14 – Tensões na MRV 6x4 sem as mútuas (Gerador).	89
Fig.6.15 – Tensões na MRV 6x4 com as mútuas (Gerador).	89
Fig.6.16 – Tensões na MRV 6x6 sem as mútuas (Gerador).	90
Fig.6.17 – Tensões na MRV 6x6 com as mútuas (Gerador).	90
Fig.6.18 – Tensões na MRV 6x4 sem as mútuas na fase que não está desligada (Gerador com uma fase desligada).	91
Fig.6.19 – Tensões na MRV 6x4 com as mútuas na fase que não está desligada (Gerador com uma fase desligada).	91
Fig.6.20 – Tensões na MRV 6x6 sem as mútuas na fase que não está desligada (Gerador com uma fase desligada).	92
Fig.6.21 – Tensões na MRV 6x6 com as mútuas na fase que não está desligada (Gerador com uma fase desligada).	92
Fig.6.22 – Tensões na MRV 6x4 sem as mútuas na fase que está queimada (Gerador com uma fase desligada).	93

Fig.6.23 – Tensões na MRV 6x4 com as mútuas na fase que está queimada (Gerador com uma fase desligada).	93
Fig.6.24 – Tensões na MRV 6x6 sem as mútuas na fase que está queimada (Gerador com uma fase desligada).	94
Fig.6.25 – Tensões na MRV 6x6 com as mútuas na fase que está queimada (Gerador com uma fase desligada).	94

CAPÍTULO 7

Fig.7.1- Máquina 6x6 modificada para se obter a saturação na Excitação.	100
Fig.7.2- Máquina 6x4 modificada para se obter a saturação na excitação.	101
Fig.7.3- Desenho da lâmina do estator da MRV Modificada 6x4 E 6x6.	102
Fig.7.4- Desenho da lâmina do rotor da MRV Modificada 6x4.	103
Fig.7.5- Desenho da lâmina do rotor da MRV Modificada 6x6.	104
Fig.7.6- Fluxos magnéticos próprios no GRV 6x4.	105
Fig.7.7- Fluxos magnéticos próprios no GRV 6x6.	105
Fig.7.8 - Comparação entre as indutâncias mútuas do GRV Padrão e o GRV Modificado (6x4).	106
Fig.7.9 - Comparação entre as indutâncias mútuas do GRV Padrão e o GRV Modificado (6x6).	107
Fig.7.10 - Comparação entre as tensões na fonte do GRV Padrão e do GRV Modificado 6x4.	109

Fig.7.11 - Comparação entre as correntes na fonte do GRV Padrão e do GRV Modificado 6x4.	109
Fig.7.12 - Comparação entre as tensões na fase A do GRV Padrão e do GRV Modificado 6x4.	110
Fig.7.13 - Comparação entre as correntes na fase A do GRV Padrão e do GRV Modificado 6x4.	110
Fig.7.14 - Potência elétrica média na carga no GRV 6x4.	111
Fig.7.15 - Potência elétrica na fonte do GRV 6x4.	112
Fig.7.16 - Conjugado mecânico do GRV 6x4.	112
Fig.7.17 - Rendimento no GRV 6x4.	113
Fig.7.18 - Rendimento no GRV 6x4 Modificado com e sem indutâncias Mútuas.	114
Fig.7.19 - Comparação entre as tensões na fonte do GRV Padrão e do GRV Modificado 6x6.	115
Fig.7.20 - Comparação entre as tensões na fonte do GRV Padrão e do GRV Modificado 6x6.	115
Fig.7.21 - Comparação entre as tensões em uma das bobinas do GRV Padrão e do GRV Modificado 6x6.	116
Fig.7.22 - Comparação entre as correntes na fase A do GRV Padrão e do GRV Modificado 6x6.	116
Fig.7.23 - Potência elétrica na carga no GRV 6x6.	117
Fig.7.24 - Potência elétrica na fonte do GRV 6x6 Padrão e Modificado.	117
Fig.7.25 - Conjugado mecânico do GRV 6x6 Padrão e Modificado.	118
Fig.7.26 - Rendimento no GRV 6x6 Padrão e Modificado.	118

Fig.7.27 - Rendimento no GRV 6x6 Modificado com e sem indutâncias

Mútuas.

119

CAPÍTULO 8

Fig.8.1- Desenho do Projeto da bancada. 121

Fig.8.2- Módulo de IGBT-7MBR50UA120. 121

Fig.8.3- Conversor *half-bridge*. 122

Fig.8.4- *Drive* para IGBT. 122

Fig.8.5-ChipKIT Max32. 123

Fig.8.6–Encoder- EP50S8. 123

Fig.8.7- Inversor de frequência (CFW- 08) e Motor trifásico (3c.v - 4 polos). 124

Fig.8.8- Lâminas da MRV 6x4 e 6x6 Padrão. 125

Fig.8.9- Lâminas da MRV 6x4 e 6x6 Modificada. 125

Fig.8.10- Exemplares de lâminas do estator sendo envernizadas. 126

Fig.8.11 - Lâminas do estator sendo prensadas e colocadas na carcaça. 126

Fig.8.12 - Isolamento entre a pilha e as bobinas. 127

Fig.8.13 - Estatores bobinados nas carcaças. 127

Fig.8.14 - Rotor de um GRV. 128

Fig.8.15–Bancada de Teste MIT (azul) e os quatro GRV (cinza). 129

Fig.8.16–Tensão na entrada do *Half-Bridged*o GRV 6x4 padrão. 130

Fig.8.17 – Tensão na entrada do *Half-Bridge* do GRV 6x4 Modificado. 130

Fig.8.18–Corrente na fonte (excitação) do GRV 6x4 Padrão. 131

Fig.8.19–Corrente na fonte (excitação) do GRV 6x4 Modificado. 131

Fig.8.20–Tensão na bobina do GRV 6x4 Padrão. 132

Fig.8.21–Tensão na bobina do GRV 6x4 Modificado.	132
Fig.8.22–Corrente na bobina do GRV 6x4 Padrão.	133
Fig.8.23–Corrente na bobina do GRV 6x4 Modificado.	133
Fig.8.24–Potência na bobina do GRV 6x4 Padrão.	134
Fig.8.25–Potência na bobina do GRV 6x4 Modificado.	134
Fig.8.26–Tensão na carga do GRV 6x4 Padrão.	135
Fig.8.27–Tensão na carga do GRV 6x4 Modificado.	135
Fig.8.28–Corrente na carga do GRV 6x4 Padrão.	136
Fig.8.29–Corrente na carga do GRV 6x4 Modificado.	136
Fig.8.30–Potência na carga do GRV 6x4 Padrão.	137
Fig.8.31–Potência na carga do GRV 6x4 Modificado.	137
Fig.8.32 –Tensão na fonte do GRV 6x6 Padrão.	139
Fig.8.33 –Tensão na fonte do GRV 6x6 Modificado.	139
Fig.8.34 – Corrente na fonte do GRV 6x6 Padrão.	140
Fig.8.35 – Corrente na fonte do GRV 6x6 Modificado.	140
Fig.8.36 – Tensão na fase do GRV 6x6 Padrão.	141
Fig.8.37 – Tensão na fase do GRV 6x6 Modificado.	141
Fig.8.38 – Corrente na fase do GRV 6x6 Padrão.	142
Fig.8.39 – Corrente na fase do GRV 6x6 Modificado.	142
Fig.8.40 – Potência na fase do GRV 6x6 Padrão.	143
Fig.8.41 – Potência na fase do GRV 6x6 Modificado.	143
Fig.8.42 – Tensão na carga do GRV 6x6 Padrão.	144
Fig.8.43 – Tensão na carga do GRV 6x6 Modificado.	144
Fig.8.44 – Corrente na carga do GRV 6x6 Padrão.	145

Fig.8.45 – Corrente na carga do GRV 6x6 Modificado.	145
Fig.8.46 – Potência na carga do GRV 6x6 Padrão.	146
Fig.8.47 – Potência na carga do GRV 6x6 Modificado.	146

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL E APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

1.1 - Considerações iniciais

A crescente demanda por energia advinda, entre outros fatores, da crescente atividade comercial e industrial, bem como do aumento do padrão de vida da população, vem exigindo, de forma contínua, elevados investimentos na produção energética brasileira e mundial.

Paralelamente, outra vertente do setor energético defende que além de se investir em maior produção energética, deve-se investir no desenvolvimento tecnológico dos equipamentos elétricos, aumentando assim o rendimento destas máquinas, causando uma significativa economia de energia.

Atualmente, enfrentamos uma crise com inflação e desemprego que começou a ser percebida após o governo deixar de interferir – autoritariamente e irresponsavelmente – no preço da energia. Essa regulação autoritária pode levar ao desanimo de investidores e à crises energéticas.

Em países industrializados, cerca de 70% da energia gerada é consumida pelo setor industrial, onde, deste montante, 50% é consumido por máquinas elétricas. Sendo mais específico, dados nacionais mostram [1] que 40% de toda energia gerada é consumida pelo setor industrial, onde 49% dessa energia é usada na produção de força motriz, ou seja, em máquinas elétricas. Sendo assim, 20% de toda energia gerada no Brasil é consumida por motores elétricos.

Esses fatos são, por si só, suficientes para motivar investigações relacionadas à aplicação, melhoria do projeto e, conseqüentemente, aumento da eficiência de máquinas

elétricas. Essas investigações se mostram necessárias tanto para motores quanto para geradores.

Nas últimas décadas, devido às evoluções em sistemas microprocessados e em eletrônica, as máquinas a relutância variável voltaram a ser estudadas. E, dependendo da aplicação, são cotadas como possível substituta da máquina de indução [9].

Existem, na literatura científica, trabalhos que afirmam haver uma independência elétrica e magnética entre as fases de uma MRV e uma tolerância à falta de uma ou mais fases [14, 40, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50]. A justificativa desses trabalhos é que as indutâncias mútuas têm valores muito pequenos em relação às indutâncias próprias, podendo ser desprezadas na modelagem, na simulação, e no projeto das Máquinas a Relutância Variável (MRV). Além disso, esses trabalhos propõem aplicações baseadas nesse pressuposto: como, por exemplo, em aplicações críticas onde a tolerância à falta de uma das fases seria desejada. Esses trabalhos afirmam que as bobinas de uma MRV podem ser acionadas independentes umas das outras e que as bobinas de um Gerador a Relutância Variável (GRV) podem acionar cargas distintas – ou seja, cada carga é alimentada por uma bobina – e, no caso de uma bobina queimar, os outros circuitos não seriam afetados. Essas afirmações quando extrapoladas para o Motor a Relutância Variável poderiam levar a achar que: caso uma das bobinas desse motor queime, as outras bobinas - das fases não danificadas - continuariam contribuindo com a mesma parcela de conjugado. Portanto, a máquina teria seu conjugado reduzido proporcionalmente ao número de bobinas queimadas.

Por outro lado, recentemente começaram a aparecer trabalhos que afirmam ser necessário considerar a indutância mútua entre as bobinas das fases e apresentar aplicações para o conhecimento dessas indutâncias [2][3][4][5][6]. Alguns desses trabalhos afirmam que essa imprecisão (desconsiderar as indutâncias mútuas) pode levar a projetos ineficientes.

Porém, não se identificou entre esses trabalhos algum que tratasse essa imprecisão de maneira quantitativa em relação a projeto, modelagem ou acionamento de MRV.

Neste contexto, o foco desse trabalho será desenvolver um estudo das influências da saturação magnética e das indutâncias mútuas em duas configurações de Geradores a Relutância Variável: 6x4 e 6x6. Além disso, esse trabalho apresentará um roteiro de projeto para Máquinas a Relutância Variável.

Deve ficar evidente que as indutâncias mútuas são intrínsecas aos sistemas em estudo. Logo, o que se procura aqui é o entendimento e estudo dessa variável na etapa de projeto; posto que, na prática, ela é inevitável. Em outras palavras: deseja-se saber se as indutâncias mútuas podem continuar, ou não, sendo negligenciadas nas etapas de modelagem, simulação e nos projetos desse conversor.

Esse estudo não ficará restrito na quantificação da saturação e das indutâncias mútuas. Tais variáveis serão quantificadas mas outras possíveis influências (como, por exemplo, alterações na velocidade, conjugado e rendimento) devem ser apresentadas e discutidas, objetivando conhecer o que deve ser levado em consideração no modelo e na simulação desse tipo de máquina, no intuito de auxiliar no projeto das MRV e de seus conversores.

Duas topologias de MRV, 6x4 e 6x6, serão projetadas e fabricadas para que as colocações teóricas expostas nesse trabalho sejam avaliadas. Deve-se testar, principalmente, se há mudanças significativas quando se incluem a saturação magnética e as indutâncias mútuas na etapa de projeto.

Logo em seguida, serão apresentadas sugestões de modificação de projeto objetivando o aumento de rendimento. E, finalmente esses conversores serão construídos.

1.2 – Revisão Bibliográfica

As MRV são máquinas de estrutura e construção sólida e barata, montadas a partir de um rotor e de um estator compactos, de polos salientes, com laminação em aço de grãos não orientados e bobinas concentradas apenas nos polos do estator [17, 34, 37, 38, 39].

A redução no volume de cobre, devida ao passo curto das bobinas unipolares confinadas ao estator [40] e ao volume de material magnético em razão da estrutura recortada em pólos salientes, contribui para a redução no custo de fabricação da máquina [41]. A manufatura simplificada é outro fator de economia considerável.

A ausência de bobinas no rotor e a concentração das bobinas por polo do estator tornam essa máquina robusta e confiável [37, 40, 39]. Aliado a isto, o momento de inércia apresenta-se baixo [34]. Devido à sua arquitetura construtiva a MRV não apresenta perdas joule no rotor, o que facilita sua refrigeração que fica restrita ao estator [38]. Assim, a manutenção torna-se fácil e escassa [34]. O resultado é uma expectativa de vida útil maior [39, 35].

Não há ímãs permanentes e tampouco escovas [42], além de ser extremamente flexível: suas bobinas podem operar em série ou em paralelo com facilidade [40].

Alguns artigos recentes que tratam diretamente o assunto deste trabalho, indutância mútua de MRV , foram encontrados; sendo que os principais são [2][3][4][5] e [6].

Em [2] e [3] foram desenvolvidos métodos de controle de corrente de um motor a relutância variável (MRV) através de um tipo de rede neural denominada Função de Base Radial (*Radial Basis Function - RBF*). Foi dada atenção especial ao efeito da indutância mútua sobre as correntes de enrolamento estando duas fases energizadas. Ainda afirmou-se que a indutância mútua não pode ser ignorada quando duas fases são energizadas, mas que tal indutância possui um comportamento extremamente não linear. O controle da MRV foi feito

levando-se em consideração os valores das indutâncias mútuas. No entanto, não foram mostrados esses valores de indutância própria e mútua.

Em [4] A motivação do artigo foi a de mostrar que significativas ondulações de conjugado (com magnitudes de 6 a 10%) podem ser catalisadas pelo efeito do acoplamento magnético. Um novo método de controle de conjugado que adota a energização de duas fases foi proposto. Foi utilizado um algoritmo denominado Função de Distribuição de Conjugado, que também compensa o efeito do acoplamento mútuo. O controlador foi modelado, simulado, analisado e comparado com resultados experimentais de um protótipo de laboratório 8x6. Foi utilizado o método de Análise de Elementos Finitos (*Finite Element Analysis – FEA*) e a partir dele, juntamente com medições experimentais, foram aferidas as indutâncias próprias, mútuas e as taxas de variação das mesmas em função da posição do rotor. Esse artigo apresenta gráficos de indutância própria e mútua, porém bidimensionais, a partir dos quais se chegou numa diferença de até 6,4% entre elas. Foi concluído que as indutâncias mútuas não podem ser negligenciadas.

Em [5] o objetivo do artigo é analisar os aspectos que sofrem influência das indutâncias mútuas através de simulações e resultados de testes. Ele mostra a simulação de um gerador a relutância variável 6x4 com carga resistiva. Os métodos utilizados são: elementos finitos e ambiente Mathcad. Mais uma vez, não se apresenta como obter os dados do FEA e, como conclusão tem-se que as indutâncias mútuas interferem na fase onde a tensão deveria estar desligada.

E em [6] uma MRV 8x6 é estudada, sendo o objetivo desse trabalho mostrar como aferir as indutâncias mútuas e o quão significativas elas são no acionamento dessa máquina e na determinação de sua posição. Não se faz referência a projeto.

Em [53] o objetivo do trabalho é descrever uma metodologia de projeto para um motor a relutância variável 8x6 que minimiza aspectos indesejados e otimiza efeitos desejados. São feitas as especificações iniciais convencionais como torque nominal, tensão de barramento, corrente de pico, potência nominal, fator de potência e nível de ruído acústico. A partir de tais especificações é feita a seleção de parâmetros por meio de análises de simulações utilizando *software* de elementos finitos. O rendimento da máquina é referido como mais uma variável de proporção a ser estudada. Não são citadas as indutâncias mútuas e não há resultados experimentais.

Em [54] os autores propõem uma ferramenta de projeto utilizando um *software* de elementos finitos em conjunto com o MATLAB e o Simulink, que permite definir parâmetros de projeto de acordo com a necessidade do usuário. São definidas através da ferramenta, por exemplo, as dimensões da máquina, o número de espiras, a velocidade nominal e a corrente. Os resultados das simulações são plotados para fins de análise, apresentando os perfis de indutância própria, a densidade de fluxo e o perfil de conjugado. Não são feitas referências às indutâncias mútuas e não há relacionamento explícito entre os parâmetros escolhidos e resultados com o rendimento da MRV. Também não é apresentado resultado experimental.

Em [55] o objetivo dos autores é propor uma metodologia de projeto que seja mais fácil de compreender, porém limitada no que diz respeito aos parâmetros que são estudados. É apresentado o dimensionamento eletromagnético do rotor e do estator de uma máquina trifásica e de uma máquina monofásica, demonstrando por meio de um *software* de elementos finitos os resultados dos parâmetros simulados. São testados diversos materiais ferromagnéticos e entreferros, com seus respectivos efeitos no fluxo magnético do circuito da MRV. No entanto, a influência das indutâncias mútuas não é levada em consideração e não há relação dos parâmetros com o rendimento da máquina. Não são apresentados protótipos.

Em [56] é apresentado um estudo comparativo sobre o projeto de uma máquina a relutância 8x14, 8x6 e 8x10. Para a máquina 8x14, é apresentado uma nova forma para o cálculo das dimensões dos polos. Outros aspectos de projeto são apenas citados. Um *software* de elementos finitos é usado para simular as máquinas, plotando os perfis de indutância própria e relacionando o ângulo de disparo com o conjugado, sem, no entanto, fazer alusão direta ao rendimento. As indutâncias mutuas não são consideradas e não há resultados experimentais.

Em [57] é apresentada uma configuração de máquina a relutância variável 6x10 para aplicação em um veículo elétrico híbrido. São feitas considerações sobre o projeto através de fórmulas convencionais de dimensionamento para rotor e estator. São comparadas duas configurações (6x10 e 8x14) de MRV. Os ângulos de disparo são citados sem a menção da relação com o rendimento ou fluxo magnético, bem como método de investigação. Os autores afirmam que as indutâncias mutuas são muito pequenas e podem ser desprezadas. Não há resultados experimentais.

Em [58] é exposto o projeto de uma máquina a relutância variável na configuração 24x16 para aplicação em veículos elétricos híbridos. As bases da análise do projeto são a condição do espraio do fluxo magnético associado à geometria das lâminas e a relação do número de espiras com o fluxo concatenado. É feita uma simulação dinâmica para determinar os ângulos de excitação adequados para alcançar valores nominais pré-determinados, analisar as perdas térmicas e elétricas e refinar o número de espiras por fase, bem como as dimensões geométricas. Em seguida, é feita análise utilizando um *software* de elementos finitos para validar o conjugado da máquina e avaliar os níveis de densidade de fluxo. As indutâncias mútuas não são citadas e tampouco estabelecidas relações diretas dos parâmetros com o rendimento das máquinas.

Em [59] sugere a máquina a relutância variável como um ótima opção para aplicações de alta velocidade, e propõe uma nova maneira de projetar a estrutura do rotor para essa aplicação. A estrutura geométrica da máquina, incluindo dimensões do rotor e do estator, comprimento da pilha, o entreferro e o diâmetro do eixo são determinados utilizando valores empíricos ou convencionais. A geometria da máquina é então testada através de um software de elementos finitos, que simula uma MRV 4x2. O ângulo de excitação é estabelecido de 60° a 80°, sem fazer referência ao rendimento da máquina. O desempenho é analisado por meio de testes com diferentes dimensões de entreferro. Uma máquina é construída e os resultados experimentais confirmam as simulações. As indutâncias mútuas são consideradas desprezíveis nesse trabalho.

Em [60] os autores analisam a influência dos parâmetros de projetos de um motor a relutância variável 6x4 nas características de operação da máquina. As especificações de conjugado e velocidade angular são estabelecidas, de modo que outras variáveis como tensão e corrente nominal, dimensionamento geométrico, espessura do fio, resistência da fase e ângulos de excitação são determinados por métodos convencionais. Através da simulação em ambiente MATLAB são feitas variações nos valores nominais escolhidos anteriormente. O resultado de cada variação é então analisado em relação a perdas no cobre, em ganhos na massa da máquina, no *ripple* e na variação do conjugado. O estudo foi realizado apenas com simulações, não havendo resultados experimentais.

1.3 - Objetivo do trabalho

Este trabalho teve como objetivo mostrar, etapa por etapa, o desenvolvimento de projetos para duas topologias de Geradores a Relutância Variável (6x4 e 6x6) de 735,6 VA. Esses projetos serão elaborados com foco no estudo das influências da saturação magnética e da indutância mútua entre as bobinas dessas máquinas.

Para tal objetivo ser alcançado, executou-se as 7 etapas:

1. estudo e compreensão do funcionamento de Máquinas Relutância Variável (MRV);
2. modelagem matemática das duas MRV em estudo;
3. projeto de duas topologias de GRV, 6x4 e 6x6, de 735,6 VA e 1200 rpm;
4. aferição e estudo dos fluxos magnéticos, das indutâncias própria e mútua das MRV usando o *software* FEMM LAB;
5. simulação das MRV com estudo da saturação magnética e das indutâncias mútuas;
6. sugestões de modificação de projeto com objetivo de aumento de rendimento;
7. construção de protótipos;

1.4 – Apresentação do conteúdo do trabalho

Cada capítulo apresentado a seguir constitui uma etapa do projeto de duas configurações de GRV (6x4 e 6x6).

O Capítulo 2 contém uma revisão dos princípios eletromagnéticos fundamentais das MRV, a partir dos quais o modelo matemático das máquinas poderá ser desenvolvido e usado no capítulo de simulações.

O Capítulo 3 apresenta a modelagem matemática das duas MRV considerando as indutâncias mútuas.

O Capítulo 4 mostra o roteiro utilizado para o projeto das dimensões físicas das MRV.

O Capítulo 5 apresenta um *software* de elementos finitos (FEMM) para aferição dos valores dos fluxos magnéticos, das indutâncias própria e das indutâncias mútua. Os resultados são obtidos para serem usados na simulação.

O Capítulo 6 apresenta as simulações, em ambiente MATLAB, e seus resultados.

O Capítulo 7, mostra um roteiro de modificações no projeto com intuito de melhorar o rendimento desse conversor.

O Capítulo 8, apresentará a construção de uma bancada de testes dos GRV (Gerador a Relutância Variável) projetados e os resultados experimentais.

E o Capítulo 9 apresentará as conclusões desse trabalho relativas, principalmente, ao estudo da saturação magnética e das indutâncias mútuas nos projetos de GRV.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DOS PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

UMA ETAPA PRÉ-PROJETO

2.1 – Introdução

De uma maneira geral os princípios de funcionamento de todos os conversores eletromecânicos de energia são muito parecidos, salvo algumas especificidades. No caso aqui em estudo, trata-se de conversores que serão usados para converter energia mecânica em energia elétrica; ou seja: geradores. Para que estas conversões aconteçam, o campo magnético é usado como meio de acoplamento entre a energia elétrica e a força mecânica.

É de suma importância que pretendentes a se tornarem projetistas de conversores de energia tenham uma clara visão dos princípios de funcionamento do conversor antes de iniciarem o projeto propriamente dito.

O entendimento desses princípios permitirá a compreensão dos resultados e a mensuração da influência de cada variável. E, como é sabido, essa é uma das funções desse trabalho: estudar a influência mútua entre as bobinas de um gerador e a saturação magnética. Logo, esse capítulo é fundamental, mesmo se tratando de uma tese. Porém, será apresentado da maneira mais objetiva possível.

Assim, serão apresentadas nesse capítulo as características específicas da estrutura e de acionamento de uma Máquina a Relutância Variável Trifásica (MRV) 6x4 e de uma MRV monofásica 6x6 para serem utilizadas nos capítulos seguintes.

2.2 – Estrutura das Máquinas a Relutância Variável

Uma Máquina a Relutância Variável (MRV) é composta de uma estrutura laminada de dupla saliência, em que as bobinas estão restritas apenas aos dentes do estator [11, 12, 13, 14, 15]. Além disso, usualmente, e no caso deste trabalho, cada bobina de um par de dentes opostos do estator constitui uma fase [16, 17], como está mostrado na Fig.2.1.

Essa figura mostra uma MRV 6x4, ou seja, uma MRV com seis polos no estator e quatro polos no rotor. Como cada par de polos no estator forma apenas uma fase, essa é uma Máquina a Relutância Variável de três fases.

Pode ser visto na Fig.2.1 também, a ligação em série das bobinas de cada par de dentes opostos para a formação da já citada fase. Assim, a corrente, que percorre essas bobinas, será a mesma [18, 19, 20]. A Fig.2.1 mostra as bobinas de apenas uma fase, a fase A; porém essa configuração se repete para as outras duas fases. Neste caso, a fase A está em sua posição de completo alinhamento. Essa posição foi escolhida para ser a referência nesse trabalho, ou seja, sempre que o rotor estiver alinhado com o estator numa determinada fase, diz-se que o rotor está a zero grau dessa fase.

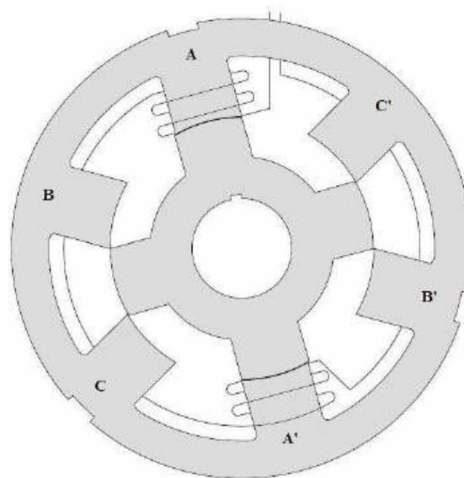


Fig.2.1 – Desenho da seção transversal de uma MRV 6x4, mostrando o enrolamento da fase A.

A Fig.2.2 mostra uma MRV 6x6. Como pode ser visto, o que distingue as duas máquinas estudadas é apenas a quantidade de dentes no rotor e seus acionamentos. Mais uma vez, cada par de dentes opostos no estator foi ligado em série, porém a energização de todas as bobinas será realizada ao mesmo tempo, não havendo defasagem entre os pulsos, por isso, essa configuração de MRV, onde o número de dentes do rotor é igual ao número de dentes do estator, é chamada de Máquina a Relutância Variável Monofásica. A polaridade dos enrolamentos dos outros dentes também está representada na Fig.2.2.

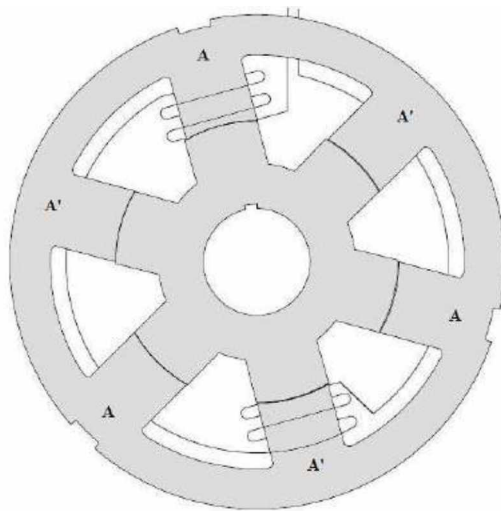


Fig.2.2 – Seção transversal de uma MRVM 6x6, mostrando uma parte do enrolamento da fase A.

2.3 – Princípios de acionamento das Máquinas a Relutância Variável

Para que cada fase seja energizada no momento correto é necessário conhecer, a todo instante, a posição do rotor. Para isso, um disco de posicionamento com sensores ópticos é comumente acoplado ao eixo da máquina, como mostrado na Fig.2.3.

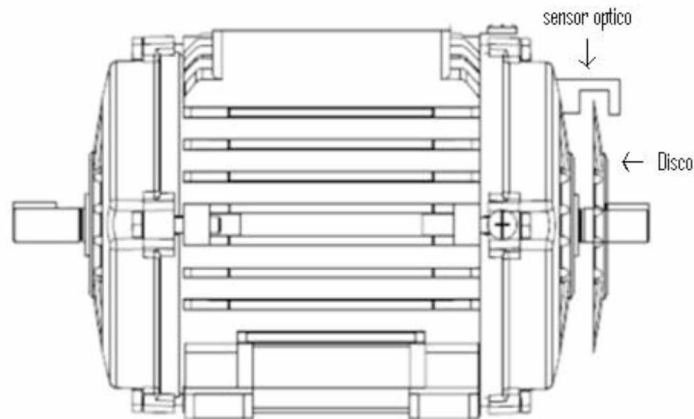


Fig.2.3 – Carcaça, sensor óptico e disco de posicionamento.

Esse sensor pode ser substituído por qualquer forma de detecção de posição: direta ou indireta. Os métodos de detecção direta são aqueles em que sensores ou um encoder detectam a posição do rotor e enviam um sinal para um micro-controlador acionar as chaves do conversor. Nos métodos indiretos, essa posição é estimada através do estudo de alguma variável que possa ser relacionada com o deslocamento angular.

2.3.1 – Gerador a Relutância Variável 6x4

Para acionar a MRV 6x4 no modo gerador, foi usado um conversor *half-bridge*. Este conversor foi escolhido por ser considerado o mais comumente aplicado no acionamento dessas máquinas [21].

Dentre os trabalhos encontrados sobre MRV alguns tratam especificamente de conversores para Máquinas a Relutância [23-28].

A Fig.2.4 mostra um conversor *half-bridge* com três braços. Neste conversor, o gatilho de cada chave será controlado pelo sensor de posicionamento, de tal maneira que a fase será energizada quando estiver faltando $4,7^\circ$ para o completo alinhamento (Fig.2.5), nesse ponto as chaves S_1 e S_2 serão fechadas e a corrente advinda da fonte fluirá pela bobina da fase A.

Essa energização terá um período de duração de 30 graus para o protótipo projetado nesse trabalho, ou seja, quando a fase A estiver a 25,3 graus a excitação será desligada, desligando as chaves S_1 e S_2 (Fig.2.6). Neste ponto, a energia que foi armazenada na bobina da fase A e a energia gerada pela variação de fluxo, serão entregues à carga, estabelecendo uma circuito com os diodos D_1 , D_2 e a carga.

O mesmo acontece com as outras duas fases.

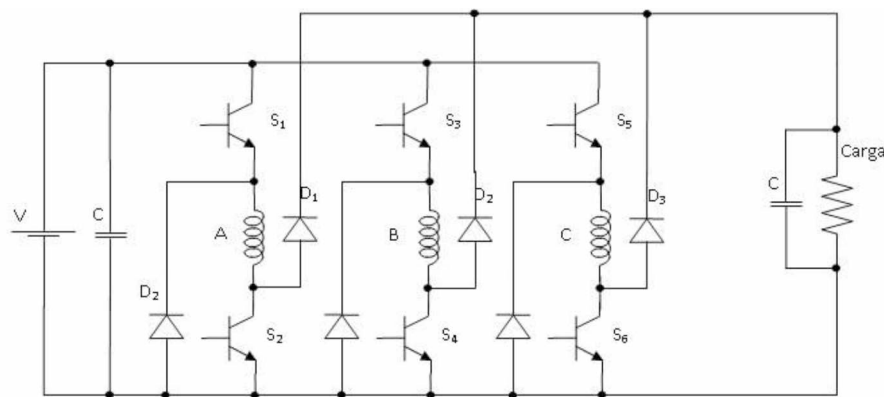


Fig.2.4 – Conversor half-bridge trifásico.

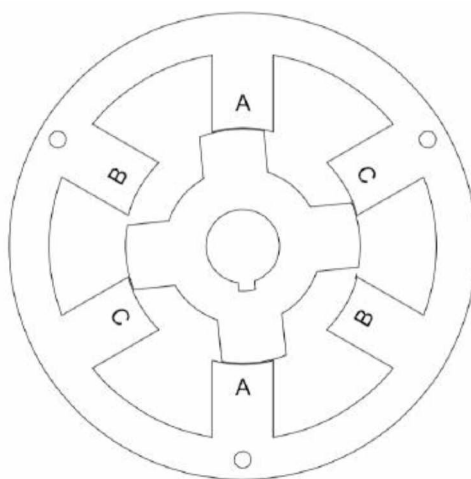


Fig.2.5 – Fase A em -4,7 graus em uma MRV(6x4).

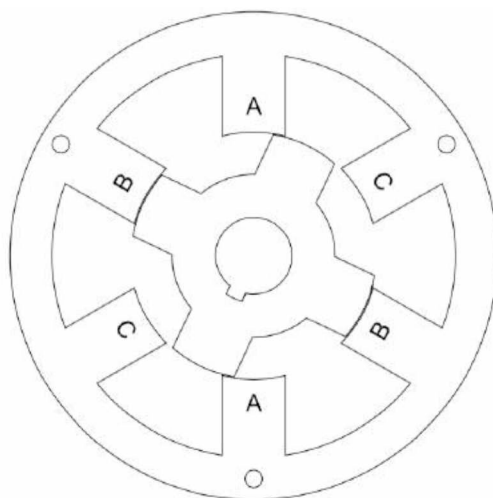


Fig.2.6 – Fase A em 25,3 graus em uma MRV(6x4).

A Fig.2.7 mostra o que acontece eletricamente quando um pulso de tensão é aplicado em uma fase (etapa de excitação), da posição mostrada na Fig.2.5 até a posição da Fig.2.6. É a tensão positiva aplicada sobre a fase que provocará o aparecimento de corrente no enrolamento. Como pode ser visto nesta figura (Fig.2.7), após a retirada do pulso, aparece a corrente que alimentará a carga.

A tensão negativa que aparece na fase é consequência do desligamento das chaves dessa fase, que reduzem o circuito à bobina da fase, os diodos e a carga (etapa de geração).

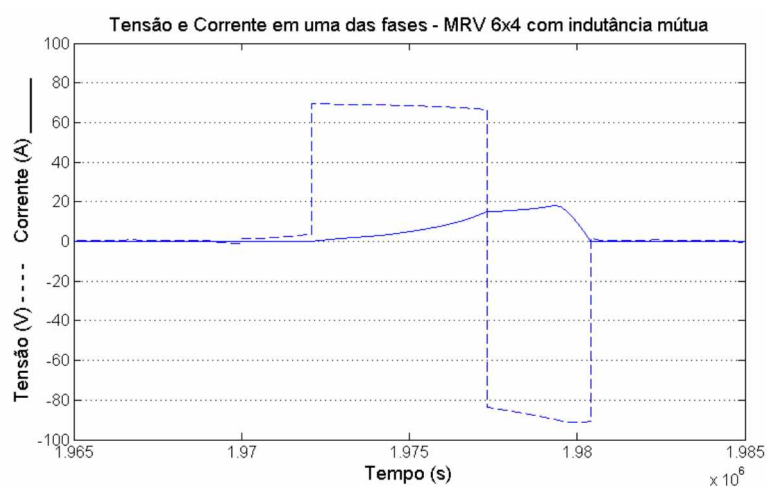


Fig.2.7 – Tensão e corrente na fase de uma MRV 6x4.

O nome Máquina a Relutância Variável (MRV), se deve ao fato de que nesta máquina a Relutância está sempre variando, levando conseqüentemente a uma dependência entre a variação da indutância da fase com a posição instantânea do rotor. No caso da configuração 6x4 o perfil de relutância tem um período de 90 graus. A Fig.2.8 mostra o perfil típico de indutância de uma MRV 6x4.

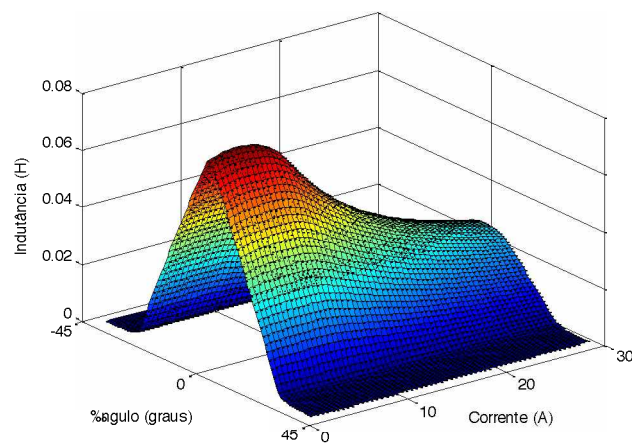


Fig.2.8 – Perfil de indutância de uma MRV 6x4.

Além disso, a indutância é função da corrente que é aplicada no enrolamento da fase, por isso a Fig.2.8 é uma superfície que mostra a indutância em relação à posição e à corrente.

2.3.2 – Máquina a Relutância Variável Monofásica (6x6)

A Máquina a Relutância Variável Monofásica é uma máquina onde, tipicamente, o número de dentes no rotor e no estator são iguais. Sendo assim, não ocorre defasagem entre o perfil de indutância das bobinas do estator. Por isso, essas máquinas são referidas como tendo apenas uma fase.

É comum encontrar projetos com 2x2, 4x4, 6x6 e 8x8 polos no estator e rotor, respectivamente [11]. Aqui, será analisada a máquina com configuração 6x6.

Para acionar essa máquina, novamente utilizou-se um conversor *half-bridge*; contudo, nesse caso, faz-se necessário um conversor com apenas um braço [22], como mostrado na Fig.2.9.

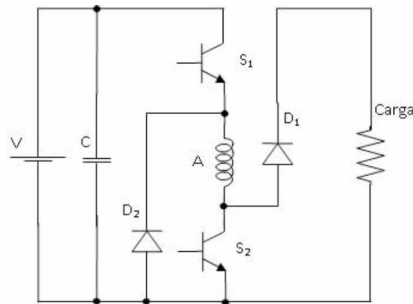


Fig.2.9 – Conversor *half-bridge* monofásico.

Deste modo, quando o rotor estiver faltando $4,7^\circ$ para o alinhamento, a máquina será energizada (Fig.2.10). Nesse ponto, as chaves S_1 e S_2 serão fechadas e a corrente advinda da fonte fluirá pelo enrolamento da fase, assim como descrito para a MRV 6x4.

Essa energização terá um período de duração de 24° , ou seja, quando estiver em $19,3^\circ$ a fase será desligada, desligando as chaves S_1 e S_2 (Fig.2.11). Neste ponto, a energia que foi armazenada na bobina da fase e a energia gerada pela variação de fluxo, será entregue à carga, estabelecendo então, um circuito com os diodos D_1 , D_2 e a carga.

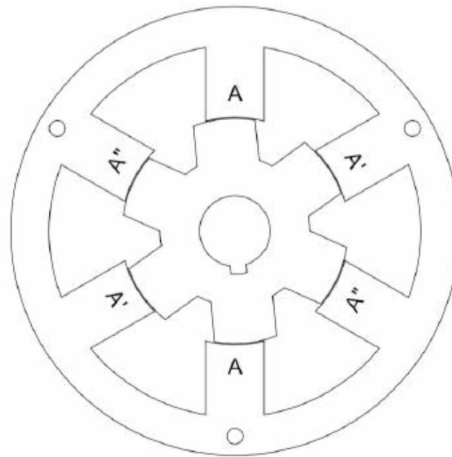


Fig.2.10 – Fase A em $-7,7^\circ$ do acoplamento em uma MRV 6x6.

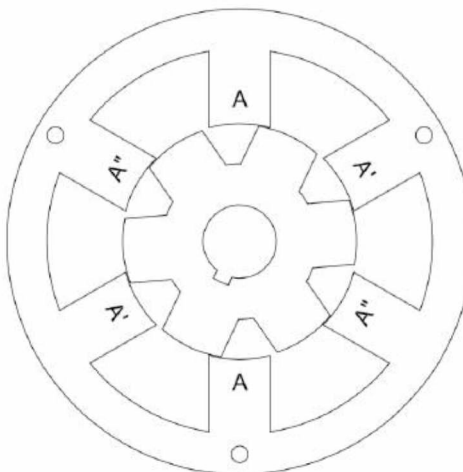


Fig.2.11 – Fase A em $16,3^\circ$ em uma MRV 6x6.

A Fig.2.12 mostra o que acontece eletricamente quando um pulso é aplicado na fase de um Gerador a Relutância Variável Monofásico (6x6), da posição mostrada na Fig.2.10 até a posição da Fig.2.11. As explicações sobre essa figura são as mesmas dadas para a Fig.2.7.

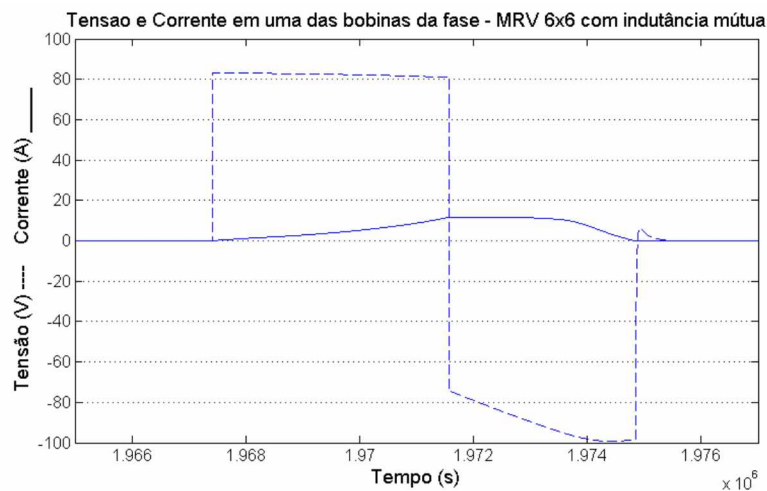


Fig.2.12 – Tensão e corrente em uma bobina de uma MRV 6x6.

No caso da configuração 6x6 o perfil de relutância tem período de 60° . A Fig.2.13 mostra o perfil de indutância de uma MRV (6x6).

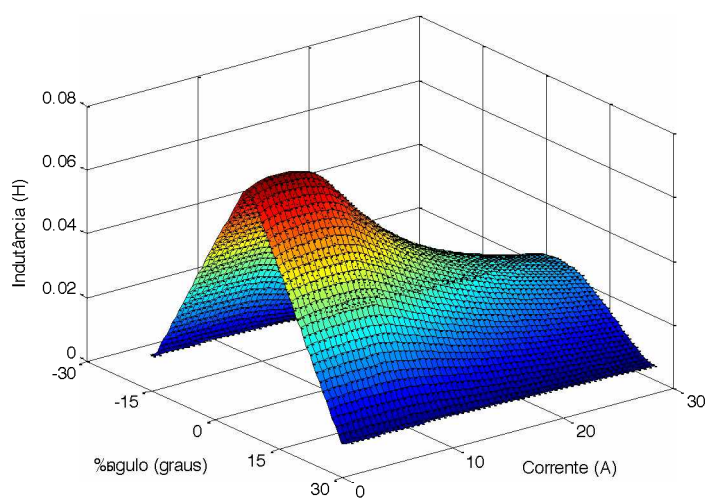


Fig.2.13 – Perfil de indutância de uma MRV 6x6.

2.4 – Conversão de Energia em uma MRV

Os ângulos de disparo (janelas de condução), que equivalem aos ângulos onde se mantém uma fase energizada e desenergizada, foram estabelecidos através de simulação. Sendo assim, são aplicáveis aos protótipos que serão projetados nesse trabalho.

Porém existem explicações sobre os porquês de não se manter o pulso de tensão por mais ou menos tempo na fase.

No gerador, o conjugado mecânico externo tenta desalinhar a fase enquanto ela está sendo excitada. Esse desalinhamento provoca a variação da relutância, que provoca uma variação do fluxo e, tem como consequência a indução de corrente elétrica que, por sua vez, colabora com a excitação da bobina. Testes mostraram que essa etapa de excitação contribui para o aumento do rendimento desse conversor quando iniciada antes da posição de alinhamento. Provavelmente esses graus a mais de excitação fortalecem o campo e provocam mais corrente induzida. Existem também trabalhos que mostram que manter a fase excitada por mais tempo – mantendo uma roda livre na bobina com uma das chaves – pode aumentar o rendimento [51].

2.5 – Efeitos dos ângulos de disparo nas MRV

No acionamento de Máquinas a Relutância Variável deve-se conhecer a posição angular do rotor em relação ao estator a todo instante, para que os chaveamentos apresentados nas seções anteriores sejam feitos corretamente.

As MRV são máquinas duais, ou seja, podem ser acionadas como motor e como gerador. Sendo que a diferença entre o acionamento de motor e gerador está apenas nos ângulos de disparos. No caso do motor, a energização é feita – prioritariamente – enquanto o rotor está alinhando com o estator (derivada de indutância positiva). No caso do gerador, a energização é feita – prioritariamente – enquanto o rotor está desalinhando do estator (derivada negativa da indutância).

Outro importante fato a se salientar é que um correto posicionamento dos sensores de posição e uma escolha adequada dos ângulos de disparo influenciarão diretamente na operação e no desempenho dessas máquinas.

2.6 – Conseqüências do perfil de indutância nas MRV

Será mostrado no capítulo 4 (na modelagem das máquinas) que tanto a força magneto motriz (FMM) quanto o conjugado gerado pelas MRV são diretamente proporcionais à derivada da indutância em relação ao ângulo. Logo, esse valor de derivada será importante na determinação do rendimento dessas máquinas. O foco desse trabalho será a avaliação dessas variáveis.

2.7 – Conclusões

Esse capítulo apresentou os princípios básicos de operação das MRV, explicitando as variáveis a serem consideradas na modelagem, simulação e acionamento dessas máquinas.

O próximo capítulo trata da modelagem matemática.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM MATEMÁTICA

PRIMEIRO PASSO DO PROJETO

3.1 – Introdução

Uma vez entendidos os princípios de funcionamento das Máquinas a Relutância Variável, torna-se possível uma formulação matemática do funcionamento desses conversores. Essa formulação é indispensável no estudo e na execução do projeto.

A Máquina a Relutância Variável é uma máquina comparativamente simples, entre os diversos tipos de máquinas existentes. Seu modelo matemático, assim como o de outras máquinas, é baseado em equações que descrevem o comportamento de sistemas elétricos e mecânicos.

Esse capítulo tem como objetivo apresentar o modelo matemático utilizado para a simulação digital. Salienta-se que o desenvolvimento pormenorizado do modelo foi motivo de estudo em trabalhos anteriores [11, 12, 13, 21, 29]. De inovação nesse trabalho, tem-se a inserção das indutâncias mútuas no modelo da MRV.

3.2 – Equacionamento das Forças mecânica e das tensões elétricas de uma MRV

A máquina a relutância é constituída por uma estrutura de dupla saliência, onde os enrolamentos de uma fase estão dispostos em um par de dentes opostos do estator, como mostrado na figura 3.1., e como foi dito anteriormente.

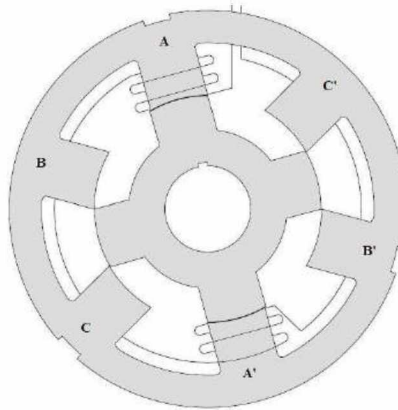


Fig.3.1 – Desenho da seção transversal de uma MRV 6x4, mostrando o enrolamento da fase A.

Apesar de a Fig.3.1 ser de uma MRV(6x4), a modelagem a seguir é genérica. Sendo assim, todas as afirmações servem para as outras configurações.

Como, em um indutor, o fluxo concatenado por sua bobina (λ) é proporcional à corrente (i) que percorre a bobina e a sua indutância (L), tem-se

$$\lambda = Li \quad (3.1)$$

A tensão induzida em um indutor (e) é proporcional à variação deste fluxo concatenado (λ) em relação ao tempo, então

$$e = \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (3.2)$$

Desta forma, a tensão nos terminais de cada fase tem natureza resistiva, devido à resistência dos condutores; e natureza indutiva, devido à variação de fluxo da bobina [21], sendo assim

$$v = Ri + e \quad (3.3)$$

Onde:

$$v = Ri + \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (3.4)$$

Como o fluxo concatenado pelas bobinas é proporcional à indutância e à corrente, a solução da equação (3.4) envolve uma derivada parcial, onde primeiramente L é considerada constante e i variável, e depois i é considerada constante e L é variável. Como L é variável em relação à posição do rotor e ao tempo, substituindo a equação (3.1) na equação (3.4) e resolvendo, tem-se

$$v = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} + i \frac{\partial L}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (3.5)$$

Conceitualmente, como a derivada da posição angular do rotor (θ) em relação ao tempo é a velocidade angular (ω), pode-se escrever

$$v = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} + i \omega \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (3.6)$$

A equação (3.6) descreve a MRV eletricamente, porém para uma modelagem completa faz-se necessária outra equação que vislumbre a máquina mecanicamente. Para tal, basta fazer o equacionamento das forças de tal maneira que elas estejam equilibradas.

Sendo assim, no caso de a máquina ser usada como motor, a energia elétrica que entra no sistema irá gerar um conjugado eletromagnético (T_{emg}). Como resultado dessa entrada será gerado um conjugado mecânico (T_{mec}) na saída do sistema. Além disso, deve-se considerar que esta máquina deve ser capaz de vencer a inércia do sistema ($J \frac{d\omega}{dt}$), e de vencer o atrito dinâmico dos mancais ($D\omega$) [21]. Sendo assim:

$$T_{emg} = T_{mec} + D\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.7)$$

Onde:

D é o coeficiente de atrito viscoso do sistema;

J é o momento de inércia do sistema.

O conjugado eletromagnético é dado por [29]

$$T_{emg} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (3.8)$$

No caso de a máquina ser usada como gerador, a energia mecânica - conjugado mecânico (T_{mec}) - que entra no sistema deve ser capaz de vencer o conjugado eletromagnético (T_{emg}), a inércia rotacional do sistema ($J \frac{d\omega}{dt}$), e de vencer o atrito dinâmico dos mancais ($D\omega$) [21], assim

$$T_{mec} = T_{emg} + D\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.9)$$

Portanto a equação (3.6) e a equação (3.7), juntas, descrevem de maneira completa (elétrica e mecanicamente) uma MRV monofásica acionada como motor, e a equação (3.6) e a equação (3.9), juntas, descrevem de maneira completa (elétrica e mecanicamente) uma MRV monofásica acionada como gerador. Porém, este trabalho consiste também, no estudo de uma máquina trifásica (6x4), logo, devem-se considerar as três fases.

3.3 – Equacionamento das tensões de uma MRV com três enrolamentos no estator

A determinação da tensão nos terminais da bobina para o circuito com j fases, seria

$$v_j = R_j i_j + \frac{d\lambda_j}{dt} \quad (3.10)$$

Onde R_j é resistência interna da bobina.

O fluxo magnético em cada uma das fases da máquina, tem origem na corrente da própria da fase e na corrente das outras fases. Logo, tem-se

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= L_{11}i_1 + L_{12}i_2 + L_{13}i_3 \\ \lambda_2 &= L_{21}i_1 + L_{22}i_2 + L_{23}i_3 \\ \lambda_3 &= L_{31}i_1 + L_{32}i_2 + L_{33}i_3 \end{aligned} \quad (3.11)$$

A equação (3.11) tem uma importância elevada no contexto desse trabalho pois a influência mútua entre as bobinas, em termos de indutância, é pela primeira vez considerada.

Substituindo o grupo de equações (3.11) na equação (3.10)

$$\begin{aligned} v_1 &= R_1 i_1 + \frac{dL_{11}i_1}{dt} + \frac{dL_{12}i_2}{dt} + \frac{dL_{13}i_3}{dt} \\ v_2 &= R_2 i_2 + \frac{dL_{21}i_1}{dt} + \frac{dL_{22}i_2}{dt} + \frac{dL_{23}i_3}{dt} \\ v_3 &= R_3 i_3 + \frac{dL_{31}i_1}{dt} + \frac{dL_{32}i_2}{dt} + \frac{dL_{33}i_3}{dt} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Como a indutância será, também, proporcional a parâmetros físicos e dada por

$$L = \mu N^2 \frac{A}{l} \quad (3.13)$$

Em que:

μ é a permeabilidade magnética do circuito;

N é o número de espiras nas bobinas integrantes do circuito;

l é comprimento médio do circuito;

A é a área transversal por onde circula o fluxo enlaçado.

Pode-se afirmar que há, em cada fase, uma dependência da indutância em relação a posição angular $L(\theta)$, além de sua relação com a corrente $L(i)$.

Portanto, como $L(i, \theta)$, faz-se necessária a expansão das derivadas do grupo de equações (3.12) bem como da aplicação da regra da cadeia para o produto Li , de tal forma

$$\begin{aligned} v_1 &= R_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} + L_{13} \frac{di_3}{dt} + \frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} i_1 + \frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} i_2 + \frac{\partial L_{13}}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} i_3 \\ v_2 &= R_2 i_2 + L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} + L_{23} \frac{di_3}{dt} + \frac{\partial L_{21}}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} i_1 + \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} i_2 + \frac{\partial L_{23}}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} i_3 \\ v_3 &= R_3 i_3 + L_{31} \frac{di_1}{dt} + L_{32} \frac{di_2}{dt} + L_{33} \frac{di_3}{dt} + \frac{\partial L_{31}}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} i_1 + \frac{\partial L_{32}}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} i_2 + \frac{\partial L_{33}}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} i_3 \end{aligned} \quad (3.14)$$

escrevendo a equação (3.14) de maneira matricial tem-se

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + \frac{\omega \partial L_{11}}{\partial \theta} & \frac{\omega \partial L_{12}}{\partial \theta} & \frac{\omega \partial L_{13}}{\partial \theta} \\ \frac{\omega \partial L_{21}}{\partial \theta} & R_2 + \frac{\omega \partial L_{22}}{\partial \theta} & \frac{\omega \partial L_{23}}{\partial \theta} \\ \frac{\omega \partial L_{31}}{\partial \theta} & \frac{\omega \partial L_{32}}{\partial \theta} & R_3 + \frac{\omega \partial L_{33}}{\partial \theta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dot{i}_3 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

O modelo matemático da máquina trifásica ainda deverá incluir a representação de seu comportamento mecânico, descrito pela análise de seu equacionamento de forças.

3.4 – Equacionamento das Forças de uma MRV com três enrolamentos

Tem-se, então, que expandir e desenvolver a equação (3.7) para motores ou a equação (3.9) para geradores.

Lança-se mão, nesse trabalho, do conceito de co-energia para cálculo do conjugado eletromagnético. Em termos de co-energia (W^{co}), em relação ao fluxo magnético, na fase j, é dado

$$W^{co}(\theta, i) = \int_0^i \lambda(\theta, i) di \quad (3.17)$$

como torque eletromagnético instantâneo é dado por

$$T_{emag} = \frac{\partial W^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (3.18)$$

para as três fases da MRV, resulta em

$$T_{emag} = \frac{\partial W_1^{co}}{\partial \theta} + \frac{\partial W_2^{co}}{\partial \theta} + \frac{\partial W_3^{co}}{\partial \theta} \quad (3.19)$$

Levando em consideração a igualdade $W = \frac{1}{2L}\lambda^2$, é tido que

$$\begin{aligned} W_1^{co} &= \frac{1}{2}(L_{11}i_1^2 + L_{12}i_2^2 + L_{13}i_3^2) \\ W_2^{co} &= \frac{1}{2}(L_{21}i_1^2 + L_{22}i_2^2 + L_{23}i_3^2) \\ W_3^{co} &= \frac{1}{2}(L_{31}i_1^2 + L_{32}i_2^2 + L_{33}i_3^2) \end{aligned} \quad (3.20)$$

A co-energia total do sistema é concluída, portanto

$$W^{co} = \frac{1}{2}(L_{11}i_1^2 + L_{12}i_2^2 + L_{13}i_3^2 + L_{21}i_1^2 + L_{22}i_2^2 + L_{23}i_3^2 + L_{31}i_1^2 + L_{32}i_2^2 + L_{33}i_3^2) \quad (3.21)$$

Aplicando a equação (3.19) e expandindo as derivadas

$$T_{emag} = \frac{1}{2} \left(i_1^2 \frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} + i_2^2 \frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} + i_3^2 \frac{\partial L_{13}}{\partial \theta} + i_1^2 \frac{\partial L_{21}}{\partial \theta} + i_2^2 \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} + i_3^2 \frac{\partial L_{23}}{\partial \theta} + i_1^2 \frac{\partial L_{31}}{\partial \theta} + i_2^2 \frac{\partial L_{32}}{\partial \theta} + i_3^2 \frac{\partial L_{33}}{\partial \theta} \right) \quad (3.22)$$

Sendo possível organizar da seguinte forma

$$T_{emag} = \frac{1}{2} \left[i_1 \left(\frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} i_1 + \frac{\partial L_{21}}{\partial \theta} i_1 + \frac{\partial L_{31}}{\partial \theta} i_1 \right) + i_2 \left(\frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} i_2 + \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} i_2 + \frac{\partial L_{32}}{\partial \theta} i_2 \right) + i_3 \left(\frac{\partial L_{13}}{\partial \theta} i_3 + \frac{\partial L_{23}}{\partial \theta} i_3 + \frac{\partial L_{33}}{\partial \theta} i_3 \right) \right] \quad (3.23)$$

Voltando à equação (3.7) ou na equação (3.9), para determinar o conjugado mecânico da máquina trifásica tem-se, para um motor

$$T_m = \frac{1}{2} \left[i_1 \left(\frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} i_1 + \frac{\partial L_{21}}{\partial \theta} i_1 + \frac{\partial L_{31}}{\partial \theta} i_1 \right) + i_2 \left(\frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} i_2 + \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} i_2 + \frac{\partial L_{32}}{\partial \theta} i_2 \right) + i_3 \left(\frac{\partial L_{13}}{\partial \theta} i_3 + \frac{\partial L_{23}}{\partial \theta} i_3 + \frac{\partial L_{33}}{\partial \theta} i_3 \right) \right] - D\omega - J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.24)$$

e para um gerador

$$T_m = \frac{1}{2} \left[i_1 \left(\frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} i_1 + \frac{\partial L_{21}}{\partial \theta} i_1 + \frac{\partial L_{31}}{\partial \theta} i_1 \right) + i_2 \left(\frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} i_2 + \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} i_2 + \frac{\partial L_{32}}{\partial \theta} i_2 \right) + i_3 \left(\frac{\partial L_{13}}{\partial \theta} i_3 + \frac{\partial L_{23}}{\partial \theta} i_3 + \frac{\partial L_{33}}{\partial \theta} i_3 \right) \right] + D\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.25)$$

A matriz de estados que representa, enfim, o comportamento mecânico e eletromagnético da MRV trifásica em estudo é, para um motor

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ T_m \\ 0 \end{bmatrix} = \\
& \begin{bmatrix} R_1 & \frac{\omega \partial L_{12}}{\partial \theta} & \frac{\omega \partial L_{13}}{\partial \theta} & 0 & 0 \\ \frac{\omega \partial L_{21}}{\partial \theta} & R_2 & \frac{\omega \partial L_{23}}{\partial \theta} & 0 & 0 \\ \frac{\omega \partial L_{31}}{\partial \theta} & \frac{\omega \partial L_{32}}{\partial \theta} & R_3 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} i_1 \left(\frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} + \frac{\partial L_{21}}{\partial \theta} + \frac{\partial L_{31}}{\partial \theta} \right) & \frac{1}{2} i_2 \left(\frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} + \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} + \frac{\partial L_{32}}{\partial \theta} \right) & \frac{1}{2} i_3 \left(\frac{\partial L_{13}}{\partial \theta} + \frac{\partial L_{23}}{\partial \theta} + \frac{\partial L_{33}}{\partial \theta} \right) & -D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \times \\
& \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & 0 & i_1 \frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & 0 & i_2 \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & 0 & i_3 \frac{\partial L_{33}}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & -J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dot{i}_3 \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3.26)
\end{aligned}$$

Para um gerador basta modificar o sinal de J e de D .

3.5 – Conclusão

O modelo matemático apresentado nesse capítulo descreve de maneira completa uma MRV(6x6) e uma MRV(6x4). A equação (3.26) pode ser usada na máquina 6x6 pois essa configuração também conta com três enrolamentos no estator. Porém, não haverá defasagem de perfil de indutância nas bobinas desse conversor. Nesse trabalho, é necessário tratar de maneira individual cada bobina da máquina monofásica, para que o estudo da influência de cada uma seja possível.

Esse modelo será implementado e utilizado nas simulações digitais apresentadas nos próximos Capítulos.

CAPÍTULO 4

PROJETO ELETROMECAÂNICO DE MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

SEGUNDO PASSO DO PROJETO

4.1 – Introdução

Esse capítulo apresenta um roteiro para se determinar as dimensões físicas e os dimensionamentos elétricos de Máquinas a Relutância Variável (MRV). Essas máquinas deverão ter a configuração 6x4 (ou seja, deverá ter 6 dentes no estator e 4 dentes no rotor) e a configuração de 6x6 (6 dentes no estator e 6 dentes no rotor).

Essa etapa dará condições de dimensionar e desenhar as lâminas do rotor e do estator, de escolher a bitola do fio do estator, de escolher o eixo e a carcaça que será usada. Esses dados serão essenciais para o próximo capítulo, onde será usado um software de elementos finitos para se determinar as grandezas magnéticas necessárias para se desenvolver a simulação.

O projeto de MRV aqui apresentado, segue, parcialmente, orientações da literatura clássica para projetos de máquinas elétricas, particularmente [11] e [13], além de aproveitar também a experiência acumulada no LAcE (Laboratório de Acionamentos Elétricos-UFU) proveniente de projetos anteriores [16] [21] [30] [31], principalmente [43]. Essa experiência permitiu que algumas alterações fossem feitas; porém, recomenda-se ao projetista menos experiente seguir rigorosamente os cálculos indicados, evitando as convenientes adequações e aproximações.

4.2 – MRV DE 735,6 VA (Gerador) ou 1 cv (motor)

O primeiro passo no projeto de máquinas elétricas é o conhecimento das características mecânicas da carga que será acionada. No caso deste trabalho, pretende-se projetar máquinas capazes de alimentar uma carga constante de 735,6 VA, estando a uma velocidade nominal de 1200 rpm. A tabela (4.1) descreve todas as características iniciais da máquina 6x4 para se iniciar o projeto.

Tabela 4.1– Parâmetros da MRV 6x4.

Parâmetro	Valor	Unidade
Números de polos do estator	6	Polos
Números de polos do rotor 1	4	Polos
Números de fases	3	Fases
Potência Saída	735,6	VA
Velocidade Nominal	1200	rpm

A Tabela 4.2 descreve todas as características da máquina 6x6. Como pode ser visto, a única mudança é o numero de polos do rotor.

Tabela 4.2– Parâmetros da MRV 6x6.

Parâmetro	Valor	Unidade
Números de polos do estator	6	Polos
Números de polos do rotor 1	6	Polos
Números de fases	1	Fases
Potência Saída	735,6	VA
Velocidade Nominal	1200	rpm

O segundo passo é calcular o conjugado necessário para que uma carga de 1cv gire a 1200 rpm. Como $1 \text{ cv} \cong 735,5 \text{ W}$, $1 \text{ rpm} = 2\pi/60 \text{ rad/s}$, e potência (P) é a energia ou trabalho (T) gasto por unidade de tempo, então

$$P = \frac{T}{\Delta t} \text{ (W)} \quad (4.1)$$

E trabalho é proporcional a força e ao deslocamento

$$T = F \cdot \Delta\theta \text{ (J)} \quad (4.2)$$

Onde $\Delta\theta$ é o deslocamento angular. Substituindo a equação (4.2) na (4.1) obtém-se

$$P = \frac{F \cdot \Delta\theta}{\Delta t} \text{ (W)} \quad (4.3)$$

Conceitualmente $\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right)$ é a velocidade angular (ω) em rad/s, e as forças envolvidas em máquinas rotativas são forças rotativas, podendo a força (F), nas equações anteriores, ser entendida como conjugado (C), de forma que a potência desenvolvida no eixo da máquina é proporcional a sua velocidade angular e ao seu conjugado (C), como está mostrado na equação (4.4).

$$P = C \cdot \omega \text{ (W)} \quad (4.4)$$

Sendo assim, $P = 735,5 \text{ W}$ e $\omega = 125,664 \text{ rad/s}$.

A equação que relaciona grandezas que têm origem eletromagnética (F e B) com grandezas geométricas da máquina (D_r = diâmetro do rotor) e (l = comprimento do rotor) é [11] [13] [29] [30]:

$$F = A * B * \pi * D_r * l \text{ (N)} \quad (4.5)$$

onde: A= carregamento elétrico e B= carregamento eletromagnético.

Uma vez encontrada a força que atua na superfície do rotor, basta multiplicar essa força pelo raio do rotor, que mede metade do diâmetro ($D_r/2$), para se encontrar o conjugado. Assim, tem-se que o conjugado (C) fornecido por essa máquina será

$$C = \frac{1}{2} * B * A * \pi * D_r^2 * l \quad (\text{N*m}) \quad (4.6)$$

Em geral a equação (4.6) é escrita considerando uma constante k que é proporcional ao carregamento elétrico (A) e ao carregamento eletromagnético (B), além de se relacionar com o conjugado por volume do rotor (TRV) dado em (N*m/m^3) [13]. Sendo assim, a equação (4.6) toma a seguinte forma

$$C = k * D_r^2 * l \quad (\text{N*m}) \quad (4.7)$$

Onde:

$$k = \frac{TRV * \pi}{4} \quad (4.8)$$

A equação (4.7) fornece o conjugado da máquina; assim, como foi mostrado na equação (4.4), para se obter a potência da máquina basta multiplicar essa expressão pela velocidade angular (ω) especificada. Fazendo isso e substituindo a equação (4.8) na equação (4.7), tem-se

$$P = \frac{TRV * \pi}{4} * D_r^2 * l * \omega \quad (\text{W}) \quad (4.9)$$

Os parâmetros D_r e l se relacionam através da variável k_1 da seguinte maneira:

$$k_1 = \frac{l}{D_r} \quad (4.10)$$

A variável k_1 é a indicação de qual será o formato da máquina, mostrando a relação entre diâmetro e comprimento. Geralmente, máquinas de elevado diâmetro apresentam maior conjugado e máquinas de elevado comprimento apresentam altas velocidades.

Logo, a equação (4.10) pode ser escrita da seguinte maneira

$$l = k_1 * D_r \quad (4.11)$$

Substituindo a equação (4.11) na equação (4.9) e isolando a variável D_r , tem-se

$$D_r = \sqrt[3]{\frac{4 * P}{TRV * \pi * K_1 * \omega}} \quad (m) \quad (4.12)$$

A equação (4.12) apresenta dois parâmetros desconhecidos, TRV e k_1 . Nesse trabalho será usado um k_1 de 1,6355, ou seja, o comprimento da máquina será 60% maior que o diâmetro. E o TRV será retirado da Tabela 4.3 [13] a seguir, e o valor usado será 16000 para motores de aplicações industriais.

Tabela 4.3– Valores Típicos de TRV

Tipos de Motores	$k.N.m/m^3$
Motores pequenos totalmente fechados	2.5-7
Motores para aplicações industriais	7-30
Servomotores de alta-performance	15-50
Motores para aplicações aeroespaciais	30-75
Motores grandes, refrigeração com líquidos	100-250

Tem-se assim, todos os dados desejados para se determinar o diâmetro do rotor da máquina sob projeto. Logo, resolvendo a equação (4.12) tem-se que o diâmetro do rotor será de

$$D_r = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot P}{TRV \cdot \pi \cdot K_1 \cdot \omega}}$$

$$D_r = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 735,5}{16000 \cdot \pi \cdot 1,6355 \cdot 125,664}}$$

$$D_r \cong 0.07 \text{ m}$$

Usando a equação (4.11) tem-se que o comprimento da máquina será de aproximadamente

$$L = k_1 \cdot D_r$$

$$L = 1,6355 \cdot 0.0701$$

$$L \cong 0.1147 \text{ m}$$

Determinado o diâmetro do rotor e o comprimento da máquina pode-se seguir um roteiro apresentado em [13, 31], para a determinação das outras dimensões. Ressalta-se aqui novamente, que experiência acumulada em projetos é importante quando da escolha dos valores das constantes, já que a recomendação bibliográfica é dada em faixa de valores.

4.2.1 – Escolha do Ângulo do Polo do Estator

De acordo com as referências [13, 31], o ângulo máximo do estator (β_s) onde a fase pode produzir conjugado diferente de zero é dado por 180° dividido pelo número de polos que se deseja que o estator tenha. Outra maneira de se interpretar essa equação seria pegar o

numero de polos do estator (N_{ps}), que no caso deste trabalho é seis, somar com o número de espaços, que será seis também, e dividir por 360° . Sendo assim, o ângulo do estator (β_s) será de:

$$\beta_s = \frac{180}{N_{ps}} \quad (\text{graus}) \quad (4.13)$$

$$\beta_s = \frac{180}{6}$$

$$\beta_s = 30^\circ$$

4.2.2 – Obtenção do Comprimento do Entreferro

As referências [13] e [16] indicam que o valor do entreferro (g) deve estar em torno de 0.5% do diâmetro do rotor. Para aumentar o fluxo, o entreferro foi considerado o menor possível, sendo usado nesse trabalho um entreferro de 0,24% do diâmetro do rotor, portanto:

$$g = 0,24 * D_r \quad (\text{m}) \quad (4.14)$$

Assim:

$$g = 0,24 * 0.12532$$

Logo:

$$g \cong 0,0003 \text{ m}$$

4.2.3 – Altura da culatra do Estator

Essa altura deve ser suficiente para que a densidade de fluxo magnético na culatra não seja maior que a densidade de fluxo magnético nos polos do estator. A Fig. 4.1 mostra essa situação desejada, na qual uma simulação foi feita usando uma MRV 6x6 na posição alinhada. Como pode ser observado, a densidade de fluxo magnético na culatra do estator é menor que a

densidade de fluxo magnético nos polos do estator. A posição de completo alinhamento foi escolhida porque é essa a posição onde a densidade de fluxo é maior.

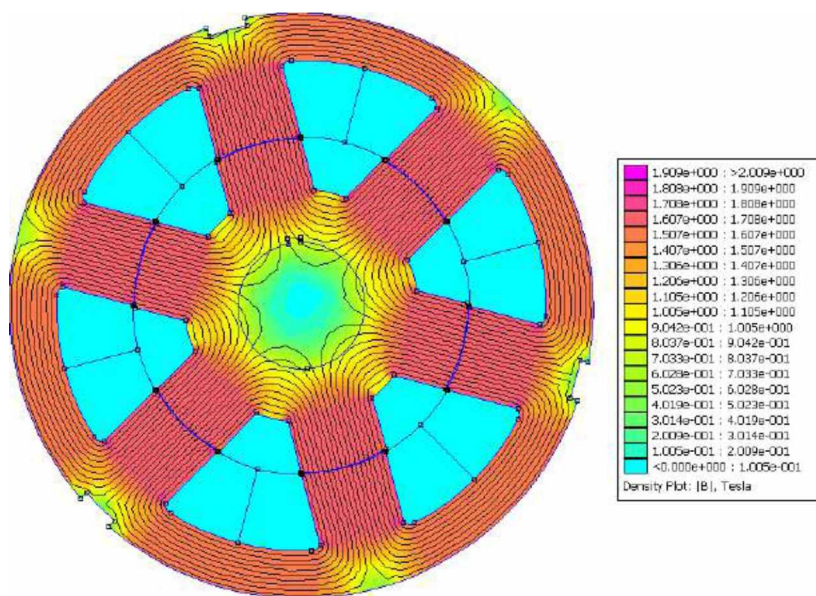


Fig. 4.1- Densidade de fluxo magnético em uma MRV 6x6.

Também pode ser visto na Fig. 4.1 que o fluxo magnético que passa pelos polos do estator se divide na culatra, indo aproximadamente metade para cada lado. Sendo assim, a altura da culatra (y_s) deve ter no mínimo metade da largura do polo do estator.

Na Fig.4.2 pode-se observar que a largura do polo do estator é equivalente ao seno do ângulo β_s que no caso deste trabalho é 30° . Como o que se deseja é descobrir a metade desse valor, o ângulo usado terá metade do valor de β_s .

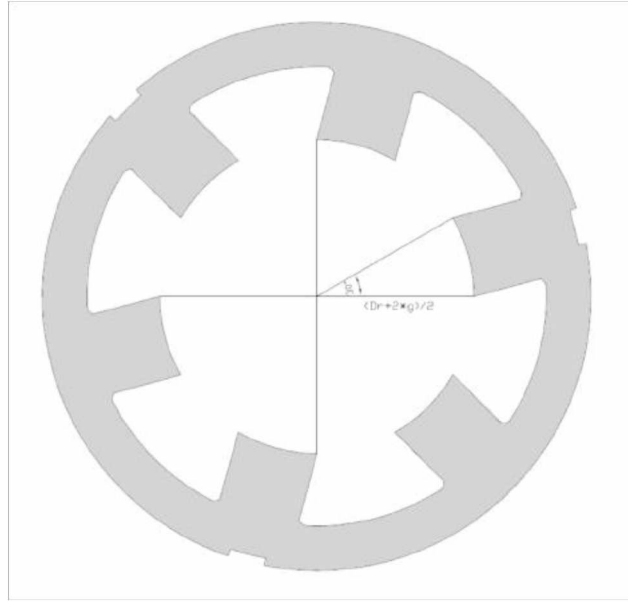


Fig.4.2- Perfil das lâminas do estator de uma MRV.

Uma análise na Fig. 4.2 indica que o valor da culatra será de no mínimo:

$$y_s = \left(\frac{D_r + 2 \cdot g}{2} \right) * \sin\left(\frac{\beta_s}{2}\right) \quad (\text{m}) \quad (4.15)$$

As referências [13] e [16] recomendam que esse valor, se possível, seja maior que o indicado pela equação (4.15). Porém, deve-se nesse ponto fazer uma previsão da carcaça que será usada. Essa carcaça deve ter diâmetro interno igual ao diâmetro externo das lâminas do estator. Fazendo uso dos catálogos do fabricante WEG, fez-se a escolha por uma carcaça comercial 90S, devido a suas dimensões serem compatíveis com os valores já encontrados aqui. Essa escolha limitará o valor da culatra. O valor usado aqui será:

$$y_s \cong 0,0122 \text{ m}$$

Como esse valor é inferior ao indicado pela equação 4.15; o projetista deve, no final do projeto e antes da fabricação, verificar na simulação com um software de elementos finitos se uma possível excessiva saturação magnética ocorrerá na culatra. Caso isso ocorra, deve-se modificar a carcaça para provável adequação do valor da culatra.

4.2.4 – Diâmetro Externo do Estator

Na literatura sobre projeto de MRV [13, 16], a relação do diâmetro do rotor (D_r) pelo diâmetro externo do estator (D_s) deve variar entre os valores 0,4 a 0,7, como indicado na equação (4.17):

$$0,4 \leq \frac{D_r}{D_s} \leq 0,7 \quad (4.17)$$

Porém, como dito anteriormente, nesse projeto foi usada uma carcaça comercial da WEG (90 S). Assim, o diâmetro externo do estator foi fixado em 0,1401 m que corresponde ao diâmetro interno dessa carcaça, onde as lâminas do estator ficarão acomodadas. Usando a equação (4.17), isso implica que:

$$\frac{D_r}{D_s} \cong 0,5$$

4.2.5 – Largura do Polo do Estator

Na obtenção da altura da culatra do estator (y_s) foi dito que o valor dessa culatra deveria ser a metade da largura do polo do estator (t_s). Essa afirmação está mostrada na equação (4.15). Sendo assim, como o que se deseja agora é encontrar a largura do polo do estator, basta multiplicar a equação (4.18) por dois. Assim:

$$t_s = 2 * \left(\frac{D_r + 2 * g}{2} \right) * \text{sen}\left(\frac{\beta_s}{2}\right) \quad (\text{m}) \quad (4.18)$$

Nesse caso específico, devido as alterações, tem-se:

$$t_s \cong 2 * y_s$$

logo:

$$t_s \cong 2 * 0,0122$$

E, por fim:

$$t_s \cong 0,02 \text{ m}$$

4.2.6 – Largura do Polo do Rotor

Segundo [13] a largura do polo do rotor deve ser maior que largura do polo do estator para permitir que haja um aumento da permeância na posição de completo alinhamento dos polos do estator e do rotor e diminuir o espraçamento. É comum considerar um aumento de $2 * g$ no pólo do rotor, logo:

$$t_r = t_s + 2 * g \quad (\text{m}) \quad (4.19)$$

Portanto:

$$t_r = 0,02 + 2 * 0,0003$$

Assim:

$$t_r \cong 0,0206 \text{ m}$$

4.2.7 – Cálculo do Ângulo do Polo do Rotor

Uma vez que se sabe a largura do polo do rotor (t_r) e o diâmetro do rotor (D_r), então, o ângulo do polo do rotor (β_r) é, aproximadamente, o ângulo cujo seno dado pela largura t_r dividida pelo raio $\frac{D_r}{2}$, assim:

$$\beta_r = 2 * \arcsen\left(\frac{t_r}{D_r}\right) \quad (\text{graus}) \quad (4.20)$$

Sendo assim:

$$\beta_r = 2 * \arcsen\left(\frac{0,0206}{0,0701}\right)$$

E finalmente:

$$\beta_r \cong 34,1791^\circ$$

4.2.8 – Cálculo da Altura do Polo do Rotor

A equação (3.8) indica que o conjugado eletromagnético produzido por uma MRV é proporcional à variação da indutância em relação à posição angular, assim: ($T_{emg} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}$); então é desejável que essa variação seja a máxima possível. A referência [13] sugere que, para se obter esse efeito, a altura do polo do rotor (d_r) seja no mínimo de 20 a 30 vezes o comprimento do entreferro (g). Essa mesma referência indica também que na prática a altura do polo do rotor (d_r) pode ser a metade da largura do polo do estator (t_s), sendo assim:

$$d_r = \frac{t_s}{2} \quad (\text{m}) \quad (4.21)$$

Então, tem-se:

$$d_r = \frac{0,024}{2}$$

Assim:

$$d_r \cong 0,012 \text{ m}$$

4.2.9 – Altura da culatra do Rotor

Na obtenção da culatra do rotor é feito o mesmo raciocínio que foi usado na obtenção da culatra do estator, ou seja, na culatra a densidade de fluxo magnético não pode ser maior que a densidade de fluxo magnético no polo do rotor. Novamente pode-se observar na Fig.4.1 que o fluxo magnético que flui nos polos do rotor se divide aproximadamente pela metade na culatra do rotor. Sendo assim, a culatra do rotor (y_r) deve ter uma altura mínima de metade da largura do dente do rotor (t_r). As referências [13] e [16] recomendam um acréscimo de 20% a 40% para este valor.

Nesse trabalho foi usado um acréscimo de 20%. Desta forma

$$y_r = \frac{t_r}{2} \quad (\text{m}) \quad (4.22)$$

O que leva à:

$$y_r = 1,2 * \frac{0,0206}{2}$$

Finalmente:

$$y_r \cong 0,0124 \text{ m}$$

Na prática esse valor ficou alterado, pois do eixo usado não foi um eixo projetado, e sim o eixo comercial da carcaça 90S da WEG.

4.2.10 – Diâmetro do Eixo do Motor

O diâmetro do eixo pode ser definido pela Equação a seguir:

$$D_{eix} = D_r - 2 * (d_r + y_r) \quad (\text{m}) \quad (4.23)$$

O que implicaria:

$$D_{eix} = 0,0701 - 2 * (0,0122 + 0,0124)$$

Assim, o diâmetro do eixo vale:

$$D_{eix} \cong 0,0210 \text{ m}$$

Porém, será usado um eixo comercial da carcaça 90S que tem diâmetro de 0,0219 m.

4.2.11 – Altura do Polo do Estator

A altura do polo do estator pode ser determinada de maneira lógica, usando os dados encontrados até agora, assim:

$$d_s = \frac{1}{2} (D_s - D_r - 2 * (g + y_s)) \quad (\text{m}) \quad (4.24)$$

Substituindo os valores:

$$d_s = \frac{1}{2} (0,1401 - 0,0701 - 2 * (0,0003 + 0,0122))$$

Resolvendo:

$$d_s = 0,0225 \text{ m}$$

Faz-se, então, necessário o desenho das lâminas que constituirão os núcleos de estator e rotor.

4.3 – Desenhos das lâminas de uma MRV

Nesse trabalho pretende-se projetar, simular, construir e acionar uma MRV 6x4 e uma MRV 6x6. O projeto que foi realizado nas seções anteriores servirá para se desenhar em algum *software* CAD as lâminas dessas máquinas.

4.3.1 – Desenhos das lâminas do estator/rotor dos projetos de MRV


Nas páginas a seguir estão, respectivamente, o desenho das laminas do estator, o desenho da lâminas do rotor da MRV 6x4 e o desenho da lâminas do rotor da MRV 6x6. Lembrando que um único estator será usado para as duas configurações de máquina.

Nesses desenhos, todas as grandezas estão em milímetros.

UFU		UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA	
TESE DE DOUTORADO		e-mail	
NOME: RENATO JAYME DIAS		DATA:	
LÂMINAS DA MRV 6X6 / 6X4		ORIENTADOR	RUBRICA:



UFU UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA	
TESE DE DOUTORADO	e-mail
NOME: RENATO JAYME DIAS	DATA: --/--
LÂMINAS DA MRV 6X4	ORIENTADOR: RÔBRICA:

			
UFU UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA		e-mail	
TESE DE DOUTORADO			
NOME: RENATO JAYME DIAS		DATA:	
		-/-/-	
LÂMINAS DA MRV 6X6		ORIENTADOR	RUBRICA:

4.4 – Cálculo do número de espiras de cada fase

Sabe-se que as máquinas projetadas terão uma potência gerada de aproximadamente 735,5 W como potência de saída (P_s). Considerando um rendimento (η) de 70%, a potência de entrada (P_e) é

$$P_e * \eta = P_s \quad (4.26)$$

Pode-se então concluir que

$$P_e = 1,0507 \text{ kW}$$

As MRV são alimentadas com correntes unidirecionais, sendo necessário então, um conversor para acioná-las. Neste trabalho, para efetuar projetos e dimensionamentos, considerou-se que o retificador usado para alimentar o conversor, forneça uma tensão aproximada de 180 V c.c., que será a tensão de entrada (V_e) do sistema. Sendo assim, tem-se que a corrente de entrada (i_e) do sistema é

$$P_e = V_e * i_e \quad (\text{W}) \quad (4.27)$$

Portanto:

$$1050,71 = 180 * i_e$$

E por fim:

$$i_e \cong 5,8 \text{ A}$$

Essa corrente é a responsável pelo aparecimento do campo magnético nas bobinas da MRV. Esse campo magnético terá como consequência uma força *Magnetomotriz* (\mathcal{F}_{mm}) que é proporcional à corrente que passa pelas bobinas e ao número de espiras (N_e) dessa bobina. Sendo assim:

$$\mathcal{F}_{mm} = i_e * N_e \quad (\text{ampère-espiras}) \quad (4.28)$$

Sabe-se também, que a intensidade do campo magnético (H) tem unidade ampère-espira/metro. Então, pode-se afirmar que a integral de linha de H ao longo de seu percurso resultará numa grandeza cuja unidade é o ampère-espira (A.e), que é a *força magnetomotriz* (\mathcal{F}_{mm}) da equação (4.28), porém escrita de outra maneira; assim:

$$\mathcal{F}_{mm} = \oint H * dl \quad (\text{A.e}) \quad (4.29)$$

A equação (4.29) é a Lei de Ampère de Circuitos. Substituindo a equação (4.29) na equação (4.28), tem-se:

$$i_e * N_e = \oint H * dl \quad (4.30)$$

A equação (4.30) será usada no cálculo do número de espiras (N_e) de cada fase das MRV, porém ainda falta compreender o valor de H e sua região (dl). Para encontrar H lançou-se mão de curvas de magnetização do material, as quais estão mostradas na Fig. 4.6, adotando a região do chamado “joelho da curva”, onde o material inicia sua saturação, como referência para os cálculos. O uso desse valor remeterá à uma intensidade de campo máximo, o qual não satura o material. O material ferromagnético utilizado no estator e no rotor das máquinas desse trabalho foi o aço silício de grão não orientado com baixa perda eletromagnética.

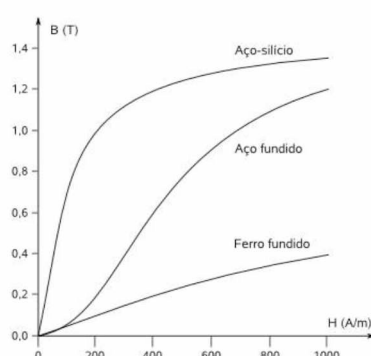


Fig. 4.6- Densidade de fluxo magnético x intensidade de campo magnético em materiais magnéticos

O valor de densidade de fluxo magnético na região desejada está na faixa de 1 a 1,5 T (tesla). Para efeito de cálculo, a densidade do fluxo magnético foi considerada constante por todo circuito magnético, ou seja, o material ferromagnético e o entreferro possuem a mesma densidade de fluxo, que, para esse trabalho, foi considerada de $B_{ent} = 1,2$ T. O valor da intensidade de campo magnético no entreferro (H_{ent}) pode ser encontrado pela equação:

$$H_{ent} \cong \frac{B_{ent}}{\mu_0} \quad (\text{A.e/m}) \quad (4.31)$$

Como $\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} \text{ Tm/A.e}$

$$H_{ent} \cong \frac{1,2}{4 * \pi * 10^{-7}}$$

Assim:

$$H_{ent} \cong 9,55 * 10^5 \text{ A.e/m}$$

Como a relutância do material ferromagnético foi considerada desprezível quando comparada com a relutância do entreferro, pode-se então, desprezar sua contribuição na formação da \mathcal{F}_{mm} . Além disso, os cálculos foram efetuados para a posição de completo alinhamento da fase, como cada fase é constituída por dentes diametralmente opostos ligados em série, o circuito magnético de cada fase possui dois entreferros; assim, dl será considerada constante e terá o valor de dois entreferros ($2 * g$), que é de 0,0006 metros.

As afirmações anteriores possuem aproximações [31], que simplificam, mas não alteram de maneira significativa os resultados dos cálculos. E que resultam na seguinte solução para a equação (4.33):

$$i_e * N_e = \oint H * dl$$

Fazendo $dl = g$:

$$i_e * N_e = H_{ent} * 2 * g$$

Isolando N_e :

$$N_e = \frac{H_{ent} * 2 * g}{i_e}$$

Substituindo os valores:

$$N_e = \frac{9,55 * 10^5 * 0,0006}{5,8}$$

E resolvendo:

$$N_e \cong 98 \text{ espiras}$$

Chega-se então à conclusão que se cada dente de uma fase for enrolado com 49 espiras, ligado em série com o outro dente e percorrido pela corrente de 5,8 A, aparecerá então, um campo magnético capaz de produzir a potência desejada de 735,5 W na máquina.

4.4 .1– Finalizações do projeto

Usando a tabela de fios esmaltados da Erbele do anexo A, tem-se que a bitola mínima é a 15 AWG. Usando os desenhos em programa CAD verificou-se que, geometricamente, seria possível colocar 50 espiras por dente . Finalizando-se assim, a etapa de dimensionamentos físicos.

4.5 – Conclusões

Foi apresentado nesse capítulo um roteiro de projetos de uma MRV 6x4 e uma MRV 6x6 onde as dimensões físicas e elétricas foram encontradas. Finda-se esse capítulo com o conhecimento de como deve ser a rede que alimenta essa máquina; quais são as dimensões das lâminas das máquinas; qual material deve ser usado nas lâminas; qual carcaça deve ser usada e qual fio deve ser utilizado. Os capítulos seguintes apresentarão um estudo magnético dessa máquina e suas simulações.

CAPÍTULO 5

PERFIL DE INDUTÂNCIA PRÓPRIA E MÚTUA USANDO O FEMM

TERCEIRO PASSO DO PROJETO

5.1 – Introdução

Uma vez que se têm as características físicas da máquina (obtidas no Capítulo 4), pode-se usar um software de elementos finitos para se obter os perfis de indutância. No Capítulo 3 (Modelo matemático) viu-se que esses perfis e suas derivadas serão dados de entrada necessários para resolver o modelo matemático nas simulações computacionais. Logo, nesse capítulo serão obtidos os dados de indutância para serem usados na próxima etapa de projeto (Capítulo 6 - Simulação Computacional).

Em geral, as simulações de MRV usam estimativas de perfil de indutância que em pouco se parecem com o perfil real. É muito comum supor que, através de valores de indutância máxima e mínima, o perfil seja triangular, trapezoidal ou senoidal [21].

Outros trabalhos usam o perfil prático, ou seja, constroem a máquina e depois refinam a simulação colocando o perfil obtido através de testes práticos [21]. Esse tipo de simulação apresenta ótimos resultados, pois leva em consideração a saturação do material ferromagnético, porém existe a incoerência de ter que construir a máquina para depois simulá-la; haja vista, que a simulação é uma ferramenta indispensável no projeto e construção de máquinas.

Além disso, a obtenção de perfil prático é extremamente trabalhosa e repetitiva.

Por isso, optou-se nesse trabalho por usar um software de Elementos Finitos (FEMM - *Finite Element Method Magnetics*) para estimar a indutância própria e mútua das bobinas das MRV projetadas e que serão simuladas no Capítulo 6.

Esse capítulo tem como objetivo apresentar um roteiro de como usar esse programa no projeto de MRV.

5.2 – FEMM

O FEMM é um software livre que usa elementos finitos para resolver problemas de engenharia. Para instalá-lo basta acessar o site <http://www.FEMM.info/wiki/HomePage> e baixar o executável de instalação.

5.2.1 – FEMM Passo a Passo – Pré-processamento

Ao iniciar o FEMM surgirá a página inicial mostrado na Fig.5.1. Com a mensagem de “pronto” (*ready*) na parte esquerda inferior.



Fig.5.1- Página inicial do FEMM.

Deve-se então, ir no menu *File* e iniciar um arquivo novo (*new*). Em seguida, a janela da Fig.5.2 aparecerá e o tipo do problema deverá ser definido.

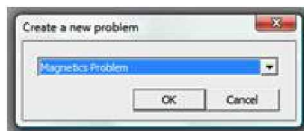


Fig.5.2- Definição do tipo de Problema.

São oferecidas as opções: *Magnetics Problem*, *Electrostatics Problem*, *Heat Flow Problem* e *Current Flow Problem*. No caso desse trabalho, trata-se da solução de um projeto magnético, pois se deseja estimar o perfil de indutância de duas Máquinas a Relutância Variável.

O FEMM é um software que, na montagem do problema, trabalha em duas dimensões; porém, na solução, a profundidade entra nos cálculos.

Logo, será de extrema importância o cálculo das dimensões da máquina em estudo. O Capítulo 4 (projeto de máquinas) revelou todas as dimensões que aqui serão usadas.

5.2.2 – Definição do Problema

A Fig.5.3 aparecerá na tela ao clicar no *problem* na barra de trabalho superior do programa. Nessa janela o tipo do problema (geometricamente falando), as unidades, a frequência, a profundidade, a precisão e outros fatores referentes ao método serão definidos.

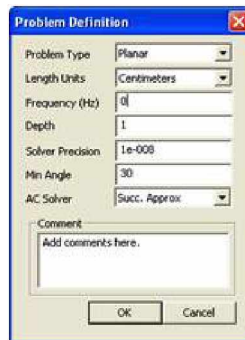


Fig.5.3- Definição dos Parâmetros do Problema.

5.2.3 – Importando o Desenho do AUTOCAD

Esse é o momento que se deve desenhar os componentes que farão parte do processo eletromagnético em questão. Nesse trabalho os desenhos usados são os mesmos que foram retirados do Capítulo 4. Desenhos os quais foram feitos no AUTOCAD®. Assim, fez-se necessário a importação de arquivos DXF. Essa importação é feita no menu *File <Import DXF*. Ao se importar arquivos DXF a Fig.5.4 aparecerá. E a tolerância ou precisão da importação desses arquivos deve ser escolhida.



Fig.5.4- Definição da Tolerância de Importação de Arquivos DXF.

A Fig.5.5 mostra o desenho das lâminas que foram feitas para uma MRV 6x4, rotor, estator e o local das bobinas.

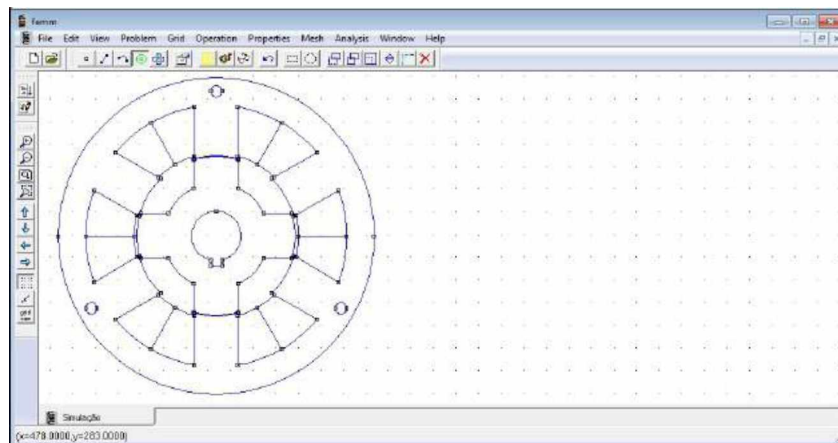


Fig.5.5 - Lâminas de uma MRV 6x4 Importadas de Arquivos DXF e apresentadas na interface do modo Pré-Processador

5.2.4 – Definição de características

Com o layout da máquina definido, em *Edit>Preferences* devem ser especificadas algumas características do problema. A Fig. 5.6 aparecerá. Suas abas são organizadas de acordo com o tipo de problema a ser tratado, sendo necessário configurar apenas aquelas referentes ao tipo de problema selecionado. No caso, são estabelecidos os valores das propriedades para *Magnetics input* e *Magnetics output*.

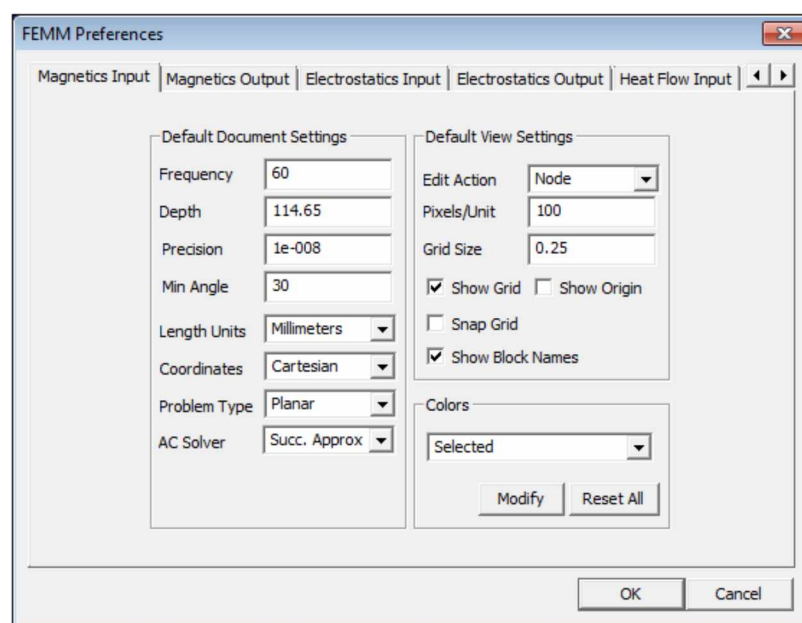


Figura 5.6 - Janela para definição das características do problema

Na aba *Magnetics input* são definidos a frequência (*Frequency*) da rede na qual a máquina deverá operar; a profundidade (*Depth*) do desenho, neste caso: valor do comprimento da pilha de lâminas do conjunto rotor-estator, retirado do projeto da máquina; a precisão (*Precision*) do *Solver*, ou seja, o critério de parada do método utilizado pelo programa para resolver as equações diferenciais estabelecidas; o ângulo de menor valor possível (*Min Angle*) tomado como restrição pelo programa na criação de suas malhas; a unidade (*Length Units*); o tipo de coordenadas (*Coordinates*); a disposição espacial do problema (*Problem Type*) e, finalmente, o método de resolução para um problema variante no tempo (*AC Solver*).

Na Figura 5.6 são mostrados os valores estabelecidos nesta simulação. A precisão e o ângulo mínimo foram deixados em seus valores padrão dados pelo FEMM.

No lado direito da mesma aba encontram-se as configurações da aparência da interface. Na simulação tais opções não foram modificadas, deixando-as de acordo com o padrão do FEMM.

Para *Magnetics output* nenhum valor ou opção são alterados, permanecendo no padrão estabelecido pelo *software*.

5.2.5 – Definição de propriedades

Nessa etapa, onde os desenhos já estão devidamente configurados, deve-se definir o material que constitui cada área desenhada. Para isso, no *menu properties > materials* aparecerá a janela da Fig.5.7.

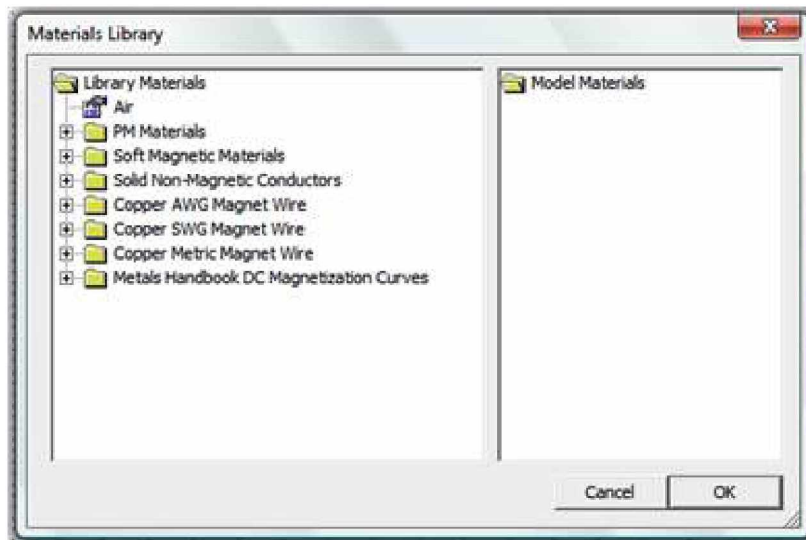


Fig.5.7- Biblioteca de Materiais.

Onde os materiais a serem usados deverão ser definidos: o aço usado nas lâminas, o aço do eixo, o fio de cobre dos circuitos das bobinas e o ar do entreferro. O FEMM possui uma biblioteca de materiais, porém, caso o material usado tenha características diferentes, o FEMM permite a alteração. A Figura 5.8 mostra os materiais que foram utilizados na simulação já na pasta de modelos.

O ar (*air*) está presente na região em que não há material.

O aço 1020 (1020 *steel*) que é utilizado no eixo do rotor e nos parafusos que prendem as lâminas do estator está localizado em *Soft Magnetic Materials/Low Carbon Steel*.

O aço silício M-19 (M-19 *steel*) é de grãos não orientados e compõe as lâminas do rotor e do estator; e encontra-se em *Soft Magnetic Materials/Silicon Iron*.

O 10 AWG é o fio de cobre escolhido para as bobinas; e está na pasta *Cooper AWG Magnet Wire*.

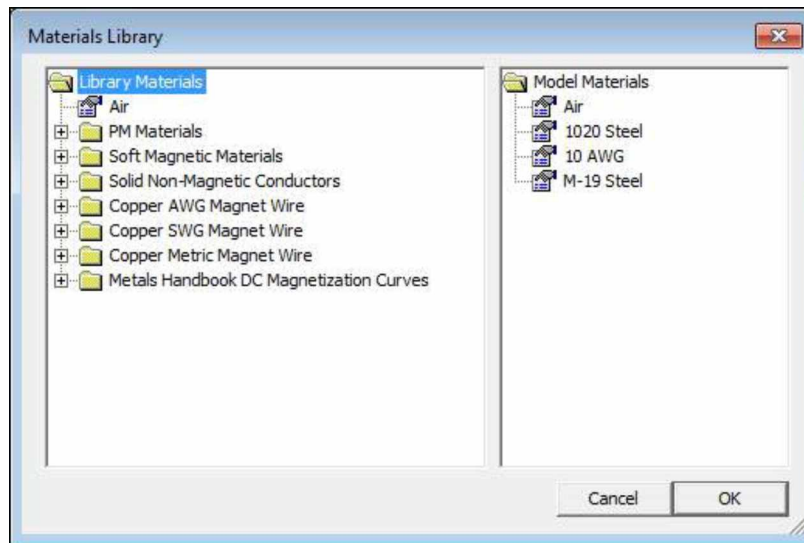


Fig. 5.8 - Biblioteca de materiais

Ao dar um clique duplo sobre algum dos materiais abrirá uma janela onde é possível observar as propriedades dos materiais. É importante conferir se tais propriedades estão de acordo com as dos materiais utilizados no projeto e também definir os atributos especiais do material (*Special Attributes: Lamination & Wire Type*). Foram alterados apenas os atributos especiais no aço M-19 e no fio de cobre como apresentados na Figura 5.9.

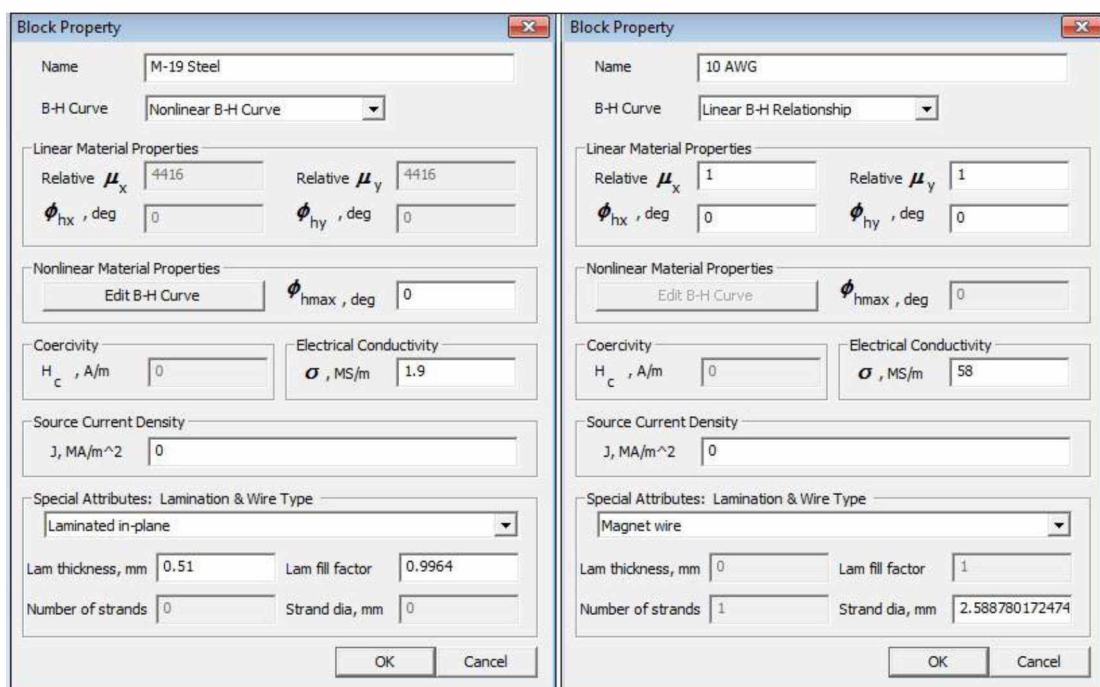


Fig. 5.9 - Propriedades do aço M-19 e do fio de cobre 10 AWG

Outra maneira de se modificar as propriedades de cada material é ir ao menu *properties>materials*. Assim, aparecerá a Fig.5.10. Selecione o material na janela *Property Name* e depois acione o botão *Modify Property*. Uma nova janela da Fig. 5.9 se abrirá onde será permitido modificar as propriedades do material (se é laminado ou não, características eletromagnéticas, etc).



Fig.5.10 - Definição da Propriedade dos Materiais Escolhidos.

Os circuitos devem ser definidos no menu *properties>circuits* onde a janela da Fig.5.11 aparece.

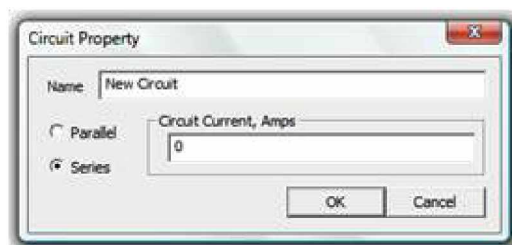


Fig.5.11 - Propriedade dos Circuitos.

No caso das MRV 6x4, cada par de dentes diametralmente opostos serão ligados formando uma fase. Deve-se então, criar três circuitos correspondentes as três fases da máquina. Para a MRV 6x6, no entanto, basta estabelecer um único circuito.

Além disso, as condições de contorno do problema devem ser definidas. É comum em máquinas considerar que o fluxo magnético está confinado ao material ferro magnético, e que fora desse material nenhum campo considerável exista.

A Fig.5.12 que está no menu *properties>Boundary* permite criar e modificar condições de contorno.



Fig.5.12 - Condições de Contorno.

A janela da Fig.5.13 mostra as condições de contorno, a qual se considerou estando na divisa entre as lâminas e a carcaça das máquinas. Como, considera-se que não há fluxo, todas as grandezas são consideradas zero. Como se trata de uma região de contorno, o FEMM resolverá o problema até essa região.

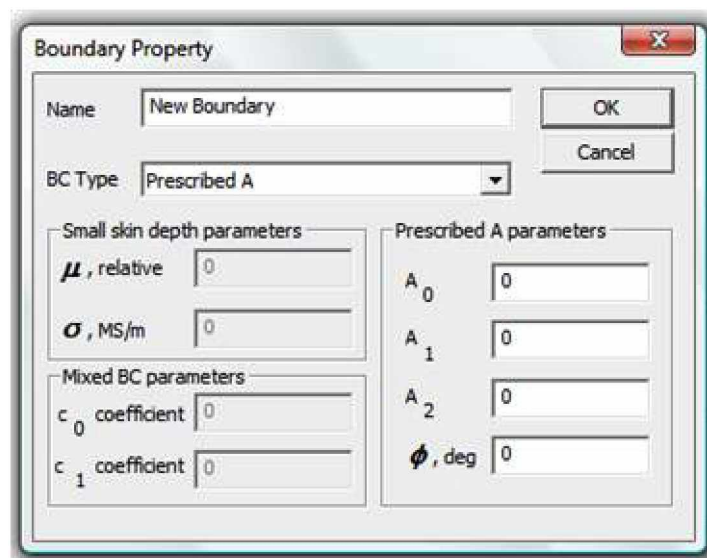


Fig.5.13 - Propriedade dos Circuitos.

A Fig.5.14 apresenta o botão usado para adicionar materiais nos desenhos. Deve-se, após ativar essa função, clicar em todas as regiões do desenho.



Fig.5.14-Bloco para Adicionar materiais no Desenho.

Após isso, deve-se clicar com o botão esquerdo do mouse perto do símbolo de materiais que está em cada área. A janela da Fig.5.16 irá aparecer e o material de cada região deve ser escolhido.

Apenas estarão disponíveis os materiais que foram escolhidos inicialmente na biblioteca de materiais.

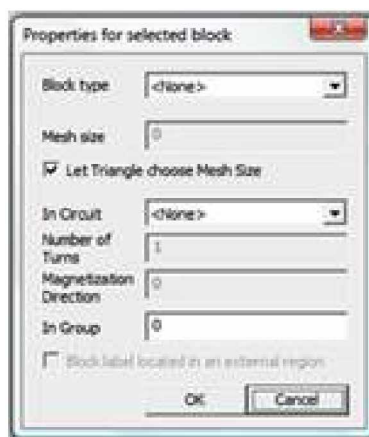


Fig.5.16-Bloco para Escolher os Materiais no Desenho.

Uma vez escolhidos os materiais, deve-se então, clicar no botão da Fig.5.17 para criar a malha de triângulos da análise de elementos finitos. A Fig.5.18 aparecerá como resultado dessa etapa.



Fig.5.17-Criação da Malha no Desenho.

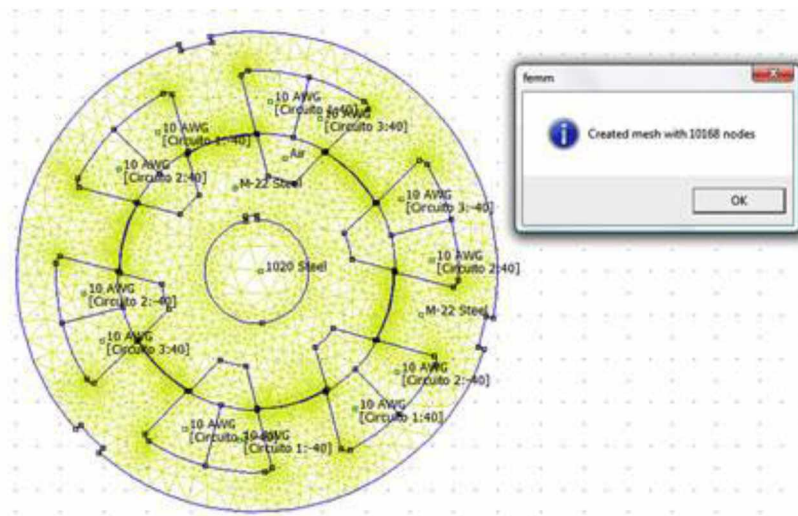


Fig.5.18- Malha no Desenho.

Posto isso, deve-se clicar no botão da Fig.5.19 para que o programa execute. E, em seguida no botão da Fig.5.20 para visualizar o resultado.



Fig.5.19- Execução do Programa.



Fig.5.20- Visualização dos Resultados.

Finalmente, deve-se clicar no botão da Fig.5.21 e a janela da Fig.5.22 será exibida, mostrando, entre outros fatores, a indutância do circuito selecionado.



Fig.5.21- Execução do Programa.

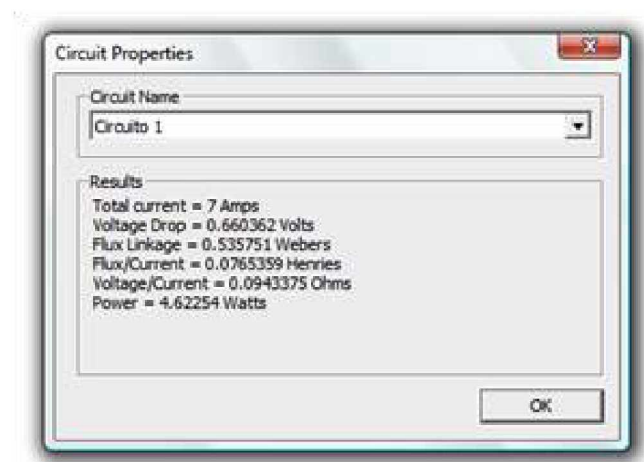


Fig.5.22 - Execução do Programa.

Após isso, todos os resultados desejados sobre indutâncias podem ser obtidos no programa, bastando para isso, repetir o processo para cada posição e para cada corrente desejada. Pode-se também, lançar mão do script LUA para se programar a alteração de posição e de corrente automaticamente e, além disso, pode-se guardar os valores de indutância automaticamente.

5.3 – Resultados

Para se definir o perfil de indutância própria e mútua completo dessas máquinas, deve-se variar o valor de corrente de uma das bobinas mantendo as outras em zero; e variar também a posição angular do rotor.

Os valores de indutâncias própria e mútua gerados através da simulação no FEMM são de natureza complexa. Desta forma, fez-se necessário o tratamento de tais valores em ambiente MATLAB® a fim de utilizar os módulos dos valores.

A superfície da Fig. 5.23 apresenta os valores de indutâncias próprias da MRV (6x4) para cada corrente e cada ângulo.

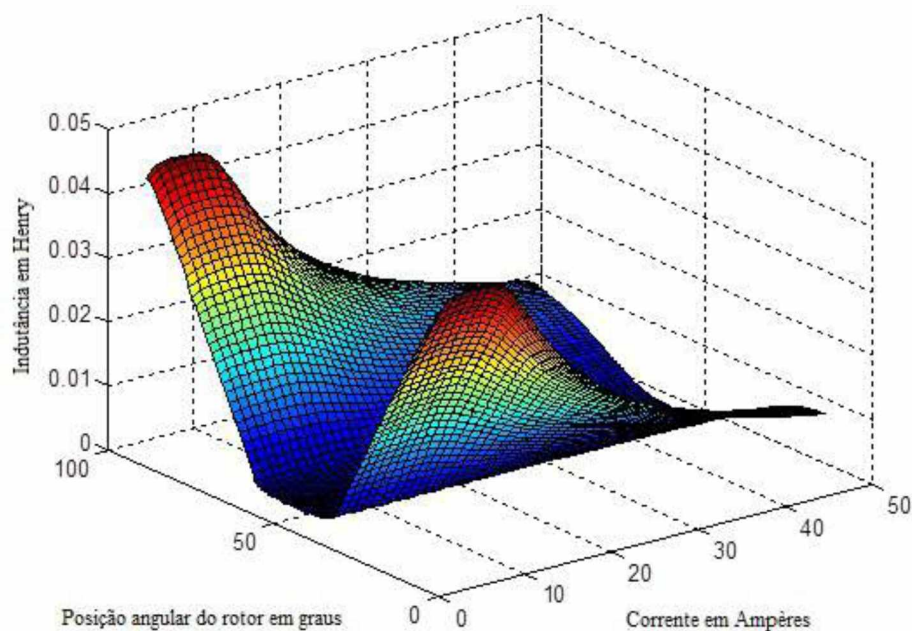


Fig. 5.23 - Superfície de indutâncias próprias da fase A da MRV 6x4 em estudo

Essa superfície de perfil de indutância própria mostra-se coerente com o que era esperado. Lembrando que a mudança de posição é referente ao rotor, ou seja, a posição de zero graus acontece quando o rotor está completamente alinhado com o estator. Logo, quando se diz 1 grau significa que o rotor está a 1 grau da posição de completamente alinhado.

A superfície da Fig. 5.24 apresenta os valores de indutâncias próprias da MRV (6x6) para cada corrente e cada ângulo.

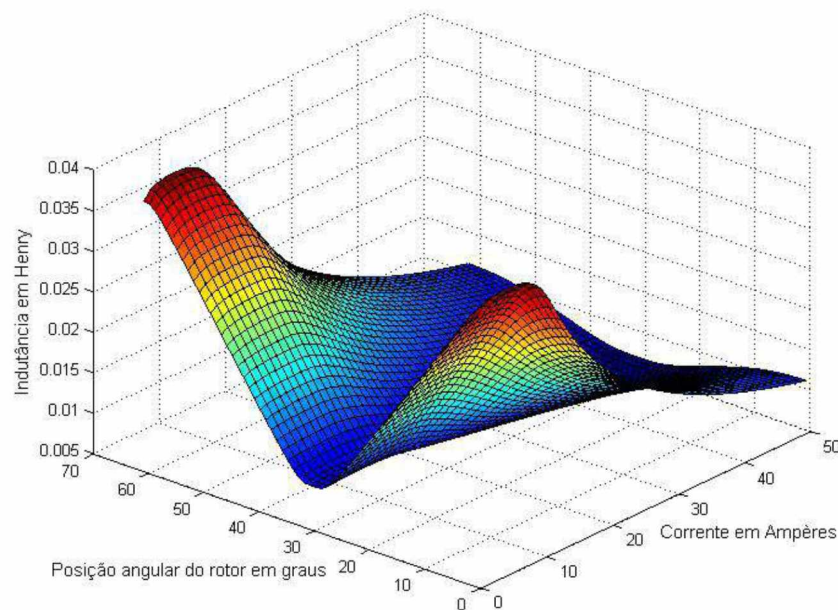


Fig. 5.24 - Superfície de indutâncias próprias de uma bobina da fase A da MRV 6x6 em estudo

5.3.1 – Indutância Própria em Relação à Posição Angular

Quando a posição angular do rotor varia de 0° a 45° , na MRV(6x4), a indutância própria decresce, pois o entreferro aumenta para essa fase. E de 45° a 90° a indutância possui comportamento oposto, sendo crescente, pois o entreferro volta a diminuir.

A figura (Fig. 5.23) mostra que nessa configuração de máquina o perfil de indutância própria tem um período de 90° . Essa conclusão era esperada pois o rotor é uma cruzeta de quatro dentes igualmente espaçados (Fig. 5.25) e ao gira-lo 90° ele volta à mesma posição.

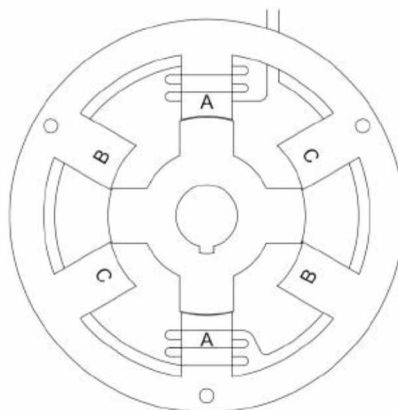


Fig. 5.25 – Desenho da seção transversal de uma MRV 6x4, mostrando o enrolamento da fase A na posição zero.

Já na MRV 6x6, quando a posição angular do rotor varia de 0° a 30° , a indutância própria decresce, pois o entreferro aumenta para essa fase. E de 30° a 60° a indutância possui comportamento oposto, sendo crescente pois o entreferro volta a diminuir.

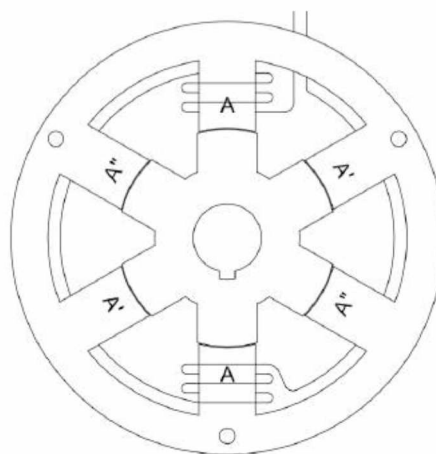


Fig. 5.26 – Desenho da seção transversal de uma MRV 6x6, mostrando o enrolamento de uma das bobinas da fase A na posição zero.

A figura (Fig. 5.24) mostra que nessa configuração de máquina o perfil de indutância própria tem um período de 60° .

O rotor desse tipo de máquina tem seis dentes igualmente espaçados (Fig. 5.26) e ao gira-lo 60°, ele volta à mesma posição.

5.3.2 – Indutância Própria em Relação à Corrente

Pode-se observar que, em relação à corrente, há um crescimento dos valores de indutância à medida que a corrente diminui em ambas as máquinas (6x4 e 6x6). Esse crescimento não se dá de forma linear, sendo esta a consequência da saturação magnética.

5.3.3 – Visualização da Indutância Própria

Ao visualizar graficamente os resultados e compará-los para diferentes valores de corrente e posições angulares do rotor, é possível compreender com maior facilidade o comportamento do fluxo magnético nas MRV. A Fig.5.27 mostra a MRV 6x4 na posição de alinhamento e na posição de completo desalinhamento para uma corrente de 5 A.

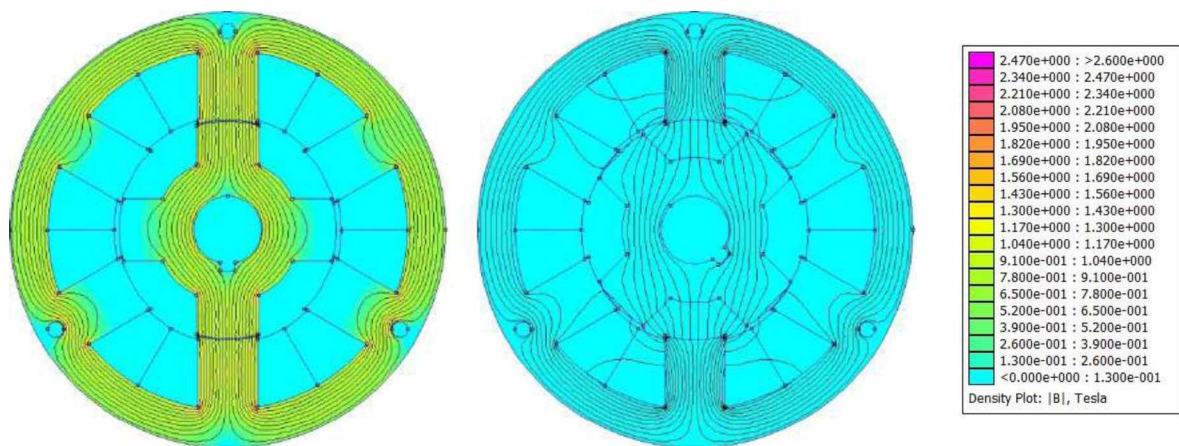


Fig.5.17- Representação gráfica da densidade de fluxo (B) para uma corrente de 5A

MRV 6X4

A Fig.5.28 mostra a MRV 6x6 na posição de alinhamento e na posição de completo desalinhamento para uma corrente de 5 A.

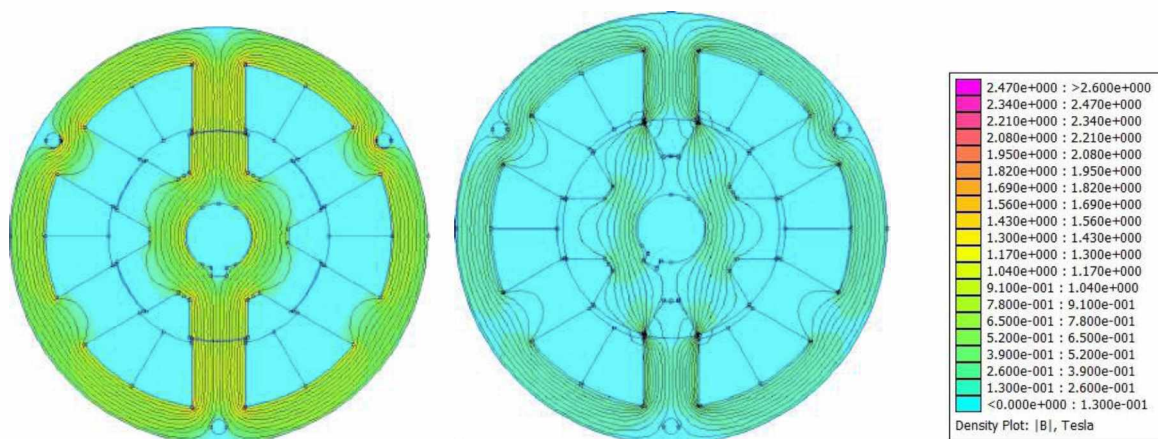


Fig.5.28- Representação gráfica da densidade de fluxo (B) para uma corrente de 5A
MRV 6X6

A Fig.5.29 mostra a MRV 6x4 na posição de alinhamento e na posição de completo desalinhamento para uma corrente de 25 A.

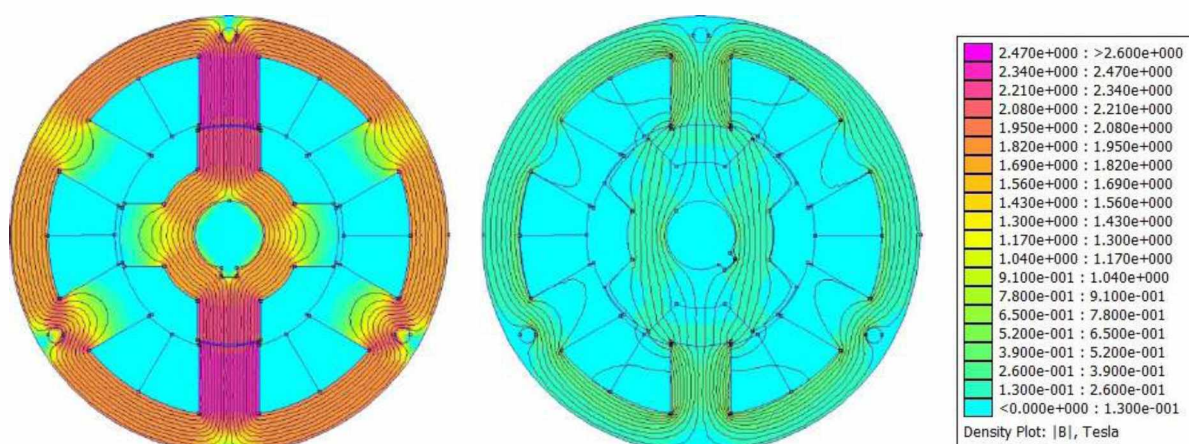


Fig.5.29- Representação gráfica da densidade de fluxo (B) para uma corrente de 25A
MRV(6x4)

A Fig.5.30 mostra a MRV 6x6 na posição de alinhamento e na posição de completo desalinhamento para uma corrente de 25 A. Pode-se perceber o aumento das linhas de fluxo.

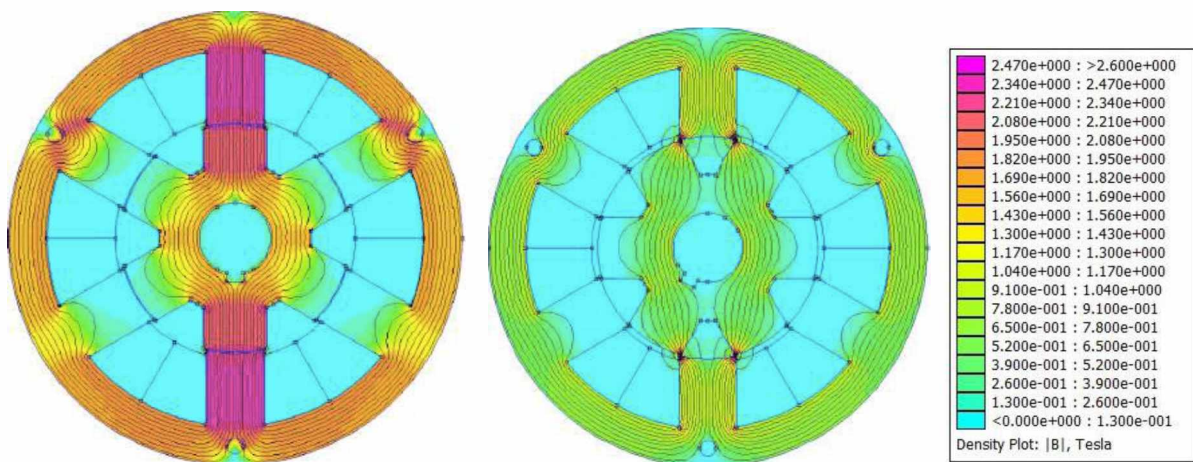


Fig.5.30- Representação gráfica da densidade de fluxo (B) para uma corrente de 25A

MRV 6X6

A Fig.5.31 mostra a MRV 6x4 na posição de alinhamento e na posição de completo desalinhamento para uma corrente de 45 A. E, a Fig.5.32 mostra a MRV 6x6 na posição de alinhamento e na posição de completo desalinhamento para uma corrente de 45 A. Os efeitos do aumento do fluxo e da saturação magnética ficam mais evidentes. Esse teste havia sido sugerido na etapa de projeto do Capítulo 4 pois havia o receio de a culatra saturar antes da saturação dos dentes do estator/ rotor. Porém, isso não ocorreu.

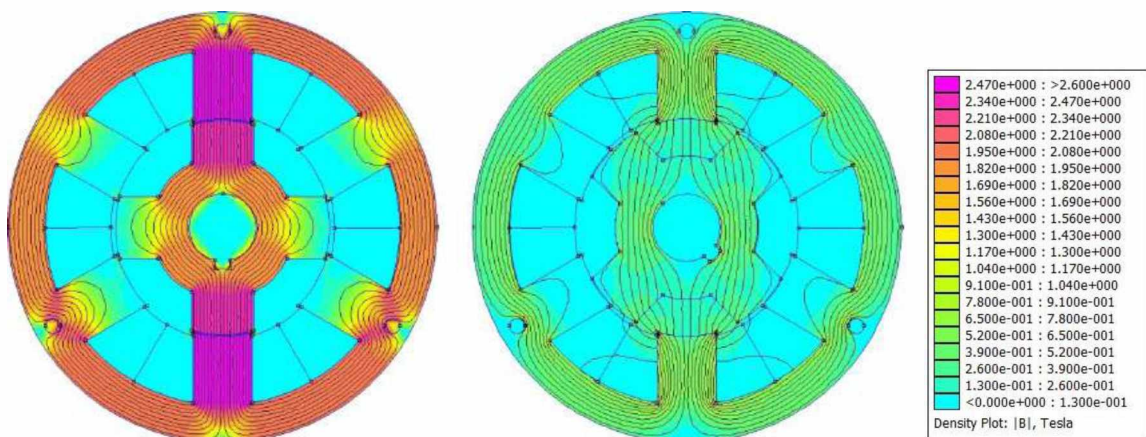


Fig.5.31- Representação gráfica da densidade de fluxo (B) para uma corrente de 45A

MRV 6X4

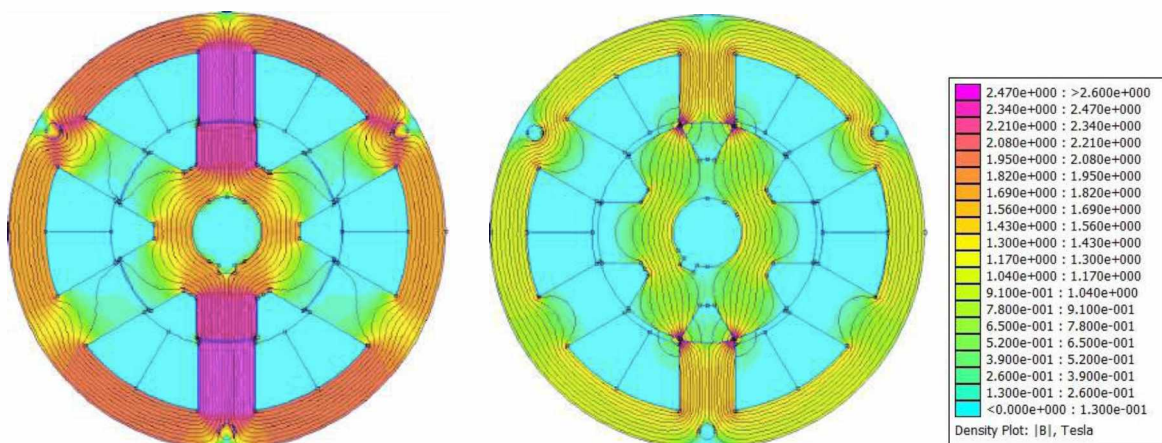


Fig.5.32- Representação gráfica da densidade de fluxo (B) para uma corrente de 45A
MRV 6X6

É bom lembrar que as MRV tem corrente pulsante e que apesar da MRV em questão ter sido projetada para uma corrente média de 5,8A o valor de pico será bem maior, por isso, os ensaios no FEMM foram feitos até para 50A.

A Fig.5.33 mostra uma legenda da densidade de fluxo das figuras anteriores gerado pelo FEMM.

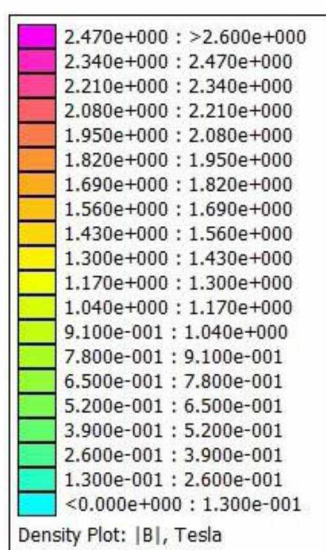


Fig.3.33 - Legenda com a variação da densidade de fluxo (B)

A variação da relutância magnética implica em um maior ou menor coeficiente de indução. Quando os polos do rotor estão totalmente alinhados aos polos do estator (0°), é possível observar um fluxo magnético consideravelmente maior do que quando os polos do rotor estão desalinhados em relação ao estator (45°). Assim, constata-se a indutância máxima para determinada corrente quando a posição angular do rotor é 0° e indutância mínima quando é 45° .

5.3.4 – Visualização das Indutância Mútuas

As curvas das indutâncias mútuas foram plotadas em ambiente MATLAB[®] formando uma superfície para a indutância da fase A nas bobinas da fase B (Fig.5.34) e outra para a indutância da fase A nas bobinas da fase C (Fig.5.35). Ambas essas figuras são da MRV 6x4.

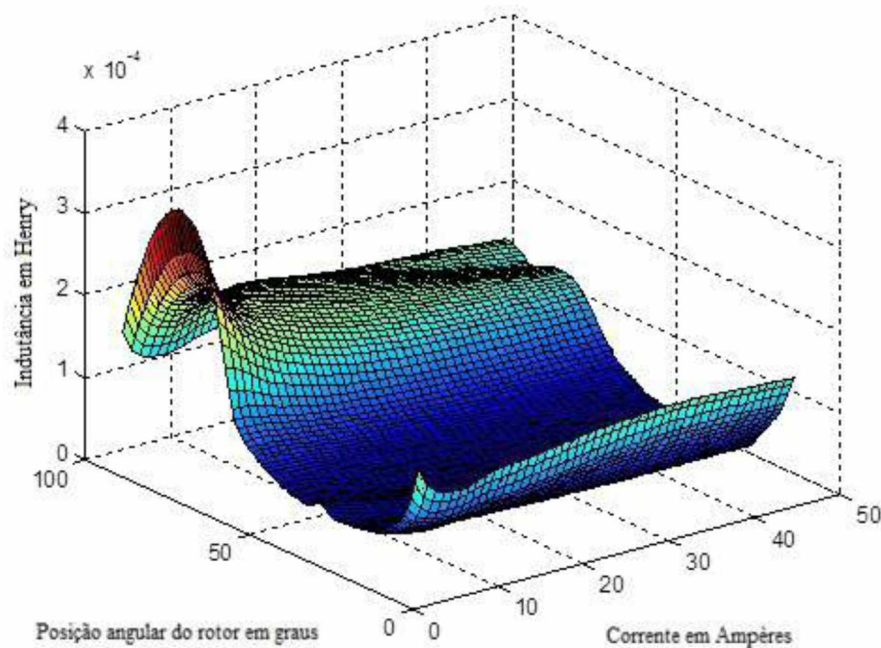


Fig.5.34 - Superfície de indutâncias mútuas da fase A na bobina da fase B da MRV 6x4

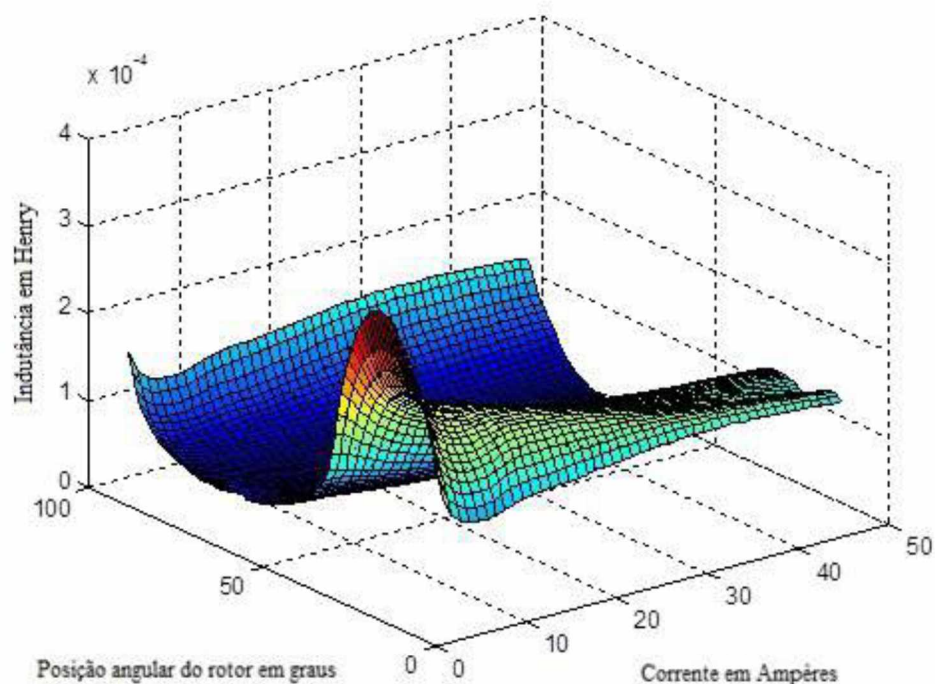


Fig.5.35 - Superfície de indutâncias mútuas da fase A na bobina da fase C da MRV 6x4

Na MRV 6x6, apesar desta ser uma MRV monofásica, a fase A foi subdividida em três grupos de bobina. As curvas da Fig.5.36 mostram uma superfície para a indutância mútua do primeiro grupo de bobinas da fase A em relação ao segundo grupo de bobinas da fase A que estão defasados geometricamente 60° . A Fig.5.37 mostra a indutância mútua do primeiro grupo de bobinas da fase A em relação ao segundo grupo de bobinas da fase A que estão defasados geometricamente 120° .

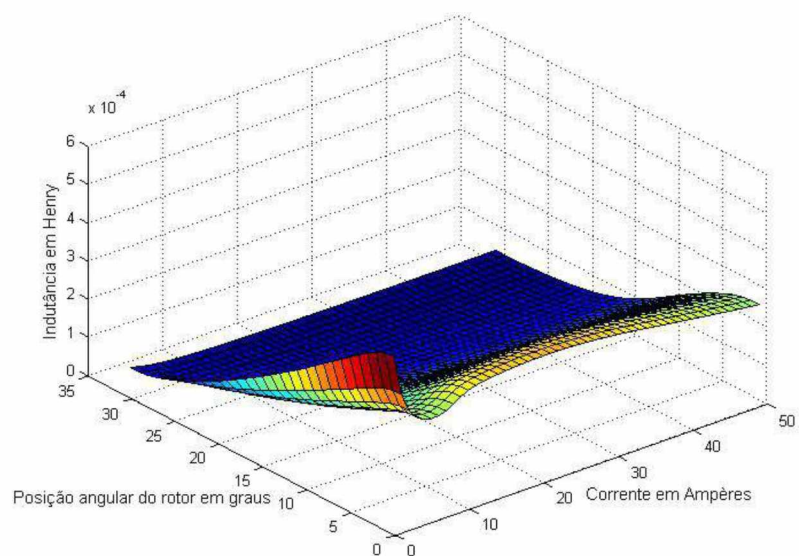


Fig.5.36 - Superfície de indutâncias mútuas da bobina energizada da fase A na bobina defasada 60° da MRV 6x6

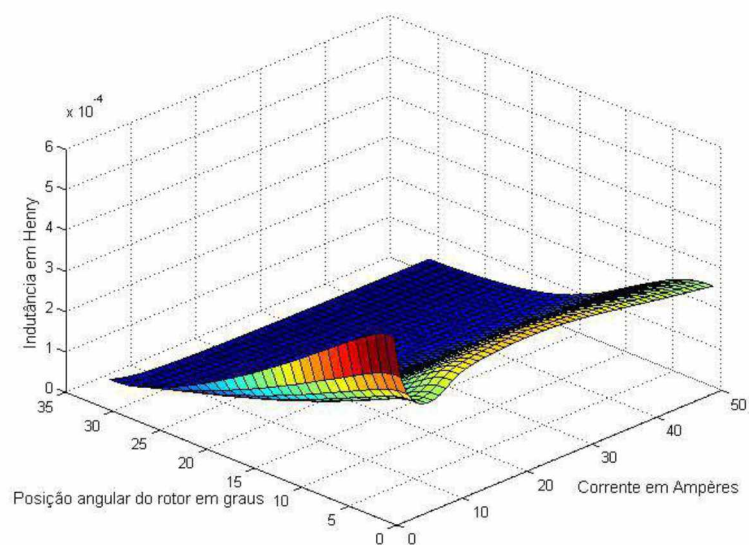


Fig.5.37 - Superfície de indutâncias mútuas da bobina energizada da fase A na bobina defasada 120° da MRV 6x6

5.4 – Sobre as indutâncias encontradas e como usá-las

Uma vez que se conhece o valor e o comportamento da indutância própria e das indutâncias mútuas, deve-se assegurar que esses valores serão utilizados corretamente na simulação.

Em se tratando das indutâncias próprias, provavelmente não há dúvidas sobre o significado físico. Pois sabe-se que a indutância própria é a relação entre o fluxo concatenado por uma bobina e a corrente na bobina. Esse fluxo considerado deve ter origem apenas na corrente da bobina da própria fase.

A indutância mútua também é a relação entre o fluxo e a corrente. Porém essa corrente é de outra fase. Ou seja, o fluxo considerado aqui tem origem em outra fase [29].

Sendo assim, na solução do modelo matemático a indutância mútua da fase A na Fase B deve ser calculada com base na corrente e na posição da fase A, pois essa é a indutância que a fase A provoca na B. Para se calcular a indutância mútua da fase B na Fase A deve-se usar como base a corrente e a posição da fase B, pois essa é a indutância que a fase B provoca na A.

5.5 – Conclusão

O FEMM mostrou-se suficiente para o que foi proposto nesse capítulo. As curvas de indutância própria e mútua foram estimadas e poderão ser usadas no Capítulo 6 de simulação. As curvas aqui encontradas apresentam coerência de comportamento e de amplitude. Parte-se assim, para a etapa de simulação.

CAPÍTULO 6

SIMULAÇÃO DE UMA MRV QUARTO PASSO DO PROJETO

6.1 – Introdução

As ferramentas de simulação têm facilitado muito no desenvolvimento de projetos mais precisos e baratos em máquinas elétricas. Parâmetros que antes eram impossíveis de se considerar, agora são facilmente previstos na concepção dessas máquinas, através de simulações. Assim, uma vez conhecidos os princípios de funcionamento, o modelo matemático e as dimensões de uma MRV, parte-se para a simulação dessas máquinas.

As simulações apresentadas neste trabalho foram realizadas em ambiente MATLAB[®] SIMULINK. Pretende-se simular uma MRV 6x4 e uma MRV 6x6, ambas de 735,6 VA. Para isso, essas máquinas foram projetadas nos capítulos anteriores e as curvas de indutância própria e mútua, que variam em relação à posição do rotor e à corrente, foram estimadas.

Simulações de MRV podem ser encontradas em [33-36]. Além disso, as simulações aqui apresentadas são uma evolução dos trabalhos [16], [21], [31] e [32]. E apresentam a inovação do uso de um *software* de elementos finitos (FEMM) para estimar as indutâncias, além de considerar a existência das indutâncias mútuas.

Será foco desse capítulo mostrar a simulação de MRV para ser usada em projetos desse tipo de máquina, além de realizar simulações que não consideram as indutâncias mútuas e compará-las com simulações que levam em conta as indutâncias mútuas. Além disso, essas simulações servirão de base para se propor melhoria nos projetos. Melhoria, as quais, serão expostas nos próximos capítulos.

6.2 – Simulação das Máquinas a Relutância Variável

A simulação de uma máquina, seja ela qual for, é a solução computacional do seu modelo matemático, de tal forma que sua dinâmica possa ser observada ao longo de uma variável qualquer. Aqui, será analisado em relação à variável tempo. No caso desse trabalho, essa modelagem matemática foi apresentada no Capítulo 3, onde equações dinâmicas de estado foram descritas. Em particular, foi apresentada a equação (3.26), que representa a modelagem elétrica e mecânica de uma MRV (com três bobinas em seu estator – 6x4 ou 6x6).

Uma análise dessas equações mostra a necessidade de se conhecer o valor das indutâncias e das derivadas da indutância das bobinas para a solução desse modelo. Esses valores foram obtidos no Capítulo 5.

6.2.1 – Obtenção do Perfil de Indutância

Para a obtenção do perfil de indutância usado nas simulações desse trabalho, foi utilizado o software de análise que usa elementos finitos, chamado FEMM.

Assim, os desenhos das lâminas feitos no AUTOCAD[®] e seus materiais, os quais foram mostrados no capítulo de cálculo de dimensões (Cap. 4), foram usados nessa análise. Os detalhes estão mostrados no capítulo 5, o qual ilustra, passo a passo, como as curvas de indutância foram obtidas.

O perfis usados nas simulações deste trabalho são os das figuras: Fig.5.23, Fig.5.24, e Fig.5.34, Fig.5.35, Fig.5.36 e Fig.5.37. Esses perfis de indutância devem ser usados de maneira integral, onde cada ponto das superfícies da Fig.5.23 e Fig.5.24 representa a indutância própria da bobina energizada da MRV 6x4 e da MRV 6x6, respectivamente. E, cada ponto das superfícies das Fig.5.34, Fig.5.35, Fig.5.36 e Fig.5.37, representa as indutâncias mútuas nas outras duas bobinas, em relação à corrente e à posição angular da

bobina energizada. Uma vez que se têm os três perfis de indutância, parte-se para a implementação da simulação propriamente dita.

Essa simulação, como dito anteriormente, será desenvolvida em ambiente MATLAB® SIMULINK que é um ambiente gráfico de simulação. Sendo assim, lança-se mão de blocos para representar cada etapa da simulação. Além disso, existem nesse ambiente alguns componentes já modelados (é o caso das chaves eletrônicas - MOSFET). Para se utilizar esses componentes, basta configurá-los corretamente, não sendo necessário uma modelagem completa.

Contudo, em outras etapas - como por exemplo a solução da equação de estados do capítulo 3 – foi preciso a criação de um script (um programa em forma de função) o qual será inserido em um bloco no SIMULINK.

Segue-se assim, com a apresentação da simulação de cada componente.

6.2.2 – Simulação das Bobinas de uma MRV

Para simular as bobinas de uma MRV, foi usada uma fonte de corrente controlada por um sinal (Fig. 6.1). O sinal de controle deste bloco é a corrente que foi gerada como saída da equação (3.26). Essa fonte de corrente será inserida no conversor *half-bridge* que por sua vez será completamente modelado dentro de um bloco.

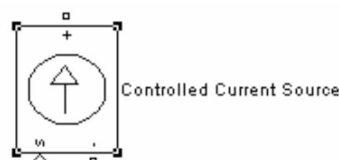


Fig. 6.1-Fonte de Corrente Controlada por Sinal.

6.2.3 – Solução da equação (3.26) de uma MRV

Assim, criou-se a necessidade de um bloco que tenha a função de resolver as equações de estado, tendo como entradas as tensões nas bobinas e os valores das indutâncias (que estarão em uma matriz); e como saída as correntes nas bobinas de cada fase. Para isso, foi usada uma *S-function*, que é um bloco pronto do MATLAB® SIMULINK especializado em solução de equações de estado. Esse bloco está mostrado na Fig.6.2.

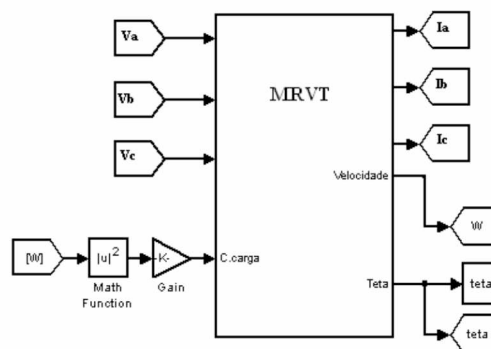


Fig. 6.2-Bloco de solução da equação (3.26).

Nesse caso, a equação de estado a se resolver (equação 3.26) precisou ser inserida. Segue assim, o programa criado para isso. Fez-se a opção de deixá-lo em formato de script para facilitar o uso deste programa por outros.

```
%-----  
%   O primeiro passo é criar uma função responsável por resolver a equação 3.26  
%   depois deve-se montar a matrizes da equação 3.26  
%-----  
  
% função que tem como dados de entrada Ra (resistência das fase), D(coeficiente de atrito) e J  
% (momento de inércia). t, x, u e flag são variáveis de controle próprias às S-function.  
% As variáveis sys e x0 são variáveis de saída. Nesse programa o vetor x será usado como saída  
% principal, onde: x(1) é a corrente da fase A, x(2) é a corrente da fase B, x(3) é a corrente da  
% fase C, x(4) é a velocidade angular da máquina e x(5) é a posição angular da máquina.  
  
function [sys,x0] = simulink_naolinear (t,x,u,flag,Ra,D,J)  
  
if abs(flag) == 1,  
  
    A = zeros(5,5);                                % Criação da matriz A.
```

```

A(1,1) = Ra;
A(2,2) = Ra;
A(3,3) = Ra;
A(4,4) = D;
A(5,4) = -1;

B = zeros(5,5); % Criação da matriz B.
B(4,4) = J;
B(5,5) = 1;

%-----
%                               Cálculo das grandezas relacionadas a fase A
%-----
% Cálculo do angulo alpha para a fase A em graus

alpha = rem((x(5)*180/pi),90);

% Será criada e usada uma função (aqui chamada de findu) para ir em um banco de dados que
% contenha o valor das indutâncias própria e mútua. Além disso, essa função deve ser capaz de
% calcular as derivadas dessas indutâncias. Essa função será apresentada posteriormente de maneira
% detalhada. Como pode ser visto, essa função têm a corrente da fase e a posição da fase como
% variáveis de entrada.

[ indut , indut2, indut3, deriv, deriv2, deriv3] = findu( abs(x(1)), alpha);

B(1,1) = indut;
B(1,5) = x(1)*deriv/(pi/180);

A(4,1) = -0.5*x(1)*(deriv/(pi/180)+deriv3/(pi/180)+deriv2/(pi/180));
A(1,2)=x(4)* deriv3/(pi/180);
A(1,3)=x(4)* deriv2/(pi/180);

B(1,2)=indut3;
B(1,3)=indut2;

%-----
%                               Cálculo das grandezas relacionadas a fase B
%-----

alpha = rem(((x(5)*180/pi)+120),90);

[ indut , indut2, indut3, deriv, deriv2, deriv3] = findu( abs(x(2)), alpha);
B(2,2) = indut;
B(2,5) = x(2)*deriv/(pi/180);

A(4,2) = -0.5*x(2)*(deriv/(pi/180)+deriv3/(pi/180)+deriv2/(pi/180));

A(2,1)=x(4)* deriv2/(pi/180);

A(2,3)=x(4)*deriv3/(pi/180);

```

```

B(2,1)=indut2;

B(2,3)=indut3;

%-----
%                               Cálculo das grandezas relacionadas a fase C
%-----

alpha = rem(((x(5)*180/pi)+60),90);

[ indut , indut2, indut3, deriv, deriv2, deriv3] = findu( abs(x(3)), alpha);
B(3,3) = indut;
B(3,5) = x(3)*deriv/(pi/180);

A(4,3) = -0.5*x(3)*(deriv/(pi/180)+deriv3/(pi/180)+deriv2/(pi/180));

A(3,1)=x(4)* deriv3/(pi/180);

A(3,2)=x(4)*deriv2/(pi/180);

B(3,1)=indut3;

B(3,2)=indut2;

% Uma vez montada a equação 3.26 deve-se resolve-la e colocar os valores no vetor sys

sys = zeros(5,1);
sys = inv(B)*u-inv(B)*A*x;

% Caso o programa não esteja no primeiro ciclo o valor de sys deve ser transferido para x

elseif abs(flag) == 3,

    sys = x;

% Caso o programa esteja no primeiro ciclo deve inserir valores iniciais para os vetores valor sys e x

elseif abs(flag) == 0,

    x0 = [0; 0; 0; 125.664; 0];

    sys = [5 0 5 5 0 0]';

else

    sys = [];

end

```

O bloco da Fig.6.2 mostra que além das correntes, esse bloco também terá a velocidade angular (ω) e o ângulo de posicionamento do rotor (θ) como saídas do sistema, os quais são provenientes do vetor x do programa. As entradas (tensões das bobinas) serão retiradas de outro bloco, o bloco que simula o conversor *half-bridge*. E a carga mecânica no eixo da máquina, que também é entrada desse bloco, admite a forma que o programador quiser. No caso do desenho da Fig.6.2 está mostrada uma carga quadrática. Segue-se então, com o objetivo de simular o conversor *half-bridge* em ambiente MATLAB SIMULINK®.

5.2.4 – Simulação do conversor *half-bridge* no modo Gerador

Aqui, pretende-se criar um bloco que simule o conversor *half-bridge*. A Fig.6.3 mostra esse conversor para uso da MRV como gerador. E a Fig.6.4 apresenta esse conversor no ambiente MATLAB SIMULINK®.

Esse bloco terá como entradas as correntes provindas do bloco da Fig.6.2, que alimentarão suas fontes de correntes controladas. E como saída, esse bloco fornecerá as tensões sob cada fase da MRV.

Na Fig.6.4 as chaves usadas na simulação foram MOSFET que, assim como os diodos e a fonte de tensão, são blocos prontos fornecidos pelo SIMULINK®.

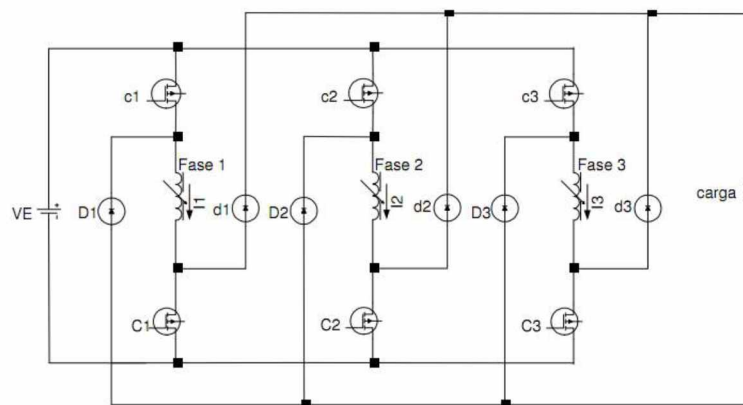


Fig.6.3 – Conversor half-bridge para um gerador

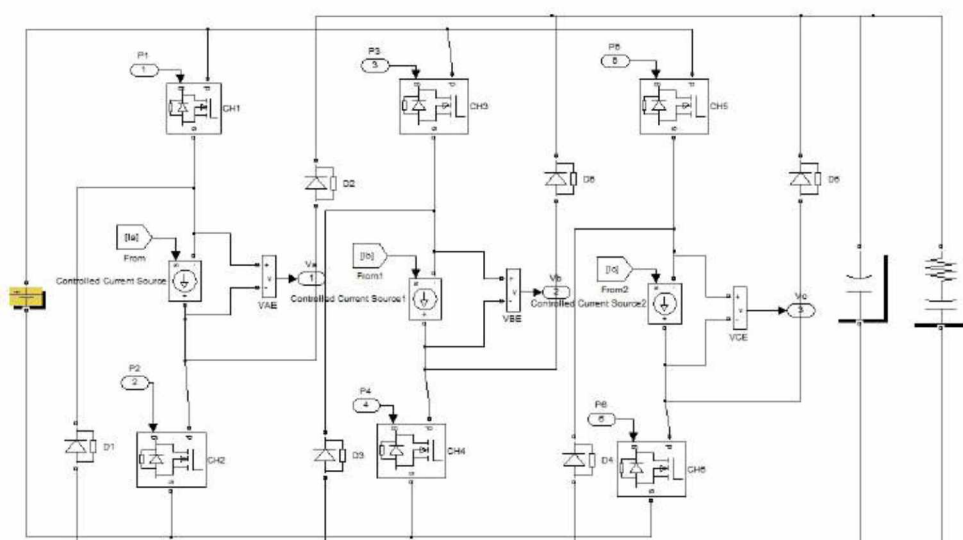


Fig.6.4 – Conversor *half-bridge* para gerador no SIMULINK.

Fecha-se assim um ciclo entre os dois blocos até aqui apresentados, pois a entrada de um dos blocos é a saída de outro, e vice versa.

O da Fig.6.4, têm também como entrada o trem de pulsos que fará o disparo dos MOSFET de cada bobina em seu momento adequado. Isso está mostrado na seção seguinte.

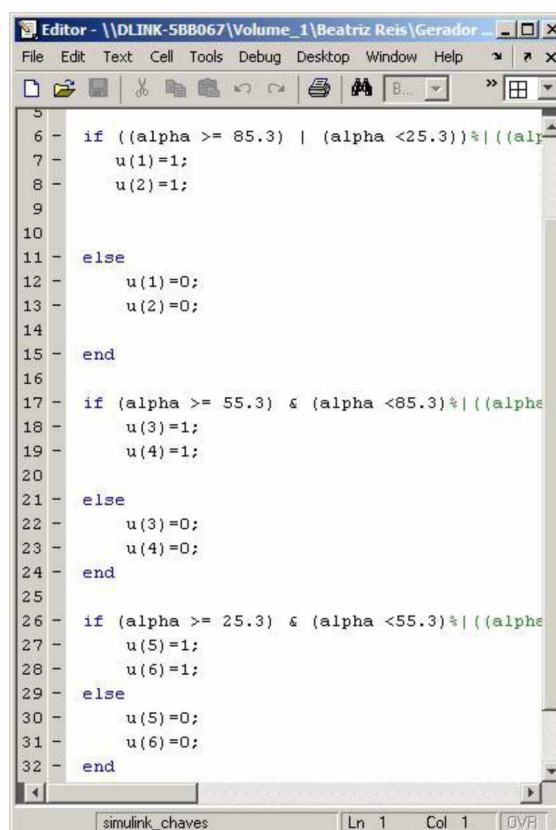
6.2.5 – Disparo das chaves

No acionamento de uma MRV é necessário conhecer a posição angular do rotor a todo instante para que a energização de cada fase seja feita nas posições corretas. Na seção 6.2.4

foi mostrado que a posição angular é um parâmetro de saída daquele bloco. Logo, criou-se mais um programa com extensão “.m” onde o parâmetro de entrada é a posição angular da máquina e os parâmetros de saída são os pulsos nas chaves de cada fase.

Esse programa está mostrado na Fig.6.5 para a MRV sendo acionada como gerador.

Nessa figura pode-se perceber que cada fase é energizada em momentos distintos uma da outra, dependendo do ângulo *alpha*. Como mostrado no capítulo de princípios de funcionamento (Cap. 2), no caso do gerador, o intuito é provocar a variação da relutância para que o fluxo na bobina varie e tensão seja induzida. Para isso, a fase deve ser energizada quando a bobina está praticamente alinhada e o conjugado mecânico externo provocará, mesmo assim, o desalinhamento e, conseqüentemente a indução.



```
5
6 - if ((alpha >= 85.3) | (alpha <25.3))*| ((alpha
7 -     u(1)=1;
8 -     u(2)=1;
9
10
11 - else
12 -     u(1)=0;
13 -     u(2)=0;
14
15 - end
16
17 - if (alpha >= 55.3) & (alpha <85.3))*| ((alpha
18 -     u(3)=1;
19 -     u(4)=1;
20
21 - else
22 -     u(3)=0;
23 -     u(4)=0;
24
25 - end
26 - if (alpha >= 25.3) & (alpha <55.3))*| ((alpha
27 -     u(5)=1;
28 -     u(6)=1;
29 - else
30 -     u(5)=0;
31 -     u(6)=0;
32 - end
```

Fig.6.5 – Disparos das chaves de uma MRV 6x4 (Gerador)

A Fig.6.5 mostra os ângulos de disparo de uma MRV 6x4. Para acionar outra configuração de MRV devem-se observar os valores ideais de disparo.

Falta ainda explicar a função *findu*, responsável por inserir o valor das indutâncias e das derivadas da indutância na solução da equação de estados. Logo, essa função terá como entrada o valor de corrente e de posição de cada fase. E como saída, os vetores m , m_2 , m_3 , $derivada$, $derivada_{12}$, $derivada_{13}$, os quais representam respectivamente a indutância própria da fase, a indutância mútua na segunda fase, a indutância mútua na terceira fase, a derivada da indutância própria, a derivada da indutância mútua da segunda fase e a derivada da indutância mútua da terceira fase. Assim, tem-se o *script* descrito no anexo C.

Agora que se sabe como as simulações funcionam, parte-se para a obtenção de resultados.

6.3 – Resultados de Simulação

Essa seção tem o objetivo de mostrar os resultados obtidos nas simulações da MRV estudada neste trabalho. Serão apresentados os resultados de quatro simulações por MRV. Assim, as duas primeiras mostrarão a MRV 6x4 acionada como gerador. Uma, sem a presença das indutâncias mútuas e, a outra, considerando as indutâncias mútuas.

As outras duas mostrarão a MRV 6x4 acionada como gerador. E, mais uma vez, a primeira estará sem a presença das indutâncias mútuas e, a segunda, considerando as indutâncias mútuas. Porém, nesse segundo tipo de teste, uma das bobinas dessa máquina será desligada para se avaliar a tolerância à falta de fase dessa máquina.

Os mesmos quatro ensaios serão feitos para a MRV 6x6.

6.3.1 – MRV acionada como Gerador

Nas simulações da MRV 6x4 como gerador, a tensão no barramento cc foi mantida a 59,2 V. Essa tensão foi determinada por testes. Essa foi a menor tensão capaz de gerar 1c.v (735,6W) de potência elétrica, quando esse gerador está na velocidade nominal de projeto (1200 rpm).

Cada fase da MRV fica ativada de $-4,7^\circ$ (próximo ao alinhamento) até $25,3^\circ$. Esses ângulos também foram determinados através de teste na própria simulação.

6.3.1.1 – Correntes na MRV acionada como Gerador

As figuras Fig.6.6 e Fig.6.7 mostram as correntes nas fases de uma MRV 6x4 acionada como gerador. A primeira figura (Fig.6.6) foi retirada da simulação que não considera as indutâncias mútuas e a segunda (Fig.6.7), retirada da simulação que considera as indutâncias mútuas. Cada pulso de corrente corresponde à corrente em uma das fase da MRV(6x4). É perceptível nesses gráficos que não há diferença nas correntes da simulação que considera as indutâncias mútuas e a simulação que não as considera.

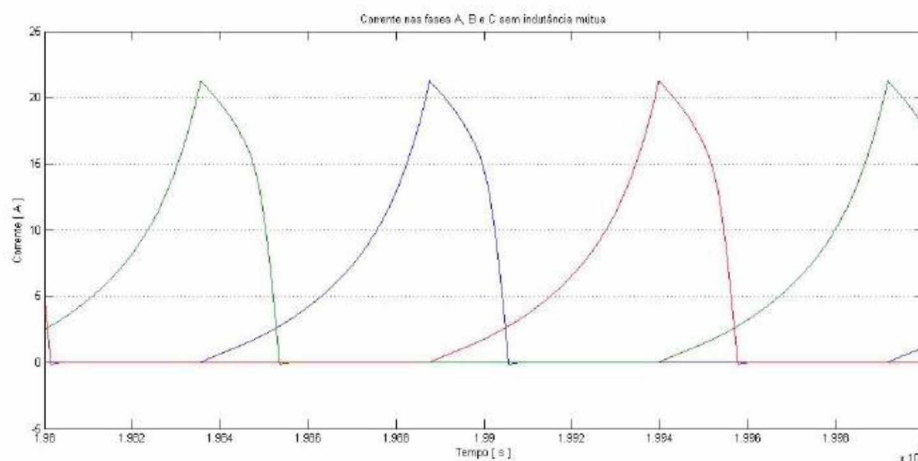


Fig.6.6 – Corrente na MRV 6x4 sem as mútuas (Gerador)

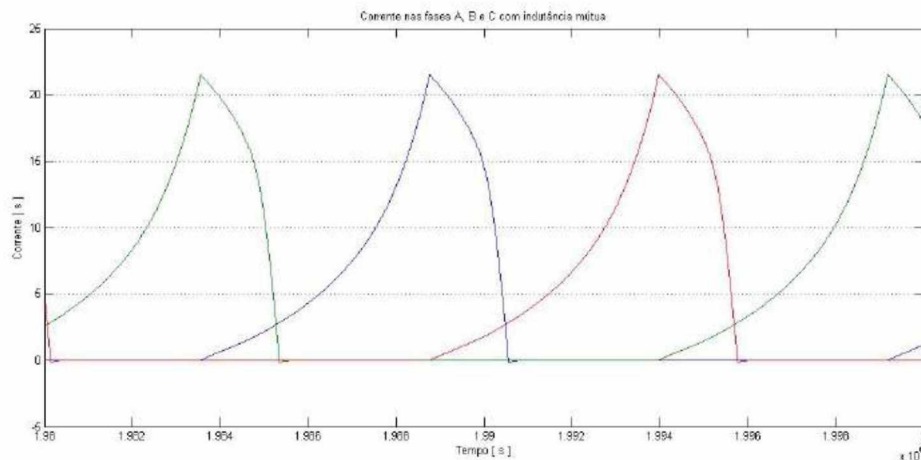


Fig.6.7 – Corrente na MRV 6x4 com as mútuas (Gerador)

As figuras Fig.6.8 e Fig.6.9 mostram as correntes nas fases de uma MRV 6x6 acionada como gerador. A primeira figura (Fig.6.8) foi retirada da simulação que não considera as indutâncias mútuas e a segunda (Fig.6.9), retirada da simulação que considera as indutâncias mútuas. Cada pulso de corrente corresponde à corrente em uma das bobinas da fase A da MRV 6x6. Na MRV 6x6 cada fase fica ativada de $-7,7^\circ$ (próximo ao alinhamento) até $16,3^\circ$.

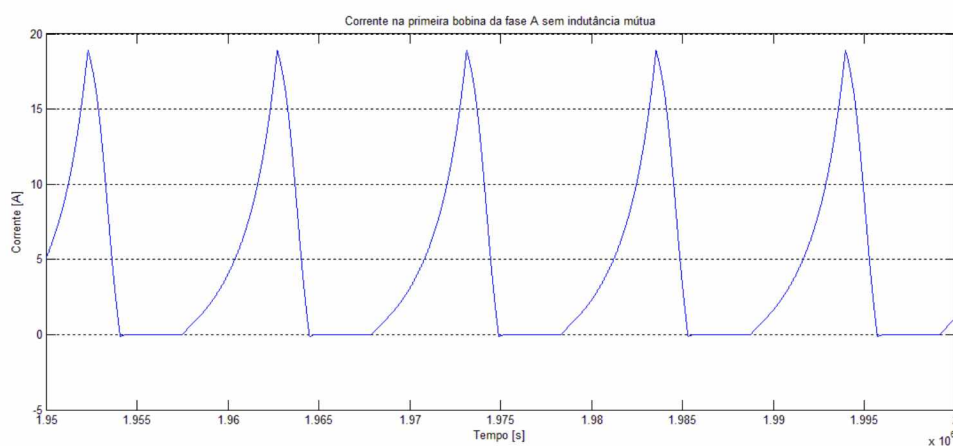


Fig.6.8 – Corrente na MRV 6x6 sem as mútuas (Gerador)

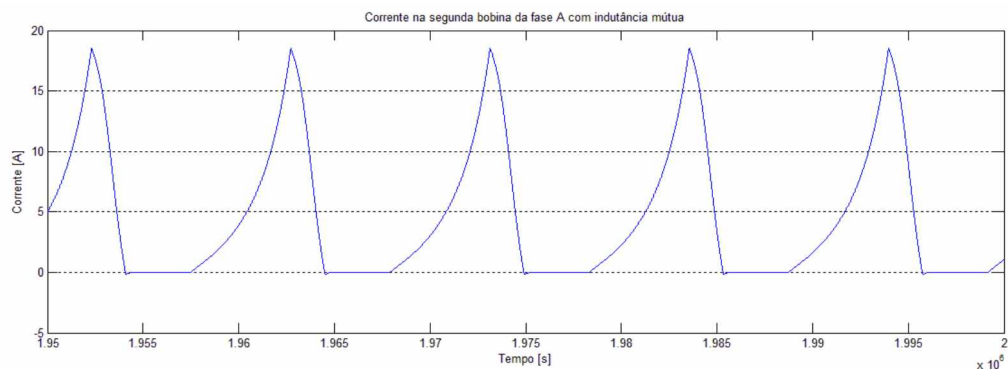


Fig.6.9 – Corrente na MRV 6x6 com as mútuas (Gerador)

O ensaio de simulação onde uma bobina estava desligada foi repetido para a MRV acionada como gerador.

As figuras Fig.6.10 e Fig.6.11 apresentam as formas de onda das correntes nas fases com as indutâncias mútuas e sem as indutâncias mútuas, respectivamente, para uma MRV 6x4. Mais uma vez, nenhuma mudança significativa pôde ser observada.

As figuras Fig.6.12 e Fig.6.13 apresentam as formas de onda das correntes nas fases com as indutâncias mútuas e sem as indutâncias mútuas, respectivamente, para uma MRV 6x6.

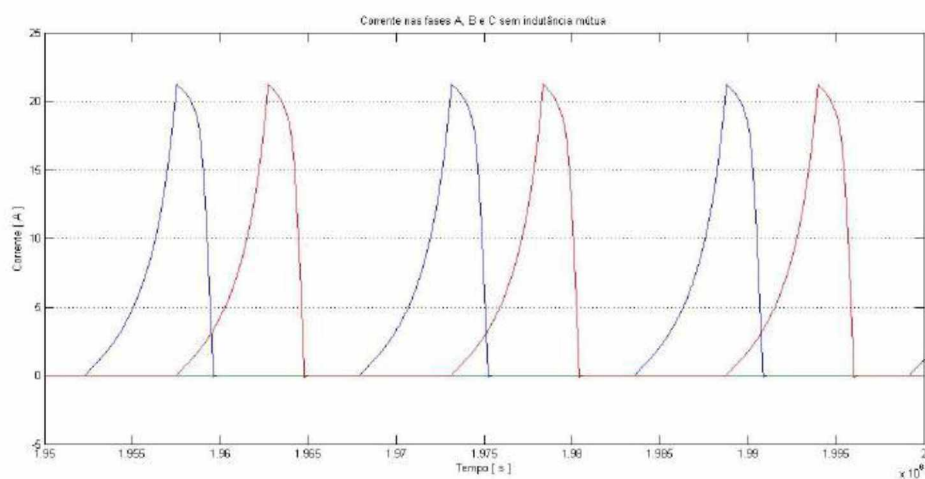


Fig.6.10 – Corrente na MRV 6x4 sem as mútuas (Gerador com uma fase desligada)

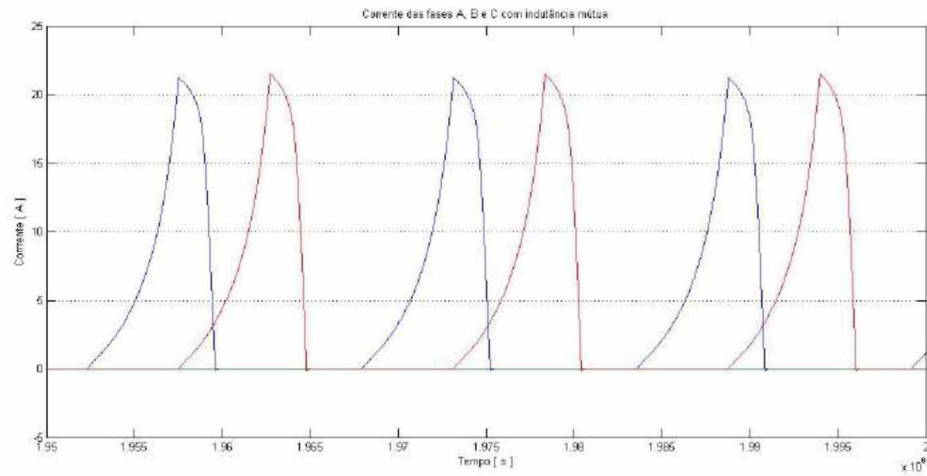


Fig.6.11 – Corrente na MRV 6x4 com as mútuas (Gerador com uma fase desligada)

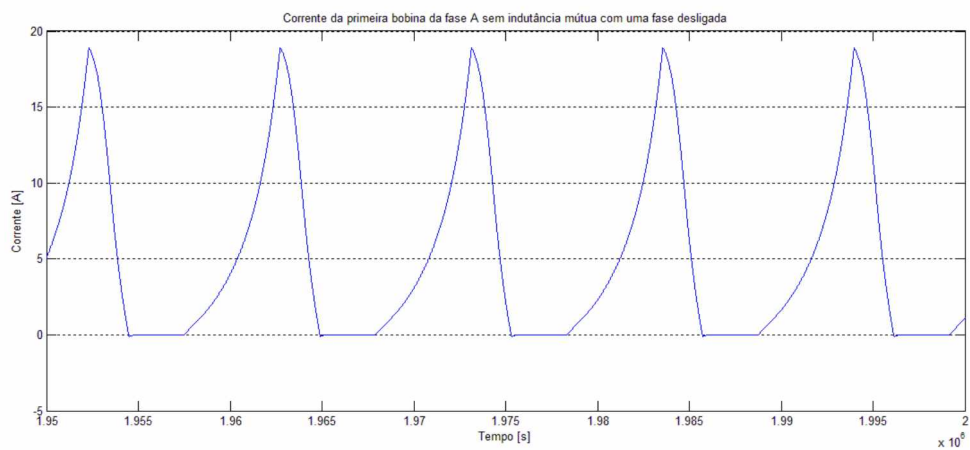


Fig.6.12 – Corrente na MRV 6x6 sem as mútuas (Gerador com uma fase desligada)

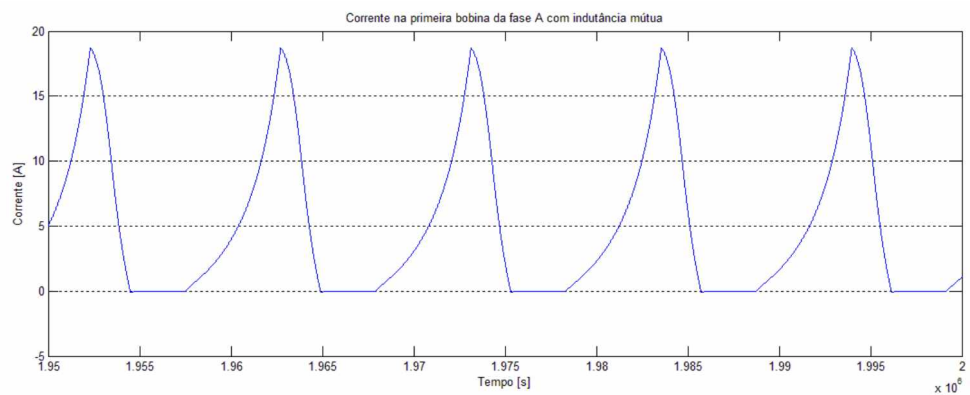


Fig.6.13 – Corrente na MRV 6x6 com as mútuas (Gerador com uma fase desligada)

6.3.1.2 – Tensões na MRV acionada como gerador

A Fig.6.14 mostra a tensão na fase A de uma MRV 6x4, simulada sem a presença das indutâncias mútuas. A Fig.6.15 mostra a tensão na fase A de uma MRV 6x4, simulada com a presença das indutâncias mútuas.

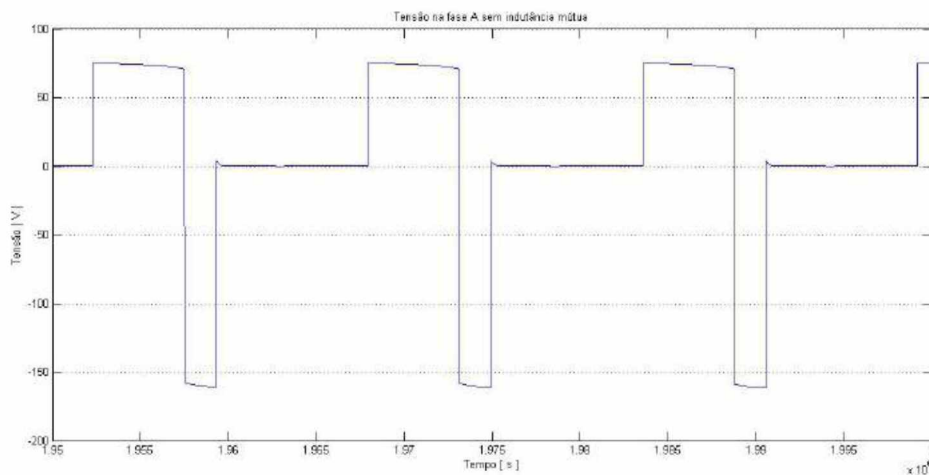


Fig.6.14 – Tensões na MRV 6x4 sem as mútuas (Gerador)

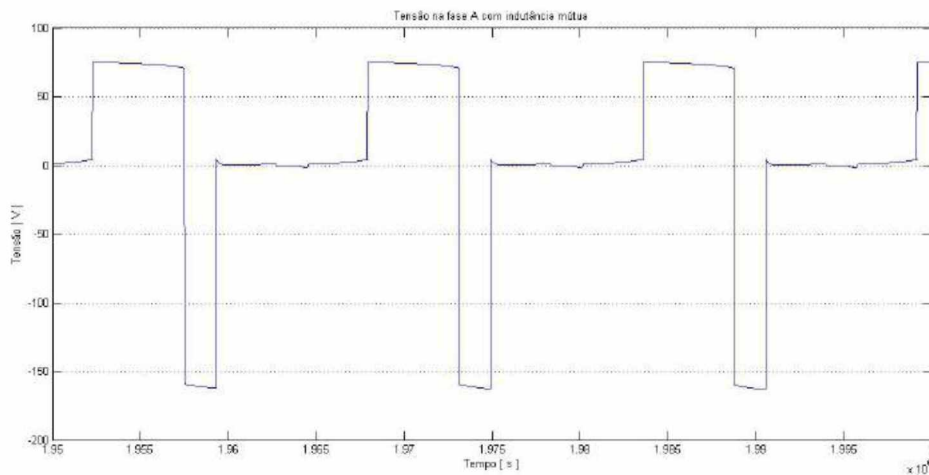


Fig.6.15 – Tensões na MRV 6x4 com as mútuas (Gerador)

Há uma diferença entre esses dois gráficos na etapa em que a fase deveria estar desligada. Pode-se observar a presença de ruídos e de mudança de comportamento no gráfico da simulação que considera as indutâncias mútuas (Fig.6.15).

A Fig.6.16 mostra a tensão na fase A de uma MRV 6x6, simulada sem a presença das indutâncias mútuas. A Fig.6.17 mostra a tensão na fase A de uma MRV 6x6, simulada com a presença das indutâncias mútuas.

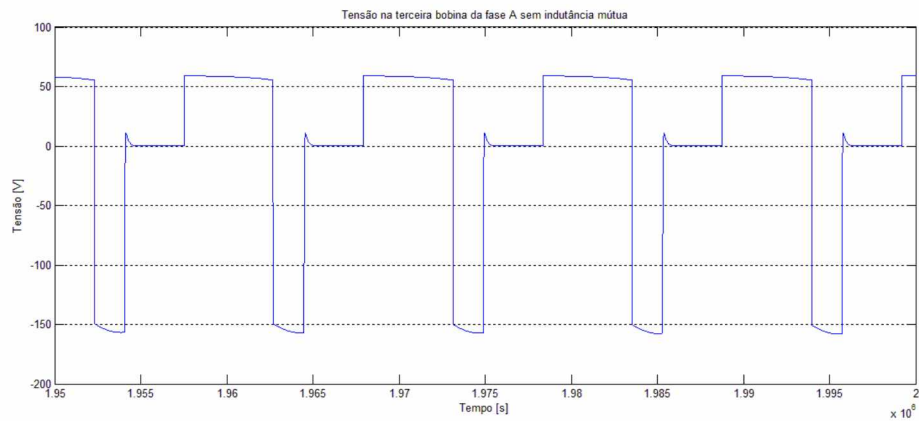


Fig.6.16 – Tensões na MRV 6x6 sem as mútuas (Gerador)

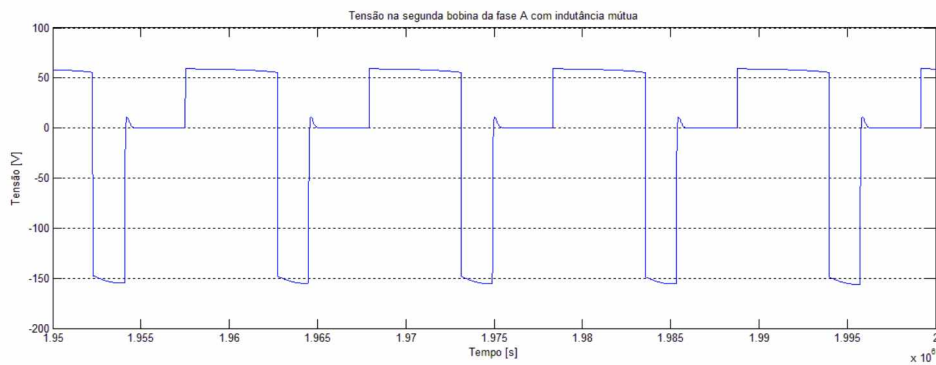
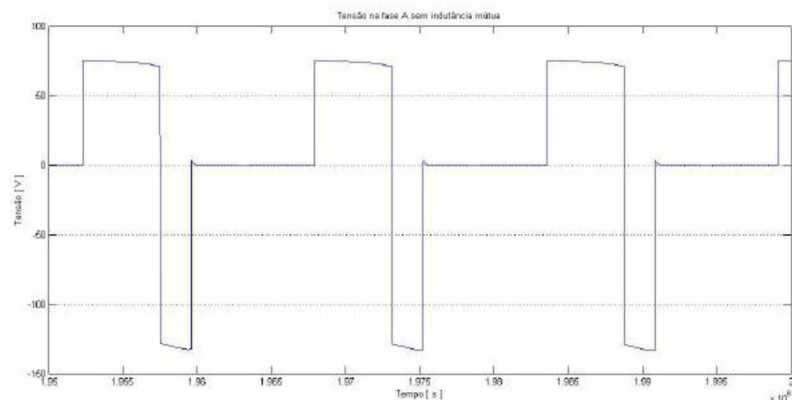


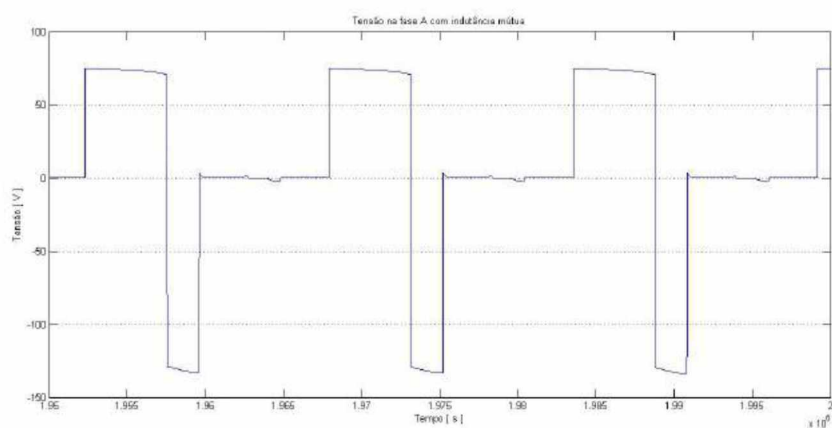
Fig.6.17 – Tensões na MRV 6x6 com as mútuas (Gerador)

Não há diferença perceptível entre esses dois gráficos.

As figuras Fig.6.18 e Fig.6.19 apresentam as mesmas tensões das figuras Fig.6.16 e Fig.6.17. Porém, com a presença de uma fase desligada.



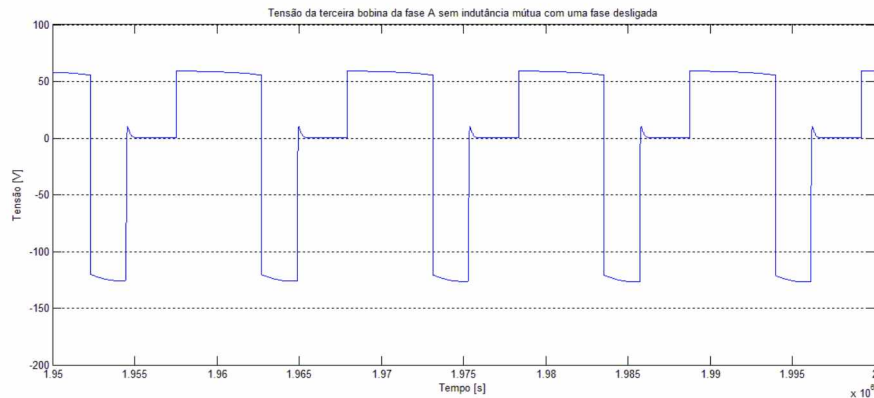
**Fig.6.18 – Tensões na MRV 6x4 sem as mútuas na fase que não está desligada
(Gerador com uma fase desligada)**



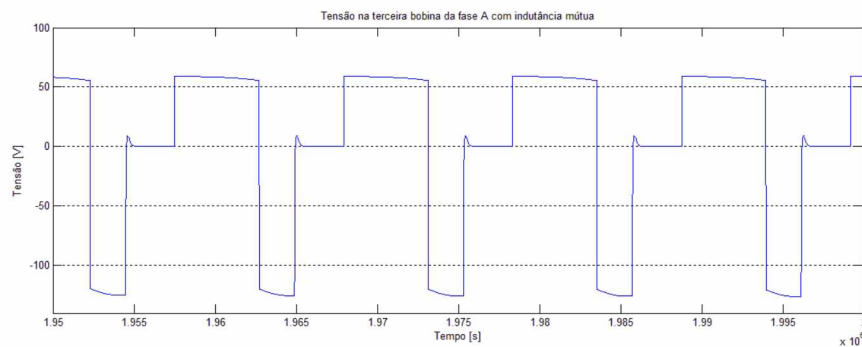
**Fig.6.19 – Tensões na MRV 6x4 com as mútuas na fase que não está desligada
(Gerador com uma fase desligada)**

Pode-se perceber que não há mudanças significativas em ambos os gráficos. Ou seja, as fases que não estão desativadas, continuam com comportamento normal nesse tipo de teste. Isso acontece nas duas simulações do GRV 6x4: sem mútua e com mútua.

A mesma conclusão pode ser observada nas Fig. 6.20 e 6.21. Porém, para o GRV 6x6.



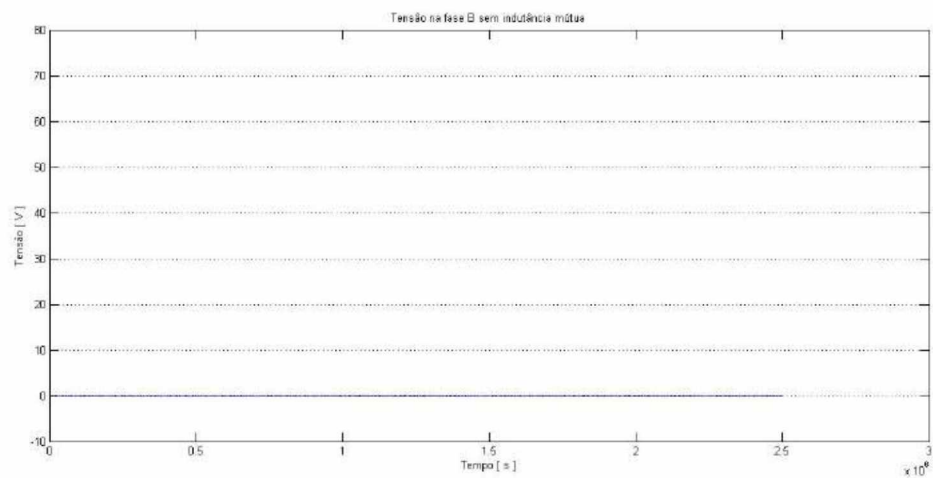
**Fig.6.20 – Tensões na MRV 6x6 sem as mútuas na fase que não está desligada
(Gerador com uma fase desligada)**



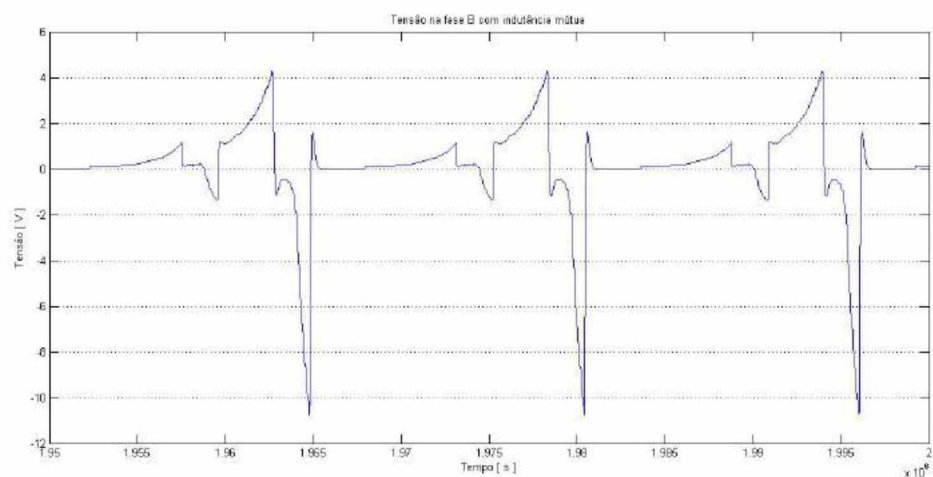
**Fig.6.21 – Tensões na MRV 6x6 com as mútuas na fase que não está desligada
(Gerador com uma fase desligada)**

As figuras Fig.6.22 e Fig.6.23 apresentam as tensões na fase que está queimada. A Fig.6.22 foi retirada da simulação que não considera as indutâncias mútuas e a Fig.6.23 foi retirada da simulação que as considera. Ambas para o GRV 6x4.

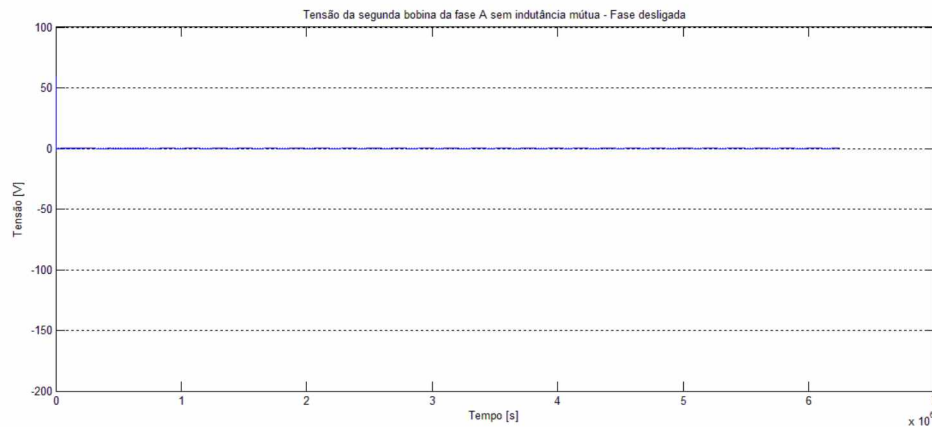
O mesmo teste foi repetido para o GRV 6x6 e os resultados estão expostos nas Fig. 6.24 e Fig.6.25.



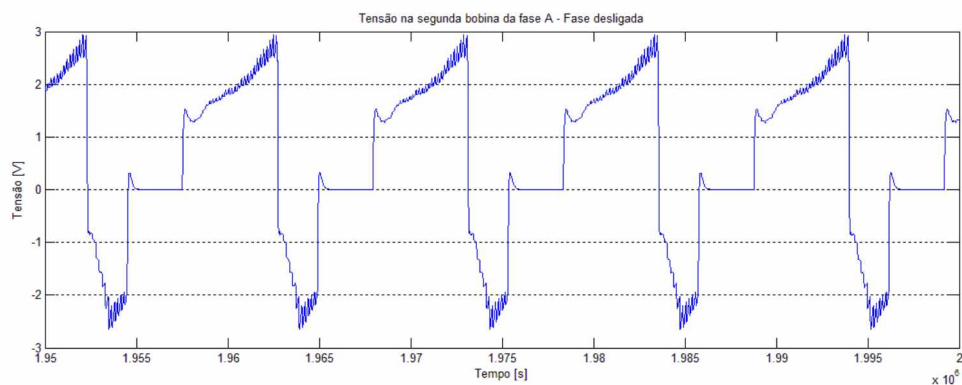
**Fig.6.22 – Tensões na MRV 6x4 sem as mútuas na fase que está queimada
(Gerador com uma fase desligada)**



**Fig.6.23 – Tensões na MRV 6x4 com as mútuas na fase que está queimada
(Gerador com uma fase desligada)**



**Fig.6.24 – Tensões na MRV 6x6 sem as mútuas na fase que está queimada
(Gerador com uma fase desligada)**



**Fig.6.25 – Tensões na MRV 6x6 com as mútuas na fase que está queimada
(Gerador com uma fase desligada)**

Observa-se que nas simulações onde não há a presença das mútuas (Fig. 6.22 e Fig.6.24), para as duas configurações de GRV (6x4 e 6x6), a tensão na fase desativada é zero.

Porém, nas simulações onde há a presença da mútuas (Fig.6.23 e Fig. 6.25), a tensão na fase queimada não é zero. Pode-se observar que: no GRV 6x4, essa tensão ultrapassa 10V e no GRV 6x6, ultrapassa 3V de pico.

6.4 – Rendimento

Em todos os testes de rendimento executados nesse trabalho, manteve-se constante a potência de saída (736,5 VA). Nas duas simulações do GRV 6x4 não houve mudança no rendimento, permanecendo em torno de 80%. Na simulação do GRV 6x6 que não considera as indutâncias mútuas o rendimento também se manteve em torno 80%. No entanto, nessa mesma configuração, quando se considera as indutâncias mútuas o rendimento atingi aproximadamente 85,7%.

6.5 – Conclusão

Sobre a inclusão das indutâncias mútuas na modelagem matemática no GRV 6x4, observou-se que: em funcionamento normal, não houve influência significativa. Esse fato se deve à maneira que esse gerador foi acionado nesse trabalho, onde, cada bobina que constitui uma fase ficou ativa em momentos distintos em relação às outras duas bobinas. Ou seja, quando a fase A estava ativa, as fases B e C estavam inativas. Não havendo concomitância significativa de acionamento.

Não houve diferença significativa no que tange o rendimento no GRV 6x4. As duas simulações (considerando as mútuas e desprezando as mútuas) obtiveram aproximadamente 80%.

Porém, quando se desativou uma das fases no GRV 6x4, observou-se a mudança significativa na tensão induzida da fase desativada, quando se considera as indutâncias mútuas. Ficando evidente que a presença das mútuas poderá se manifestar mais fortemente caso a máquina seja acionada de maneira diferente da apresentada aqui.

No GRV 6x6 algumas constatações foram completamente diferentes. Quando se desativou uma das bobinas da fase no GRV 6x6, novamente se observou a mudança

significativa na tensão induzida nessa bobina desativada, quando se considera as indutâncias mútuas. Entretanto, no acionamento normal, onde todas das bobinas estavam ativas, o GRV 6x6 apresentou um rendimento 5,7% maior na modelagem que considerou as mútuas. Vale salientar, que nessa configuração de máquina todas as bobinas são acionadas juntas e, naturalmente, esse fato deve ter contribuído para o aumento da importância das indutâncias mútuas.

Parte-se assim, para a próxima etapa desse trabalho, que será apresentado no próximo capítulo. Pretende-se nessa nova etapa propor modificações para o projeto apresentado nos capítulos anteriores. Essas modificações deverão visar o aumento da saturação magnética e o aumento do valor das indutâncias mútuas com a finalidade de se conseguir um acréscimo no rendimento desse conversor.

CAPÍTULO 7

PROPOSTA DE MELHORIAS NO PROJETO

ETAPA DE INOVAÇÕES

7.1 – Introdução

No capítulo anterior (Cap.6 – Simulações) concluiu-se que, em determinadas situações, a inclusão das indutâncias mútuas na modelagem de um Gerador a Relutância Variável (GRV) poderá causar mudanças significativas em outras variáveis de projeto. Mais especificamente, observou-se que no Gerador 6x6 – onde bobinas defasadas geometricamente são acionadas ao mesmo tempo – houve um aumento de rendimento de aproximadamente 5,7% quando as indutâncias mútuas foram consideradas.

Por conseguinte, surgiu a necessidade de se investigar as causas desse aumento de rendimento e, em seguida, fundamentado nessas investigações, propor melhorias para o projeto.

Nesse sentido, esse capítulo tem como objetivo apresentar uma sugestão de modificação no projeto tradicional de um GRV 6x6 e de um GRV 6x4. Espera-se que essa modificação provoque o aumento da saturação magnética, o aumento das indutâncias mutuas entre suas bobinas e, conseqüentemente, eleve o rendimento desses conversores.

7.2 – Estudo do rendimento de GRV

O estudo dos conversores elétricos com foco no aumento do rendimento, tem se tornado cada dia mais importante. Isso acontece, principalmente, devido a escassez de recursos tradicionais para a geração de energia e, também, devido à necessidade de se evitar o desperdício no consumo.

Entende-se como rendimento (η), a relação existente entre a potência de saída e a potência de entrada do conversor em estudo. Onde, no caso do GRV, tem-se potência elétrica (P_{ein}) de excitação e potência mecânica (P_m) - na forma de conjugado e velocidade mecânica - como potências de entrada. Na saída, tem-se potência elétrica (P_{eout}) entregue à carga. A equação (7.1) exprime matematicamente esse conceito.

$$\eta = \frac{P_{eout}}{(P_{ein} + P_m)} \quad (7.1)$$

Como dito nos capítulos anteriores, este trabalho tem o objetivo de estudar Geradores com potência nominal de 735,6 VA (P_{eout}). Sendo assim, nos testes para se determinar o máximo rendimento dos dois GRV em estudo (6x6 e 6x4), manteve-se como constante a potência de saída. As variáveis estudadas foram: ângulo de disparo das chaves, saturação magnética, as indutâncias mútuas e valor do capacitor de carga.

7.2.1 – Ângulo de disparo

O ângulo de disparo é a variável que define se a máquina a relutância será acionada como motor ou como gerador. Saber o exato momento de energizar e de desligar as chaves que acionam as fases, é de extrema importância para se obter um bom rendimento.

No acionamento do Gerador a Relutância Variável (GRV), a fase deve ser energizada, prioritariamente, nas posições em que o dente do rotor está desalinhando (ou seja, na derivada negativa da indutância própria da fase - conforme apresentado no Cap.2). Porém, cada configuração de GRV possui ângulos ótimos para ser acionado.

No caso do GRV 6x6 em estudo, realizaram-se testes com a máquina, onde vários ângulos e várias janelas de condução foram experimentados. Lembrando que: nesse trabalho adotou-se a posição de completo alinhamento como ângulo zero, e que o GRV 6x6 tem um perfil de indutância de 60°. Concluiu-se que, para se obter o melhor rendimento possível, essa

máquina deverá ser excitada $4,7^\circ$ antes do completo alinhamento até $19,3^\circ$ (período de excitação). De $19,3^\circ$ até $55,3^\circ$ será o período de entrega de energia à carga (período de geração).

Os mesmos testes foram feitos para o GRV 6x4; concluiu-se que: para se obter o melhor rendimento possível, a máquina deverá ser excitada $4,7^\circ$ antes do completo alinhamento até $25,3^\circ$ (período de excitação). De $25,3^\circ$ até $85,3^\circ$ será o período de entrega de energia à carga (período de geração). Relembrando que o perfil de indutância das máquinas 6x4 é de 90° .

7.3 – Novas Etapas no Projeto

Daqui por diante esse trabalho mostrará a inserção e de novas etapas no desenvolvimento de projeto de Gerador a Relutância Variável.

7.3.1 – Estudo da Saturação magnética

O novo projeto terá como foco garantir que o GRV esteja o mais saturado possível durante o período de excitação. Fazendo isso, garante-se a diminuição da variação do fluxo. Como foi mostrado no capítulo 3 (modelagem matemática), o conjugado eletromagnético é diretamente proporcional à variação do fluxo. Logo; de maneira ideal, se a máquina está saturada e não há variação de fluxo, não haverá conjugado contrário ao movimento (conjugado eletromagnético).

Para garantir essa saturação, inicia-se o estudo da novas geometrias usando os ângulos ótimos das máquinas padrão. Tem-se assim como ponto mais crítico (ponto mais difícil de saturar, pois a máquina está desalinhada) o ângulo de $19,3^\circ$ para o GRV 6x6. E, para o GRV 6x4, o ponto mais crítico será o ângulo de $25,3^\circ$.

Sendo assim, adotou-se nesse trabalho a seguinte metodologia: de posse do projeto tradicional exposto nos capítulos anteriores e usando novamente o FEMM – software de elementos finitos – as máquinas foram travadas em seus ângulos críticos e a largura dos dentes do rotor e estator foram sendo reduzidas até que o material saturasse. A corrente adotada como referência foi a corrente de projeto apresentada no Cap.4 (10A – suportada pelo fio 15AWG).

Finalmente, chegou-se aos perfis de máquina apresentados nas Fig.7.1 (MRV 6x6) e Fig.7.2 (MRV 6x4). Essas máquinas serão denominadas nesse trabalho como máquinas modificadas e apresentam uma diminuição de 5,94 mm na largura do dente em relação à máquina padrão.

Espera-se que essas máquinas apresentem maior rendimento por trabalhar em regime de saturação durante toda a excitação.

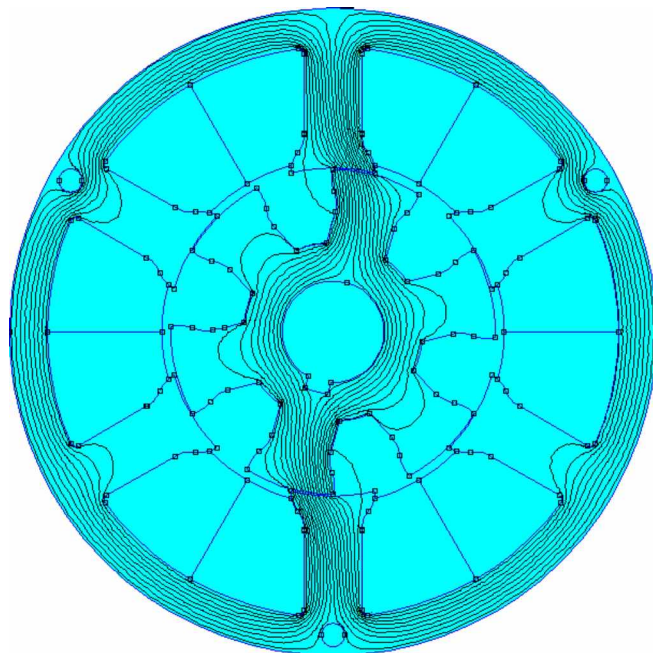


Fig.7.1- Máquina 6x6 modificada para se obter a saturação na excitação

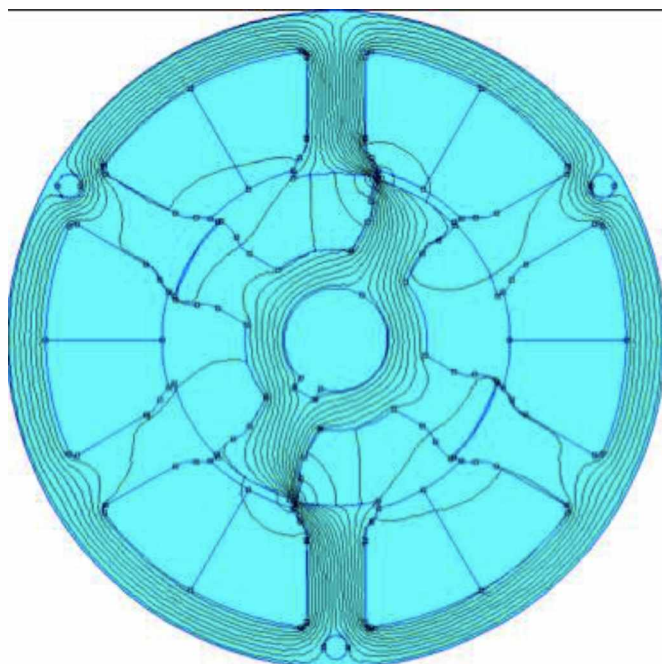
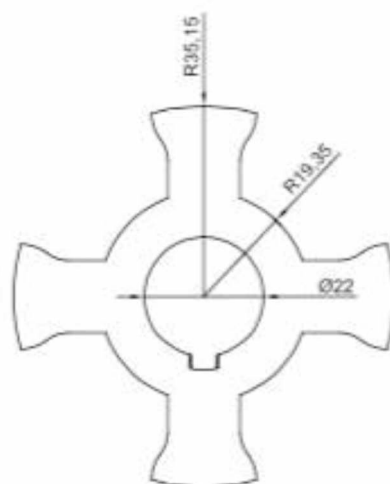


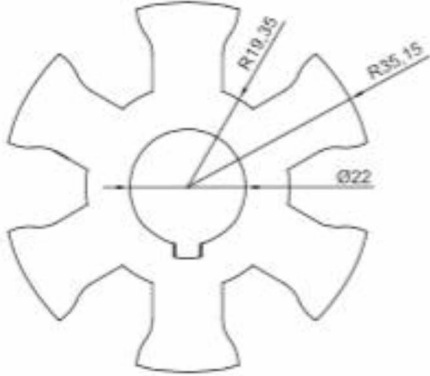
Fig.7.2- Máquina 6x4 modificada para se obter a saturação na excitação

Nas páginas seguintes estão os desenhos das novas máquinas. Esses desenhos podem ser comparados com os desenhos da máquina padrão das páginas 45, 46 e 47 do capítulo 4. Calculando a área dessas lâminas, pode-se perceber que: no rotor de 4 dentes houve uma diminuição de 8%, no rotor de 6 dentes houve uma diminuição de 18% e no estator houve uma diminuição de 24,4%.

UFU UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA	
TESE DE DOUTORADO	e-mail
NOME: RENATO JAYME DIAS	DATA: -/-/-
LÂMINAS DA MRV 6X4	ORIENTADOR RÚBRICA:



UFU UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA	
TESE DE DOUTORADO	
NOME: RENATO JAYME DIAS	
LÂMINAS DA MRV 6X4	
e-mail	
DATA: -/-/-	
ORIENTADOR	RÚBRICA:

	
UFU UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA	
TESE DE DOUTORADO	e-mail
NOME: RENATO JAYME DIAS	DATA: -/-/-
LÂMINAS DA MRV 6X6	ORIENTADOR RÚBRICA:

De posse das novas geometrias, pode-se seguir fazendo uma comparação entre Máquinas Padrão (MP) e Máquinas Modificada (MM). A figura 7.3 ilustra o fluxo magnético na configuração 6x4 Padrão e Modificada.

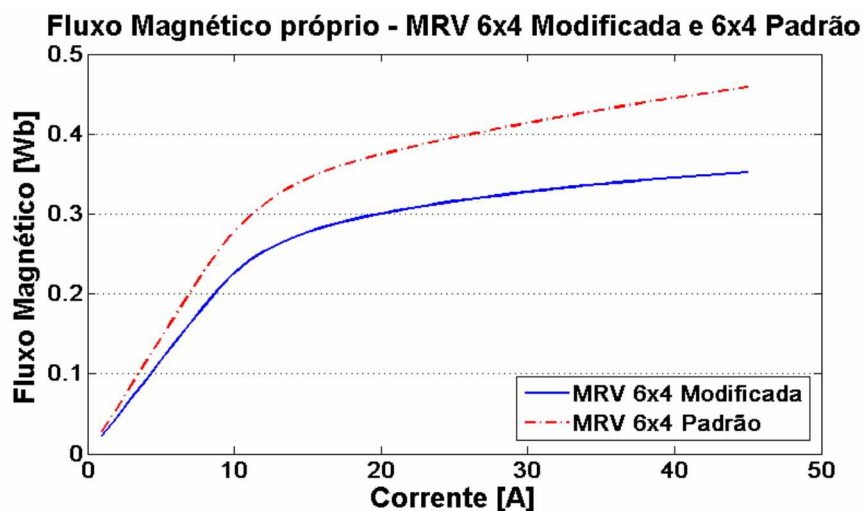


Fig.7.3- Fluxos magnéticos próprios no GRV 6x4

Nesse ensaio o GRV 6x4 foi travado na posição de 25°. Pode-se perceber que a Máquina Modificada satura, aproximadamente, com 10A; enquanto a máquina padrão satura em, aproximadamente, 15,0A. Nota-se, pois, que a nova configuração predispõe uma saturação magnética facilitada pela condição geométrica criada.

No caso do GRV 6x6 também ocorre o mesmo, como pode ser visto na Figura 7.4. As curvas representam o fluxo quando as máquinas estão travadas na posição de 19,3°. Pode-se perceber que a Máquina Modificada satura, aproximadamente, com 10A; enquanto a máquina Padrão satura em, aproximadamente, 17A.

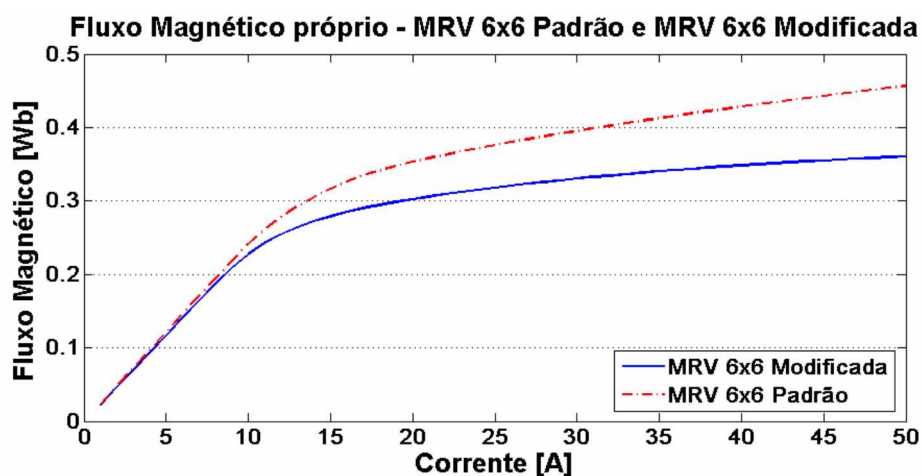


Fig.7.4- Fluxos magnéticos próprios no GRV 6x6

Conclui-se que a modificação feita na geometria das máquinas atingiu o efeito pretendido de aumentar a saturação magnética do material no rotor e estator. Esses efeitos foram observados, de maneira ainda mais evidente, nos outros ângulos da excitação.

7.3.2 – Indutâncias Mútuas

Como apresentado no capítulo anterior, o fato de se considerar as indutâncias mútuas na modelagem do GRV 6x6 tradicional forneceu resultados significativamente diferentes em relação ao rendimento (5,7% maior).

Sendo assim, pretendeu-se com as mudanças propostas no item anterior (7.3.2) projetar uma máquina que tenha valores de indutância mútua maiores que os valores do GRV padrão.

Na Fig.7.5 nota-se que o GRV 6x4 Modificado sofreu aumento das indutâncias mútuas.

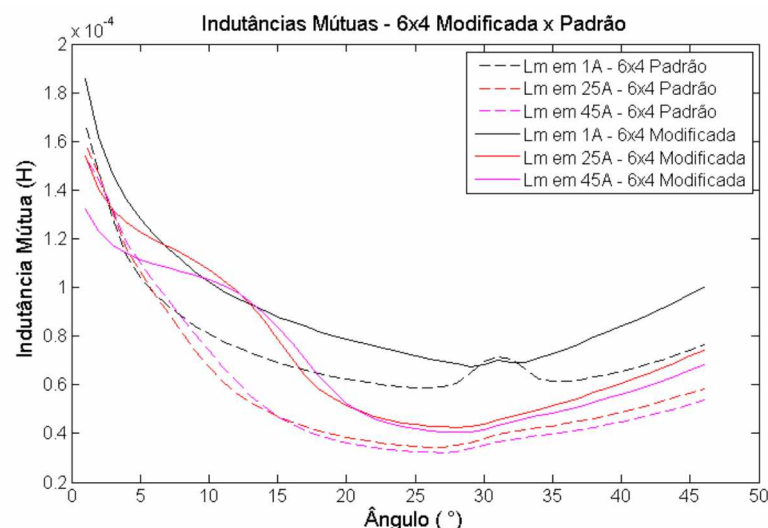


Fig.7.5 - Comparação entre as indutâncias mútuas do GRV Padrão e o GRV Modificado (6x4)

Porém, não se espera que esse aumento das indutâncias mútuas no GRV 6x4 colabore com a saturação magnética de forma significativa posto que, como dito anteriormente, as bobinas não são acionadas concomitantemente.

A Fig. 7.6 mostra uma comparação entre os valores de indutância mútua da Máquina Modificada (da Fig. 7.1) e a Máquina Padrão (projetada nos capítulos anteriores) do GRV 6x6.

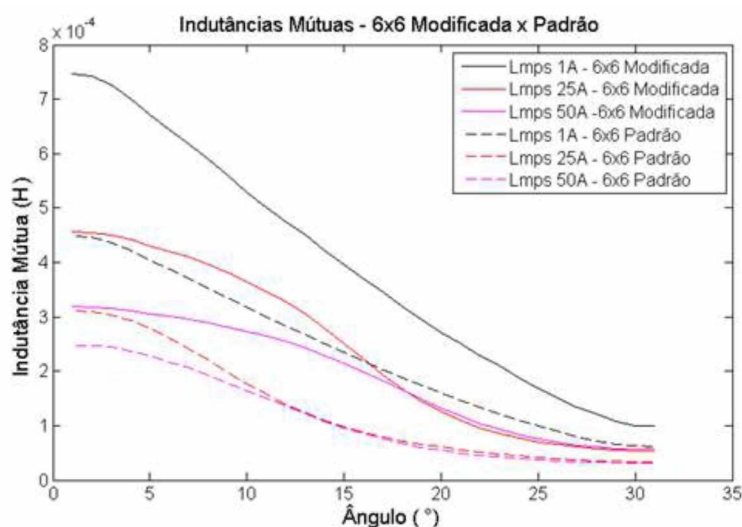


Fig.7.6 - Comparação entre as indutâncias mútuas do GRV Padrão e o GRV Modificado (6x6)

Pode-se perceber nessa figura (Fig. 7.6) que, como era desejado, as indutâncias mútuas para o novo perfil da máquina são maiores que as indutâncias mútuas da máquina padrão. Esse aumento das indutâncias mútuas contribuirá para a saturação da máquina e para o aumento do rendimento.

7.3.3 – Capacitor de Carga

O capacitor de carga é usado na saída do conversor *Half-bridge* com o objetivo principal de estabilizar (deixar constante) a tensão na carga. O valor do capacitor de saída influencia no valor da impedância do circuito e, naturalmente, influenciará também o rendimento do sistema.

Sendo assim, deve-se realizar um estudo para se determinar o valor ideal de capacitância para se obter o máximo rendimento.

Para as duas máquinas em estudo (6x4 e 6x6) e nos dois projetos (padrão e modificado) encontrou-se, através das simulações, o mesmo valor: $2 \cdot 10^{-3}(F)$.

7.4 – Simulação do Novo Projeto de GRV

Uma vez que se tem o projeto das lâminas das novas máquinas, lançou-se mão do FEMM e do MATLAB para simular esses conversores, repetindo o que foi feito no Capítulo 5 (terceiro passo do projeto) e no Capítulo 6 (quarto passo do projeto). Os resultados são diretamente comparados com as configurações 6x4 e 6x6 da Máquina Padrão.

Deve-se, primeiramente, identificar por testes quais são os ângulos de máximo rendimento dos novos conversores. Espera-se que eles sejam diferentes dos ângulos usados nas máquinas padrão.

Lembrando que: cada simulação que será aqui apresentada, partiu da premissa de se garantir uma potência de 735,6 VA na saída do conversor. Além disso, esses testes de simulação foram realizados a 1200 rpm.

7.4.1 – Simulação do Novo Projeto de GRV 6x4

As simulações mostraram que o período de excitação do novo conversor deve começar $10,7^\circ$ antes do completo alinhamento até $19,3^\circ$ (período de excitação). De $19,3^\circ$ até $79,3^\circ$ será o período de entrega de energia à carga (período de geração).

A Figura 7.7 mostra a comparação entre as tensões na fonte no GRV 6x4 nas geometrias Modificada e Padrão. Nota-se que a tensão é maior na Máquina Modificada devido ao maior número de espiras dessa configuração.

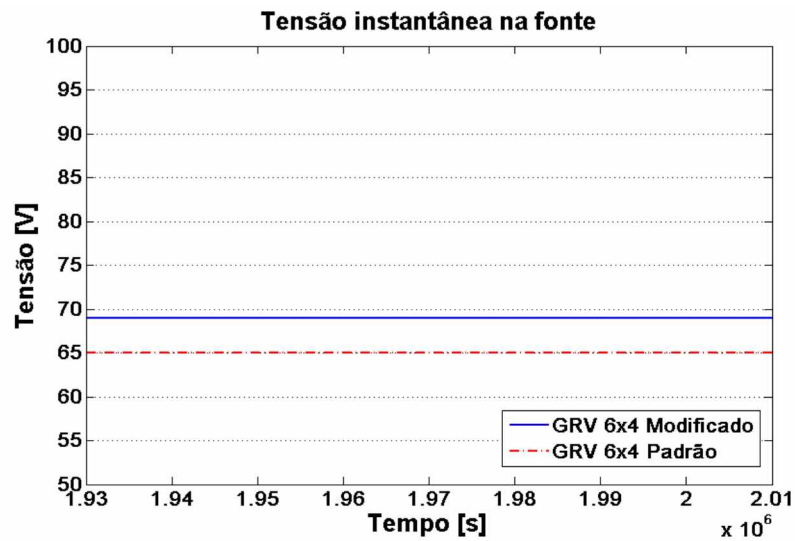


Fig.7.7 - Comparação entre as tensões na fonte do GRV Padrão e do GRV Modificado 6x4

A seguir, na Figura 7.8 são ilustradas as correntes instantâneas na fonte do GRV Padrão e Modificado. O valor da corrente requerida na fonte do GRV 6x4 Padrão é maior do que a do GRV 6x4 Modificado. No GRV 6x4 Modificado a corrente atinge valores de pico de aproximadamente 15A, enquanto na geometria Padrão esse valor é de aproximadamente 19A.

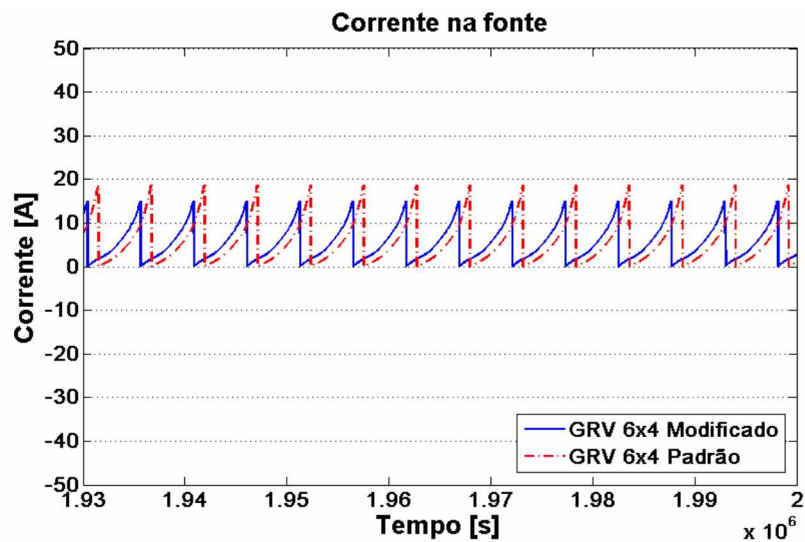


Fig.7.8 - Comparação entre as correntes na fonte do GRV Padrão e do GRV Modificado 6x4

Na Figura 7.9 são plotadas as tensões na fase A do GRV 6x4 Padrão e Modificado. Como dito anteriormente, a tensão no GRV modificado é maior devido ao maior número de bobinas nessa configuração. O valor da diferença entre as tensões de excitação é de aproximadamente 5V, enquanto que a tensão gerada pelas duas máquinas não apresenta diferença significativa.

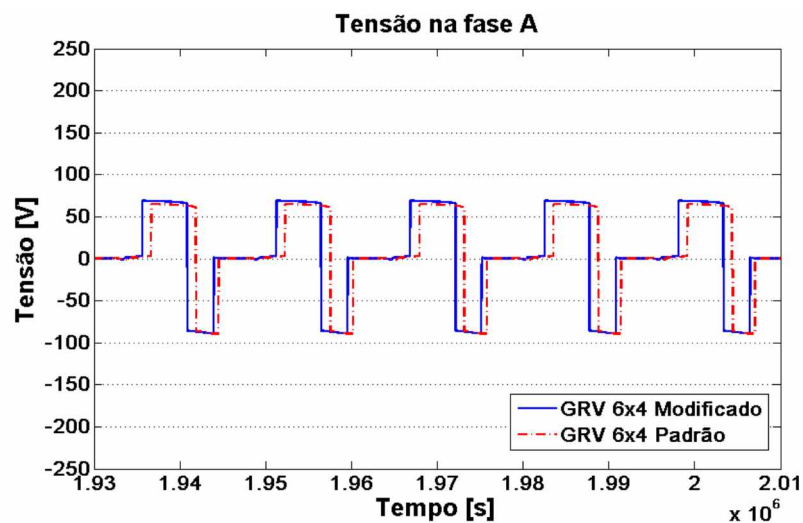


Fig.7.9 - Comparação entre as tensões na fase A do GRV Padrão e do GRV Modificado 6x4

A Figura 7.10 mostra as correntes na fase A do GRV 6x4 Padrão e GRV 6x4 Modificado. Como era esperado, as correntes na fase são menores na geometria Modificada.

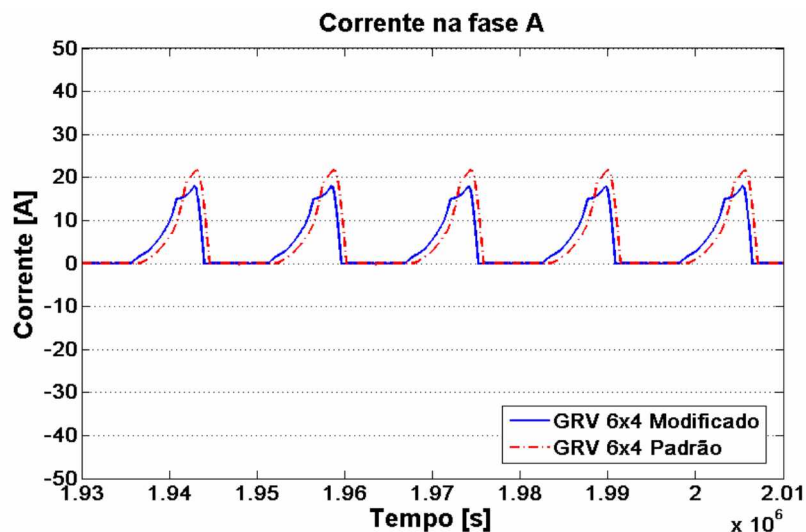


Fig.7.10 - Comparação entre as correntes na fase A do GRV Padrão e do GRV Modificado 6x4

Para que a comparação entre os rendimentos seja coerente, é necessário que as máquinas Modificada e Padrão produzam a mesma potência elétrica de saída, estipulada pelo projeto do presente trabalho, de 735,6 VA. Sendo assim, certifica-se na figura 7.11. que as máquinas entregam a mesma potência para a carga.

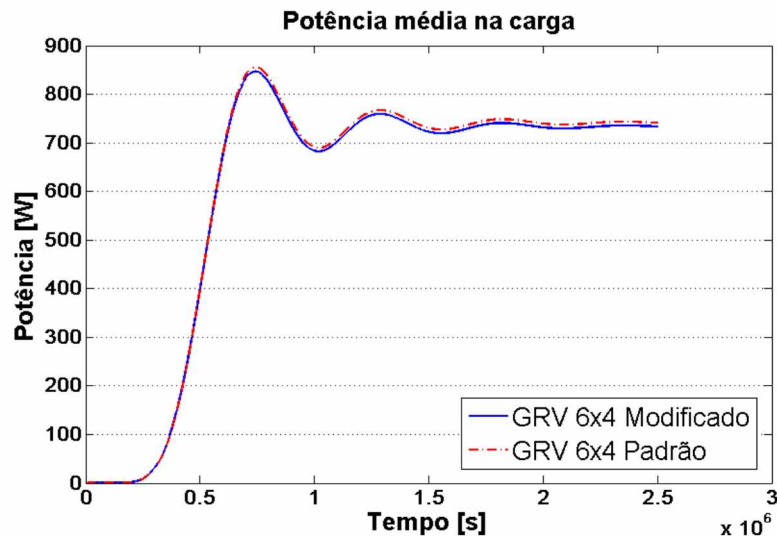


Fig.7.11 - Potência elétrica média na carga no GRV 6x4

A partir dessa constatação segue-se para a comparação da potência elétrica de entrada, ilustrada na figura 7.12. A potência elétrica na fonte também é a mesma para as duas geometrias, visto que apesar de a tensão na fonte (Figura 7.7) ser maior no GRV 6x4 Modificado, a corrente na fonte (Figura 7.8) desta máquina é menor. Isso acaba por estabelecer uma equivalência na potência elétrica de entrada das duas máquinas.

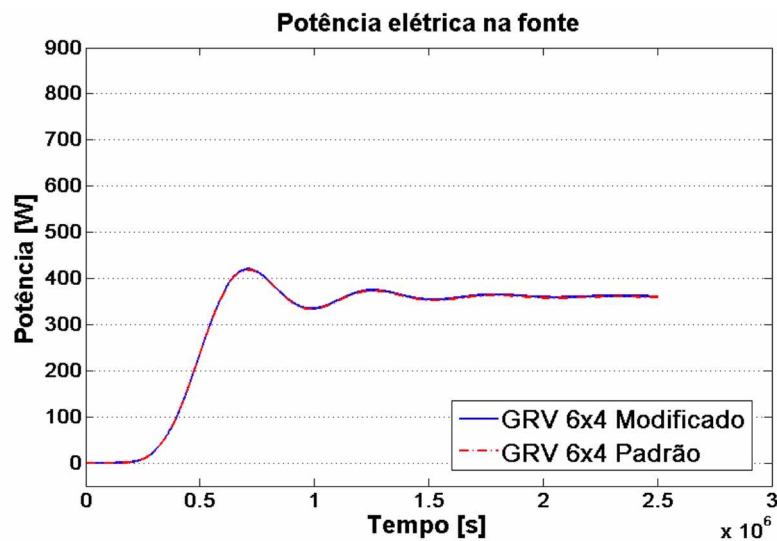


Fig.7.12 - Potência elétrica na fonte do GRV 6x4

Como última variável de análise para estudo de rendimento apresenta-se o conjugado mecânico, cujo produto pela velocidade nominal da máquina de 1200 rpm (125,664 rad/s) resulta na potência mecânica de entrada. Assim, o efeito da saturação magnética busca também reduzir o conjugado mecânico da máquina.

A Figura 7.13 representa o conjugado das geometrias Modificada e Padrão do GRV 6x4.

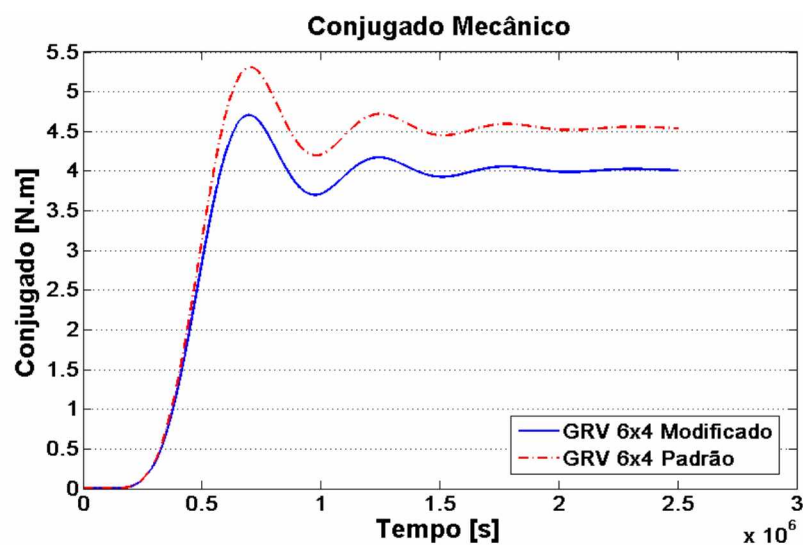


Fig.7.16 - Conjugado mecânico do GRV 6x4

Como esperado, a Máquina Modificada apresenta menor conjugado de carga, o que significa que a potência mecânica de entrada é reduzida quando comparada com a Máquina Padrão. Isso se deve à redução de conjugado contrário ao movimento realizado pelo rotor; redução essa, causada pela saturação magnética na excitação.

O GRV 6x4 Modificado apresentou a mesma potência elétrica de saída e a mesma potência elétrica na fonte que o GRV 6x4 Padrão. No entanto, a potência mecânica foi menor na nova geometria, o que resultou em um aumento de rendimento de aproximadamente 6%, como pode ser visto na Figura 7.17.

Na Máquina Modificada, o rendimento atinge aproximadamente 91%, enquanto na Máquina Padrão, em torno de 85%.

Outra comparação necessária, uma vez que se ressalta a presença das indutâncias mútuas no projeto e sua contribuição para a saturação magnética, é a do rendimento da Máquina Modificada, com e sem as matrizes dessas indutâncias mútuas. A Figura 7.18 mostra essa comparação.

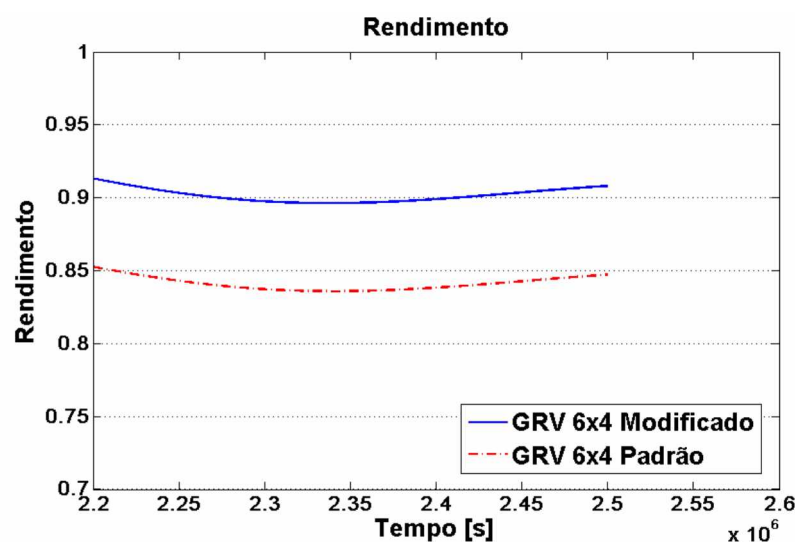


Fig.7.17 - Rendimento no GRV 6x4

Nota-se que a influência dessas variáveis (indutância mútua) na saturação magnética do GRV 6x4 não é relevante – quando o gerador é acionado como o mostrado aqui – visto que não altera o rendimento da máquina. Confirmando o visto no capítulo 6.

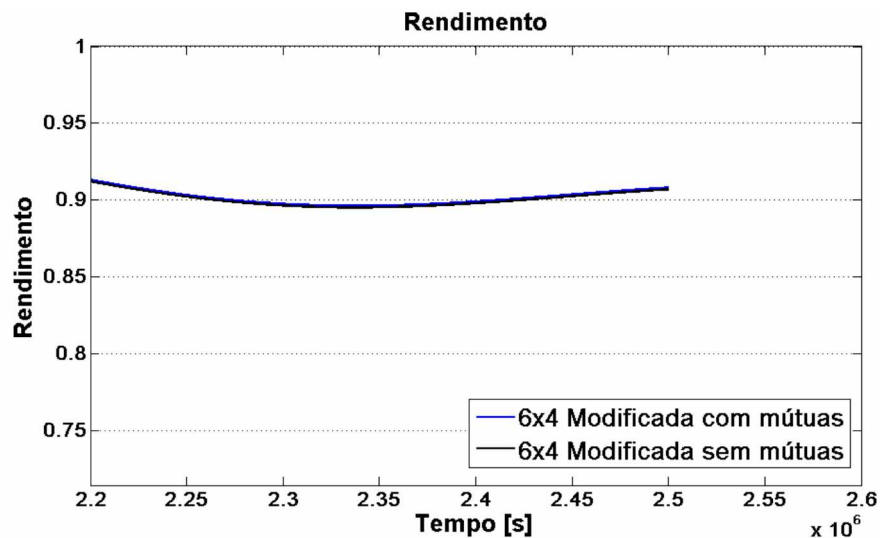


Fig.7.18 - Rendimento no GRV 6x4 Modificado com e sem indutâncias mútuas

7.4.2 – Simulação do Novo Projeto de GRV 6x6

As simulações mostraram que o período de excitação do novo conversor deve começar 7,7° antes do completo alinhamento até 16,3° (período de excitação). De 16,3° até 52,3° será o período de entrega de energia à carga (período de geração). Agora são apresentados os resultados da simulação do GRV 6x6 Padrão e Modificado. A Figura 7.19 ilustra a tensão na fonte das duas máquinas. Como ocorre na configuração 6x4, a tensão de excitação da Máquina Modificada é maior devido, novamente, ao maior número de espiras desta.

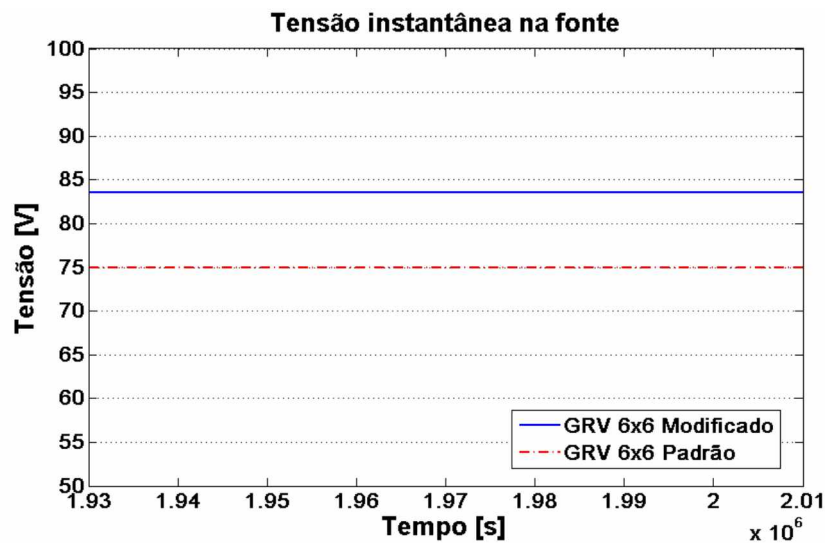


Fig.7.19 - Comparação entre as tensões na fonte do GRV Padrão e do GRV Modificado 6x6

A seguir, na Figura 7.20, as correntes na entrada são plotadas. O efeito da saturação magnética se fez presente na geometria Modificada e limitou o aumento da corrente, tendo esta, alcançado um valor de pico de aproximadamente 35A; enquanto o GRV 6x6 Padrão alcançou um valor de aproximadamente 38A.

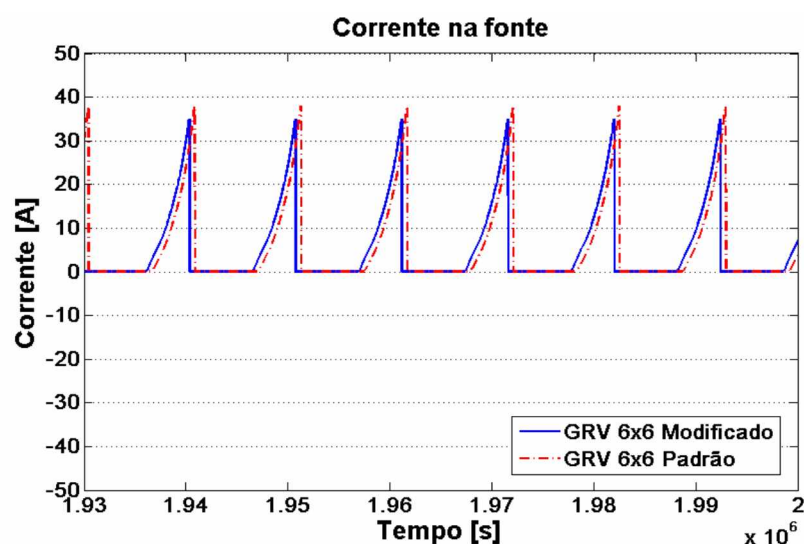


Fig.7.20 - Comparação entre as tensões na fonte do GRV Padrão e do GRV Modificado 6x6

Para o GRV 6x6 a Figura 7.21 mostra a comparação entre as tensões em uma das bobinas da MP e da MM. Novamente, a tensão de excitação no GRV 6x6 Modificado é maior quando comparado com o GRV 6x6 Padrão.

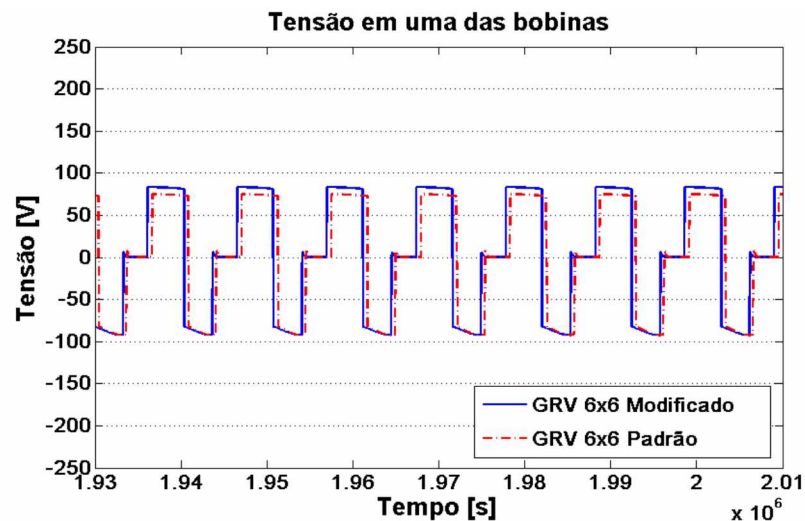


Fig.7.21 - Comparação entre as tensões em uma das bobinas do GRV Padrão e do GRV Modificado 6x6

A análise das correntes segue a mesma metodologia. A Figura 7.22 ilustra a comparação das correntes em uma das bobinas do GRV 6x6 Padrão e Modificado. A corrente na bobina da máquina modificada é de aproximadamente 11A, enquanto na máquina padrão esse valor é de aproximadamente 12A.

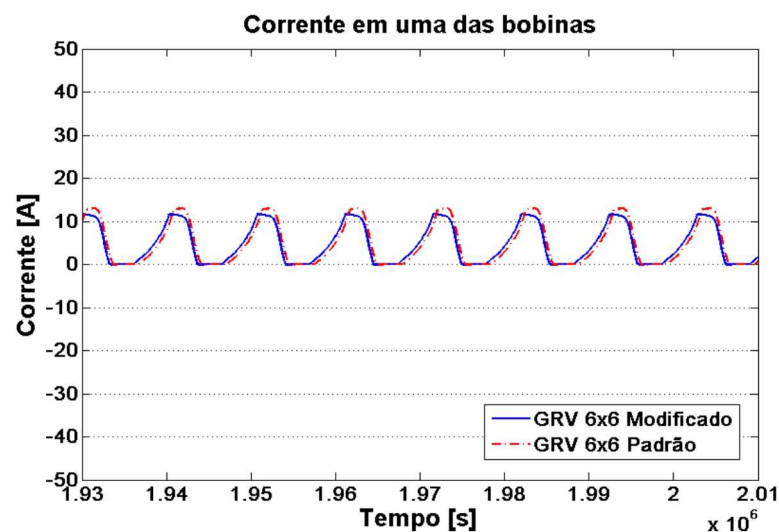


Fig.7.22 - Comparação entre as correntes na fase A do GRV Padrão e do GRV Modificado 6x6

Uma vez analisadas as correntes e as tensões, parte-se para a análise das outras grandezas que influenciam no rendimento da máquina. São elas: potência elétrica de saída, potência elétrica de entrada e potência mecânica.

Certifica-se que a potência entregue à carga seja a mesma para as duas geometrias (735,6 VA), como pode ser visto na Figura 7.23.

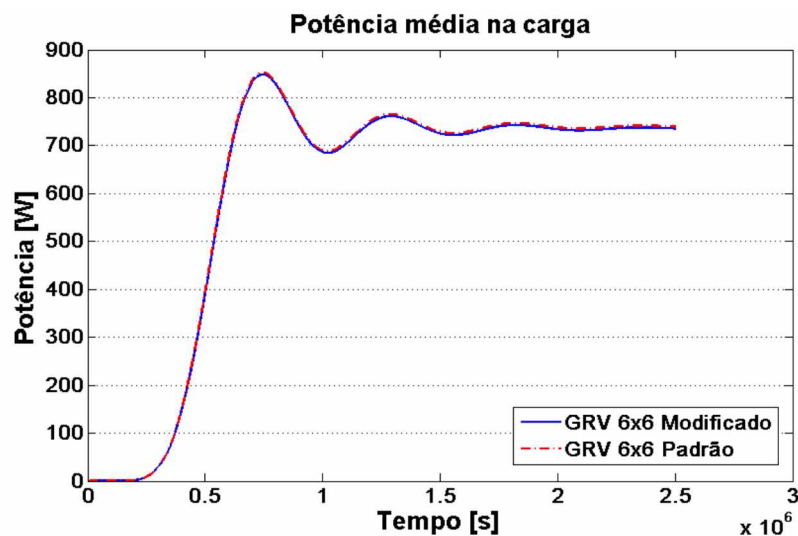


Fig.7.23 - Potência elétrica na carga no GRV 6x6

A potência elétrica na fonte, ilustrada na Figura 7.24, é maior no GRV 6x6 Modificado, devido à maior tensão de excitação se comparada ao GRV 6x6 Padrão.

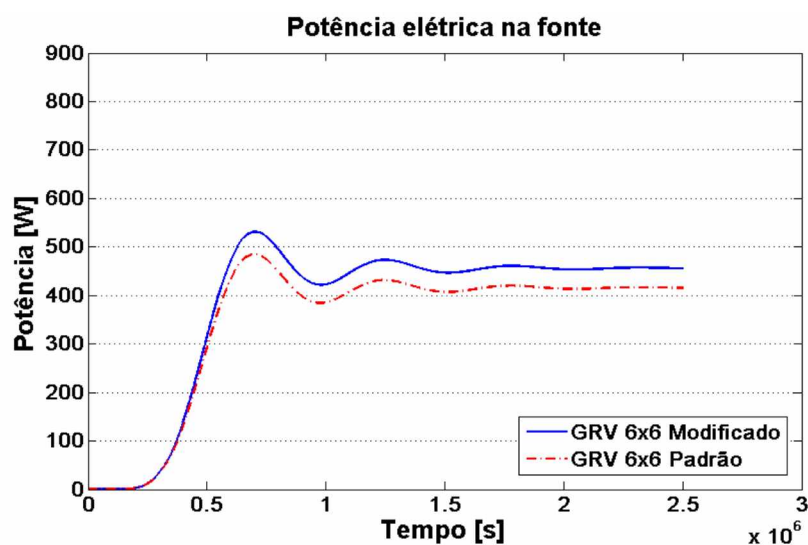


Fig.7.24 - Potência elétrica na fonte do GRV 6x6 Padrão e Modificado

Para concluir a análise do rendimento deve-se mensurar a potência mecânica de entrada através do conjugado. A Figura 7.25 mostra o conjugado do GRV 6x6 nas duas geometrias. Como esperado, o efeito da saturação magnética contribuiu para a redução no valor dessa grandeza no Gerador Modificado.

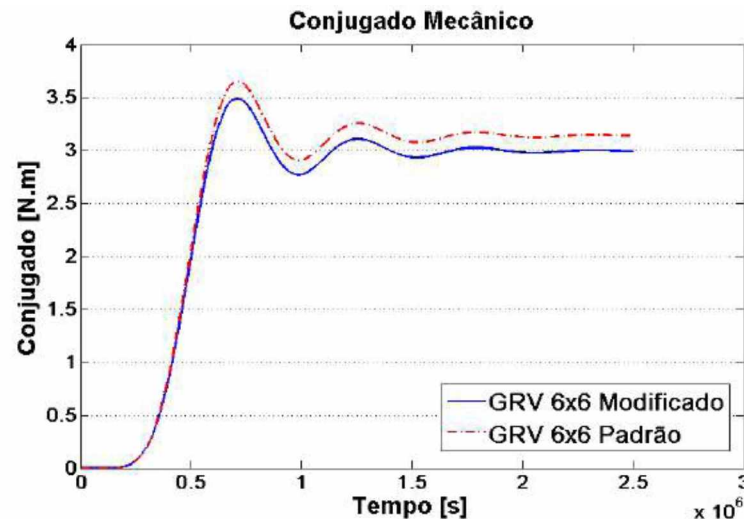


Fig.7.25 - Conjugado mecânico do GRV 6x6 Padrão e Modificado

Sendo assim, o rendimento é comparado na Figura 7.26 e retifica a investigação do efeito da saturação magnética, de modo que o rendimento do GRV 6x6 Modificado é maior do que o GRV 6x6 Padrão. Enquanto este último atinge um valor de aproximadamente 91%, o primeiro estabiliza em 96,5%.

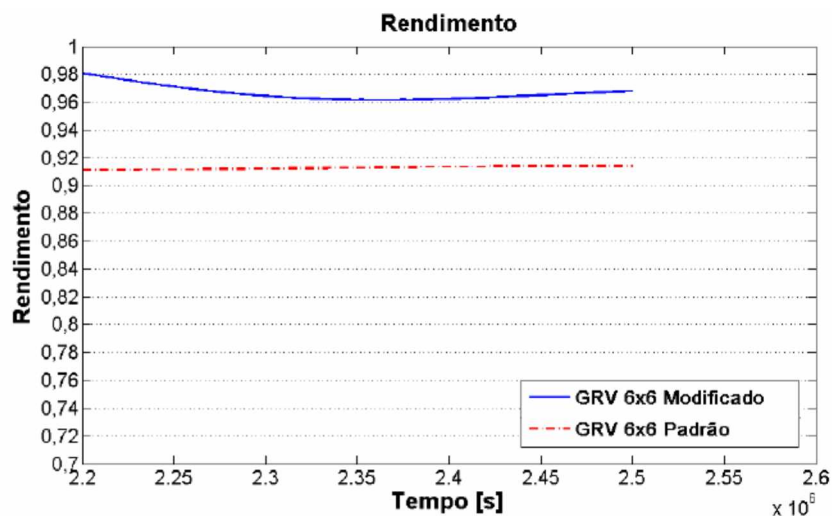


Fig.7.26 - Rendimento no GRV 6x6 Padrão e Modificado

Novamente, tendo em vista o estudo da influência da indutância mútua na saturação magnética e no aumento de rendimento, são comparados na Figura 7.27 os rendimentos da Máquina Modificada com e sem a presença das matrizes de indutância mútua.

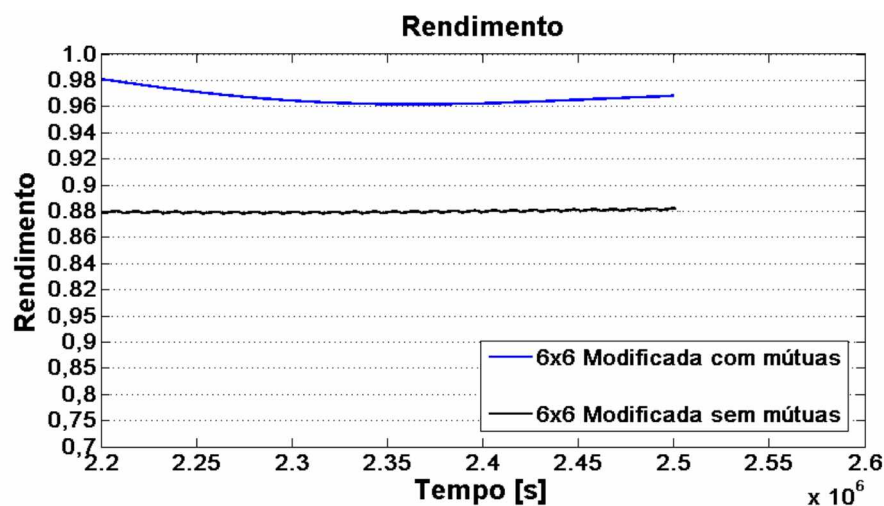


Fig.7.27 - Rendimento no GRV 6x6 Modificado com e sem indutâncias mútuas

Ao contrário do GRV 6x4, na Máquina Modificada 6x6 as indutâncias mútuas contribuem de forma considerável para a saturação magnética e, conseqüentemente, para o aumento de rendimento da máquina. O acionamento monofásico (6x6) é responsável pelo elevado valor das indutâncias mútuas, o que não ocorre na configuração trifásica (6x4).

7.5 – Conclusão

Foi possível perceber que as modificações de projeto propostos nesse capítulo se mostraram eficazes. As duas configurações (6x4 e 6x6) de máquina modificadas apresentaram melhora em seus rendimentos. Confirmou-se também, que as mudanças sugeridas provocaram um aumento nas indutâncias mútuas e um aumento da saturação das duas máquinas. Conseqüentemente, ambas as configurações produziram menos conjugado eletromagnético.

Parte-se assim, para etapa final de conclusões de todo o trabalho. Nesse próximo capítulo pretende-se construir uma bancada de teste para convalidar o exposto até aqui.

CAPÍTULO 8

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

ÚLTIMO PASSO - EXECUÇÃO DO PROJETO

8.1 – Introdução

Obter resultados experimentais, no caso do acionamento de máquinas, é a melhor forma de se validar todo aparato teórico utilizado durante a concepção dos protótipos.

Construir uma bancada de testes, apesar de trabalhoso, proporciona uma aprendizagem técnica de extrema importância na evolução de laboratórios de pesquisa, os quais permitem um desenvolvimento continuado do que se está pesquisando.

8.2 – Objetivos

O objetivo desse capítulo é mostrar os resultados experimentais das MRV projetadas nos capítulos anteriores, tanto a configuração 6x4 quanto a 6x6, ambas em suas geometrias Padrão e Modificada. Pretende-se mostrar detalhadamente como a bancada de teste será montada. Deseja-se também, demonstrar que o projeto proposto nesse trabalho (projeto de geometria modificada) apresenta melhor rendimento que o projeto padrão.

8.3 – Bancada de Testes experimentais

A bancada de testes aqui construída consistirá em um Gerador a Relutância Variável (GRV) ligado diretamente ao eixo de um Motor de Indução Trifásico (MIT) de 3cv; o qual, será usado como força mecânica de entrada para o gerador. O controle de posição do GRV será feito por meio de um encoder. A fig.8.1 apresenta uma representação gráfica dessa bancada. E cada componente será descrito a seguir.

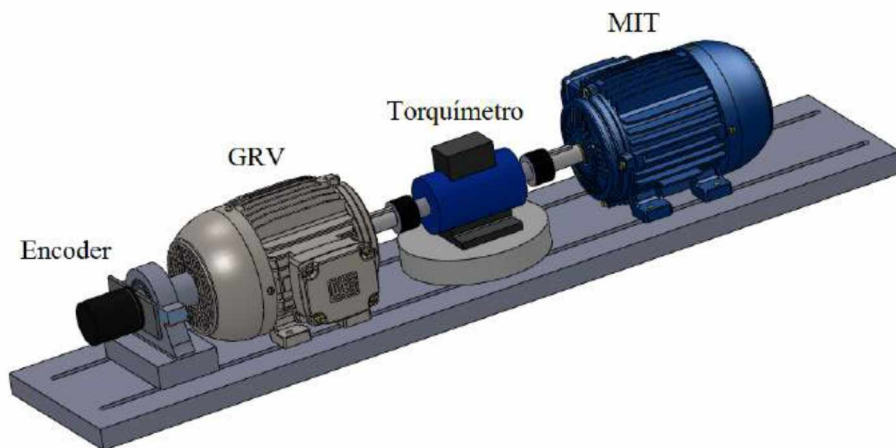


Fig.8.1- Desenho do Projeto da bancada

Para acionar o GRV, será construído um conversor *half-bridge* como apresentado na Fig.2.4 no capítulo 2. Nessa construção será usado o módulo de IGBT-7MBR50UA120 (Fig.8.2) que possui seis chaves por módulo.



Fig.8.2- Módulo de IGBT-7MBR50UA120

Esse módulo foi escolhido por ser, relativamente, barato e por ser robusto. Porém, ele apresenta a desvantagem de ser desenvolvido para inversores e, por isso, suas chaves vem ligadas aos pares. Fazendo com que, para a aplicação aqui, seja possível usar apenas metade das chaves de cada módulo (três chaves). Entretanto, como apresentado no Capítulo 2, o conversor *half-bridge* usa seis chaves. Sendo assim necessários dois módulos – um para as chaves superiores e outro para as chaves inferiores.

O desenho deste conversor está ilustrado na Fig.8.3. Mostrando detalhadamente todas as ligações que devem ser feitas desse conversor com os GRV aqui estudados.

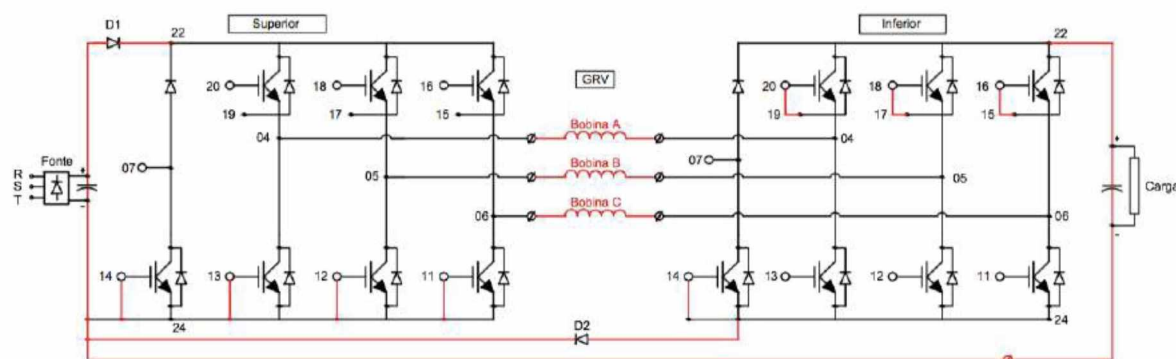


Fig.8.3- Conversor *half-bridge*

Pode-se perceber na Fig.8.3 que apenas as três chaves superiores do módulo superior serão utilizadas e que apenas as três chaves inferiores do módulo inferior serão utilizadas. Sendo assim; o *gate* da chave 1 é o pino 20, o *gate* da chave 2 é o pino 18, o *gate* da chave 3 é o pino 16, o *gate* da chave 4 é o pino 13, o *gate* da chave 5 é o pino 12 e o *gate* da chave 6 é o pino 11.

Cada uma das chaves citadas anteriormente devem ser disparadas isoladas eletricamente umas das outras. Para tanto, lançou-se mão do sistema mostrado na Fig.8.4. Que é um circuito adequado para disparo de IGBT.

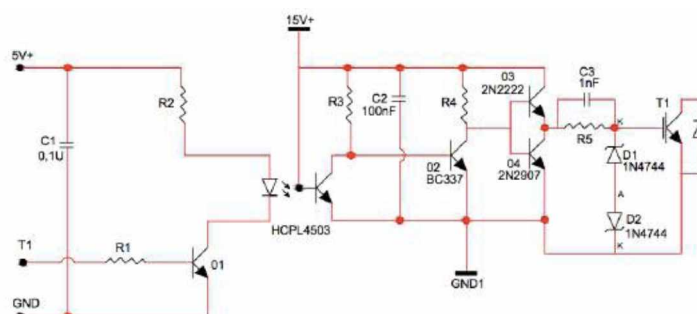


Fig.8.4- Drive para IGBT

Cada um desses *Drives*(Fig.8.4) recebe um sinal (um pulso de 3,3V) vindos de pinos digitais do micro-controlador, configurados como saída. Optou-se aqui, por usar um controlador de filosofia baseada em plataforma Arduino. Essas plataformas são baratas e fáceis de programar. Sendo acessíveis mesmo para quem não é especialista.

Ao longo do trabalho, percebeu-se vantagens relativas à confiabilidade de se usar especificamente a plataforma ChipKIT Max32 da Fig.8.6.

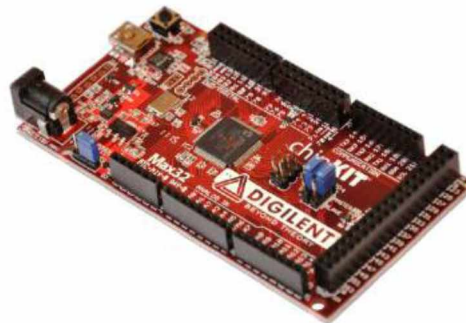


Fig.8.6-ChipKIT Max32

O micro-controlador da Fig.8.6 usa pinos digitais configurados como entrada para ler a posição do GRV. Esses sinais são produzidos por um Encoder-EP50S8 como o mostrado na Fig.8.7. Esse é um encoder absoluto que gera um sinal em Código Gray.



Fig.8.7–Encoder- EP50S8

Finalizando a descrição da bancada da Fig.8.1: há um motor de indução trifásico associado à um inversor de frequência (Fig.8.8), responsáveis por fornecer a energia mecânica de entrada para os GRV.



Fig.8.8- Inversor de frequência (CFW- 08) e Motor trifásico (3c.v - 4 polos)

8.5 – Construção das máquinas

A construção das máquinas, a partir do projeto apresentado neste trabalho, envolve desde o corte das lâminas que irá compor a pilha de rotores e estatores dos 4 GRV, até o enrolamento de suas bobinas, passando pelo desenho mecânico da base e seus sistemas de acoplamento. Nesse tópico serão detalhadas as etapas mais importantes do processo de fabricação.

8.4.1 – Corte das lâminas

O material que compõe as lâminas dos rotores e estatores é o aço silício M19 de grão não orientado, que possui características eletromagnéticas adequadas à aplicação em máquinas elétricas. Esse material é entregue em chapas de aço de variados tamanhos que devem ser cortadas com a geometria exata referida no projeto.

No presente caso, devem ser cortadas nas configurações 6x4 e 6x6 nas geometrias Padrão e Modificada. As figuras 8.2 e 8.3 mostram as lâminas já cortadas. O tipo de corte escolhido para o aço silício foi o corte a jato d'água, uma vez que não há aquecimento excessivo da estrutura física do aço no ato do processamento, preservando assim suas características eletromagnéticas, não sendo necessário realizar tratamento térmico nas lâminas após o corte. Outra vantagem do corte escolhido é a precisão, coerente com o projeto de máquinas elétricas.



Fig.8.9- Lâminas da MRV 6x4 e 6x6 Padrão

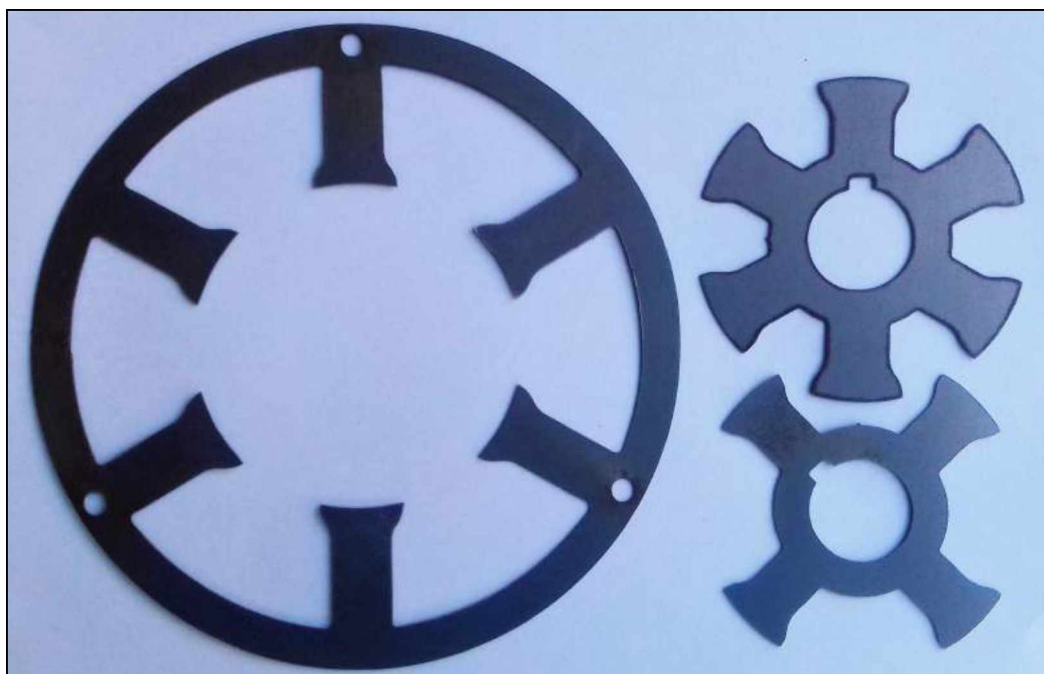


Fig.8.10- Lâminas da MRV 6x4 e 6x6 Modificada

8.4.2 – Preparação e empilhamento das lâminas

Após o corte das lâminas as mesmas devem ser envernizadas a fim de diminuir a existência de correntes parasitas durante o funcionamento das máquinas. A Fig.8.11 ilustra algumas lâminas recebendo essa camada de verniz.

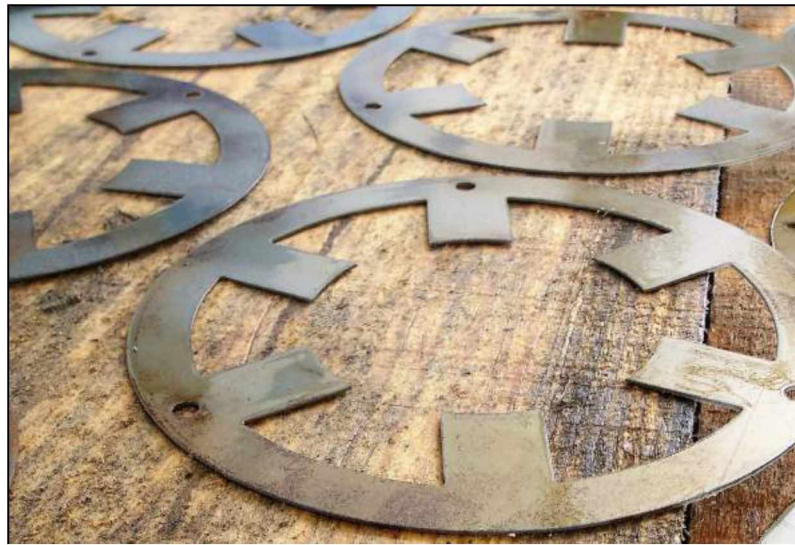


Fig.8.11- Exemplares de lâminas do estator sendo envernizadas

Com o devido tratamento, as lâminas são empilhadas de acordo com a quantidade definida no projeto. Depois de empilhadas elas são prensadas e colocadas nas carcaças (Fig.8.12) com o auxílio de uma prensa hidráulica.



Fig.8.12 - Lâminas do estator sendo prensadas e colocadas na carcaça

8.4.3 – Enrolamento e isolamento das bobinas

De posse das 4 carcaças já com as respectivas pilhas, parte-se para o enrolamento das bobinas. A Fig.8.13 mostra o estator e o isolamento entre as lâminas e as bobinas, e após isso, as bobinas são colocadas no estator (Fig8.14).



Fig.8.13 - Isolamento entre a pilha e as bobinas

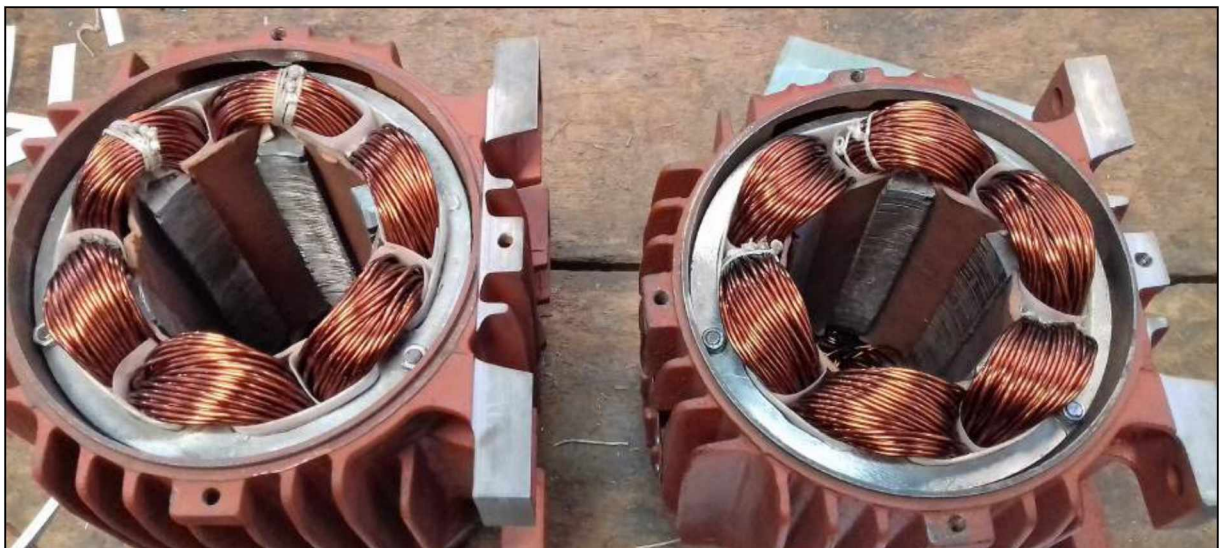


Fig.8.14 - Estatores bobinados nas carcaças

8.4.4 – Empilhamento das lâminas do rotor

As lâminas do rotor são empilhadas e prensadas até atingirem o comprimento adequado do projeto. Em seguida eles são colocados no eixo da carcaça, como mostra a Fig.8.15.



Fig.8.15 - Rotor de um GRV

8.4.5 – Testes elétricos

Ressalta-se que todos os testes tipicamente realizados em máquinas elétricas relativos à segurança, foram feitos. Como por exemplo: os testes de isolamento entre as bobinas, os testes de isolamento entre as bobinas e a carcaça, as medidas de impedâncias das bobinas, etc.

8.4.6 – Aspectos mecânicos da bancada

A principal relevância do projeto mecânico da bancada do GRV está relacionada ao alinhamento de seus componentes, que deve ser extremamente preciso a fim de não prejudicar os resultados a serem obtidos. Sendo assim, a base da bancada de testes foi construída de maneira modular; ou seja, para realizar a troca de um GRV por outro, basta "desencaixá-lo", sem que isso provoque alteração no posicionamento dos outros elementos da bancada. A foto das Fig.8.16 mostra a bancada de teste construída.



Fig.8.16–Bancada de Teste MIT (azul) e os quatro GRV(cinza)

8.5 – Resultados Experimentais

Nesse tópico será apresentado os resultados experimentais retirados da bancada da Fig.8.16. Cada gerador foi acoplado na bancada e dados como: tensão de entrada, tensão na bobina, tensão na carga e as respectivas correntes nos mesmos pontos foram obtidos, analisados e comparados com os resultados de simulação do capítulo anterior.

É importante ressaltar que, na obtenção de cada dado, foi assegurado que o gerador estava fornecendo 735,6 VA em sua saída.

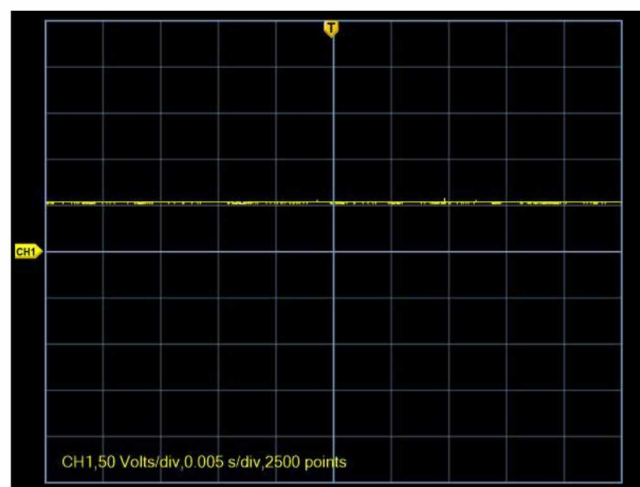
8.5.1 – Resultados Experimentais do Gerador a Relutância 6x4 Padrão e 6x4 Modificado

Na fabricação do GRV 6x4 Padrão não houve nenhuma alteração significativa em relação ao exposto no capítulo 4 (cálculo das dimensões). Porém, no GRV 6x4 modificado percebeu-se - durante a fabricação - que seria possível aumentar o número de espiras por bobina. Sendo assim, essa máquina possui 75 espiras por bobina.

Para que o GRV 6x4 padrão alcance a potência prevista na saída (735.6 VA) foi preciso uma potência na fonte (potência elétrica de entrada) de aproximadamente 300 VA. No GRV 6x4 Modificado foi necessário 400 VA.

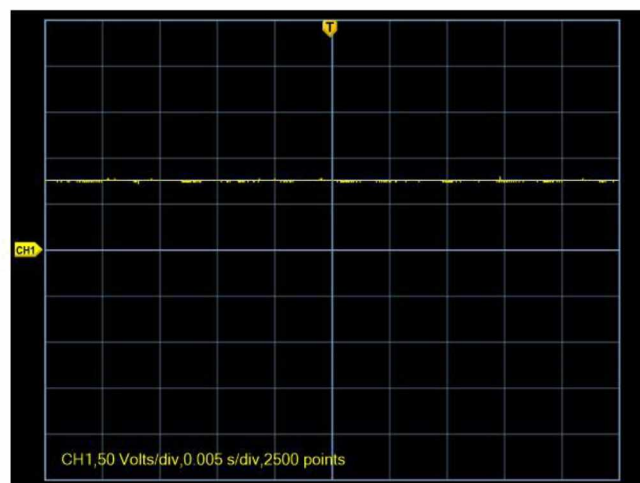
A Fig.8.17 apresenta a tensão na fonte do *Half-Bridge* do GRV 6x4 padrão. E, a Fig.8.18 apresenta a tensão na fonte do *Half-Bridge* do GRV 6x4 modificado. Como pode ser visto, a forma de onda e o comportamento são exatamente como se espera na simulação (Fig.7.7).

O valor exato de tensão da máquina padrão é 52V (Fig. 8.17) e da máquina modificada é 75 V.



TBS 1072B - 23:09:16 12/07/2016

Fig.8.17–Tensão na entrada do *Half-Bridged* do GRV 6x4 padrão

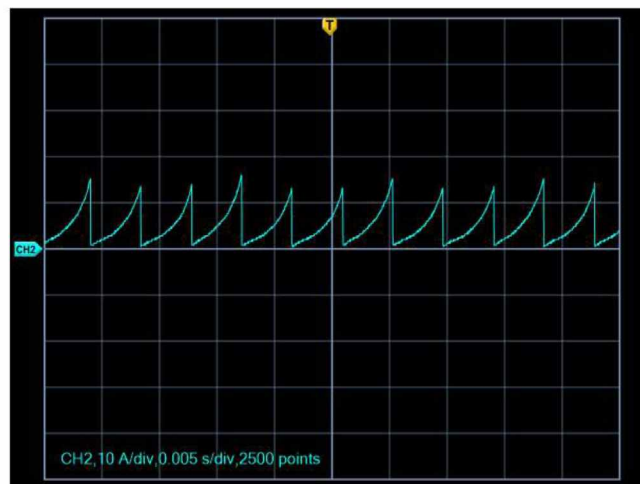


TBS 1072B - 01:36:47 13/07/2016

Fig.8.18 – Tensão na entrada do *Half-Bridge* do GRV 6x4 Modificado

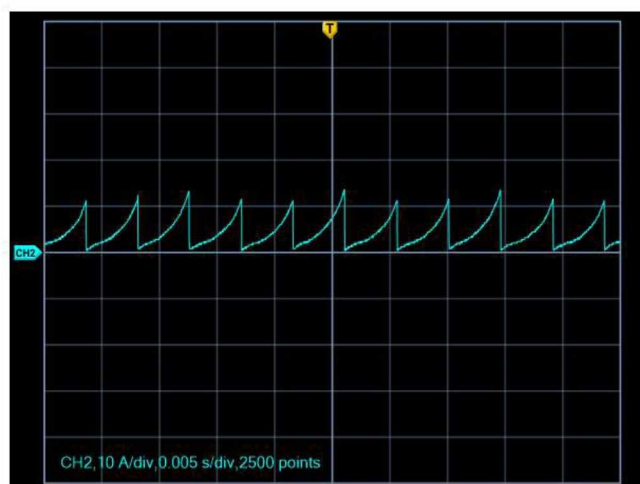
A Fig.8.19 mostra a corrente na fonte do GRV 6x4 padrão. E, a Fig.8.20 mostra a corrente na fonte do GRV 6x4 Modificado. Essa é a corrente de excitação necessária para se produzir a potência de 735,6 VA na saída desses conversores.

Ao se comparar essas figuras com a Fig.7.8 (simulação) pode-se observar que o comportamento é o mesmo. Porém, os valores de pico do GRV modificado são menores.



TBS 1072B - 23:10:08 12/07/2016

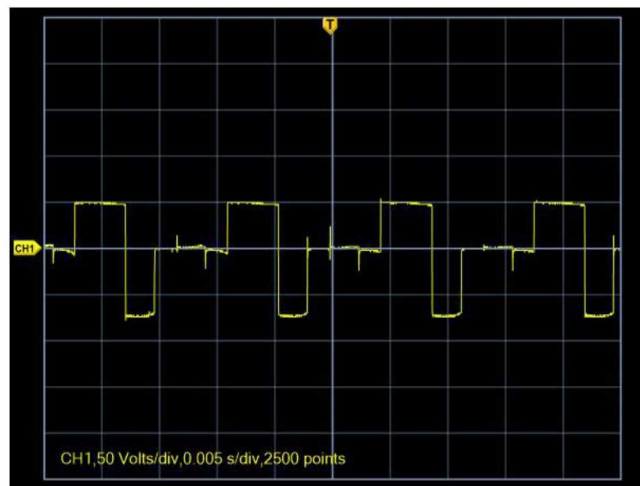
Fig.8.19–Corrente na fonte (excitação) do GRV 6x4 Padrão



TBS 1072B - 01:37:43 13/07/2016

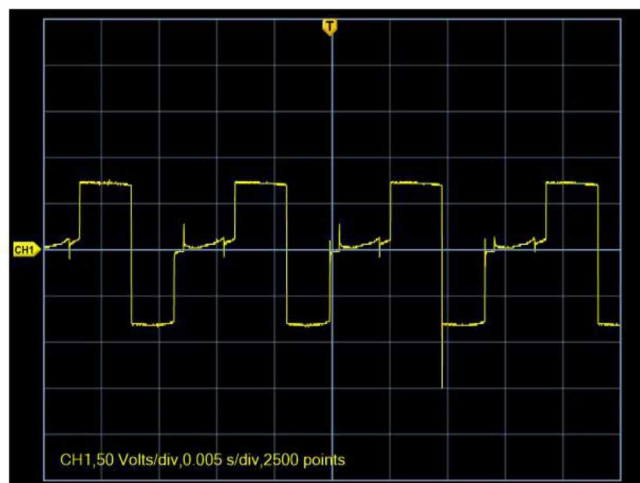
Fig.8.20–Corrente na fonte (excitação) do GRV 6x4 Modificado

A Fig.8.21 apresenta a tensão em uma bobina do GRV 6x4 Padrão. E, a Fig.8.22 apresenta a tensão em uma bobina do GRV 6x4 Modificado. Essas figuras podem ser comparadas com a Fig.7.9. Fica claro nessa comparação (Simulação vs. Experimental) a semelhança de comportamento e de valores. Pode-se perceber, que assim como na simulação, a máquina modificada possui uma maior tensão de excitação que a máquina padrão.



TBS 1072B - 22:48:02 12/07/2016

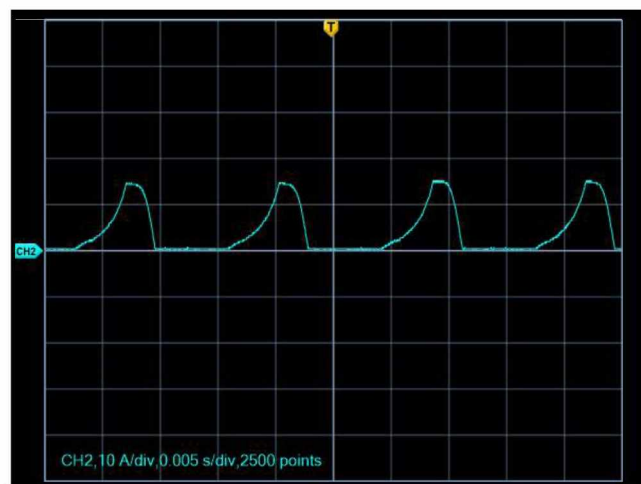
Fig.8.21–Tensão na bobina do GRV 6x4 Padrão



TBS 1072B - 01:22:23 13/07/2016

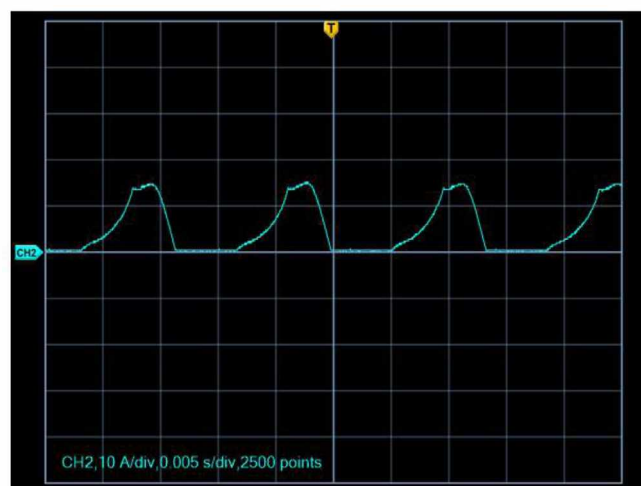
Fig.8.22–Tensão na bobina do GRV 6x4 Modificado

A Fig.8.23 apresenta a corrente na Bobina do GRV 6x4 Padrão. E, a Fig.8.24 apresenta a corrente na Bobina do GRV 6x4 modificada. Ambas apresentadas na Fig.7.10 de simulação.



TBS 1072B - 22:48:55 12/07/2016

Fig.8.23–Corrente na bobina do GRV 6x4 Padrão

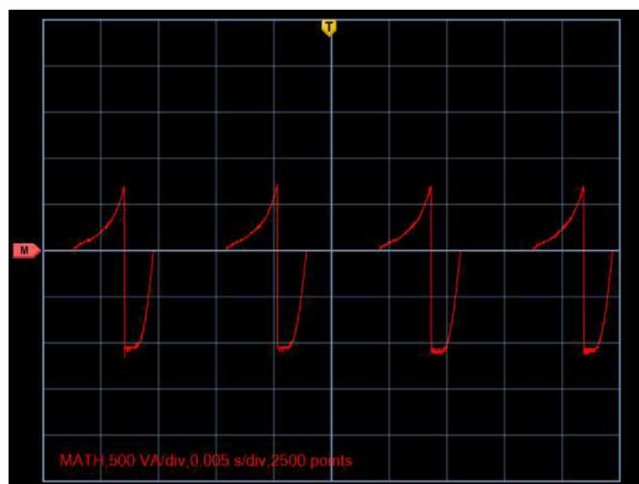


TBS 1072B - 01:23:30 13/07/2016

Fig.8.24–Corrente na bobina do GRV 6x4 Modificado

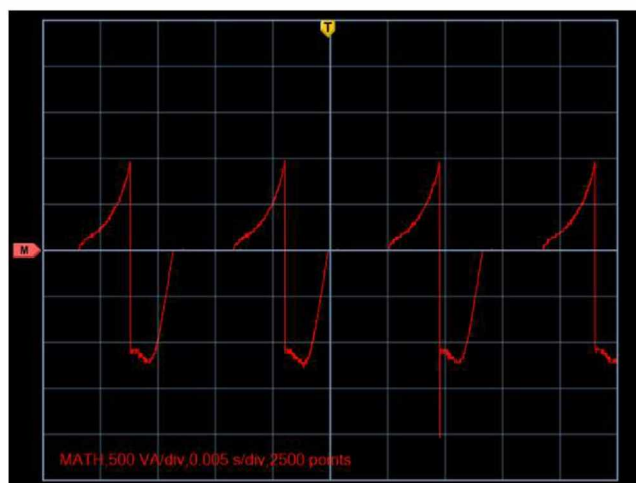
Mais uma vez, o esperado no projeto acontece. A corrente no GRV modificado é menor que a corrente no Padrão.

A Fig.8.25 apresenta a potência em uma das bobinas do GRV 6x4 Padrão. E, a Fig.8.26 apresenta a potência em uma das bobinas do GRV 6x4 Modificado. Pode-se perceber a presença da energia de excitação (parte positiva dos gráficos) e da energia de Geração (parte negativa).



TBS 1072B - 22:49:42 12/07/2016

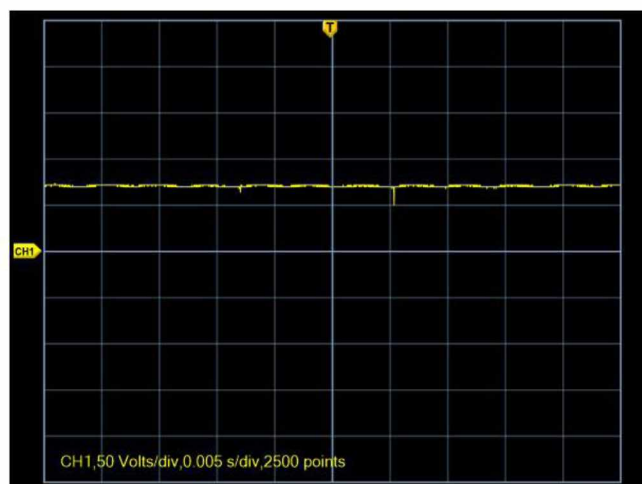
Fig.8.25–Potência na bobina do GRV 6x4 Padrão



TBS 1072B - 01:24:25 13/07/2016

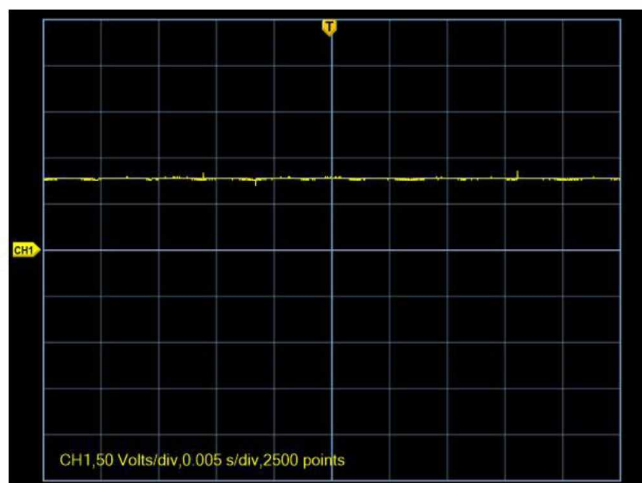
Fig.8.26–Potência na bobina do GRV 6x4 Modificado

A tensão na carga do GRV 6x4 Padrão e Modificado estão representados respectivamente nas figuras Fig.8.27 e Fig.8.28. Percebe-se que elas tem o mesmo comportamento e o mesmo valor numérico (aproximadamente 80V).



TBS 1072B - 22:30:01 12/07/2016

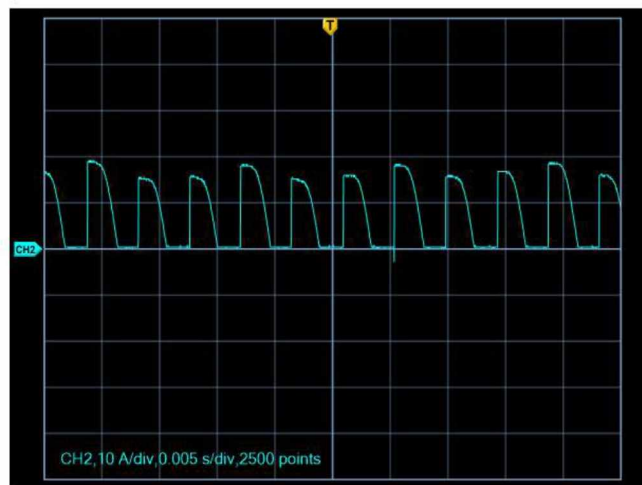
Fig.8.27–Tensão na carga do GRV 6x4 Padrão



TBS 1072B - 01:09:06 13/07/2016

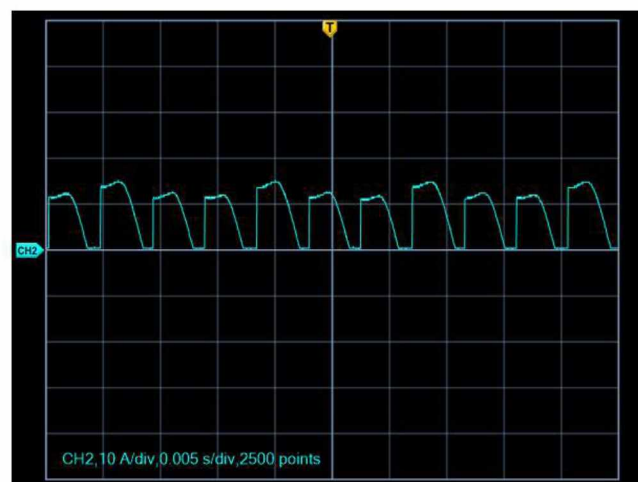
Fig.8.28–Tensão na carga do GRV 6x4 Modificado

A corrente na carga do GRV 6x4 Padrão e do GRV 6x4 modificado podem ser vistas nas figuras Fig.8.29 e Fig.8.30.



TBS 1072B - 22:30:54 12/07/2016

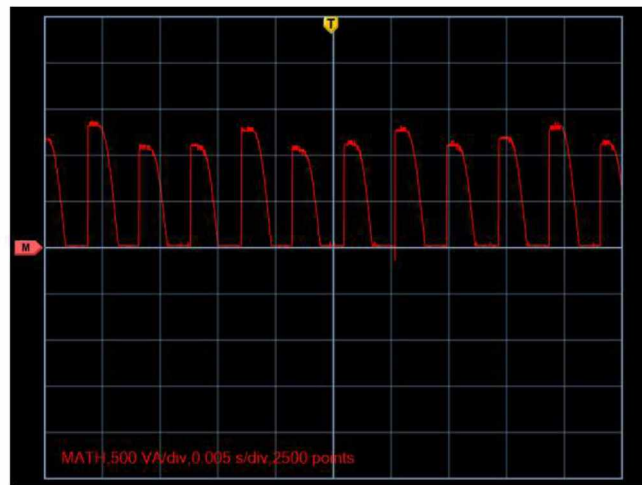
Fig.8.29–Corrente na carga do GRV 6x4 Padrão



TBS 1072B - 01:09:51 13/07/2016

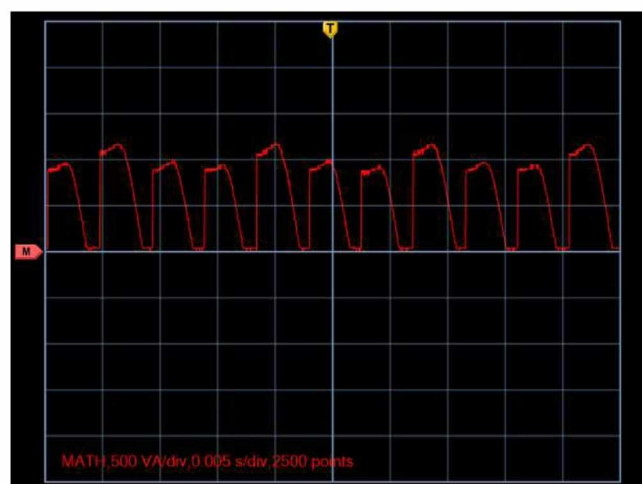
Fig.8.30–Corrente na carga do GRV 6x4 Modificado

E , finalmente, a potência na carga do GRV 6x4 Padrão e do GRV 6x4 modificado podem ser vistas nas figuras Fig.8.31 e Fig.8.32.



TBS 1072B - 22:32:37 12/07/2016

Fig.8.31–Potência na carga do GRV 6x4 Padrão



TBS 1072B - 01:10:41 13/07/2016

Fig.8.32–Potência na carga do GRV 6x4 Modificado

8.5.1.2 – Rendimento do GRV 6x4 Padrão e do GRV 6x4 Modificado

No cálculo da energia mecânica de entrada dos geradores, foi usado um torquímetro que era capaz de aferir conjugados de zero à 10 N.m. Para o GRV 6x4 padrão foi aferido 4 N.m. e para o GRV 6x4 modificado, 3 N.m.

Como exposto anteriormente esses geradores foram, ambos, acionados à 1200 rpm.

Logo, a potência mecânica de entrada do GRV 6x4 padrão foi 502,656 W. E a potência mecânica de entrada do GRV 6x4 modificado foi 376,992 W. Somando os valores de potência mecânica de entrada com os valores de potência elétrica de entrada (expostos no início desse subitem), tem-se a potência total de entrada.

No caso do GRV 6x4 padrão, a potência total de entrada foi 802 VA. Dividindo a potência de saída por esse valor, tem-se o rendimento de 0,916. No caso do GRV 6x4 modificado, a potência total de entrada foi 777 VA. Dividindo a potência de saída (735,6 VA) por esse valor, tem-se o rendimento de 0,9459.

Como esperado, a máquina modificada apresentou rendimento maior que o da máquina padrão.

8.5.2 – Resultados Experimentais do Gerador a Relutância 6x6 Padrão e 6x6 Modificado

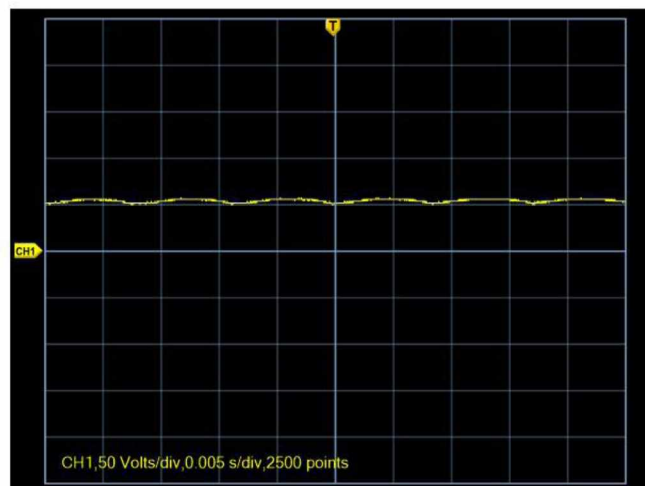
A fabricação do GRV 6x6 Padrão não apresentou nenhuma alteração significativa em relação ao exposto no capítulo 4 (cálculo das dimensões). Porém, no GRV 6x6 modificado percebeu-se - durante a fabricação - que seria possível aumentar o número de espiras por bobina. Sendo assim, essa máquina possui 75 espiras por bobina.

Para alcançar a potência prevista na carga, de 735.6 VA, o GRV 6x6 Padrão exigiu uma potência elétrica de entrada de 337 VA. No GRV 6x6 Modificado esse valor de entrada foi de 499 VA.

Sendo assim, parte-se para a análise das grandezas da configuração monofásica (6x6) nas duas geometrias (Padrão e Modificada), seguindo a mesma sequência de análise da máquina 6x4. Na Fig.8.33 é apresentada a tensão na fonte do *Half-Bridge* do GRV 6x6 Padrão. A Fig.8.34 apresenta a tensão na fonte do *Half-Bridge* do GRV 6x6 Modificado.

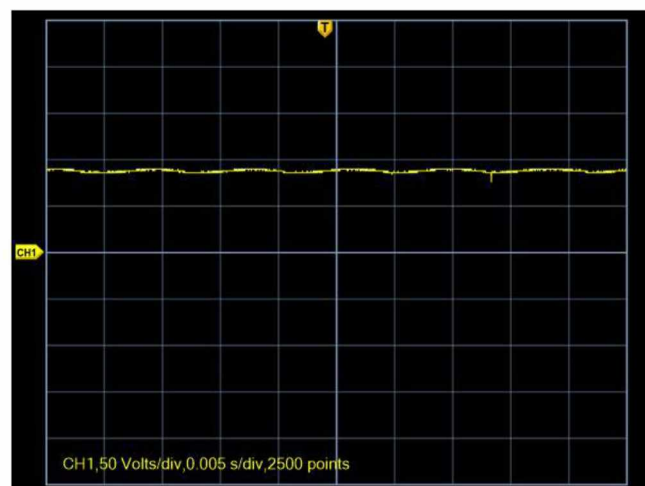
Como pode ser visto, a forma de onda e o comportamento são exatamente como se espera na simulação (7.19).

O valor exato de tensão da máquina padrão é 54V (Fig. 8.34) e da máquina modificada é 88V(Fig. 8.35).



TBS 1072B - 16:06:46 11/07/2016

Fig.8.34 –Tensão na fonte do GRV 6x6 Padrão

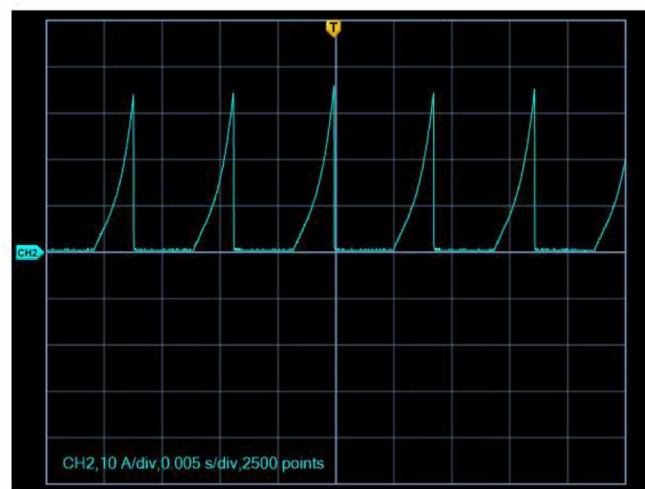


TBS 1072B - 21:24:00 11/07/2016

Fig.8.35 –Tensão na fonte do GRV 6x6 Modificado

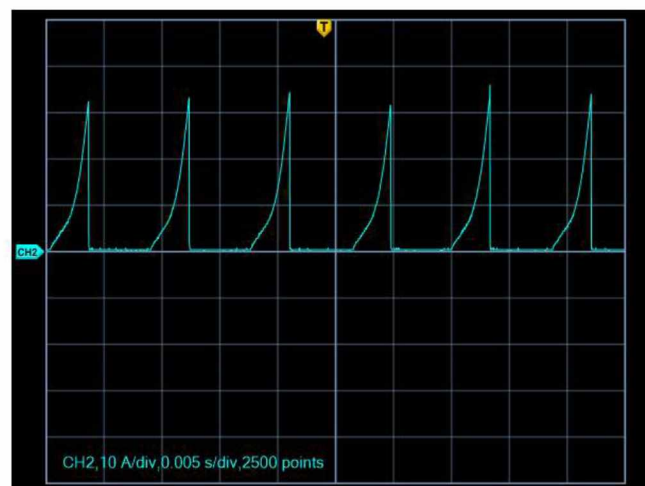
A Fig.8.36 mostra a corrente na fonte do GRV 6x6 Padrão, enquanto a Fig.8.37 mostra a corrente na fonte do GRV 6x6 Modificado. Com esse valor de corrente, os conversores analisados nesse tópico produziram a potência de saída de 735,6 VA.

Observa-se que o comportamento das formas de onda são coerentes com as formas de onda resultantes da simulação (Fig.7.20).



TBS 1072B - 16:07:26 11/07/2016

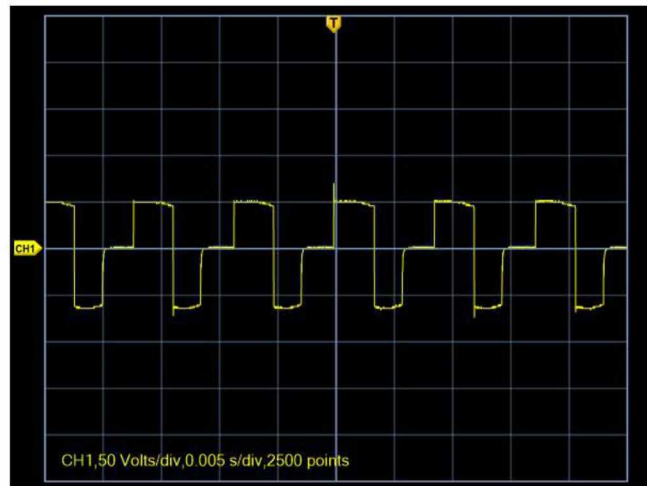
Fig.8.36 – Corrente na fonte do GRV 6x6 Padrão



TBS 1072B - 21:24:33 11/07/2016

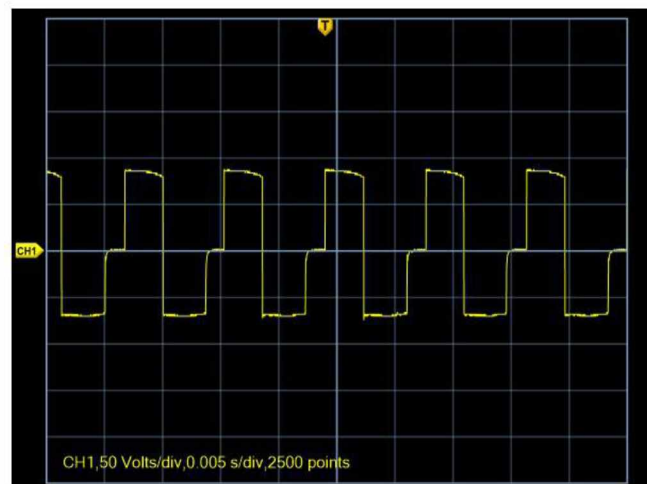
Fig.8.37 – Corrente na fonte do GRV 6x6 Modificado

A Fig.8.38 apresenta a tensão em uma bobina do GRV 6x6 Padrão. E, a Fig.8.39 apresenta a tensão em uma bobina do GRV 6x6 Modificado.



TBS 1072B - 16:24:39 11/07/2016

Fig.8.38 – Tensão na fase do GRV 6x6 Padrão

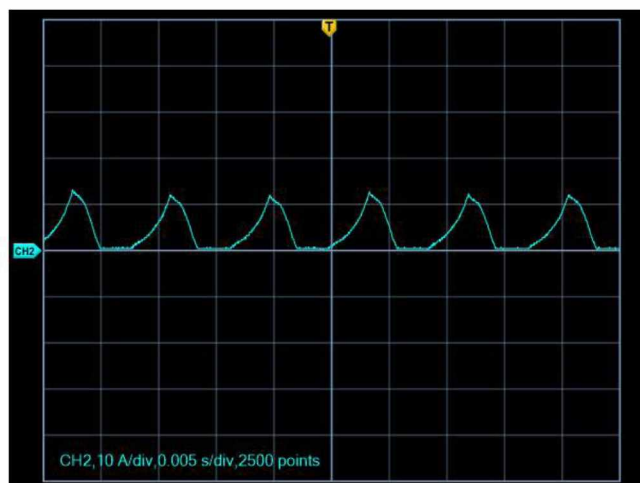


TBS 1072B - 21:03:07 11/07/2016

Fig.8.39 – Tensão na fase do GRV 6x6 Modificado

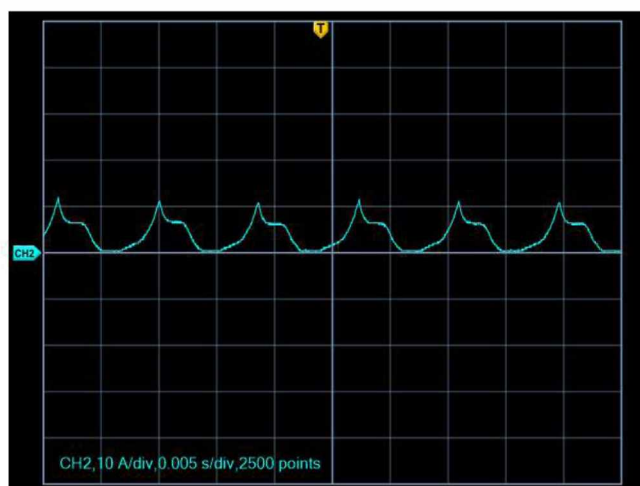
Essas figuras podem ser comparadas com a Fig.7.21. Com essa comparação (Simulação vs. Experimental) fica clara a semelhança de comportamento e de valores das formas de onda. Pode-se perceber, que assim como na simulação, a máquina modificada possui maior tensão de excitação que a máquina padrão.

A Fig.8.40 apresenta a corrente na Bobina do GRV 6x6 Padrão, enquanto a Fig.8.41 apresenta a corrente na Bobina do GRV 6x6 Modificada.



TBS 1072B - 16:25:49 11/07/2016

Fig.8.40 – Corrente na fase do GRV 6x6 Padrão



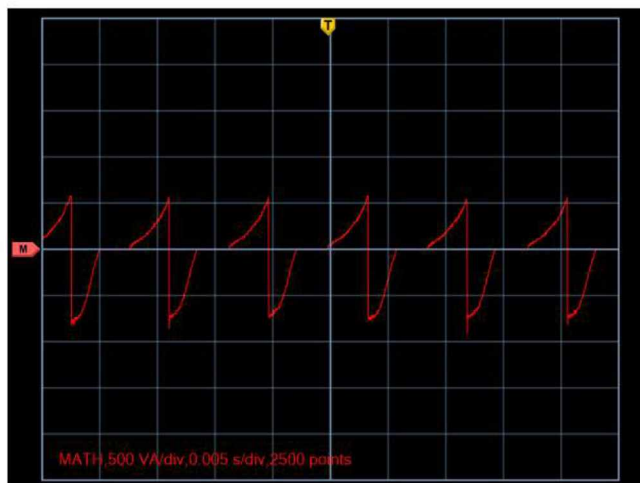
TBS 1072B - 21:03:58 11/07/2016

Fig.8.41 – Corrente na fase do GRV 6x6 Modificado

Novamente a corrente no GRV Modificado é menor que a corrente no GRV Padrão, conforme esperado no projeto e ilustrado nas simulações.

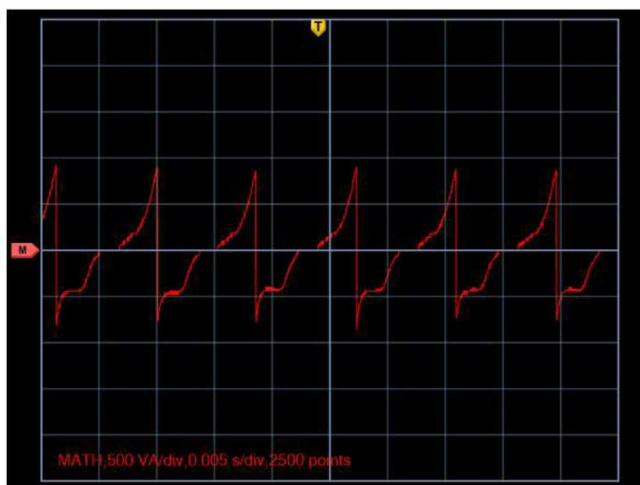
A Fig.8.42 apresenta a potência em uma das bobinas do GRV 6x6 Padrão. E, a Fig.8.43 apresenta a potência em uma das bobinas do GRV 6x6 Modificado. Pode-se perceber

a presença da energia de excitação (parte positiva dos gráficos) e da energia de Geração (parte negativa).



TBS 1072B - 16:26:38 11/07/2016

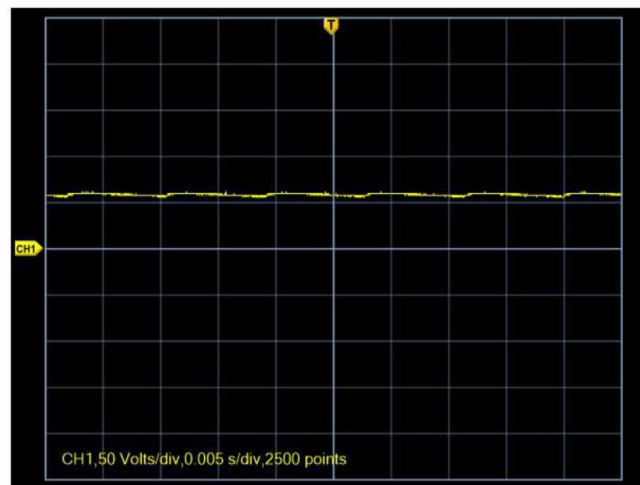
Fig.8.42 – Potência na fase do GRV 6x6 Padrão



TBS 1072B - 21:04:29 11/07/2016

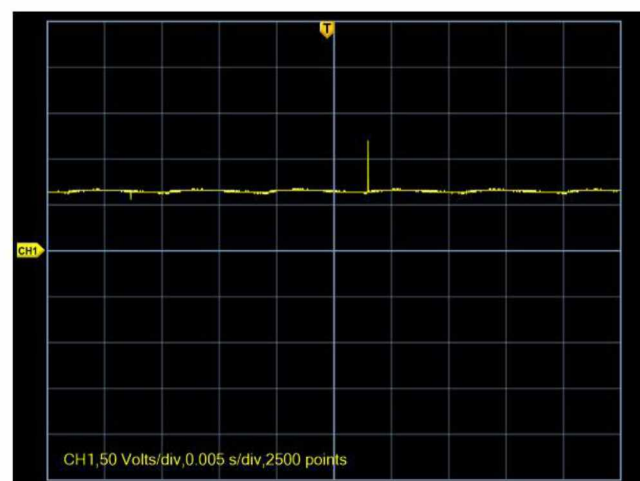
Fig.8.43 – Potência na fase do GRV 6x6 Modificado

A tensão na carga do GRV 6x6 Padrão e Modificado estão representados respectivamente nas figuras Fig.8.44 e Fig.8.45. Nota-se que elas apresentam, aproximadamente, o mesmo valor bem como o comportamento.



TBS 1072B - 15:39:35 11/07/2016

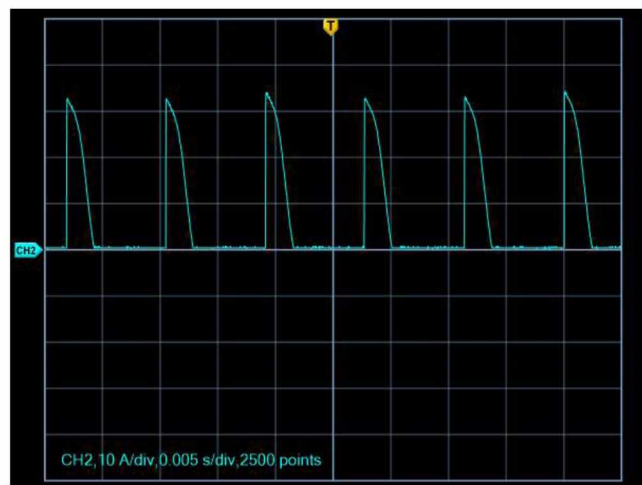
Fig.8.44 – Tensão na carga do GRV 6x6 Padrão



TBS 1072B - 20:49:09 11/07/2016

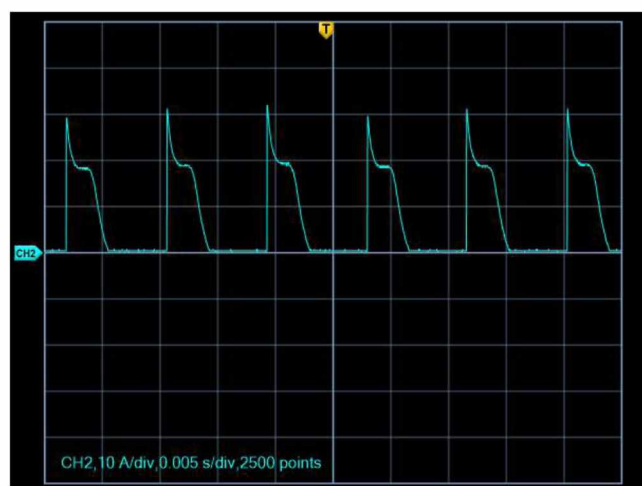
Fig.8.45 – Tensão na carga do GRV 6x6 Modificado

A corrente na carga do GRV 6x6 Padrão pode ser visto na Fig.8.46 e o do GRV 6x6 Modificado na Fig. 8.47.



TBS 1072B - 15:40:25 11/07/2016

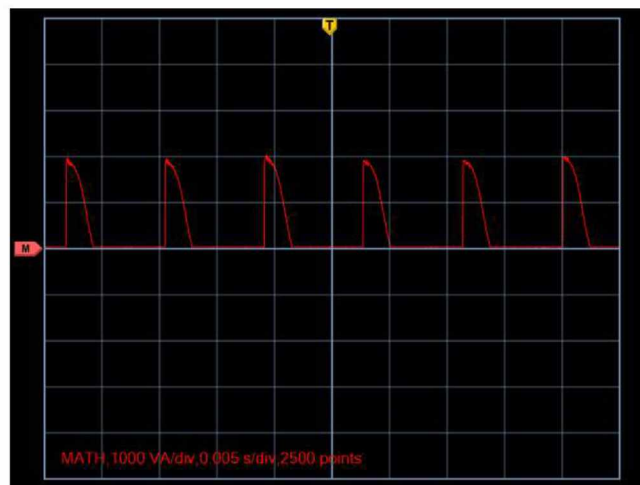
Fig.8.46 – Corrente na carga do GRV 6x6 Padrão



TBS 1072B - 20:49:48 11/07/2016

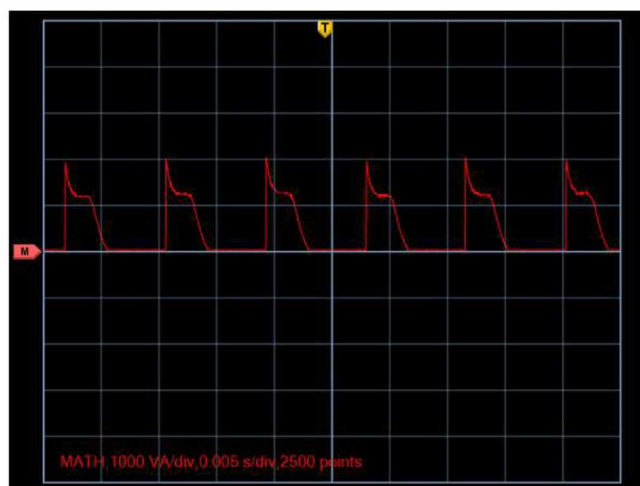
Fig.8.47 – Corrente na carga do GRV 6x6 Modificado

A Fig.8.48 apresenta a potência na carga do GRV 6x6 Padrão, enquanto a Fig. 8.49 apresenta a potência na carga do GRV 6x6 Modificado.



TBS 1072B - 15:42:42 11/07/2016

Fig.8.48 – Potência na carga do GRV 6x6 Padrão



TBS 1072B - 20:50:33 11/07/2016

Fig.8.49 – Potência na carga do GRV 6x6 Modificado

8.5.2.2 – Rendimento do GRV 6x6 Padrão e do GRV 6x6 Modificado

Da mesma forma que foi executado para a máquina trifásica o cálculo da energia mecânica de entrada dos geradores foi aferido com o auxílio do torquímetro. No GRV 6x6 Padrão foi aferido 3,75 N.m. e para o GRV 6x6 Modificado, 2 N.m.

Como exposto anteriormente esses geradores foram, ambos, acionados à 1200 rpm. Logo, a potência mecânica de entrada do GRV 6x4 padrão foi 471.24 W. E a potência

mecânica de entrada do GRV 6x6 modificado foi 251,328 W. Somando os valores de potência mecânica de entrada com os valores de potência elétrica de entrada (expostos no início desse subitem), tem-se a potência total de entrada.

No caso do GRV 6x6 padrão, a potência total de entrada foi 808,24 VA. Dividindo a potência de saída por esse valor, tem-se o rendimento de 0,916. No caso do GRV 6x4 modificado, a potência total de entrada foi 751,328 VA. Dividindo a potência de saída (735,6 VA) por esse valor, tem-se o rendimento de 0,9798.

Como esperado, a máquina modificada apresentou rendimento maior que o da máquina padrão.

8.6 – Conclusões

Foi comprovado que as modificações sugeridas provocaram um aumento no rendimento dos dois conversores modificados propostos (6x4 e 6x6). A saturação magnética nos períodos de excitação provocaram uma diminuição no conjugado eletromagnético. Essa diminuição de conjugado resultou numa menor necessidade de energia mecânica de entrada.

Sendo assim, a inserção das modificações de projeto propostas no capítulo anterior se mostraram eficazes. Devendo – sempre que possível – serem adotadas.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES

9.1 – Conclusões Finais

Esse trabalho cumpriu como os objetivos que foram propostos inicialmente, apresentando inovações em projetos de Geradores a Relutância Variável (GRV). Inovações, as quais, ficaram focadas em estudos sobre as indutâncias mútuas e a saturação magnética. Esse trabalho também cumpriu o papel de apresentar um roteiro de projeto para GRV.

O software de elementos finitos – FEMM – que foi usado na nova etapa de projeto, se mostrou uma ferramenta fácil e precisa. Além de ter a vantagem de ser um software livre. Essa ferramenta foi fundamental para o completo estudo eletromagnético dos conversores, possibilitando assim, inserir mudanças geométricas nas lâminas que causaram saturação durante o período de excitação.

Ficou evidente que trabalhar com o GRV saturado durante esse período – excitação, reduz a necessidade de conjugado de carga e, com isso, há aumento do rendimento. Nesse sentido, as alterações de projeto propostas por esse trabalho, tornam-se indispensáveis; pois colaboram para a saturação desses conversores. Sendo mais específico, as máquinas modificadas – propostas aqui – apresentaram um aumento de cerca de 3% (para o GRV 6x4) e de 6% (para o GRV6x6) no rendimento devido às alterações.

Além disso, pode-se perceber que as indutâncias mútuas podem ajudar na saturação dos GRV. Por isso, chegou-se a conclusão que esse parâmetro não deve ser negligenciado na etapa de projeto. Principalmente quando se está projetando GRV que possuem bobinas acionadas concomitantemente; como no caso do GRV 6x6.

Finalmente, Calculando a área das lâminas, pode-se perceber que: no GRV 6x4 modificado, houve uma diminuição de 20,5% e; no GRV 6x6 modificado, houve uma diminuição de 22,6%. Logo, as máquinas propostas por esse trabalho, usam menos aço magnético. Além disso, como pode ser visto nos desenhos das laminas, os dentes da máquina modificada são mais finos, possibilitando aumentar o número de expiras por fase, caso isso se mostre conveniente.

9.2 – Propostas e Sugestões para Trabalhos Futuros

1. Repetir os estudos sobre saturação magnética e indutância mútua para Motores a Relutância Variável. Visando melhorar o projeto.
2. Usar os valores de indutância própria e mútua para estimar a posição desses conversores. Eliminando assim, a necessidade de encoder.
3. Usar os valores de indutância própria e mútua para estimar o conjugado de Motores a Relutância Variável.
4. Usar os valores de indutância própria e mútua em técnicas de controle desses conversores.
5. Desenvolver um software que automatize todo processo do projeto de Geradores a Relutância Variável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SOARES G.A. et al. Os novos níveis de rendimento dos motores de indução trifásico. **Revista Eletricidade Moderna**. n. 387, p.42-51, Junho, 2006.
 - [2] ZHENG, Y.; SUN, H.; DONG, Y.; LEI, Z. A current control method of SRM Based on RBF considering the Mutual Inductance with simultaneous two-phase excitation. In: POWER ELETRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 2008. **IEEE Conference Publications**, p. 3569-3573, 2008.
 - [3] ZHENG, Y.; SUN, H.; DONG, Y.; LI, P. A current control method of switched reluctance motors based on Iterative Learning Control considering the mutual inductance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS, 2008. **IEEE Conference Publications**, p. 3401-3404, 2008.
 - [4] BAE, H-K.; KRISHNAN, R. A novel approach to control of switched reluctance motors considering mutual inductance. In: INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY – ANNUAL CONFERENCE OF IEEE, 2000. **IEEE Conference Publications**, v.01, p. 369-374, 2000.
 - [5] PAULA, P.P.; SILVA, W.M.; CARDOSO, J.R.; NABETA, S.L. Assessment of the influences of the mutual inductances on switched reluctance machines performance. In: ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE, 2003. **IEEE Conference Publications**, v.03, p. 1732-1738, 2003.
 - [6] PANDA, D.; RAMANARAYANAN,V. Effect of mutual inductance on steady-state performance and position estimation of switched reluctance motor drive. In: INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE, 1999. **IEEE Conference Publications**, v.04, p. 2227 - 2234, 1999.
-

-
- [7] MOGHBELLI, H.; ADAMS, G.E.; HOFT, R.G. Performance of a 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors. In: IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, 1991. **IEEE Conference Publications**, v.21, n.03, maio/junho, 1991.
- [8] GIERAS, J.F. Comparison of High - Power High - speed Machines: Cage Induction versus Switched Reluctance Motors. In: 5th AFRICON CONFERENCE IN AFRICA, 1999. **IEEE Conference Publications**, v.02, p. 675-678, 1999.
- [9] ANDRADE, D.A.; COSTA, R.S.; TEIXEIRA, R.S.; FLEURY, A.V. Energy Efficiency for Fractional Power Loads: Single-phase switched reluctance Motors offer several advantages. **IEEE Journals & Magazines**, v.02, ed. 6, p. 12-20, 2006.
- [10] ANDRADE, D.A.; COSTA, R.S.; TEIXEIRA, R.S.; FLEURY, A.V. The Single-Phase SRM as an Energy Efficient Solution for Fractional Power Loads. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS, Joinville, 2004.
- [11] KRISHNAN, R., **Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2001. (Industrial Electronic Series).
- [12] MILLER, T.J.E. **Electronic Control of Switched Reluctance Machines**. Edited by T J E Miller, Newness Power Engineering Series, 2001.
- [13] MILLER, T.J.E. **Switched reluctance motors and their control**. Oxford: Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993.
- [14] RADUN, A. Generating with the switched reluctance motor, In: NINTH ANNUAL APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION, 1994. **Proceedings** v. 01, p. 41-47, fev, 1994.

-
- [15] TORREY, D.A. (2002), "Switched reluctance generators and their control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 49, Issue 1, Feb. 2002, pp. 3-14.
- [16] BORGES, T.T., "Motor a relutância chaveado com controle Fuzzy e detecção indireta de posição", Tese, Universidade Federal de Uberlândia, 2002, 183 pp..
- [17] CHUANG, L., JIAGENG, Y., XUEZHONG, Z. LIU, D., "Investigation and practice for basic theory of switched reluctance generators", Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, Volume 1, 27-29 Sept. 2005, pp 575-579.
- [18] RADUN, A.V., FERREIRA, C.A., RICHTER, E., "Two-channel switched reluctance starter/generator results", IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 34, Issue 5, Sept.-Oct. 1998, pp. 1026-1034.
- [19] SAWATA, T., KJAER, P.C., COSSAR, C. MILLER, T.J.E., HAYASHI, Y., "Fault-tolerant operation of single-phase SR generators", IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 35, Issue 4, July-Aug 1999a, pp. 774-781.
- [20] SAWATA, T., KJAER, P.C. COSSAR, C., MILLER T.J.E., "A study on operation under faults with the single-phase SR generator", IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 35, Issue 4, July-Aug 1999b, pp. 782-789.
- [21] S V. F, AUGUSTO, "Modelagem, Construção, Testes e Análise de Desempenho de um Gerador à Relutância Chaveado", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Abril,2008.
- [22] KRISHNAN, R. and SITAPATI, K. "A Novel Single-Phase Switched Reluctance Motor Drive System." IEEE IECON 2001, pp. 1488-1492.
- [23] KRISHNAN, R. and MATERU, PN "Design of a Single-Switch-per-Phase Converter for Switched Reluctance Motor." IEEE Trans. Industrial Applications, Vol. 37, 1990, pp. 469-476.

-
- [24] VUKOSAVIC, Slobodan, and STEFANOVIC, Victor R. "SRM Inverter Topologies: A Comparative Evaluation." IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 6, November/December 1991, pp. 1034-1047.
- [25] BARNES, Mike, and POLLOCK, Charles. "Selecting Power Electronic Converters for Single Phase Switched Reluctance Motors." Power Electronics and Variable Speed Drives, 21-23 September 1998, Conference Publication No. 456 © IEE 1998, pp. 527-531.
- [26] DAHMANE, M., MEIBODY-TABAR, F., SARGOS, F.M., "An adapted converter for switched reluctance motor/generator for high speed applications", Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, Volume 3, 8-12 Oct. 2000, pp. 1547-1554.
- [27] SINGH, N. K., FLETCHER, J. E., FINNEY, S. J., WILLIAMS, B. W., "Evaluation of a sparse PWM converter for Switched Reluctance Generator," International Conference on Power Electronics and Drives Systems, 2005, PEDS 2005, Volume 1, 16-18 Jan. 2006, pp. 721-725.
- [28] TAKAHASHI, A., GOTO, H., NAKAMURA, K., WATANABE, T., ICHINOKURA, O., "Characteristics of 8/6 switched reluctance generator excited by suppression resistor converter", IEEE Transactions on Magnetics, Volume 42, Issue 10, Oct. 2006, pp. 3458-3460.
- [29] FITZGERALD, A. E., KINGSLEY, JR. C. & UMANS, S.D., "Electric machinery", McGraw-Hill Series in Electrical Engineering, 1990, 585 pp..
- [30] DOMINGOS, JOSÉ. L. "Projeto, Construção e Proposta de Acionamento um Motor Linear a Relutância Chaveado." Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Fevereiro, 2003.

-
- [31] COSTA, R.S., “Análise, projeto e construção de um motor monofásico a relutância chaveado: uma solução eficiente para cargas de potência fracionária”, Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia, 2004, 153 pp...
- [32] HWANG, G.R., “Modelagem da máquina a relutância chaveada incluindo a saturação magnética”, Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia, 2002, 89 pp..
- [33] CHEN, H., MENG, X., ZHENG, L., “Design and simulation software package of switched reluctance machine systems for windows 9x in english”, The 2000 IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems, APCCAS 2000, 4-6 Dec. 2000, pp. 489-492.
- [34] ICHINOKURA, O., KIKUCHI, T. NAKAMURA, K., WATANABE, T., HAI-JIAO, G, “Dynamic simulation model of switched reluctance generator”, IEEE Transactions on Magnetics, Volume 39, Issue 5, Part 2, Sept. 2003, pp 3253-3255.
- [35] SKVARENINA, T.L., PEKAREK, S., WASYNCHUK, O., KRAUZE, P.C., THIBODEAUX, R.J., WEIMER, J., “Simulation of a switched reluctance, more electric aircraft power system using a graphical user interface”, Proceedings of the 32nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, IECEC’97, Volume 1, 27 July-1 Aug. 1997, pp. 580-584.
- [36] SKVARENINA, T.L., WASYNCHUK, O., KRAUZE, P.C., CHEN, W.Z., THIBODEAUX, R.J., WEIMER, J., “Simulation and analysis of a switched reluctance generator/more electric aircraft power system”, Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, IECEC’96, Volume 1, 11-16 Aug. 1996, pp. 143-147.
- [37] MCGROW, L., POLLOCK, C., “Low cost brushless generators”, Conference record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference, 1999, Thirty-fourth IAS Annual Meeting, Volume 2, 3-7 Oct. 1999, pp. 1229-1236.

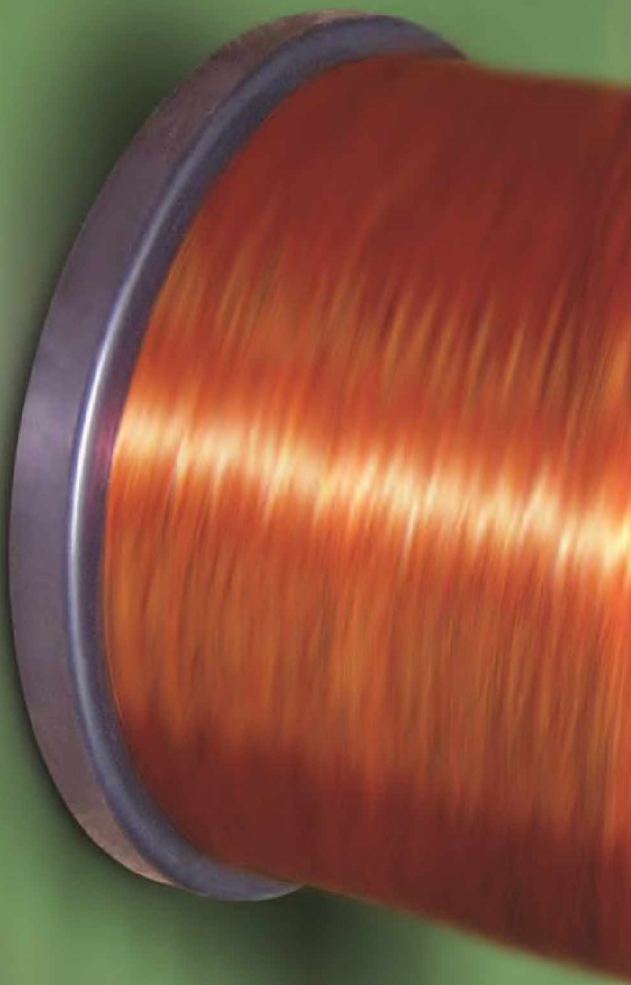
-
- [38] MOREAU, L., MACHMOUM, M., ZAIM, M. E., "Control and minimization of torque ripple in switched reluctance generator", 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, 11-14 Sept. 2005, pp. 8.
- [39] RADIMOV, N., BEN-HAIL, N., RABINOVICI, R., "Simple model of switched reluctance machine base only on aligned an unaligned position data", IEEE Transactions on Magnetics, Volume 40, Issue 3, May 2004, pp. 1562-1572.
- [40] MITCHAM, A.J., GRUM, N., "An integrated LP shaft generator for the more electric aircraft", IEE Colloquium on All Electric Aircraft, 17 June 1998, pp. 8/1 – 8/9.
- [41] RADIMOV, N., BEN-HAIL, N., RABINOVICI, R., "Switched reluctance machines as a three-phase AC autonomous generator", IEEE Transactions on Magnetics, Volume 42, Issue 11, Nov. 2003, pp. 3760-3764.
- [42] CHEN, H., "Electromagnetic design of switched reluctance generator", The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS 2003, Volume 1, 17-20 Nov. 2003a, pp. 777-780.
- [43] ASADI, P., EHSANI, M., FAHIMI, B., "Design and control characterization of switched reluctance generator for maximum output power", Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics and Exposition, 2006, APEC '06, 19-23 March 2006, pp. 6.
- [44] CHANCHAROENSOOK, P., RAHMAN, M.F., "Control of a four-phase switched reluctance generator: experimental investigations", IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2003, Volume 2, 1-4 June 2003, pp. 842-848.
- [45] CHEN, H., AHANG, D., GUO, Y., "A novel green electric drive system", IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Volume 5, 7-10 Oct 2001, pp. 3157-3162.

-
- [46] CHUANG, L., YANGUANG, Y., “Realization of SRG position sensorless technique with current chopping mode”, Proceedings of The Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2001, Volume 2, 18-20 Aug. 2001, pp. 1236-1239.
- [47] ELBULUK, M.E., KANKAM, M.D., “Potential starter/generator technologies for future aerospace applications”, Proceedings of the IEEE 1997 National Aerospace and Electronics Conference, NAECON 1996, Volume 1, 20-23 May 1996, pp. 75-82.
- [48] HAO, C., QIUSHUANG, S., “A switched reluctance variable speed generator”, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, IEEE CCECE 2003, Volume 1, 4-7 May 2003, pp. 467-470.
- [49] MADEMLIS, C., KIOSKERIDIS, I., “Optimizing performance in current-controlled switched reluctance generators”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 20, Issue 3, Sept. 2005, pp. 556-565.
- [50] MESE, E., SOZER, Y., KOKERNAK, J.M., TORREY, D.A., “Optimal excitation of a high speed switched reluctance generator, Fifteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2000, Volume 1, 6-10 Feb. 2000, pp. 362-368.
- [51] AUGUSTO WOHLGEMUTH FLEURY VELOSO DA SILVEIRA “Controle de tensão na carga para motor/gerador a relutância variável de três fases.” Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Fevereiro, 2012.
- [52] RENATO JAYME DIAS “Motores a Relutância Variável 6x4 e 6x6, Estudo Comparativo de Operação e Desempenho.” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Fevereiro, 2011.

-
- [53] ANWAR, M.N; HUSAIN, I.; RADUN, A.V. A comprehensive design methodology for switched reluctance machines. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v.37, n.06, nov/dez, 2001, p. 1684-1692.
- [54] BILGIN, B.; KRISHNAMURTHY, M. An FEA/MATLAB Based Machine Design tool for switched reluctance motors. In: VEHICLE POWER AND PROPULSION CONFERENCE, 2011. **IEEE Conference Publications**, p. 1-6, 2011.
- [55] BRAUER, H.J.; BURKHART, B.; DE DONCKER, R.W. Comprehensive electromagnetic design procedure for switched reluctance machines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS, MACHINES AND DRIVES, 2012. **IET Conference Publications**, p. 1-6, 2012.
- [56] SMAKA, S.; MASIC, S.; HADZIMEJLIC, N.; COSOVIC, M. Design considerations for novel 8/14 and comparison with conventional 8/6 and 8/10 switched reluctance machines. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER ELECTRONICS, ELECTRICAL DRIVES, AUTOMATION AND MOTION, 2012. **IEEE Conference Publications**, p. 614-619, 2012.
- [57] BILGIN, B.; EMADI, A.; KRISHNAMURTHY, M. Design considerations for switched reluctance machines with a higher number of rotor poles. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 59, n. 10, p. 3745-3756, outubro, 2012.
- [58] SCHOFIELD, N.; LONG, S.A.; HOWE D.; MCCLELLAND, M. Design of switched reluctance machine for extended speed operation. **IEEE Transactions on industry applications**, v.45, n. 1, p. 116-122, jan / fev, 2009.
- [59] DANG. J et al. Electromagnetic Design Considerations for a 50,000 rpm 1kW Switched Reluctance Machine using a Flux Bridge. In: INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES & DRIVES CONFERENCE, 2013. **IEEE Conference Publications**, p. 325-331, 2013.

-
- [60] TEIXEIRA, C.; OLIVEIRA, D.N.; PONTES, R.S.T.; VIANA, S.A. Influence of the switched reluctance machines design parameters on its steady-state operation characteristics. In: CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS, 2007. **IEEE Conference Publications**, p. 1455-1459, 2007.

FIOS ESMALTADOS



Anexo A



CATÁLOGO DE FIOS METALCORTE/EBERLE

A Metalcorte/Eberle Motores Elétricos, tradicional fabricante de motores elétricos, coloca à disposição do mercado a linha original de fios esmaltados. Após muitos anos de desenvolvimento e sempre em busca de melhoria contínua, os fios esmaltados Metalcorte/Eberle alcançaram excelente padrão de qualidade, atendendo normas nacionais e internacionais.

NOMENCLATURA	CLASSE TÉRMICA	APLICAÇÕES
EBM 180 Metalterm	H (180°)	É utilizado, em geral, para enrolamentos de motores e transformadores de todos os tipos, que sejam exigidas altas condições de temperatura.

NBR 6727/NBR 5428/NBR 6776

 - Aprovado pelo Underwrites Laboratories Inc. (UL)(E 155802)

TABELA DE DIMENSÕES

Bitola AWG	FIO DE COBRE NU						FIO DE COBRE ESMALTADO			
	Diâmetro(mm)			Secção (mm²)	Resistência Elétrica (Ω/m)	Intensidade de Corrente		GRAU 2 OU CAPA REFORÇADA		
	nominal	min.	máx.			Prático (A)	Segurança (A)	Acréscimo do Isolante (mm) min.	Diâmetro Externo (mm) máx.	Rigidez Diéletrica (V) min.
1	7,350	7,280	7,420	42,4	-	86,4	55,7	-	-	-
2	6,540	6,470	6,610	33,6	-	83,7	44,1	-	-	-
3	5,830	5,770	5,890	26,7	-	52,6	35	-	-	-
4	5,189	5,137	5,241	21,147	-	41,7	27,7	94	5,329	3700
5	4,620	4,574	4,666	16,764	-	33,1	22	91	4,755	3600
6	4,115	4,074	4,156	13,229	-	26,3	17,5	89	4,244	3500
7	3,665	3,628	3,702	10,550	-	20,8	13,8	86	3,787	3400
8	3,264	3,231	3,297	8,367	-	16,5	11	84	3,383	3300
9	2,906	2,877	2,935	6,633	-	13,1	8,7	81	3,020	3200
10	2,588	2,562	2,614	5,260	-	10,4	6,9	79	2,695	6200
11	2,304	2,281	2,327	4,169	-	8,2	5,5	76	2,408	6000
12	2,052	2,031	2,073	3,307	-	6,5	4,4	74	2,151	5800
13	1,829	1,811	1,847	2,627	-	5,2	3,5	71	1,923	5600
14	1,628	1,612	1,644	2,082	-	4,1	2,7	81	1,732	6325
15	1,450	1,435	1,465	1,651	-	3,3	2,2	76	1,547	6175
16	1,290	1,277	1,303	1,307	-	2,6	1,7	74	1,384	6000
17	1,151	1,139	1,163	1,040	-	2	1,3	71	1,240	5850
18	1,024	1,014	1,034	0,8235	-	1,6	1,1	66	1,110	5700
19	0,912	0,903	0,921	0,6533	0,026	1,3	0,86	64	0,993	5550
20	0,813	0,805	0,821	0,5191	0,033	1	0,68	58	0,892	5400
21	0,724	0,717	0,731	0,411	0,042	0,81	0,54	56	0,798	5250
22	0,643	0,637	0,649	0,3247	0,054	0,64	0,43	53	0,714	5125
23	0,574	0,568	0,580	0,2588	0,068	0,51	0,34	51	0,643	5000
24	0,511	0,506	0,516	0,2051	0,085	0,41	0,27	48	0,577	4850
25	0,455	0,450	0,460	0,1626	0,108	0,32	0,21	46	0,516	4725
26	0,404	0,400	0,408	0,1282	0,137	0,25	0,17	43	0,462	4600
27	0,361	0,357	0,365	0,1024	0,172	0,20	0,13	41	0,417	4500
28	0,32	0,317	0,323	0,0804	0,218	0,16	0,11	41	0,373	4375
29	0,287	0,284	0,290	0,0647	0,272	0,18	0,084	38	0,338	4250
30	0,254	0,251	0,257	0,050	0,348	0,10	0,067	36	0,302	4150
31	0,226	0,223	0,229	0,0401	0,441	0,078	0,053	33	0,274	3825
32	0,203	0,200	0,206	0,0324	0,548	0,063	0,042	30	0,249	3525
33	0,180	0,177	0,183	0,0254	0,700	0,050	0,033	28	0,224	3250
34	0,160	0,157	0,163	0,0201	0,890	0,039	0,026	25	0,193	2975
35	0,142	0,139	0,145	0,0158	1,136	0,032	0,021	23	0,176	2750
36	0,127	0,124	0,130	0,0127	1,427	0,025	0,017	20	0,160	2525
37	0,114	0,111	0,117	0,0102	1,781	0,020	0,013	20	0,145	2325
38	0,102	0,099	0,105	0,0082	2,239	0,016	0,010	18	0,130	2150
39	0,089	0,086	0,092	0,0062	2,968	0,012	0,008	15	0,114	1975
40	0,079	0,076	0,082	0,0049	3,800	0,009	0,006	15	0,102	1800
41	0,071	0,068	0,074	0,0040	4,747	0,008	0,005	13	0,091	1675
42	0,064	0,061	0,067	0,0032	5,973	0,006	0,004	10	0,081	1525
43	0,056	0,053	0,059	0,0025	7,560	0,005	0,003	10	0,074	1400
44	0,051	0,048	0,054	0,0020	9,115	0,004	0,002	10	0,069	1300

Aços Planos
RST 453, Km 2,2 - Distrito Industrial - Cx. Postal 938 - CEP: 95110-690 - Caxias do Sul - RS - Fone: (0xx54) 3025 9500 Fax: (0xx54) 3025 9514
Fundição
Rua Dom José Barea, 1501 - Exposição - CEP: 95080-100 - Caxias do Sul - RS - Fone: (0xx54) 3026 3100 Fax: (0xx54) 3026 3135
Eberle Motores Elétricos
BR 116, KM 145, nº 5.000 - São Ciro - CEP: 95059-520 - Caxias do Sul - RS - Fone: (0xx54) 3026 3400 Fax: (0xx54) 3026 3401
www.metalcorte.com
metalcorte@metalcorte.com



EBERLE
MOTORES ELÉTRICOS
Uma empresa **Metalcorte**

ANEXO B

PROJETOS DE PESQUISA E ARTIGOS APROVADOS RELACIONADOS À ESSE TRABALHO

A.1 – Projeto de Pesquisa

Em 2013/1 um projeto de pesquisa foi aprovado na Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC-GO cujo título é: **A importância de se levar em consideração a indutância mútua na modelagem, no projeto e no acionamento de Máquinas a Relutância Variável.**

O qual foi descrito: O foco desse trabalho será em estudar a importância de se considerar a indutância mútua na modelagem, projeto e acionamento de Máquinas a Relutância Variável. Mostrando que, dependendo do acionamento, essa consideração poderá ou não ser significativa. Tendo sempre como meta melhorar a modelagem e os projetos desses conversores.

Situação: Encerrado;

Natureza: Pesquisa.

Alunos envolvidos: Graduação: (5)

Integrantes: Renato Jayme Dias – Coordenador.

Integrantes: Augusto Fleury Veloso da Silveira – pesquisador

A.2 – Artigos completos publicados em congresso

Dias, R. J., Reátegui, C., Costa, C. S., Fleury, A., Andrade, D. A., Neris, N. M., Cardoso, H.C. *A New Desing Methodology of a Switched Reluctance Generator Considering the Influence of the Mutual Inductances*. In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'16), 2016, Madrid. PAPERS ICREPQ'16, 2016.

Fleury, A ; DIAS, R. J. ; W. R. H. Araújo ; A. W. F. V. Silveira ; D. A. Andrade ; G. C. Ribeiro. *Effects of the Mutual inductance on the Switched Reluctance Machines*. In: ICREPQ, 2012, Santiago de Compostela. ICREPQ'2012, 2012.

D. A. Andrade ; GOMES, L. C. ; DIAS, R. J. ; Cabral, L. G. ; A. W. F. V. Silveira ; Fleury, A ; BISSOCHI JUNIOR, C. A. *Comparative study between a Single-phase and a Three-phase switched reluctance machine*. In: Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International, 2011, Niagara Falls, ON. Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International, 2011. p. 1391-1396.

DIAS, R. J. ; D. A. Andrade ; Cabral, L. G. ; A. W. F. V. Silveira ; Fleury, A ; GOMES, L. C. ; BISSOCHI JUNIOR, C. A. *Modeling, Simulation and a Comparative study between a Single-phase Switched Reluctance Machine (6x6) and a Three-phase Switched Reluctance Machine*. In: ICREPQ'11 INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY, 2011, Ilhas Canárias. ICREPQ'11, 2011.

DIAS, R. J. ; COELHO, A. ; Fleury, A . *About phases dependence in a switched reluctance generator*. In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'08), 2008, Santander. PAPERS ICREPQ'08, 2008.

Fleury, A ; COELHO, A. ; DIAS, R. J. ; D. A. Andrade ; A. W. F. V. Silveira . *SOBRE A NECESSIDADE DE LEVAR EM CONTA A INDUTÂNCIA MÚTUA NA MODELAGEM DO GERADOR A RELUTÂNCIA CHAVEADO*. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2008, Juiz de Fora. XVII Congresso Brasileiro de Automática, 2008.

A.2 – Artigos completos publicados em revista

R. J. Dias, C. Reátegui, B. R. Dos Santos, C. S. Costa, A. Fleury and D. A. Andrade.

Innovations on Design of 6x4 and 6x6 Switched Reluctance Generators for Increasing the Efficiency. Latin America Transactions, IEEE Volume 15 Issue 4 April 2017

Dias, R. J., Reátegui, C., Costa, C. S., Fleury, A., Andrade, D. A., Neris, N. M., Cardoso,

H.C. *A New Desing Methodology of a Switched Reluctance Generator Considering the Influence of the Mutual Inductances.* Renewable Energy and Power Quality Journal, v. No.14, 2016.

Fleury, A ; DIAS, R. J. ; W. R. H. Araújo ; A. W. F. V. Silveira ; D. A. Andrade ; G. C.

Ribeiro . *Effects of the Mutual inductance on the Switched Reluctance Machines.* Renewable Energy and Power Quality Journal, v. No.10, p. 686, 2012.

DIAS, R. J. ; D. A. Andrade ; Cabral, L. G. ; A. W. F. V. Silveira ; Fleury, A ; GOMES,

L. C. ; BISSOCHI JUNIOR, C. A.. *Modeling, simulation and a comparative study between a single-phase switched reluctance machine (6x6) and a three-phase switched reluctance machine.* Renewable Energy and Power Quality Journal, v. No.9, p. 512, 2011.

DIAS, R. J. ; COELHO, A. ; Fleury, A . *About phases dependence in switched reluctance*

generator. Renewable Energy and Power Quality Journal, v. No.6, p. 444, 2008.

ANEXO C

PROGRAMA QUE CALCULA AS INDUTÂNCIAS E SUAS DERIVADAS

```
%-----
%
%      Função criada para se determinar os valores da indutâncias
%-----
function [m, m2, m3, derivada, derivada12, derivada13] = findu(I_entrada, Theta_entrada)

Angulo = [0:45];          % valores possíveis para o ângulo

Corrente = [1:45];        % valores possíveis para as correntes

% No capítulo 5 o perfil das indutâncias própria e mútua foram obtidos. Assim, para cada corrente e
% para cada ângulo as indutâncias foram calculadas. Porém, esses cálculos resultaram em matrizes
% que possuíam dois problemas: eram enormes (o que dificultava seu uso) e, possuíam valores
% discretos de indutância (logo, não se tinha o conhecimento das indutâncias para qualquer valor de
% corrente e de posição). Esses dois problemas foram resolvidos usando a função polyfit do
% MATLAB. Essa função transforma vetores em funções numéricas e têm como resultado os
% coeficientes dessas funções. Sendo assim, segue a seguir as matrizes dos coeficientes da matriz de
% indutância. Foi escolhido gerar funções de sétima ordem.

% A matriz C é a matriz da indutância própria da fase energizada.
% A matriz C2 é a matriz da indutância mútua da fase energizada na segunda fase.
% A matriz C3 é a matriz da indutância mútua da fase energizada na terceira fase.

% As linhas dessas matrizes representam os ângulos. Por isso cada matriz tem 45 linhas.
% Uma vez que se sabe a linha (posição) deve-se resolver essa linha para a corrente desejada.
```

```
C = [-3.53135755773399e-011  8.67394849187265e-009  -7.69113655861439e-007  3.18896748026294e-005  -0.000620738596654992  0.00378334575611863  0.0400685859249141
-3.31547593443164e-011  8.35015806273782e-009  -7.50406106880755e-007  3.13748463788986e-005  -0.000614181924941029  0.00375772498488161  0.0399637451985977
-2.03891725102193e-011  6.39168766721737e-009  -6.34071817892678e-007  2.80576737295791e-005  -0.000569699789526333  0.00355862229921113  0.0394691685563495
-2.7314383180875e-012  3.65705602975196e-009  -4.69780890761584e-007  2.33078216588311e-005  -0.000504897617279743  0.0032615905560778  0.0387144299351286
1.56439831589725e-011  7.73324293096391e-010  -2.93859966439725e-007  1.81309719356752e-005  -0.000432801685690098  0.0029224635914048  0.0378239505605838
2.9747832177872e-011  -1.49573320347216e-009  -1.51653793405449e-007  1.3823061738298e-005  -0.000370891543808968  0.0026211580226958  0.0369467883592525
3.85178326058732e-011  -2.97650092737054e-009  -5.42512185022917e-008  1.07254462413421e-005  -0.00032407685741048  0.00238057240584621  0.0361297051194485
4.55125890563405e-011  -4.2061269283644e-009  2.97478966253261e-008  7.95532995562898e-006  -0.00028064062534974  0.00214862623489289  0.035256014545284
5.22207919491818e-011  -5.4117066918913e-009  1.13810462421633e-007  5.12703903511974e-006  -0.000235358186573136  0.00190190932282803  0.0342651496725973
5.7558898046214e-011  -6.40130162998386e-009  1.84786582689699e-007  2.67274579574005e-006  -0.000194937978969237  0.00167732074914518  0.0332060235263755
5.95335590937567e-011  -8.64438617001086e-009  2.2146443137653e-007  1.24693936633315e-006  -0.00016889004422083  0.00152315961228876  0.0321392642799374
5.73286448235616e-011  -6.62555855900876e-009  2.17637567690583e-007  1.00017147367249e-006  -0.000158784637568898  0.00144231749576317  0.0311095994112736
5.58293643469837e-011  -6.51592597962577e-009  2.20517423745886e-007  5.49679685249954e-007  -0.000145623712079084  0.0013464049462249  0.0299823578686143
5.57926972159431e-011  -6.62143609567132e-009  2.35618378791563e-007  -2.35351490968779e-007  -0.000128056346575195  0.00122939815924259  0.028797563875989
5.62729009498696e-011  -6.77204705395213e-009  2.51070692599557e-007  -9.55633136734307e-007  -0.000112453190502852  0.00112760967595838  0.0275817466764582
5.45233825838387e-011  -6.56575219512928e-009  2.44300549651386e-007  -1.00940827768416e-006  -0.000106256581358154  0.00107056501013075  0.0264320268880951
5.20447879567904e-011  -6.25338041249406e-009  2.3161732872533e-007  -9.07624002197274e-007  -0.000101913429632654  0.00101999913658517  0.0252805664989202
5.05654358567332e-011  -6.11960172552739e-009  2.31217915488486e-007  -1.20797935694369e-006  -9.14392335212306e-005  0.0009375357185313  0.0240723520746722
5.00402148060606e-011  -6.13445733431017e-009  2.39818439782315e-007  -1.7705300607479e-006  -7.73663217815152e-005  0.00083756235878039  0.0228454708771843
4.86213203425828e-011  -5.99569251794806e-009  2.38204716376985e-007  -2.0068676798607e-006  -6.82352268625267e-005  0.000764773769015904  0.0216315020512182
4.45478789582738e-011  -5.45429327681613e-009  2.13080735115923e-007  -1.58904080021639e-006  -6.76178663197427e-005  0.000730023291183499  0.0204630977951399
4.11518006098417e-011  -5.02716406296288e-009  1.95473787866818e-007  -1.41107724083975e-006  -6.33512610520916e-005  0.000676045876327565  0.0192618917895464
3.90826603265752e-011  -4.81028335583452e-009  1.9080944790853e-007  -1.61718893106706e-006  -5.36583873083758e-005  0.000595730271651967  0.0180173291628026
3.70918885630875e-011  -4.6026630901187e-009  1.86491274213009e-007  -1.82625760930158e-006  -4.40970112650758e-005  0.000517134517820751  0.0167660249050861
3.70696866267968e-011  -4.17535839235607e-009  1.687018863536e-007  -1.63579432971625e-006  -4.01637213713174e-005  0.000467169645042572  0.015392896949517
5.682680841625201e-011  -3.4897334491631e-009  1.36470472037472e-007  -1.0661148432276e-006  -4.07868919065026e-005  0.000435462781008695  0.0143412696521106
2.42938655534654e-011  -2.95081791959731e-009  1.13759672338885e-007  -7.94379197633779e-007  -3.7012220410868e-005  0.000382311354838608  0.0130742068198447
2.00551697744167e-011  -2.44203013166938e-009  9.2285148984885e-008  -5.73796617853977e-007  -3.23370259881567e-005  0.00032427567602425  0.0118092259715483
1.63020255473751e-011  -1.95453338980781e-009  7.3061119417201e-008  -3.80512395594358e-007  -2.78654196025603e-005  0.000271197983491891  0.0105314284099617
1.18946901610221e-011  -1.39434671730162e-009  4.90400355291446e-008  -6.55771186278328e-008  -2.4900572688407e-005  0.000225161241613455  0.00927705048244741
6.833396463923e-012  -7.50000134643209e-010  2.11150583544204e-008  3.25708055886478e-007  -2.24843919339312e-005  0.00018078970248621  0.00800422770275543
2.40630328616863e-012  -2.10441937581151e-010  -1.16100955294363e-010  5.12441652820231e-007  -1.7137383513301e-005  0.000121158750008335  0.00675054113104816
5.53452766682087e-013  -4.57866168328489e-011  -5.994851329199276e-010  1.64831991770597e-007  -5.66876716681558e-006  4.04187578196033e-005  0.00548748610704891
2.39070605480994e-013  -3.85471661630226e-011  2.36294894524067e-009  -6.26715780667135e-008  3.35366500456833e-007  4.01480267849469e-006  0.00450696418487615
5.63729105255365e-014  -8.69455178954401e-012  5.34010133444449e-010  -1.58207537411847e-008  1.01843255142175e-007  2.498097558326e-006  0.00400632105975808
6.04028502831181e-014  -8.83221836588716e-012  4.9225923628158e-010  -1.27570738336478e-008  8.88010784452112e-008  1.92181357530155e-006  0.00370824955823898
3.3750297925963e-014  -5.78047072881286e-012  3.7528796436332e-010  -1.12356183318999e-008  1.1563143974358e-007  1.11147096614078e-006  0.00349823886810625
6.33955511862874e-014  -3.35553739471828e-012  5.25042489612316e-010  -1.35904127794418e-008  1.26634160557282e-007  1.04301671694778e-006  0.0033449376987527
6.22166532844497e-014  -9.18657564068132e-012  5.17386540316572e-010  -1.35045700250382e-008  1.33721267776536e-007  8.0180725979912e-007  0.0032247633550352
6.13332477454471e-014  -9.00272869503938e-012  5.04594901601578e-010  -1.32428806127756e-008  1.31888102485325e-007  6.96116417483523e-007  0.00313441946667376
6.56583179965628e-014  -9.44241615213509e-012  5.17181345696176e-010  -1.30934494411783e-008  1.27722525414812e-007  6.84373955062527e-007  0.00306133470350336
5.52546833871605e-014  -8.1906876891033e-012  4.65234571750783e-010  -1.23424573436518e-008  1.31336889840618e-007  4.98286678371731e-007  0.00300985541710802
5.3958351157285e-014  -7.98845163923607e-012  4.53431280767033e-010  -1.20318625010288e-008  1.28825123642612e-007  4.63326003401393e-007  0.00297054174495911
```


5.26331081617229e-014 -7.80249611382919e-012 4.43769154842493e-010 -1.18142191168689e-008 1.27666619107174e-007 4.30794004895954e-007 0.00294297956673113
4.58635219934687e-014 -6.97978590679867e-012 4.09050437699309e-010 -1.12784179610649e-008 1.28261934722585e-007 3.46776597525413e-007 0.00292617470754149
5.4860267091383e-014 -8.03755074277218e-012 4.51378140620753e-010 -1.18517407954794e-008 1.25977299157511e-007 4.40099057020498e-007 0.00292110359949304]

C2 = [936.164646837151e-015 -140.378392060578e-012 8.25238868017278e-009 -240.633985390972e-009 3.57006234089011e-006 -23.0421919881449e-006 181.0423767202001e-006
761.747179537439e-015 -113.743231715842e-012 6.67207653910030e-009 -195.165498052864e-009 2.93052436673084e-006 -19.0859836213325e-006 159.045712431003e-006
592.379232388192e-015 -87.8773774097495e-012 5.12846093442141e-009 -150.048577773777e-009 2.27850664412249e-006 -15.0721412195659e-006 137.339280339050e-006
471.078954700117e-015 -69.4002758372480e-012 4.02405157562737e-009 -117.444609846255e-009 1.79735803179106e-006 -12.1080391400124e-006 120.468620385815e-006
405.254068459549e-015 -59.6459329504894e-012 3.45803172785096e-009 -101.166712288237e-009 1.56096853613466e-006 -10.6866752801114e-006 110.666095907968e-006
360.552518201141e-015 -53.3754882388763e-012 3.11585058665597e-009 -91.7972093784276e-009 1.42662074404941e-006 -9.90938354167024e-006 103.646351927298e-006
330.1999466001214e-015 -49.4402168766386e-012 2.9175318652609e-009 -86.5589853674801e-009 1.34689687144172e-006 -9.44308898504143e-006 98.30842237883e-006
314.338787373021e-015 -47.5335538174096e-012 2.82696930858930e-009 -83.9985906747287e-009 1.29815835620775e-006 -9.13191220267020e-006 93.8527436991813e-006
310.72137232572e-015 -47.3072075135446e-012 2.82467994113792e-009 -83.6769798468778e-009 1.27741572177222e-006 -8.97475712734879e-006 90.0206572034894e-006
315.330206059179e-015 -48.101172898984e-012 2.86977145824436e-009 -84.4356881476943e-009 1.27010235584963e-006 -8.89278302403486e-006 86.7147983468229e-006
317.803984193380e-015 -48.4437658613971e-012 2.88248060384016e-009 -84.42290909285141e-009 1.25126210337376e-006 -8.75297678842523e-006 83.7161107885078e-006
314.631470961393e-015 -47.9190387573323e-012 2.84616722626218e-009 -82.8368776649156e-009 1.22197971735430e-006 -8.58925013510316e-006 81.1039208136226e-006
303.524175421108e-015 -46.211179566365e-012 2.74431822147795e-009 -79.8591981524742e-009 1.17789820011981e-006 -8.3777217378434e-006 78.6699074875128e-006
289.538724830576e-015 -44.066838052934e-012 2.61763617116997e-009 -76.273365540733e-009 1.12865289858134e-006 -8.14696229610753e-006 76.4256107434146e-006
280.090977526947e-015 -42.5322399848575e-012 2.52126903823880e-009 -73.3981788001209e-009 1.08806640103335e-006 -7.95491872920821e-006 74.3476554243984e-006
274.761562312788e-015 -41.5942910550845e-012 2.45741904564518e-009 -71.3489361938937e-009 1.05774810322185e-006 -7.81850155244328e-006 72.1730795652452e-006
267.701528589825e-015 -40.4799833884438e-012 2.38855227884897e-009 -69.3099635588953e-009 1.02971430422851e-006 -7.69832951639303e-006 71.1713858673205e-006
257.942346727197e-015 -38.7903714607757e-012 2.30225985554479e-009 -66.9575502102862e-009 999.845586860086e-009 -7.5734556243860e-006 69.7621390658347e-006
245.902773263599e-015 -37.2903141662614e-012 2.20891818163250e-009 -64.5069995296910e-009 970.168223769873e-009 -7.45367934831985e-006 68.4093198915315e-006
234.896101588053e-015 -35.6728200934627e-012 2.11782319770996e-009 -62.0817881571482e-009 940.360597211513e-009 -7.33037715824723e-006 67.3431620607869e-006
224.987892101177e-015 -34.1809984763918e-012 2.03191105930196e-009 -59.756404889248e-009 911.694679093646e-009 -7.21483624997520e-006 66.4236640200453e-006
213.786499523887e-015 -32.5291682071239e-012 1.93868173303022e-009 -57.72776590182600e-009 881.540093277440e-009 -7.09126557325253e-006 65.591207178692e-006
202.953876603588e-015 -30.9192547460930e-012 1.84674351727489e-009 -54.78818120477867e-009 850.2446168878222e-009 -6.94966244831461e-006 64.8127965566954e-006
190.472802015249e-015 -29.089658299507e-012 1.74372475546062e-009 -52.0296032039397e-009 815.594394483329e-009 -6.78866198640766e-006 64.1827527705412e-006
178.08003275178e-015 -27.2537811669007e-012 1.63920964678482e-009 -49.2032884968827e-009 779.983516380968e-009 -6.62788480169180e-006 63.8149758574004e-006
164.603746729472e-015 -25.2701471253712e-012 1.52728375056752e-009 -46.2175827632378e-009 743.42800809354e-009 -6.48329050310356e-006 63.872823956804e-006
149.118273780804e-015 -22.9824035742420e-012 1.39747235902561e-009 -42.7210487441219e-009 699.841544144566e-009 -6.30561621275109e-006 64.184023033321e-006
133.9436848490975e-015 -20.7609806250471e-012 1.2734014361744e-009 -39.4882926559554e-009 663.140866280201e-009 -6.23361911069067e-006 65.838736087256e-006
121.561900264302e-015 -18.9964194988920e-012 1.17992749258367e-009 -37.3484352033870e-009 649.767242131916e-009 -6.47702763404592e-006 70.5122990199481e-006
97.287696776893e-015 -15.4705986998432e-012 985.217129238075e-012 -32.3875963210016e-009 598.101652076835e-009 -6.5183725695042e-006 75.7274878086722e-006
95.9587216860889e-015 -8.66461263737072e-012 588.859513075860e-012 -21.2046279387861e-009 444.467591907468e-009 -6.68061441915539e-006 76.9999830814244e-006
-1.67157225684790e-015 -25.4106229288747e-015 105.816580296551e-012 -7.10700209284205e-009 235.943570551932e-009 -4.25894229278602e-006 74.972202026521e-006
-59.45834086640195e-015 6.30305413187887e-012 -313.507647064282e-012 5.8569581928271e-009 23.1593270627282e-009 -2.46276585431989e-006 69.3588432216984e-006
-59.4581288463607e-015 8.70471453229970e-012 -481.449449717661e-012 1.1938509417952e-009 -98.1047638966163e-009 -1.17125738122956e-006 64.079443230510e-006
-61.780594055888e-015 9.23815741958867e-012 -528.628398502492e-012 14.0121985790373e-009 -145.902541734813e-009 -627.489014625926e-009 62.5581525009516e-006
-61.215179032657e-015 9.26816464617187e-012 -540.536037332752e-012 14.8206605347428e-009 -169.174024637966e-009 -338.980200710689e-009 62.44777685186e-006
-59.1457242104445e-015 9.03881009591196e-012 -534.411508557505e-012 14.9888876262292e-009 -180.380685490904e-009 -161.955774712645e-009 62.6079627377461e-006
-57.4500932677015e-015 8.8580739193760e-012 -529.8876300700716e-012 15.1389591952018e-009 -189.367368978029e-009 -31.9411212044024e-009 63.4891487862318e-006
-55.7152673430204e-015 8.65278332296291e-012 -523.027056294118e-012 15.1709634314493e-009 -195.401021796112e-009 62.6427787594843e-009 64.5835625577342e-006
-54.7548664194121e-015 8.8186735321928e-012 -518.89288039386e-012 15.2249644207944e-009 -200.382795371064e-009 132.977650954113e-009 65.84317511757e-006
-53.2614489811603e-015 8.86876637893537e-012 -513.799416585035e-012 15.2428208753476e-009 -204.524607069153e-009 194.990047411085e-009 67.193556684163e-006
-52.5164901662617e-015 8.26455566327144e-012 -511.331620735684e-012 15.2850937494507e-009 -207.786073576111e-009 235.428300069705e-009 68.6312657116006e-006
-52.3158324106974e-015 8.28775178670049e-012 -514.250694780947e-012 15.4829148961436e-009 -213.0192801076651e-009 279.801551889275e-009 70.2634588052733e-006
-52.8832330156349e-015 8.395156946027399e-012 -522.035498349345e-012 15.781695494062e-009 -218.839714010740e-009 315.938814383151e-009 72.2704680416510e-006
-53.3368060460176e-015 8.49401276704220e-012 -530.634448426348e-012 16.1236276865914e-009 -225.344896461835e-009 354.383346496209e-009 74.2409662103686e-006
-54.9050018690785e-015 8.741912516284286e-012 -546.1403565027830e-012 16.0601663824747e-009 -232.709832622623e-009 386.289845488588e-009 76.2740349278015e-006]

C3 = [944.88582482892e-015 -141.819924543111e-012 8.34153008074247e-009 -243.133403046780e-009 3.59997885059182e-006 -23.1541280623249e-006 181.134205815876e-006
1.13344712456957e-012 -170.47559788883e-012 10.02278169688730e-009 -290.435788072443e-009 4.24090636675729e-006 -27.0826961490384e-006 204.410779441025e-006
1.284065444379103e-012 -19.159068833050e-012 11.4615960735061e-009 -332.0709845257719e-009 4.8169633372080e-006 -30.7653395479264e-006 226.366246585071e-006
1.44287047001644e-012 -218.7615036036814e-012 12.9329972561126e-009 -374.3926612677094e-009 5.40485300025589e-006 -34.626179486141e-006 246.876269287496e-006
1.53295501994678e-012 -233.742955347863e-012 13.9026304043226e-009 -404.678066178561e-009 5.86452092988986e-006 -37.9753194198469e-006 265.230894943267e-006
1.5872436839289e-012 -243.542228318380e-012 14.5887067683121e-009 -427.7194324068e-009 6.23980632834620e-006 -40.9679312469161e-006 282.254975913522e-006
1.6205192006705e-012 -249.818565117728e-012 15.0476129564642e-009 -443.811208306099e-009 6.51504746007903e-006 -43.3936045021366e-006 297.162855190476e-006
1.6752751621744e-012 -258.539256253184e-012 15.6008568779165e-009 -461.364986122573e-009 6.80222943794509e-006 -45.9307313496900e-006 311.830875744696e-006
1.73047509969407e-012 -266.54594080208e-012 16.0591200616912e-009 -474.736811162122e-009 7.01848858431984e-006 -48.0644364919063e-006 325.026665851899e-006
1.80991352478552e-012 -278.598684609176e-012 16.6465926632040e-009 -490.079046334e-009 7.23883329603643e-006 -50.104228845717e-006 337.017454675403e-006
1.8883418536625e-012 -288.619669875353e-012 17.2293295461497e-009 -504.868062199018e-009 7.44288003994152e-006 -51.9827914046576e-006 347.955328069370e-006
1.9269573983805e-012 -296.7803521723359e-012 17.519588176708e-009 -512.912524141267e-009 7.55601273465625e-006 -53.388529986282e-006 357.346677187272e-006
1.91098129495191e-012 -292.097547868582e-012 17.42227446504348e-009 -510.391512338988e-009 7.56788450583108e-006 -54.3026690725502e-006 365.471270987981e-006
1.87980648440379e-012 -287.803521723359e-012 17.2051031669296e-009 -505.7698286707154e-009 7.55190277731180e-006 -55.0688492206858e-006 372.731689458029e-006
1.82926928208007e-012 -280.271844521274e-012 16.782432367651e-009 -495.025827842607e-009 7.44842287482676e-006 -55.2816992904181e-006 378.047693117954e-006
1.79488186373424e-012 -274.599649663136e-012 16.431279086936e-009 -485.214700613557e-009 7.23115986292591e-006 -55.3289591934025e-006 381.95431829016e-006
1.75811258751786e-012 -268.61085321349e-012 16.0604468271500e-009 -474.622707307339e-009 7.21797615517687e-006 -55.2200251450474e-006 385.112939388574e-006
1.71829792170097e-012 -262.323144923634e-012 15.6793258731775e-009 -463.856493568504e-009 7.09022868655160e-006 -55.0075767377895e-006 387.295131490114e-006
1.66014315088082e-012 -253.690237562943e-012 15.1849703004405e-009 -450.427271337346e-009 6.92769421383687e-006 -54.5130619988838e-006 387.846237705189e-006
1.58340372734765e-012 -242.156489805438e-012 14.5148966211338e-009 -437.163889600216e-009 6.6847866572650e-006 -53.4167907732957e-006 386.23606554456e-006
1.49613989079160e-012 -229.183645197025e-012 13.710949524899e-009 -411.308618858817e-009 6.4188254858638e-006 -52.1372004932254e-006 383.384603750153e-006
1.39554136472128e-012 -214.118067588406e-012 12.9000389595128e-009 -387.073700881283e-009 6.09490457808803e-006 -50.4057291131933e-006 378.706076878948e-006
1.27924021826692e-012 -196.683222161886e-012 11.8891112366458e-009 -358.756144519689e-009 5.70879201542167e-006 -48.1893431681963e-006 372.168021334151e-006
1.1501466948371e-012 -177.228935379408e-012 10.7517572214047e-009 -326.451455024742e-009 5.2559151206931e-006 -45.3970212309556e-006 362.043420850300e-006
1.0059090549832e-012 -155.518913712708e-012 9.4809020884131e-009 -290.19650986808e-009 4.74150984899878e-006 -42.1128036557020e-006 351.498895914005e-006
855.297109575807e-015 -132.7047231780670e-012 8.13701688591093e-009 -251.542559900747e-009 4.18581782616257e-006 -38.84627040557431e-006 337.921368684665e-006
692.987989587022e-015 -108.19157788903e-012 6.69428395914029e-009 -209.920049461341e-009 3.57974292262953e-006 -34.321798537319e-006 321.81889667611e-006
507.560734085690e-015 -80.1365751287839e-012 5.03833366934074e-009 -161.913984532145e-009 2.87435029161692e-006 -29.4514038068800e-006 302.443005297041e-006
334.433817623486e-015 -53.768784791738e-012 3.46577503241107e-009 -115.6376308595768e-009 2.1767332298744e-006 -24.3056588091569e-006 279.912813021026e-006
170.632708878556e-015 -28.662752463461e-012 1.9583321446435e-009 -70.7316005815710e-009 1.48443777887886e-006 -18.9902305121017e-006 253.435407265764e-006
-156.04235414487e-015 22.2595572752519e-012 -1.18653345185394e-009 27.5021756605951e-00

```

CorrenteLs = max(Corrente);

% Descobrimos a quantidade de valores de entrada
[ k ce ] = size(Theta_entrada);
[ k le ] = size(I_entrada);

for linha = 1:le

    I = I_entrada(linha);

    if I > CorrenteLs                % Limita o valor da corrente máxima.
        I = CorrenteLs;
    end
    if I < CorrenteLi                % Limita o valor da corrente mínima.
        I = CorrenteLi;
    end

    Ia = I;

for coluna = 1:ce

    Theta = Theta_entrada(coluna);

    Theta = mod(Theta,2*Angulo(Dl));    % Limita o valor de theta de zero à noventa graus

    derivada = 1;

    Thetar=Theta;
    Thetar1=Theta;
    if Theta > Angulo(Dl)                % Caso theta seja maior que 45° significa que a derivada
        Theta = Angulo(Dl)-(Theta-Angulo(Dl)); % deve ser negativa.
        derivada = -1;
    end

    indice = floor((Theta-(Angulo(1)))/DAngulo)+1; % descobre o próximo valor inteiro de Theta.
    Theta1 = indice;

    if Theta ~= Angulo(Dl)                % busca nas matrizes os valores de indutância para quando
        Theta2 = indice+1;                % o ângulo é diferente de 45°.
        Ind1 = polyval(C(Theta1,:),I);
        Ind2 = polyval(C(Theta2,:),I);
        derivada = derivada*(Ind2-Ind1);
        m(linha,coluna) = ((Ind2-Ind1)/(Angulo(Theta2)-Angulo(Theta1)))*(Theta-Angulo(Theta1))+Ind1;

        if Thetar > Angulo(Dl)

            Ind13= polyval(C2(Theta1,:),I);
            Ind132= polyval(C2(Theta2,:),I);

            Ind12= polyval(C3(Theta1,:),I);
            Ind122= polyval(C3(Theta2,:),I);

            derivada13= derivada*(Ind12-Ind122);
            derivada12= derivada*(Ind13-Ind132);

```

```

m3(linha,coluna) = ((Ind12-Ind122)/(Angulo(Theta2)-Angulo(Theta1)))*(Theta-Angulo(Theta1))+Ind12;
m2(linha,coluna) = ((Ind13-Ind132)/(Angulo(Theta2)-Angulo(Theta1)))*(Theta-Angulo(Theta1))+Ind13;

else

Ind12= polyval(C2(Theta1,:),I);
Ind122= polyval(C2(Theta2,:),I);

Ind13= polyval(C3(Theta1,:),I);
Ind132= polyval(C3(Theta2,:),I);

derivada12= derivada*(Ind12-Ind122);
derivada13= derivada*(Ind13-Ind132);

m2(linha,coluna) = ((Ind12-Ind122)/(Angulo(Theta2)-Angulo(Theta1)))*(Theta-Angulo(Theta1))+Ind12;
m3(linha,coluna) = ((Ind13-Ind132)/(Angulo(Theta2)-Angulo(Theta1)))*(Theta-Angulo(Theta1))+Ind13;
end

else
% Se o ângulo for 45° a derivada da indutância própria é zero.
m(linha,coluna) = polyval(C(Theta1,:),I);
derivada = 0;
Theta2 = indice-1; % não temos 46° por isso usa-se o ponto 44 e inverter a derivada da mutua.
end
end
end

```

ANEXO D





ANEXO E

DETALHES SOBRE O USO DO FEMM (SCRIPT LUA)

E.1 Pós-processador

O pós-processador é utilizado para visualizar e tratar os dados das soluções geradas pela análise. A janela do pós-processador pode ser aberta através do carregamento de uma análise executada anteriormente (em *File/Open*, no menu principal), ou pressionando o ícone “*big magnifying glass*” dentro de uma janela de pré-processamento para ver uma solução recém gerada. Os arquivos de dados do pós-processador tem extensão *.ans*.

Este modo possibilita a visualização de diversas variáveis e a realização de cálculos importantes para a análise do comportamento da máquina em estudo.

As ações a serem realizadas no modo pós-processador foram executadas através da janela do Console Lua, pois desta forma é possível obter os valores desejados para cada posição angular do rotor de forma menos repetitiva. Uma descrição detalhada do Console Lua e dos comandos utilizados no modo pós-processador será abordada nessa seção.

Os dados foram coletados com apenas uma fase da máquina energizada, com uma corrente variando de 1 a 45 A, de um em um ampère. O posição angular do rotor foi programada para variar de 0 a 90°, de um em um grau, para cada valor de corrente. Desta forma foi possível obter uma família de curvas da indutância variando em relação à posição do rotor, sendo uma curva para cada valor de corrente.

E.2 Linguagem de extensão e Console Lua

Lua é uma linguagem de programação de extensão projetada para dar suporte à programação procedimental. Por ser uma linguagem de extensão, Lua somente funciona embargada em um programa hospedeiro, podendo ser estendida para lidar de maneira apropriada com uma ampla variedade de domínios, permitindo assim a criação de linguagens de programação personalizadas.

A linguagem de extensão Lua tem sido usada para adicionar recursos de processamento de linhas de comando ao FEMM. A interface interativa pode executar

comandos inseridos através do carregamento de programas salvos (em *File/Open Lua Script*) ou os comandos podem ser inseridos diretamente no Console Lua (em *View/Lua Console*).

Além do conjunto padrão de comandos Lua, foram adicionadas funções específicas do FEMM para a manipulação de arquivos tanto no modo pré-processador quanto no pós-processador.

Existe uma série de comandos Lua específicos do FEMM que não estão associados a nenhum tipo de problema em particular, porém algumas funções são específicas para utilização no modo pré-processador ou pós-processador. Para diferenciar as funções exclusivas de cada modo, basta observar as duas primeiras letras do comando: no pré-processamento os comandos começam com “mi” e as do pós-processamento “mo”.

Segue abaixo uma lista das funções utilizadas na realização deste trabalho, bem como a descrição de cada uma.

- `clearconsole()` → Esta função limpa a janela de saída do console Lua.
- `open("filename")` → Esta função abre o documento especificado por *filename*.
- `print()` → Este é um comando padrão Lua que direciona dados para a janela de saída do console. Qualquer quantidade de itens pode ser impresso de uma só vez se separados por vírgula.
- `mi_selectgroup(n)` → Seleciona todos os elementos classificados no grupo *n* (nós, segmentos, arcos e etiquetas de blocos). Esta função limpa a seleção de elementos feita anteriormente e configura o modo de edição em “grupo”.
- `mi_analyze(flag)` → executa o *solver*. O parâmetro *flag* controla quando a janela de status do *solver* é visível ou minimizada. Para manter a janela de status visível, especifique 0 ou nenhum valor. Para manter a janela de status minimizada especifique 1.
- `mi_loadsolution()` → Carrega e mostra a solução correspondente à geometria atual.
- `mi_saveas("filename")` → Salva o arquivo com “filename”. Para usar um endereço devem ser usadas suas barras invertidas (Exemplo: “C:\\temp\\myfemmfile.fem”).
- `mi_moverotate(bx,by,shiftangle(editaction))` → *bx* e *by* são as coordenadas do ponto de base para a rotação; *shiftangle* é o ângulo em graus para rotação dos objetos selecionados; *editaction* é onde deve ser selecionado o modo de edição (0 para nós, 1 para retas, 2 para etiquetas de bloco, 3 para arcos e 4 para grupos).

-
- `mi_seteditmode(editmode)` → Configura o modo de edição atual. Em *editmode* deve ser colocado entre aspas o modo de edição desejado (“nodes”, “segments”, “arcsegments”, “blocks” ou “group”); Este comando valerá para todas as ações subsequentes de outros comandos de edição se eles forem usados sem o parâmetro *editaction*.
 - `mi_addcircprop("circuitname",i,circuittype)` → Adiciona uma nova propriedade de circuito ao “circuitname” com a corrente determinada, *i*. O parâmetro *circuittype* é 0 para circuitos com ligações em paralelo e 1 para ligações em série.
 - `mo_blockintegral(type)` → Calcula a integral de bloco para os blocos selecionados. O Parâmetro *type* é definido de acordo com a definição do tipo de integral, tais definições podem ser encontradas em [2].

Para o cálculo da indutância própria é necessário calcular $\int A \cdot J dV$ (*type* 0) sobre o volume das bobinas da fase em questão; “A” corresponde ao fluxo magnético e “J” à densidade de corrente.

No FEMM a fórmula para o cálculo da indutância própria é:

$$L_{própria} = \frac{\int A \cdot J dV}{i^2} \quad (\text{Equação 1})$$

onde *i* a corrente na bobina.

Assim, deve-se calcular a integral do tipo 0 e depois este valor deve ser dividido pelo quadrado da corrente.

Para o cálculo das indutâncias mútuas é necessário calcular a integral $\int A dV$ (*type* 1). Similar à fórmula de indutância própria, a indutância mútua é:

$$L_{mútua} = \frac{\int A_1 \cdot J_2 dV_2}{i_1 i_2} = \frac{n_2}{i_1 a_2} \left(\int_{J_{2+}} A_1 dV_2 - \int_{J_{2-}} A_1 dV_2 \right) \quad (\text{Equação 2})$$

onde n_2 é o número de voltas na bobina 2; a_2 é a área da bobina 2; A_1 a componente de A produzida pela primeira bobina; J_2 é o componente J na segunda bobina; i_1 e i_2 são as correntes na primeira e segunda bobina, respectivamente; e dV_2 denota que a integral é feita em relação ao volume da segunda bobina.

Assim, primeiro deve ser calculada a integral do tipo 1 sobre o volume da segunda bobina. Como se trata de um problema planar, devem ser feitas duas integrações separadas (isto é, uma sobre a região de sentido positivo da corrente e outra sobre a região de sentido

negativo). Os dois valores de integração são somados e finalmente multiplicados por n_2/i_1a_2 para obter a indutância mútua.

- `mo_groupselectblock(n)` → Seleciona todos os blocos marcados com etiquetas de blocos que são membros do grupo n . Se nenhum número for especificado, todos os blocos são selecionados.
- `mo_showdensityplot(legend, gscale, upper_B, lower_B, type)` → Mostra o gráfico da densidade de fluxo com as definições de: *Legend* define se a legenda é visível ou não (0 para esconder e 1 para mostrar); *gscale* define escala de cor do gráfico de densidade (0 para colorido e 1 para escalas de cinza); *upper_B* determina o maior valor mostrado no gráfico de densidade; *lower_B* determina o menor valor; *type* configura a natureza dos valores, sendo *bmag* para magnitude, *breal* para componente real e *bimag* para componente imaginário da densidade de fluxo.
- `mo_close()` → Fecha a janela do modo pós-processador.
- `mo_savebitmap("filename")` → Salva uma captura de tela de bitmap da imagem atual no arquivo especificado por "*filename*".
- `mo_clearblock()` → Limpa a seleção do bloco.

Para a programação foi necessário separar os elementos da geometria da máquina em grupos. Para isto é necessário selecionar todos os elementos (nó, reta, arco ou etiqueta de bloco) e definir a qual grupo ele pertence através das propriedades do elemento, que podem ser editadas pressionando a barra de espaço. É importante que as etiquetas de bloco sejam selecionadas individualmente, caso contrário as definições realizadas anteriormente podem ser alteradas.

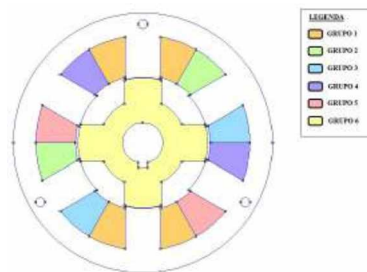


Figura 1 - Representação da definição dos blocos em grupos

A Fig. 1 mostra como foi feita a divisão dos grupos para a programação descrita a seguir, que foi a utilizada para obter os valores de indutâncias própria e mútuas na simulação da MRV 6x4.

```

open("Simulação.fem")
mi_saveas("Simulação_teste.fem")
mi_seteditmode("group")
    for i = 1,45 do
        mi_modifycircprop("Circuito_1",i,1)
        for n=0,90 do
            mi_analyze()
            mi_loadsolution()
            mo_showdensityplot(1,0,5,0,"bmag")
            mo_savebitmap(format("mr%1$d_%2$d.bmp",i,n))
            mo_groupselectblock(1)
            L=mo_blockintegral(0)/i^2
            print(n,L*1000) -- Indutância em mH
            mo_clearblock(1)
            mo_groupselectblock(2)
            Ansb = mo_blockintegral(1)
            print(n,Ansb) -- A negativo da bobina 2
            mo_clearblock(2)
            mo_groupselectblock(3)
            Apsb = mo_blockintegral(1)
            print(n,Apsb) -- A positivo da bobina 2
            mo_clearblock(3)
            Lmps = (100/(i*0.00128669))*(Apsb - Ansb)
            print(n,Lmps)
            mo_groupselectblock(4)
            Antb = mo_blockintegral(1)
            print(n,Antb) -- A negativo da bobina 3
            mo_clearblock(4)
            mo_groupselectblock(5)
            Aptb = mo_blockintegral(1)
            print(n,Aptb) -- A positivo da bobina 3
            mo_clearblock(5)
            Lmpt = (100/(i*0.00128669))*(Aptb - Antb)
            print(n,Lmpt)
            mo_close()
            mi_selectgroup(6)
            mi_moverotate(263.639,219.357,-1)
        end
        mi_selectgroup(6)
        mi_moverotate(263.639,219.357,1)
    end

```
