

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS IV
COORDENAÇÃO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNA ADERBAL DE OLIVEIRA

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ESTUDO COMPARATIVO ENTRE UM
GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8X6 E UM GERADOR A RELUTÂNCIA
VARIÁVEL 12X8**

GOIÂNIA

2019



**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG _ ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Bruna Aderbal de Oliveira

Matrícula: 20141011060231

Título do Trabalho: Modelagem, Simulação e Estudo Comparativo entre um Gerador a Relutância Variável 8x6 e um Gerador a Relutância Variável 12x8

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 27/09/2021

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

BRUNA ADERBAL DE OLIVEIRA

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ESTUDO COMPARATIVO ENTRE UM
GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8X6 E UM GERADOR A RELUTÂNCIA
VARIÁVEL 12X8**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica, do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás,
Câmpus Goiânia.

Orientador: Prof. Dr. Renato Jayme Dias

GOIÂNIA

2019

O482m Oliveira, Bruna Aderbal de.
Modelagem, simulação e estudo comparativo entre um gerador a relutância variável 8x6 e um gerador a relutância variável 12x8 / Bruna Aderbal de Oliveira. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2019.
80f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Renato Jayme Dias.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso Bacharelado de Engenharia Elétrica, Coordenação de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Departamento de Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.
Incluem apêndices e anexo.

1. Análise de elementos finitos. 2. Gerador. 3. Simulação computacional. I. Dias, Renato Jayme (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III. Título.

CDD 620

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Karol Almeida da Silva Abreu CRB1/ 2.740
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

BRUNA ADERBAL DE OLIVEIRA

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ESTUDO COMPARATIVO ENTRE UM
GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8X6 E UM GERADOR A RELUTÂNCIA
VARIÁVEL 12X8**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica, do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás,
Câmpus Goiânia.

Aprovado em 10 de dezembro de 2019

Renato Jayme Dias
Prof.: Dr. Renato Jayme Dias (Orientador)

Charles dos Santos Costa
Prof.: Me. Charles dos Santos Costa

Nayane Moura Neris
Prof.: Esp. Nayane Moura Neris

GOIÂNIA

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado a oportunidade e condições para concluir o curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

Aos meus pais Cleonice e Junio pelo incentivo, apoio e compreensão ao longo de todos esses anos.

Ao Prof. Dr. Renato Jayme Dias, pela orientação, paciência, incentivo e conhecimentos transmitidos durante todas as etapas desse trabalho.

A todos os colegas do Laboratório MultiLab, pois através do auxílio de todos esse trabalho tornou-se possível.

Agradeço também a todos, que de alguma forma, contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

Nesse trabalho é apresentado a modelagem, simulação e o estudo comparativo entre o Gerador a Relutância Variável 8x6 e o Gerador a Relutância Variável 12x8. É exposto durante o trabalho as características construtivas das lâminas do rotor e do estator dessas máquinas. De posse dessas informações, foi realizada a modelagem matemática para ambas as topologias. Com base nessa modelagem, foi elaborado um modelo de simulação computacional no ambiente *Simulink/MATLAB*®, no qual vários testes foram efetuados. Para que a realização do estudo comparativo entre as máquinas fosse coerente, foi fixado a potência de saída em 1 CV em ambas as topologias. Após a análise dos resultados obtidos durante as simulações, foi constatado que o gerador a relutância variável 8x6 é mais eficiente que o gerador a relutância variável 12x8.

Palavras-chave: Análise em Elementos Finitos, Estudo Comparativo. Máquina a Relutância Variável trifásica (12x8), Máquina a Relutância Tetrafásica (8x6), Simulação Computacional.

ABSTRACT

This work presents the modeling, simulation and comparative study between switched reluctance generator 8x6 and switched reluctance generator 12x8. During work, the structural properties of the rotor and stator blades of these machines are exposed. This information was used to perform mathematical modeling for both topologies. Based on this modeling, a computer simulation model was developed in the Simulink / MATLAB® environment where several tests were carried out. To ensure comparability between the machines, the output power in both topologies was set to 1 CV. After analyzing the results obtained during the simulations, it was found that the topology of the switched reluctance generator 8x6 is more efficient than 12x8.

Keywords: Three phases switched reluctance machine (12x8), Four phases switched reluctance machine (8x6), analysis elements finits, simulation, comparative study.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sessão Transversal da MRV 8x6.....	16
Figura 2.2 - Sessão Transversal da MRV 12x8.....	17
Figura 2.3 - Operação de uma MRV (A) Fase C excitada (B) Fase A excitada.....	18
Figura 2.4 - Curva de indutância	19
Figura 2.5 - Carcaça, sensor óptico e disco de posicionamento	19
Figura 2.6 - Esquema do conversor Half Bridge para uma fase da MRV.....	20
Figura 2.7 - Esquema conversor HB para GRV 12x8	21
Figura 2.8 - Esquema conversor HB para GRV 8x6.....	21
Figura 4.1 - Parâmetros para dimensionamento das máquinas	31
Figura 4.2 - Novo arquivo	32
Figura 4.3 - Opções para criação do problema	32
Figura 4.4 - Definição do problema	33
Figura 4.5 - Definição da tolerância.....	33
Figura 4.6 - Lâmina MRV 8x6.....	34
Figura 4.7 - Biblioteca de materiais	34
Figura 4.8 - Propriedade dos circuitos.....	35
Figura 4.9 - Propriedades de contorno	36
Figura 4.10 - Definição das propriedades de contorno.....	36
Figura 4.11 - Ícones da barra de ferramenta modo desenho	37
Figura 4.12 - Definição da região de contorno	37
Figura 4.13- Ícone para seleção dos materiais.....	37
Figura 4.14 -Janela para seleção dos materiais.....	38
Figura 4.15 - Disposição dos materiais na lâmina da MRV 8x6	38
Figura 4.16 - Ícone criar malha triangular.....	39
Figura 4.17 - Criação da malha triangular	39
Figura 4.18 - Ícone para execução do modelo	39
Figura 4.19 – Janela do programa sendo executado	40
Figura 4.20 - Ícone para verificação dos resultados.....	40
Figura 4.21 - Fluxo magnético MRV 8x6 1 A.....	40
Figura 4.22 - Ícone para visualizar a densidade de fluxo	41
Figura 4.23 - Densidade de fluxo MRV 8x6 para corrente de excitação de 1A	41
Figura 4.24 - Densidade de fluxo MRV 12x8 para corrente de excitação de 1A	41
Figura 4.25 - Deformação na estrutura da lâmina	42
Figura 4.26 - Determinação do ponto central do desenho	43
Figura 4.27 - Escala do ponto	43
Figura 4.28 - Coordenadas eixo X E Y.....	44
Figura 4.29 - Fluxo MRV 8x6 para corrente de 1A na posição do rotor de 0°	45
Figura 4.30 - Fluxo MRV 8x6 para corrente de 1A na posição do rotor de 30°	45
Figura 4.31 - Fluxo MRV 12x8 para corrente de 1A na posição do rotor de 0°	46
Figura 4.32 - Fluxo MRV 12x8 para corrente de 1A na posição do rotor de 23°	46
Figura 4.33 - Superfície de indutâncias próprias MRV 8x6	47
Figura 4.34 - Superfície de indutâncias próprias MRV 12x8	47
Figura 5.1 - Diagrama de blocos GRV	49
Figura 5.2 - Fonte de corrente de sinal	50
Figura 5.3 - Modelos pronto <i>Simulink</i> (A) Mosfet (B) Diodo	50
Figura 5.4 - Conversor HB Para GRV 8x6 no <i>Simulink</i>	51

Figura 5.5 - Conversor HB para GRV 12x8 no <i>Simulink</i>	51
Figura 5.6 - Blocos das GRV no <i>Simulink</i> (A) GRV 12x8 (B) GRV 8x6	52
Figura 5.7 - Corrente no GRV 8x6.....	56
Figura 5.8 - Corrente no GRV 8x6.....	56
Figura 5.9 - Tensões nas fases da GRV 8x6.....	57
Figura 5.10 - Tensões nas fases da GRV 12x8.....	57
Figura 5.11 - Potência líquida.....	58
Figura 5.12 - Tensões na Fase A.....	58
Figura 5.13 - Tensão média na Fase A.....	59
Figura 5.14 - Corrente instantânea na Fase A	59
Figura 5.15 - Corrente média na fase A	60
Figura 5.16 - Potência média na fonte	60
Figura 5.17 - Potência mecânica.....	61
Figura 5.18 - Rendimento entre as Topologias	61

LISTA DE TABELA

TABELA 4.1 - Dimensões das lâminas do rotor e do estator	31
--	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<i>FEMM</i>	<i>Finite Elements Methods Magnetics</i>
GRV	Gerador a relutância variável
HB	Half Bridge
MRC	Máquina a relutância chaveada
MRV	Máquina a relutância variável
λ	Fluxo concatenado
i	Corrente
L	Indutância
e	Tensão induzida no indutor
v	Tensão
θ	Posição angular
ω	Velocidade angular
D	Coefficiente de atrito viscoso
J	Momento de inércia
W^{co}	Co-energia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL E APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	12
1.1 INTRODUÇÃO.....	12
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
1.3 OBJETIVO DO TRABALHO	14
1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	15
2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	16
2.1 INTRODUÇÃO.....	16
2.2 ESTRUTURA DA MÁQUINA.....	16
2.3 ACIONAMENTO	18
2.4 CONVERSOR HALF BRIDGE	20
2.5 CONCLUSÕES.....	22
3 MODELAGEM MATEMÁTICA	23
3.1 INTRODUÇÃO.....	23
3.2 EQUACIONAMENTO.....	23
3.3 EQUACIONAMENTO TENSÕES MRV	25
3.3.1 Máquina com três enrolamentos no estator.....	25
3.3.2 Máquina com quatro enrolamentos no estator.....	26
3.4 EQUACIONAMENTO DAS FORÇAS MECÂNICA DE UMA GRV	27
3.4.1 GRV com três enrolamentos.....	27
3.4.2 GRV com quatro enrolamentos.....	28
3.5 CONCLUSÕES.....	29
4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	30
4.1 INTRODUÇÃO.....	30
4.2 LÂMINAS UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES	30
4.3 PRIMEIROS PASSOS NO FEMM.....	32
4.4 IMPORTAR MODELO.....	33
4.5 DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES	34
4.5.1 Propriedades dos materiais	34
4.5.2 Propriedades dos circuitos.....	35
4.5.3 Propriedades da região de contorno.....	36

4.5.4 Seleção das propriedades	37
4.6 EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO	39
4.7 LUA.....	42
4.8 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	44
4.9 CONCLUSÃO	48
5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	49
5.1 INTRODUÇÃO	49
5.2 SIMULAÇÃO.....	49
5.2.1 Perfis de indutância	50
5.2.2 Conversor Half Bridge.....	50
5.2.3 Modelagem da Máquina a Relutância Variável.....	52
5.2.4 Acionamento das chaves	54
5.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	55
5.3.1 Correntes	56
5.3.2 Tensão	57
5.3.3 Estudo comparativo	58
5.4 CONCLUSÃO	62
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
6.1 CONCLUSÕES FINAIS.....	63
6.2 PROPOSTAS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
REFERÊNCIAS.....	64
APÊNDICE A	68
APÊNDICE B	70
ANEXO A	72

1 INTRODUÇÃO GERAL E APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

1.1 INTRODUÇÃO

As Máquinas a Relutância Variável (MRV) são, possivelmente, as mais simples e econômicas construtivamente. Isso se deve ao fato de não utilizarem escovas e ímãs permanentes, e possuírem menor necessidade de materiais ferro magnéticos e cobre [1] [2]. Além disso, é uma máquina robusta e possui melhor desempenho em regime de velocidades variáveis [3]. As máquinas a relutância variável também são bastante versáteis, isso se deve ao fato de possibilitarem serem acionadas tanto quanto motor quanto como gerador, com simples modificações no acionamento.

Apesar de ser uma máquina simples, somente após meados de 1960, com o desenvolvimento da eletrônica de potência, principalmente dos seguintes fatores: transistores de potência (transistor bipolar, MOSFET e IGBT), dos microprocessadores e circuitos integrados, dos computadores de alto desempenho e a expansão do uso de motores elétricos com velocidade variável, teve-se um aumento na produção científica [4].

Com o aumento da preocupação em relação ao consumo consciente de recursos energéticos, observa-se a crescente quantidade de pesquisas científicas que utilizam a MRV em automóveis elétricos [3][5][6][7] e em turbinas eólicas [8][9][10][11].

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é realizar o estudo comparativo entre o gerador a relutância variável 8x6 e o gerador a relutância variável 12x8, através de simulações computacionais.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As máquinas a relutância variável, como dito anteriormente, são máquinas simples, sendo compostas por um estator e um rotor com saliências.

Em [12] foi realizado o estudo de um gerador a relutância variável 6x4. Nesse trabalho, foi apresentado os princípios de funcionamento da máquina, a modelagem matemática e simulações computacionais.

Em [13] foi apresentado o estudo comparativo motores a relutância variável 12x8 e 6x4 tendo como parâmetro de comparação o ruído e vibração. É utilizado o método dos elementos finitos para determinação da força radial e as características

mecânicas. O resultado é que a força radial da máquina a relutância variável 6x4 é mais de duas vezes que na MRV 12x8 para a mesma potência de saída.

Em [14], foi apresentado o estudo comparativo e análise de três topologias de MRV (6x4, 8x6 e 10x8) para uso em veículos elétricos de propulsão. Durante o trabalho foram abordados: os aspectos construtivos das máquinas. E utilizado o método de elementos finitos para determinação dos seguintes parâmetros: densidade de fluxo magnético, indutância e torque eletromagnético. Como resultado dos parâmetros teve que as topologias 10x8 e 8x6 apresentam ser as mais adequadas para propulsão de veículos elétricos.

Em [15], o artigo realizou uma avaliação comparativa entre as MRV 8x6, 8x10 e 8x14, foi utilizado o método dos elementos finitos para a análise do comportamento do fluxo magnético e abordado características construtivas das topologias. A MRV 8x14 apresentou perfis de torque mais suaves e menor valor de ondulação de torque se comparado com a MRV 8x6.

Em [16], é realizado o estudo comparativo entre duas máquinas a relutância variável (MRV) uma na topologia 6x6 (monofásica) e uma na topologia 6x4 (trifásica). Durante o trabalho foram apresentados: os aspectos construtivos, os princípios de acionamento, o modelo matemático, as simulações computacionais e os resultados obtidos são discutidos para determinação das vantagens e desvantagens de cada máquina. Os testes foram realizados com a mesma tensão do barramento CC, onde a MRV trifásica apresentou necessitar de menos entrada de energia, trabalhar com maior velocidade e submetida a mesma carga precisar de menos energia de entrada. Sendo assim a MRV trifásica mais vantajosa que a monofásica.

Em [17], foi apresentado a análise entre três topologias de MRV para aplicação de ventiladores automotivos, foram elas: 6x4, 8x6 e 12x8. O artigo apresentou os aspectos construtivos das lâminas do rotor e estator, as características eletromagnéticas utilizando o método de elementos finitos (conjugado e indutância) e o estudo comparativo entre as topologias. Onde a MRV 12x8 apresentou melhor eficiência em relação a ruído e vibrações, do que as outras topologias nas mesmas condições.

Em [18] o artigo apresentou duas topologias de MRV (12x8 e 12x16), ambas utilizadas como gerador para acionamento de sistemas de conversão de energia eólica de baixa velocidade. No trabalho foram realizados: a análise eletromagnética comparativa entre as máquinas por meio do método de elementos finitos e simulações

para comparação de desempenho entre elas. Como resultado, a máquina a relutância variável 12x8 apresentou possuir um desempenho um pouco melhor em relação a energia convertida, torque eletromagnético e potência de saída.

Em [19] foi realizado um estudo comparativo entre um motor a relutância variável 4x2 e 6x4, onde foi utilizado análise de elementos finitos e um controle de velocidade através do sistema de interferência adaptava *NeuroFuzzy* (ANFIS). Os motores foram projetados para girar ociosamente a 10.000 rpm e aumentar a velocidade para 100.000 rpm quando recebesse o comando de aceleração. Como conclusão a MRV 6x4 mostrou melhor desempenho na resposta à referência de velocidade, alcançando estado estável de 10.000 rpm a 100.000 rpm em 70ms mais rápido que a MRV 4x2.

Em [20] é apresentado uma análise comparativa entre um motor a relutância variável 12x8 e um motor a relutância variável 8x6. O trabalho tem como foco o comportamento eletromagnético e acústico entre as duas topologias de máquinas. Para realização dessas análises foi utilizado o método de elementos finitos (ANSYS Maxwell). E logo em seguida, exposto os resultados obtidos durante as simulações, onde a MRV 12x8 apresentou níveis mais baixos de vibração e ruído acústico que a MRV 8x6.

A busca por artigos relacionados a máquinas a relutância variável e o estudo comparativo entre as topologias, foi realizado no *IEEE Explorer*. Durante as pesquisas foram encontrados alguns artigos que realizavam o estudo comparativo entre duas ou mais topologias, conforme exposto durante essa sessão. No entanto, não foram encontrados trabalhos durante a pesquisa bibliográfica que fizessem comparação entre um gerador a relutância variável nas topologias 8x6 e 12x8 no domínio do tempo.

1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

O intuito deste trabalho foi realizar a modelagem, simulação (no domínio do tempo) e estudo comparativo entre duas máquinas a relutância variável, nas topologias 8x6 e 12x8

A fim de atingir o objetivo principal as seguintes etapas foram realizadas:

1. Compreensão dos princípios básicos de funcionamento da máquina a relutância variável;

2. Construção do modelo matemático que corresponda ao funcionamento de cada uma das topologias das máquinas;
3. Simulação e análise dos perfis de indutância própria das máquinas, utilizando o método de elementos finitos (*FEMM*);
4. Modelagem e simulação do funcionamento das máquinas no ambiente *Simulink/MATLAB*®, no domínio do tempo;
5. Estudo comparativo dos resultados obtidos durante as simulações.

1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Para alcançar os objetivos propostos, o trabalho foi organizado da seguinte maneira:

O capítulo 2 contém os princípios de funcionamento de uma máquina a relutância variável, bem como informações sobre as dimensões dos projetos das lâminas do estator e do rotor, das máquinas a serem simuladas.

O capítulo 3 apresenta a modelagem matemática que descreve o comportamento elétrico e mecânico para as duas topologias.

O capítulo 4 apresenta o *software* de elementos finitos *FEMM*, utilizado para obtenção dos valores dos perfis de indutância própria e fluxos magnéticos das máquinas, além dos resultados obtidos durante as simulações.

O capítulo 5 contém o modelo computacional desenvolvido para realizar a simulação dos geradores a relutância variável, assim como são apresentados os resultados obtidos durante as simulações.

O capítulo 6 apresenta as considerações sobre o trabalho realizado e sugestões de trabalhos futuros.

2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

2.1 INTRODUÇÃO

A máquina a relutância variável é uma máquina elétrica, na qual o torque é produzido pela tendência do rotor de se mover para uma posição, onde a indutância do enrolamento excitado é maximizada [4].

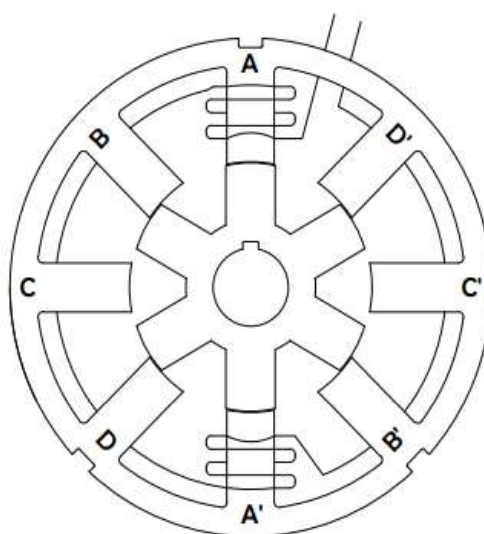
Esse capítulo apresenta os princípios de funcionamento das máquinas a relutância variável e as características construtivas das topologias a serem estudadas.

2.2 ESTRUTURA DA MÁQUINA

A estrutura de uma máquina a relutância variável é composta basicamente por um rotor e um estator, laminados, com polos salientes e bobinas restritas aos polos do estator [21] [22]. O fato de possuir somente bobinas nos polos do estator reduz o volume de cobre e perdas por efeito Joule no rotor. Um ou mais par de polos opostos do estator formam uma fase, cujas bobinas usualmente são conectadas em série e por isto são percorridos pela mesma corrente pulsada [12].

A Figura 2.1 representa a sessão transversal de uma MRV 8x6, mostrando os enrolamentos nas bobinas da fase A.

Figura 2.1 - Sessão transversal da MRV 8x6

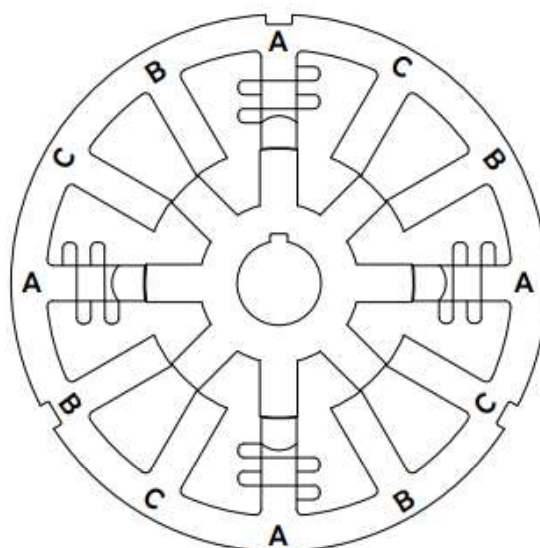


Fonte: Elaborado pela autora

O gerador a relutância variável 8x6 é composto por 8 (oito) polos no estator e 6 (seis) polos no rotor. Cada par de polos do estator representa uma fase nessa máquina, sendo assim, uma máquina tetrafásica (quatro fases).

Já o gerador a relutância variável 12x8 é composto por 12 (doze) polos no estator e 8 (oito) polos no rotor. Ao contrário do que ocorre na máquina 8x6, onde cada par de polos do estator representam uma fase, nessa topologia dois pares de polos representam uma fase dessa máquina, sendo assim, uma máquina trifásica. A Figura 2.2 apresenta a sessão transversal de um MRV 12x8, mostrando o enrolamento nas bobinas da fase A.

Figura 2.2 - Sessão transversal da MRV 12x8



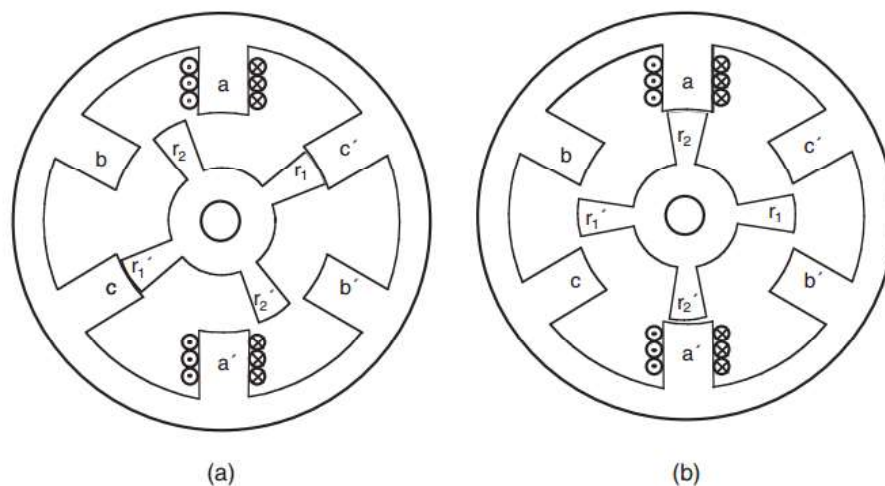
Fonte: Elaborado pela autora

O alinhamento do rotor acontece sempre que os polos do estator que está diametralmente oposto são excitados por uma corrente. Isso se deve ao fato que, em um circuito magnético a parte rotativa prefere vir para a posição de relutância mínima no momento de excitação [23]. Enquanto dois polos do rotor estão alinhados aos dois polos do estator, um outro conjunto de polos do rotor está desalinhado em relação a um conjunto diferente de polos do estator, assim esse conjunto de polos do estator é excitado para trazer os polos do rotor em alinhamento [23].

A Figura 2.3, representa a operação de uma MRV 6x4, seis polos no estator e quatro polos no rotor. Na Figura 2.3 (a), temos que os polos do rotor r_1 e r_1' estão alinhados com os polos do estator c e c' , aplicando uma corrente na fase a, um fluxo é estabelecido nos polos do estator a e a' , que tende a trazer os polos do rotor r_2 e r_2' .

para o alinhamento com os polos estator a e a' , conforme a Figura 2.3 (b). Após o completo alinhamento a corrente na fase a é desligada e a fase b é excitada [23].

Figura 2.3 - Operação de uma MRV (a) Fase c excitada (b) Fase a excitada



Fonte: [23].

Ao mudar sequencialmente as correntes de excitação para outros enrolamentos do estator, o rotor é girado. Portanto, a produção de torque e potência, envolve a comutação das correntes nos enrolamentos do estator quando há uma variação de relutância, por esse motivo, a máquina a relutância variável também é conhecida como máquina a relutância chaveada [23]. Nesse trabalho a máquina será acionada como gerador.

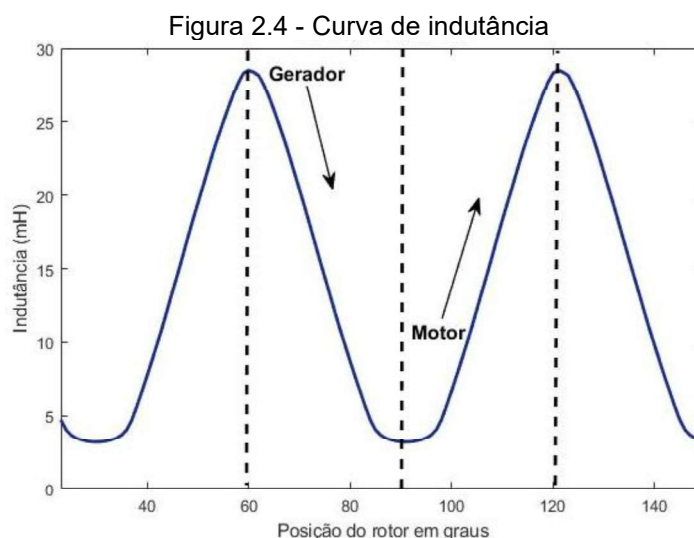
2.3 ACIONAMENTO

A máquina a relutância variável é uma máquina bastante versátil pois permite ser acionada tanto como motor como gerador. Um parâmetro muito importante para a compreensão dos princípios básicos de funcionamento dessa máquina é o conhecimento dos perfis de indutância. A indutância (L) é definida como sendo a razão entre o fluxo concatenado nas bobinas (λ) e a corrente (i):

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (2.1)$$

Para o acionamento da máquina como gerador é necessário acionar as chaves no momento em que o valor de indutância é máximo, ou seja, quando os polos do

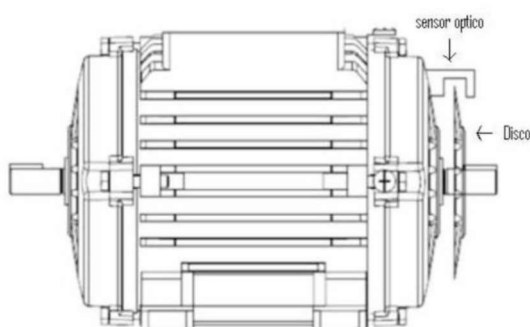
estator que será energizado está alinhado com os polos do rotor. Já para o acionamento da máquina como motor é necessário acionar as chaves no momento em que o valor de indutância é mínimo, ou seja, quando os polos do estator da fase que será energizada estão em completo desalinhamento com os polos do rotor. A Figura 2.4 representa a curva de indutância e o momento em que deve se acionar a máquina como gerador ou como motor.



Fonte: Elaborado pela autora

Os valores de indutância variam de acordo com a posição angular do rotor, portanto, 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 Figura 2.5 [24].

Figura 2.5 - Carcaça, sensor óptico e disco de posicionamento



Fonte: [24]

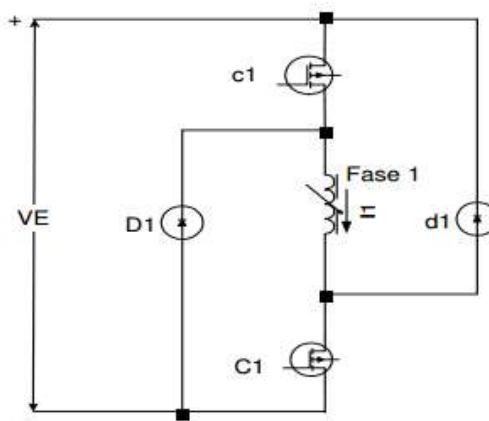
2.4 CONVERSOR HALF BRIDGE

Como o conjugado nos inversores das máquinas de relutância variável é independente da polaridade de excitação da corrente, os inversores necessitam apenas de um conversor por fase de enrolamento. Os inversores das MRV sempre possuem um enrolamento da fase em série com o conversor [23].

Há várias configurações de conversores utilizados para acionar os inversores das MRV, porém o mais utilizado para o acionamento é o conversor half bridge, como nos trabalhos [25] [26] [27] [28], sendo assim o conversor utilizado neste trabalho.

A Figura 2.6, retrata o esquema de um conversor half bridge (HB) considerando uma fase da MRV. O conversor é composto por duas chaves (MOSFET ou IGBT) e dois diodos, constituindo o ramo de uma fase do conversor HB usado para o acionamento de uma MRV, esta configuração repete-se para cada fase [12]. Por possuir fases independentes, no caso de ocorrer uma falha no disparo e ocasionar falta de uma das fases, ainda é possível ocorrer o acionamento da máquina, porém com uma redução da potência [23].

Figura 2.6 - Esquema do conversor Half Bridge para uma fase da MRV.

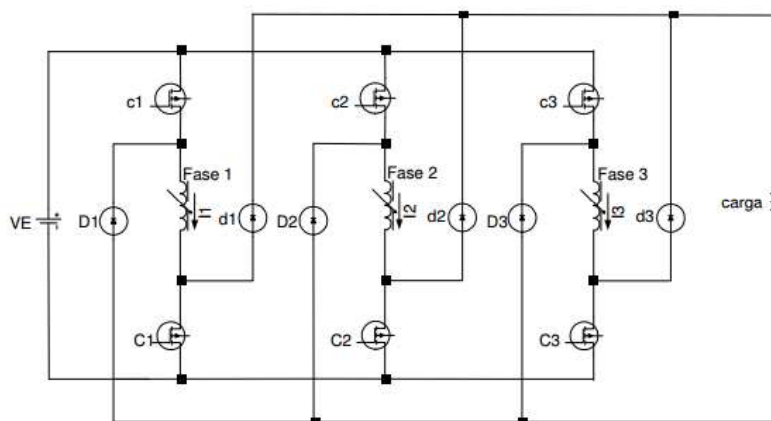


Fonte: [12].

A Figura 2.7 mostra um circuito conversor HB simplificado, alimentado por uma fonte CC, através do qual o gerador a relutância na topologia 12x8 (trifásico) pode atender a uma carga resistiva. As chaves $c1$, $C1$, $c2$, $C2$ ou $c3$, $C3$ são fechadas e abertas simultaneamente aos pares, porém cada par de chaves corresponde a uma das fases $F1$, $F2$ ou $F3$, sendo acionado no seu tempo, isto é, só um par de chaves estará fechado num determinado instante. Durante o tempo em que as chaves de uma

fase estão fechadas suas bobinas são excitadas. Após o intervalo de excitação as duas chaves dessa fase são abertas e suas bobinas alimentam a carga através dos diodos d1, D1 ou d2, D2 ou d3, D3, conforme a fase ativa no momento. O processo se repete ciclicamente [12].

Figura 2.7 - Esquema conversor HB para GRV 12x8 .

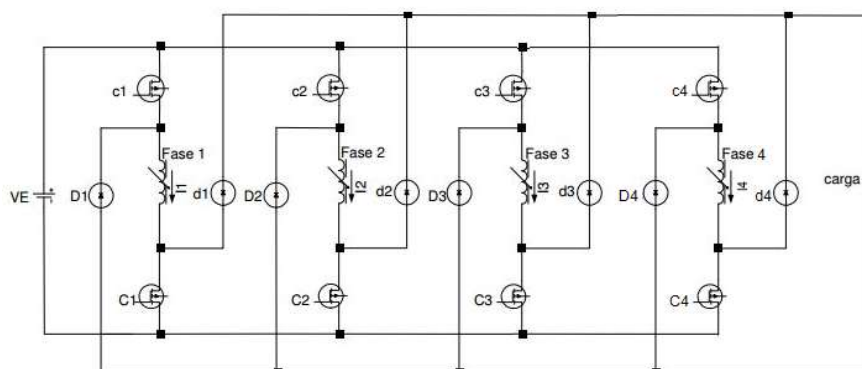


Fonte: [12].

A cada período de excitação a fonte VE transfere energia para o campo magnético da fase correspondente. Quando as chaves dessa fase são abertas essa energia flui para a carga em conjunto com uma parcela resultante da conversão da energia mecânica do eixo da máquina em energia elétrica. No GR a etapa de roda livre corresponde à alimentação da carga e não existe a etapa de regeneração porque a energia armazenada no campo magnético durante a fase de excitação é transferida à carga durante a geração [12].

Para o gerador a relutância 8x6 o esquema do conversor HB é análogo ao da Figura 2.7, porém acrescentando-se mais um braço conforme Figura 2.8.

Figura 2.8 - Esquema conversor HB para GRV 8x6



Fonte: Elaborado pela autora

2.5 CONCLUSÕES

Esse capítulo apresentou os princípios de funcionamento básicos das MRV, expondo as configurações das estruturas das máquinas, acionamento e conversor. Uma vez compreendido o princípio de funcionamento da máquina parte-se para a modelagem matemática sendo acionada como gerador.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1 INTRODUÇÃO

Após a compreensão dos princípios de funcionamento da máquina a relutância variável, já é possível elaborar o modelo matemático. A modelagem matemática é uma maneira de descrever o comportamento de um sistema real com o auxílio de ferramentas matemáticas, permitindo a implementação em sistemas computacionais.

Neste capítulo será apresentado o modelo matemático que descreva o comportamento mecânico e elétrico para os geradores a relutância variável trifásico (12x8) e para os geradores a relutância variável tetrafásico (8x6).

3.2 EQUACIONAMENTO

O fluxo concatenado (λ) na bobina é proporcional a corrente (i) que percorre a bobina e a sua indutância (L), assim temos:

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

A tensão induzida em um indutor (e) é igual a taxa de variação do fluxo concatenado (λ) em relação ao tempo, portanto:

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

Assim, a tensão aplicada em uma das fases da máquina é equivalente à queda de tensão resistiva mais a soma da tensão induzida no indutor (e), conforme equação (3.3):

$$v = R \cdot i + e \quad (3.3)$$

Substituindo a equação (3.2) na equação (3.3), temos que:

$$v = R \cdot i + \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (3.4)$$

O fluxo concatenado nas bobinas tem relação com a indutância e a corrente, sendo assim:

$$\lambda = L(\theta, i)i \quad (3.5)$$

Como a indutância (L), tem relação com a posição do rotor e a corrente. A tensão por fase é resolvida utilizando-se a regra da cadeia, onde:

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

A derivada da posição angular do rotor (θ) em relação ao tempo e a velocidade angular (ω), é descrita pela equação:

$$v = R \cdot i + L \frac{\partial i}{\partial t} + i\omega \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (3.7)$$

A modelagem da máquina é para que seja acionada como gerador, para isso é necessário realizar o equacionamento das forças mecânicas presentes na MRV, conforme equação:

$$T_{emg} = T_{mec} + D\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.8)$$

Onde:

D = coeficiente de atrito viscoso do sistema;

J = momento de inércia do sistema

O conjugado eletromagnético é fornecido pela equação:

$$T_{emg} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (3.9)$$

3.3 EQUACIONAMENTO TENSÕES MRV

3.3.1 Máquina com três enrolamentos no estator

Como já demonstrado anteriormente na equação (3.6), temos que o variável L depende da posição angular e da corrente. Substituindo os valores para as três tensões, podemos reescrever a equação (3.7) da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} v_A &= R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + i_A \omega \frac{\partial L_A}{\partial \theta} \\ v_B &= R_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} + i_B \omega \frac{\partial L_B}{\partial \theta} \\ v_C &= R_C i_C + L_C \frac{di_C}{dt} + i_C \omega \frac{\partial L_C}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Reescrevendo as equações (3.10), na forma matricial teremos o modelo matemático das tensões para uma máquina trifásica, sendo:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_A + \omega \frac{\partial L_A}{\partial \theta} & 0 & 0 \\ 0 & R_B + \omega \frac{\partial L_B}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 & R_C + \omega \frac{\partial L_C}{\partial \theta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} L_A & 0 & 0 \\ 0 & L_B & 0 \\ 0 & 0 & L_C \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{di_A}{dt} \\ \frac{di_B}{dt} \\ \frac{di_C}{dt} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.11)$$

3.3.2 Máquina com quatro enrolamentos no estator

Para a realização da modelagem do comportamento elétrico do gerador a relutância variável 8x6 (tetrafásica) é análogo ao apresentado na sessão 3.3.1, portanto:

$$\begin{aligned}
 v_A &= R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + i_A \omega \frac{\partial L_A}{\partial \theta} \\
 v_B &= R_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} + i_B \omega \frac{\partial L_B}{\partial \theta} \\
 v_C &= R_C i_C + L_C \frac{di_C}{dt} + i_C \omega \frac{\partial L_C}{\partial \theta} \\
 v_D &= R_D i_D + L_D \frac{di_D}{dt} + i_D \omega \frac{\partial L_D}{\partial \theta}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Reescrevendo as equações (3.12), na forma matricial, teremos o modelo matemático das tensões para uma máquina tetrafásica, sendo:

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \\ v_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_A + \omega \frac{\partial L_A}{\partial \theta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_B + \omega \frac{\partial L_B}{\partial \theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_C + \omega \frac{\partial L_C}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_D + \omega \frac{\partial L_D}{\partial \theta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_D \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \\ \dot{i}_D \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

3.4 EQUACIONAMENTO DAS FORÇAS MECÂNICA DE UMA GRV

3.4.1 GRV com três enrolamentos

A co-energia não possui um significado físico, no entanto é uma estratégia matemática bastante útil para obtenção das variáveis torque e força, existentes em um sistema eletromagnético. A co-energia é definida como sendo:

$$W^{co}(\theta, i) = \int_0^i \lambda(\theta, i) di \quad (3.14)$$

O torque eletromagnético instantâneo é obtido por:

$$T_{emag} = \frac{\partial W^{co}(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (3.15)$$

O equacionamento para as três fases da GRV, resultam em:

$$T_{emag} = \frac{\partial W_A^{co}}{\partial \theta} + \frac{\partial W_B^{co}}{\partial \theta} + \frac{\partial W_C^{co}}{\partial \theta} \quad (3.16)$$

Sendo que:

$$W = \frac{1}{2L} \lambda^2 \quad (3.17)$$

Assim, substituindo a equação (3.17) na equação (3.16), temos para cada uma das fase:

$$\begin{aligned} W_A^{co} &= \frac{1}{2} * L_A i_A^2 \\ W_B^{co} &= \frac{1}{2} * L_B i_B^2 \\ W_C^{co} &= \frac{1}{2} * L_C i_C^2 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Substituindo a equação (3.18) na equação (3.16), temos que a co-energia total pode ser definida como sendo:

$$W^{co} = \frac{1}{2} \left[i_A \left(\frac{\partial L_A}{\partial \theta} i_A \right) + i_B \left(\frac{\partial L_B}{\partial \theta} i_B \right) + i_C \left(\frac{\partial L_C}{\partial \theta} i_C \right) \right] \quad (3.19)$$

Como a proposta do trabalho é realizar a modelagem de um gerador, temos que o conjugado mecânico é representado pela seguinte equação:

$$T_m = \frac{1}{2} \left[i_A \left(\frac{\partial L_A}{\partial \theta} i_A \right) + i_B \left(\frac{\partial L_B}{\partial \theta} i_B \right) + i_C \left(\frac{\partial L_C}{\partial \theta} i_C \right) \right] + D\omega + J \frac{d\omega}{dx} \quad (3.20)$$

A matriz que representa tanto o comportamento mecânico quanto eletromagnética da GRV de três fases é determinado por:

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \\ T_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_C & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} i_A \frac{\partial L_A}{\partial \theta} & \frac{1}{2} i_B \frac{\partial L_B}{\partial \theta} & \frac{1}{2} i_C \frac{\partial L_C}{\partial \theta} & D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_A & 0 & 0 & 0 & i_A \frac{\partial L_A}{\partial \theta} \\ 0 & L_B & 0 & 0 & i_B \frac{\partial L_B}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & L_C & 0 & i_C \frac{\partial L_C}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

3.4.2 GRV com quatro enrolamentos

O equacionamento do comportamento mecânico da GRV de quatro fases é análogo ao da equação (3.20), apresentado na sessão 3.4.1, porém, acrescenta-se as variáveis correspondentes a mais uma fase. Assim, a equação que representa as forças mecânica presente numa GRV 8x6, são:

$$T_m = \frac{1}{2} \left[i_A \left(\frac{\partial L_A}{\partial \theta} i_A \right) + i_B \left(\frac{\partial L_B}{\partial \theta} i_B \right) + i_C \left(\frac{\partial L_C}{\partial \theta} i_C \right) + i_D \left(\frac{\partial L_D}{\partial \theta} i_D \right) \right] + D\omega + J \frac{d\omega}{dx} \quad (3.22)$$

A matriz que representa tanto o comportamento mecânico quanto eletromagnética da GRV de quatro fases é determinado por:

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \\ v_D \\ T_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_D & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} i_A \frac{\partial L_A}{\partial \theta} & \frac{1}{2} i_B \frac{\partial L_B}{\partial \theta} & \frac{1}{2} i_C \frac{\partial L_C}{\partial \theta} & \frac{1}{2} i_D \frac{\partial L_D}{\partial \theta} & D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_D \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\begin{bmatrix} L_A & 0 & 0 & 0 & 0 & i_A \frac{\partial L_A}{\partial \theta} \\ 0 & L_B & 0 & 0 & 0 & i_B \frac{\partial L_B}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & L_C & 0 & 0 & i_C \frac{\partial L_C}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & L_D & 0 & i_D \frac{\partial L_D}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \\ \dot{i}_D \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

3.5 CONCLUSÕES

Durante esse capítulo foi exposto o modelo matemático que descreve o comportamento mecânico e eletromagnético para um gerador a relutância variável trifásico (GRV 12x8) e para um gerador a relutância variável tetrafásico (GRV 8x6). Nesse modelo foi considerado somente a influência das indutâncias próprias nas bobinas do estator. O modelo matemático apresentado das duas topologias será utilizado nos próximos capítulos para simulações computacionais.

4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

4.1 INTRODUÇÃO

O método dos elementos finitos é um procedimento numérico para resolução dos quais propõe a divisão do domínio em inúmeros elementos pequenos, transformando um problema que era pequeno, porém complexo de ser resolvido, em um grande, porém mais fácil de ser solucionado utilizando recursos computacionais.

O método dos elementos finitos é bastante utilizado para a resolução de diversos problemas [15] [17] [18] [20] [29] [30]. Para a realização do estudo do comportamento do fluxo magnético nas máquinas a relutância variável, foi utilizado o software *Finite Element Method Magnetics (FEMM)*, versão 4.2, que possui um pacote de ferramentas de elementos finitos concebido para a modelagem de problemas magnéticos, eletrostáticos, fluxos de corrente e fluxos de calor, em 2D, sob baixas frequências. O software possui em sua interface ferramentas que possibilitam a construção ou importação de dados para as etapas de construção do modelo até a análise do problema.

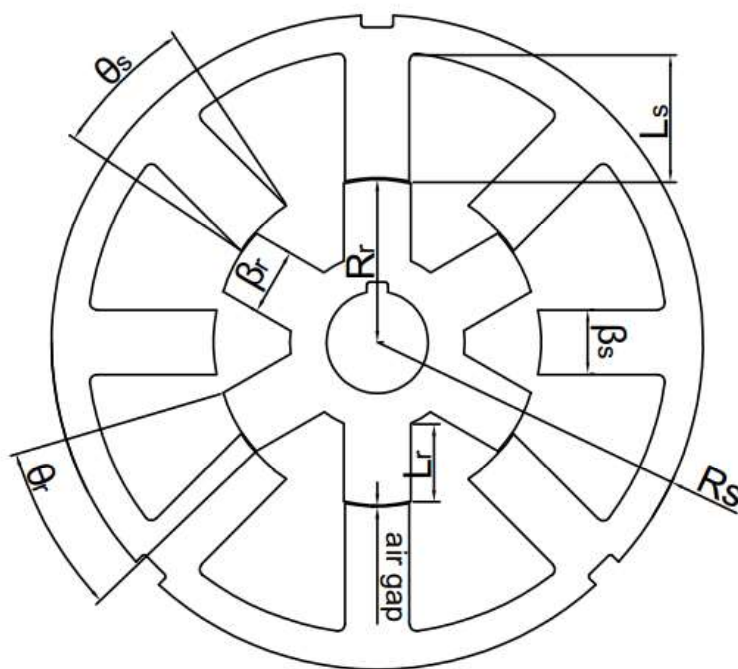
Assim, será apresentado nesse capítulo um roteiro contendo todas as etapas de como utilizar o software *FEMM* para determinação do fluxo magnético nas máquinas a relutância variável. Esse tipo de simulação apresenta ótimos resultados, pois leva em consideração a saturação do material ferromagnético [24].

4.2 LÂMINAS UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES

As lâminas do estator e as do rotor que foram utilizadas neste trabalho são de uma máquina a relutância variável 8x6 e de uma máquina a relutância variável 12x8, as quais foram projetadas por outro grupo dentro do laboratório que dá suporte para realização desse trabalho. Ambas as topologias foram projetadas para uma potência de saída de 1CV (735,5 VA) e velocidade de 1200 rpm.

A Figura 4.1 apresenta os parâmetros de projeto das lâminas do rotor e do estator para as duas topologias de máquinas.

Figura 4.1 - Parâmetros para dimensionamento das máquinas



Fonte: Elaborado pela autora

Na Tabela I são apresentados os valores, com as respectivas siglas referentes ao projeto das lâminas do rotor e do estator para as duas topologias de máquinas.

Tabela 4.1 - Dimensões das lâminas do rotor e do estator

Parâmetros	Sigla	8x6	12x8
Ângulos dos polos do estator	θ_s	22,50°	15,00°
Ângulos dos polos do rotor	θ_r	27,30°	16,1°
Largura dos polos do estator	L_s	13,77 mm	9,22 mm
Largura dos polos do rotor	L_r	14,37 mm	9,82 mm
Comprimento do entreferro	Air gap	0,03 mm	0,03 mm
Comprimento dos polos do estator	W_s	27,26 mm	25,49 mm
Comprimento dos polos do rotor	W_r	12,70 mm	14,48 mm
Raio do estator	R_s	70,05 mm	70,05 mm
Raio do rotor	R_r	35,00 mm	35,00 mm

4.3 PRIMEIROS PASSOS NO *FEMM*

Ao iniciar o software deve-se clicar no ícone conforme apresentado na Figura 4.2 para que seja criado um novo problema.

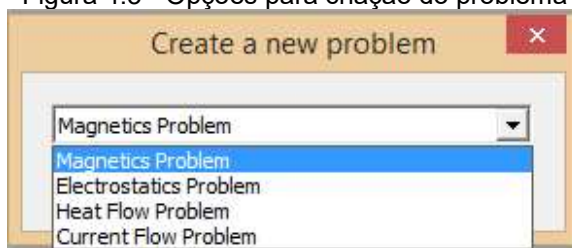
Figura 4.2 - Novo arquivo



Fonte: Elaborado pela autora

Em seguida aparecerá a janela representada na Figura 4.3, onde é determinado o tipo de problema que será criado. Como foi citado anteriormente, o software *FEMM* disponibiliza as opções: problemas magnéticos (*magnetics problem*), problemas eletrostáticos (*electrostatics problem*), fluxos de corrente (*heat flow problem*) e fluxos de calor (*currente flow problem*).

Figura 4.3 - Opções para criação do problema

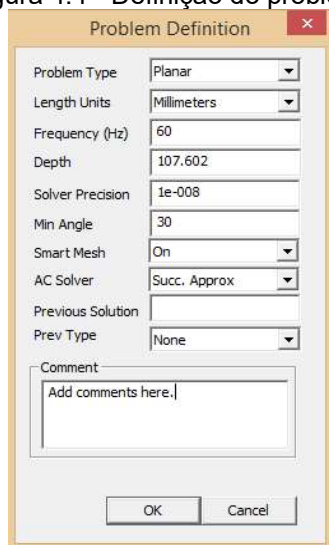


Fonte: Elaborado pela autora

Como o objetivo desse trabalho é simular duas topologias distintas de MRV e consequentemente o comportamento do fluxo magnético, a opção escolhida será problema magnético (*magnetics problem*).

Após determinado qual tipo de problema será modelado e solucionado, é necessário definir alguns parâmetros como: tipo de problema, unidades de medida, frequência, profundidade, precisão de solução do problema, ângulo mínimo, entre outros parâmetros. Para isso, é necessário selecionar a opção *problem* na barra do menu superior da área de trabalho, como exemplificado na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Definição do problema



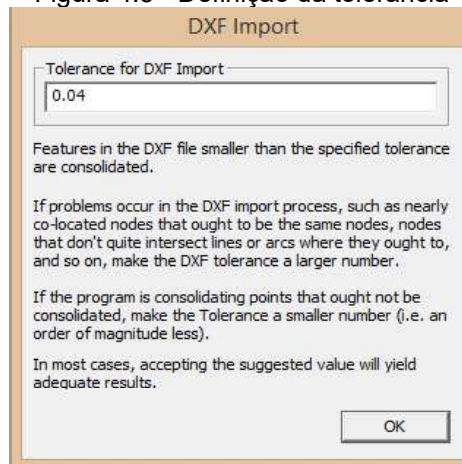
Fonte: Elaborado pela autora

4.4 IMPORTAR MODELO

No *FEMM* há opção de criar o modelo ou exportar/importar. Para que seja possível realizar a importação de arquivo em AutoCAD é necessário que o formato desse arquivo esteja em DXF. Este recurso é muito útil, pois permite ao usuário criar seu modelo em outras interfaces de desenhos 2D.

Para importar o arquivo em DXF, selecione *Import DXF* no menu *file*. Após selecionar o arquivo que deseja importar, uma caixa de diálogo aparecerá Figura 4.5, para que seja definido a tolerância. Esta tolerância é a distância máxima entre dois pontos iguais.

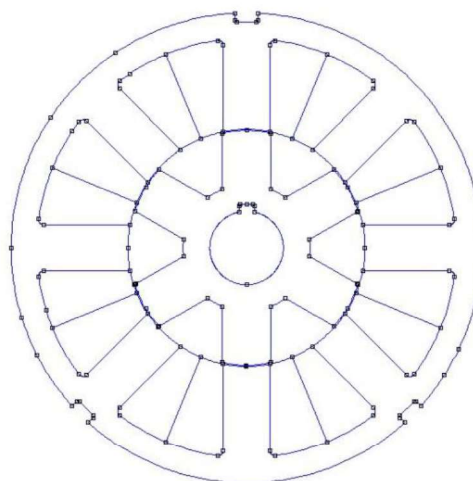
Figura 4.5 - Definição da tolerância



Fonte: Elaborado pela autora

Após realizar o procedimento de importação do arquivo *DXF* para o ambiente *FEMM*, o modelo a ser simulado pode ser observado na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Lâmina MRV 8x6



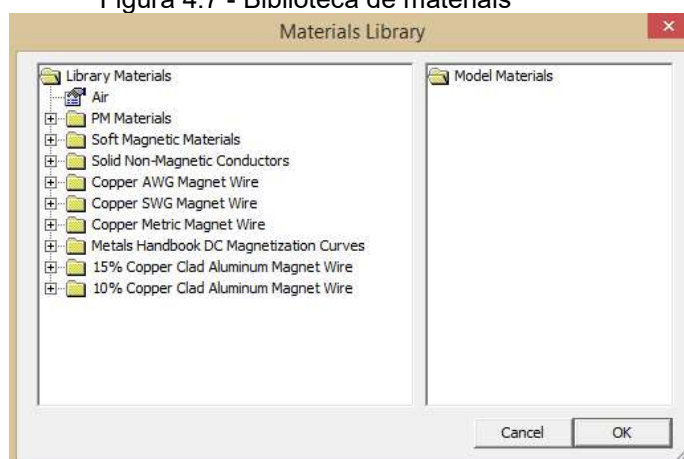
Fonte: Elaborado pela autora

4.5 DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES

4.5.1 Propriedades dos materiais

Com a definição do modelo a ser trabalhado, já é possível determinar as propriedades dos materiais. O software *FEMM* possui uma biblioteca interna que possibilita ao usuário determinar os materiais que irão compor o seu modelo, para isso é necessário selecionar a opção *Properties > Material Library*, logo em seguida a caixa de diálogo representado na Figura 4.7

Figura 4.7 - Biblioteca de materiais



Fonte: Elaborado pela autora

Essa caixa de diálogo permite ao usuário selecionar os materiais já existentes na biblioteca de materiais do *FEMM* para os materiais do modelo, apenas segurando e arrastando de um local para o outro. Nessa janela é possível selecionar todos os materiais necessários para a caracterização do modelo, assim como modificar suas propriedades de acordo com o que o usuário necessita para a solução do problema.

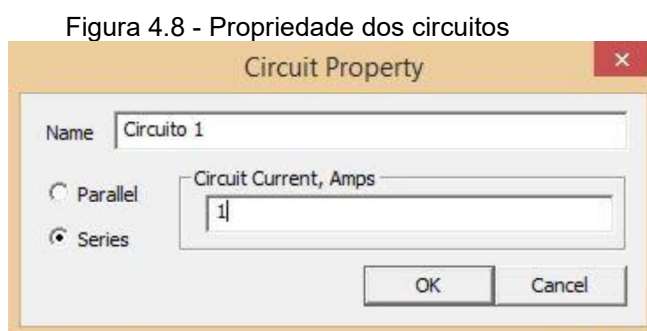
Para realizar alguma modificação nas propriedades pré-definidas após adicioná-las ao seu modelo de materiais, é necessário clicar com o botão direito do mouse no material que deseja modificar. Aparecerá na tela às opções para: deletar o material selecionada, adicionar um novo material e modificar o material.

Para simular as máquinas presentes nesse trabalho, foram utilizados os seguintes materiais:

- O ar (*air*), para a região que não existe material;
- O aço silício M-19 (*M-19 steal*), para a região do estator e do rotor;
- O aço 1020 (*1020 steal*), para a região onde se encontra o eixo do rotor;
- O fio de cobre 15 AWG é o determinado para as bobinas.

4.5.2 Propriedades dos circuitos

A definição das propriedades dos circuitos tem como objetivo permitir que o usuário determine as restrições do fluxo de corrente em um ou mais blocos. Para definir as propriedades dos circuitos é necessário selecionar *Properties > Circuits*, onde é possível adicionar, remover e modificar as propriedades do circuito. Ao adicionar um novo circuito é possível nomeá-lo, selecionar se é um circuito série ou paralelo, e o valor da corrente em âmpers. Figura 4.8



Fonte: Elaborado pela autora

4.5.3 Propriedades da região de contorno

A região de contorno é utilizada para especificar as propriedades dos segmentos de linhas e segmentos de arco que devem ser limites no domínio da solução. Para adicionar a região de contorno selecione a opção *Properties > Boundary*, a caixa de diálogo da Figura 4.9 será aberta.

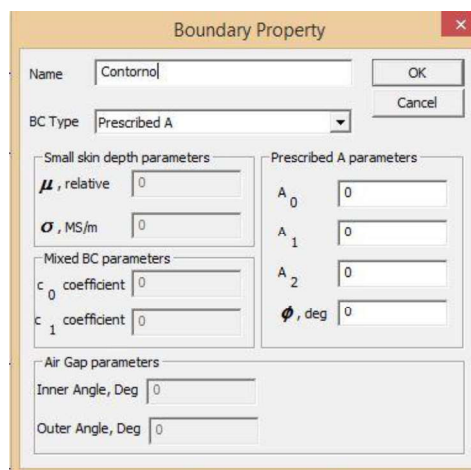
Figura 4.9 - Propriedades de contorno



Fonte: Elaborado pela autora

Ao selecionar *Add Property*, a janela da Figura 4.10 aparecerá, onde é possível modificar o nome e outros parâmetros.

Figura 4.10 - Definição das propriedades de contorno



Fonte: Elaborado pela autora

A região de contorno para o modelo que está sendo estudado é definida como sendo o local entre o estator e a carcaça da máquina. Para definir essa região de contorno do modelo é necessário selecionar o ícone da Figura 4.11 e logo após selecionar a região. Os ícones correspondem respectivamente: ponto (*point*), segmento de linha (*line segment*) e segmento de arco (*arc segment*).

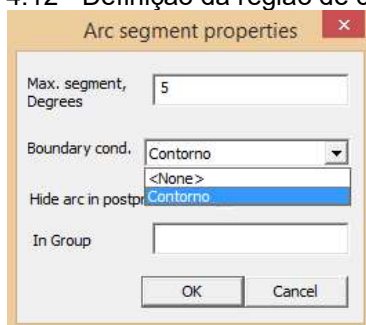
Figura 4.11 - Ícones da barra de ferramenta modo desenho



Fonte: Elaborado pela autora

Para realizar a seleção da região de contorno é necessário selecionar algum dos ícones da Figura 4.11, logo em seguida clicar com o botão direito sobre a região a ser definida. Após essa seleção aperte a barra de espaço do teclado, onde aparecerá a caixa de diálogo representada na Figura 4.12. Nessa caixa de diálogo é possível selecionar a região de contorno em *Boundary cond.* (condições de contorno), onde aparecerá a opção de nenhum (*none*) e a condição de contorno definida anteriormente.

Figura 4.12 - Definição da região de contorno



Fonte: Elaborado pela autora

4.5.4 Seleção das propriedades

Determinado os parâmetros dos materiais, circuito e região de contorno, é essencial definir no modelo o local de cada material. Para adicionar os materiais é necessário selecionar o ícone da Figura 4.13 e clicar com o botão esquerdo do mouse para selecionar a área que deseja adicionar cada material.

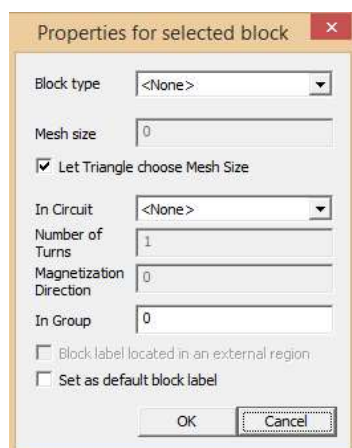
Figura 4.13- Ícone para seleção dos materiais



Fonte: Elaborado pela autora

Após indicado o local de cada material, deve-se clicar com o botão direito na área que deseja definir o material e apertar a barra de espaço do teclado, onde em seguida aparecerá a janela da Figura 4.14, para realização da escolha do material já estabelecido anteriormente em nossa biblioteca.

Figura 4.14 -Janela para seleção dos materiais



Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 4.15, podemos verificar a disposição dos materiais na lâmina após a definição do material de cada área.

Figura 4.15 - Disposição dos materiais na lâmina da MRV 8X6



Fonte: Elaborado pela autora

4.6 EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO

Após a definição de todos os parâmetros descritos anteriormente, selecione o ícone da Figura 4.16, para que seja criada a malha triangular. A razão pela qual o software utiliza a criação da malha triangular para a solução dos problemas é que ao se dividir o domínio em inúmeros elementos pequenos transforma-se um problema que era pequeno, porém complexo de ser resolvido, em um grande, porém mais relativamente fácil de ser solucionado, utilizando-se álgebra linear.

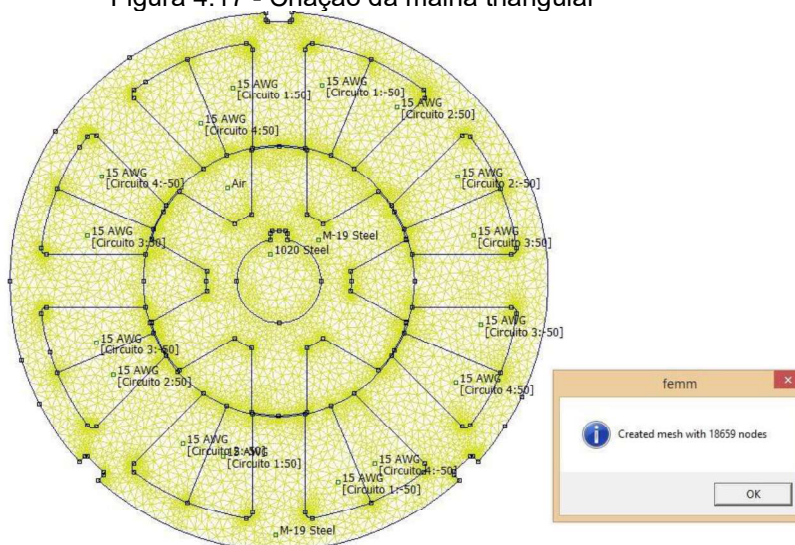
Figura 4.16 - Ícone criar malha triangular



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 4.17 retrata o resultado da criação da malha triangular

Figura 4.17 - Criação da malha triangular



Fonte: Elaborado pela autora

Após essa etapa deve-se selecionar o ícone da Figura 4.18, para a execução do modelo.

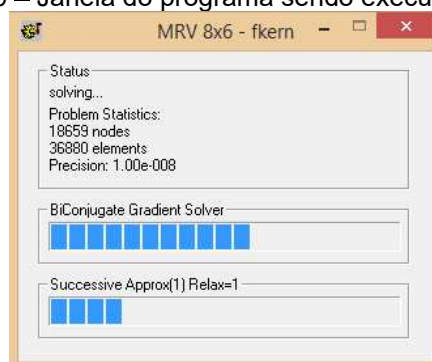
Figura 4.18 - Ícone para execução do modelo



Fonte: Elaborado pela autora

Durante a execução do modelo aparecerá à janela conforme a Figura 4.19.

Figura 4.19 – Janela do programa sendo executado



Fonte: Elaborado pela autora

Finalizado a execução do modelo, selecione o ícone da Figura 4.20, para verificar o comportamento do fluxo magnético da MRV.

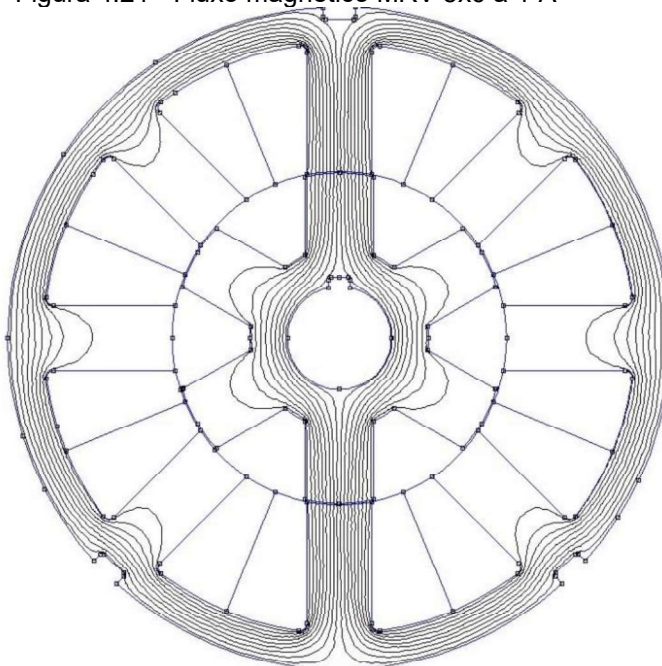
Figura 4.20 - Ícone para verificação dos resultados



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 4.21 representa o fluxo magnético da MRV 8x6

Figura 4.21 - Fluxo magnético MRV 8x6 a 1 A



Fonte: Elaborado pela autora

Para visualizar a densidade de fluxo selecione o ícone da Figura 4.22.

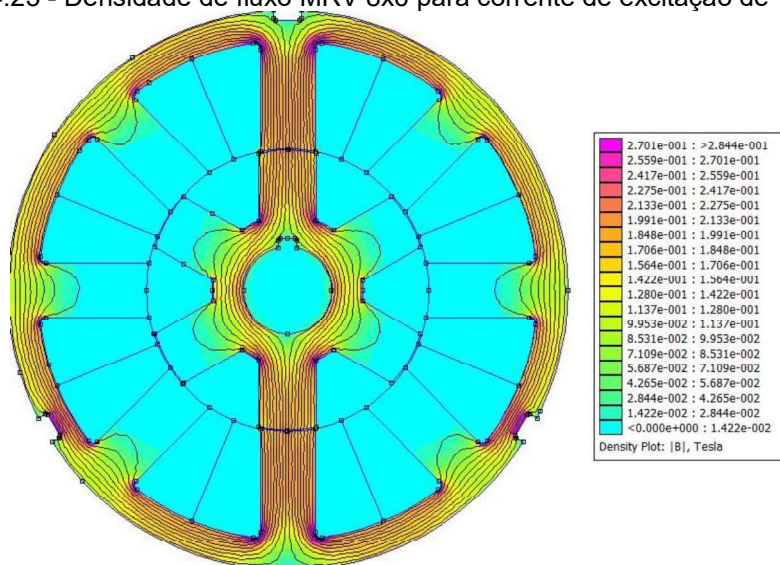
Figura 4.22 - Ícone para visualizar a densidade de fluxo



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 4.23 representa a densidade do fluxo da MRV 8x6.

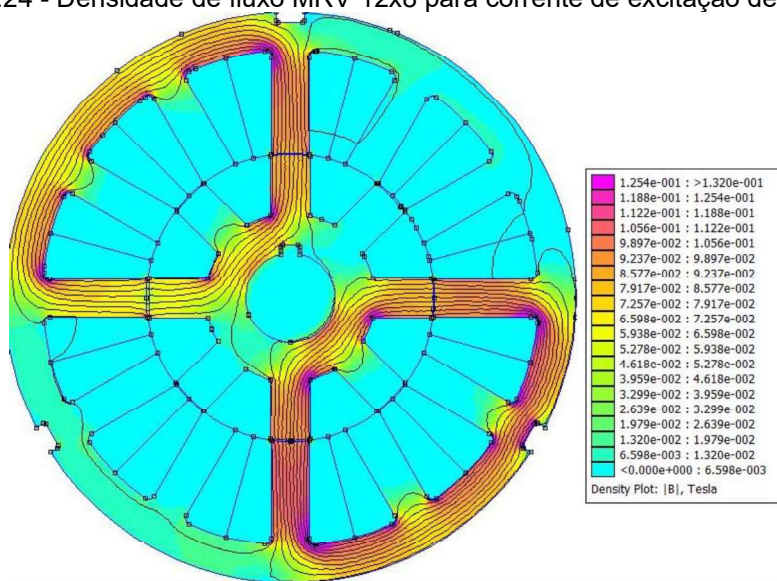
Figura 4.23 - Densidade de fluxo MRV 8x6 para corrente de excitação de 1A



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 4.24 representa a densidade do fluxo da MRV 12x8 .

Figura 4.24 - Densidade de fluxo MRV 12x8 para corrente de excitação de 1A



Fonte: Elaborado pela autora

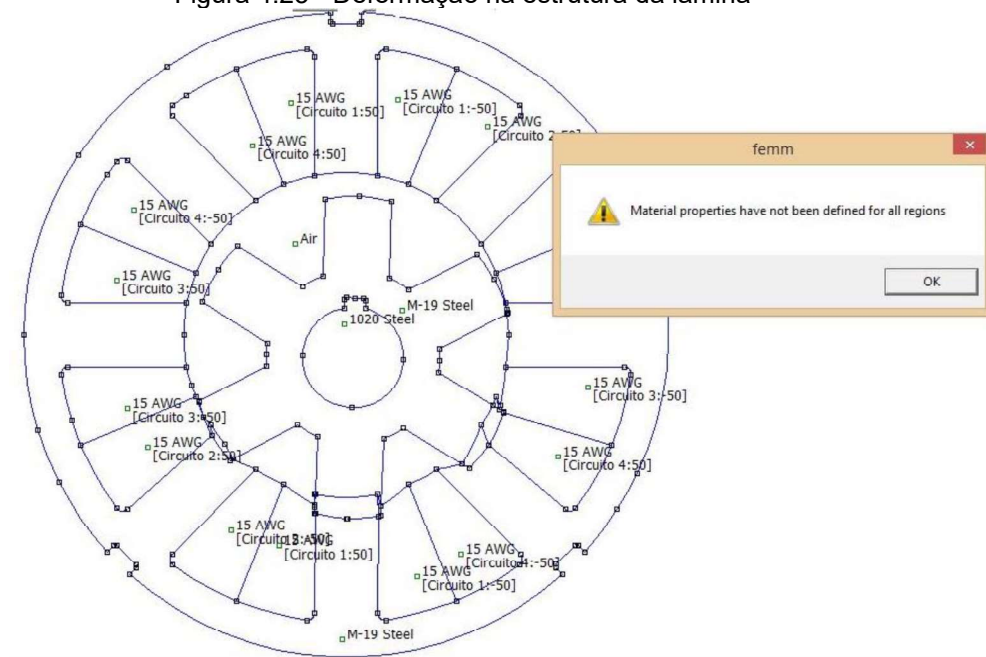
4.7 LUA

O LUA é uma linguagem de programação poderosa, eficiente e leve. O *FEMM* incorporou ao seu software a linguagem LUA. A linguagem LUA tem sido muito utilizada para adicionar recursos de processamento nas linhas de comando de comando no *FEMM*.

Além do conjunto padrão de comandos da linguagem Lua, foram adicionadas funções específicas do FEMM para a manipulação de arquivos tanto no modo pré-processamento quanto no pós-processamento. Os scripts utilizados para a realização das simulações das duas topologias de MRV e a descrição de cada função utilizada são os que constam no Anexo A desse trabalho.

Um importante parâmetro a ser adicionado no script é a base das coordenadas x e y para realização da rotação do rotor, pois ao executar o código o rotor começou a deslocar, conforme representado na Figura 4.25.

Figura 4.25 - Deformação na estrutura da lâmina

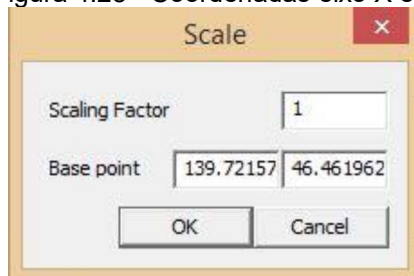


Fonte: Elaborado pela autora

Esse problema ocorreu pelo fato que os pontos centrais do rotor não estavam definidos corretamente no código LUA. Para definição desse ponto central é necessário desenhar duas linhas cruzando o rotor no eixo x e y como demonstrada na Figura 4.26.

Logo após aparecerá na tela às coordenadas no eixo x e y do ponto, conforme Figura 4.28.

Figura 4.28 - Coordenadas eixo X e Y



Fonte: Elaborado pela autora

Onde os valores que constam na *base point* (base do ponto), correspondem aos valores das coordenadas no eixo X e Y, respectivamente. Em seguida é só inserir esses parâmetros no código lua no comando `mi_moverotate("basex","basey",ânguloderotação)`.

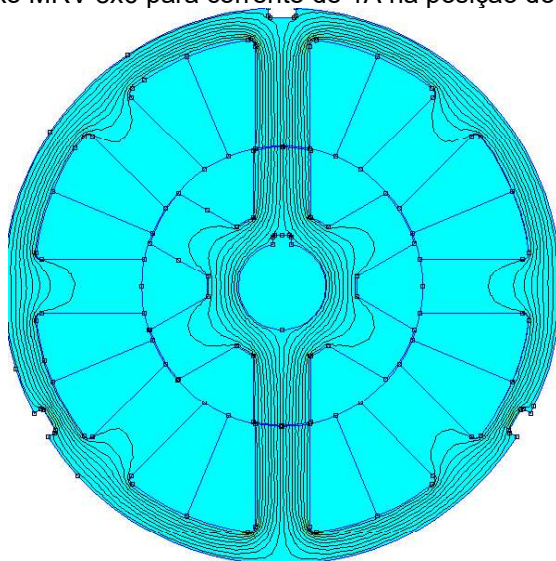
4.8 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Após a realização das simulações no software *FEMM* foram obtidos os resultados dos perfis de indutância para as duas topologias das máquinas a relutância variável.

Na MRV 8x6, foi realizada a simulação da rotação do rotor entre os valores de 0° a 60°, para cada corrente de 1 a 45 ampères, tendo ao todo 2806 valores de perfis de indutância própria e imagens geradas. A posição de total alinhamento, entre os polos do estator e do rotor, ocorre quando o rotor está na posição de 0°. Isso significa que, nessa posição os valores de indutância apresentados são máximos, e assim essa região está mais susceptível ao aparecimento de saturação magnética com o acréscimo da corrente na fase.

A Figura 4.29, demonstra fluxo magnético para a MRV 8x6, tendo como corrente de excitação 1A no circuito 1 (fase A), com o rotor na posição de 0°

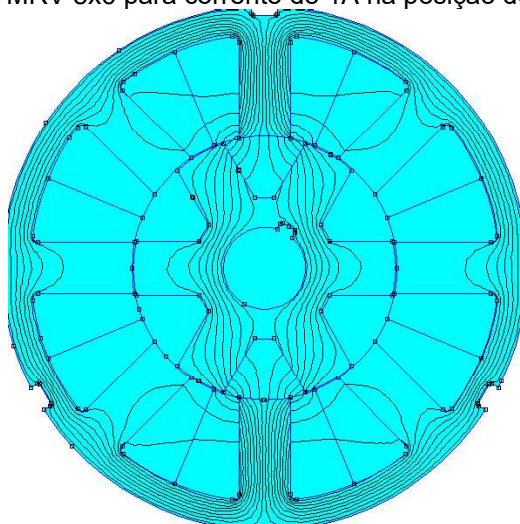
Figura 4.29 - Fluxo MRV 8x6 para corrente de 1A na posição do rotor de 0°



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 4.30, ilustra a posição da MRV com o rotor na posição de 30°, representando a posição de total desalinhamento entre o rotor e o estator. Quando o rotor está nesse estágio, qualquer força externa que surja e promova um pequeno deslocamento no rotor, fará com que ele se movimente até a posição de total alinhamento. Portanto, isto significa que nessa posição os valores medidos de indutância são menores.

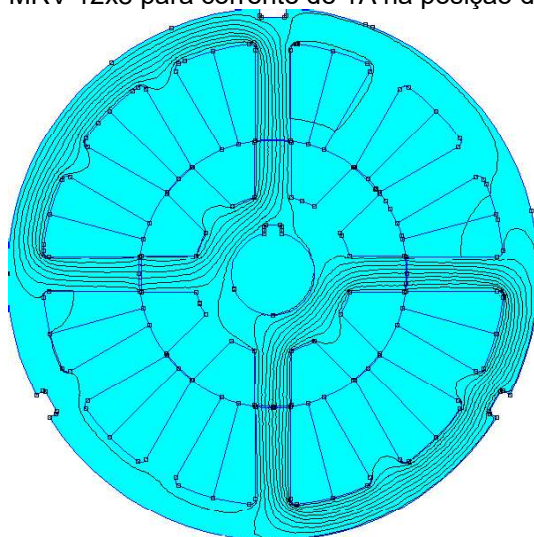
Figura 4.30 - Fluxo MRV 8x6 para corrente de 1A na posição do rotor de 30°



Fonte: Elaborado pela autora

Na MRV 12x8, foi realizada a simulação da rotação do rotor entre os valores de 0° a 45° , para cada corrente de 1 a 45 ampères, tendo ao todo 2070 valores de perfis de indutância própria e imagens geradas. Assim como na MRV 8x6 a posição de total alinhamento entre o estator e o rotor, ocorre quando o rotor está na posição de 0° . Na Figura 4.31, é ilustrada o fluxo magnético na posição de total alinhamento, tendo como corrente de excitação de 1A no circuito 1.

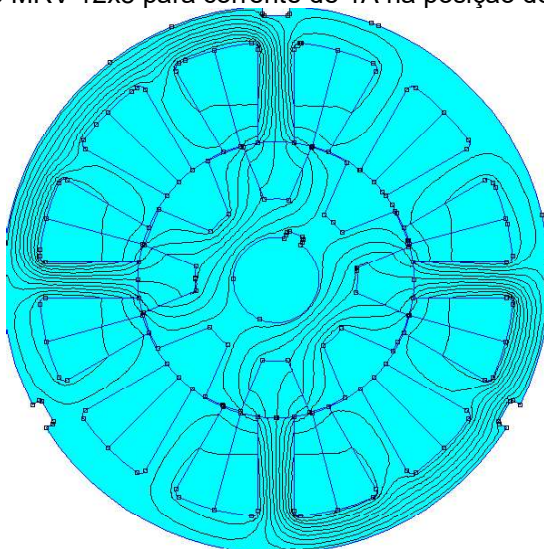
Figura 4.31 - Fluxo MRV 12x8 para corrente de 1A na posição do rotor de 0°



Fonte: Elaborado pela autora

Já a Figura 4.32, ilustra a MRV 12x8 na posição de total desalinhamento do rotor com o estator, esse estágio ocorre quando a posição do rotor se encontra a 23° .

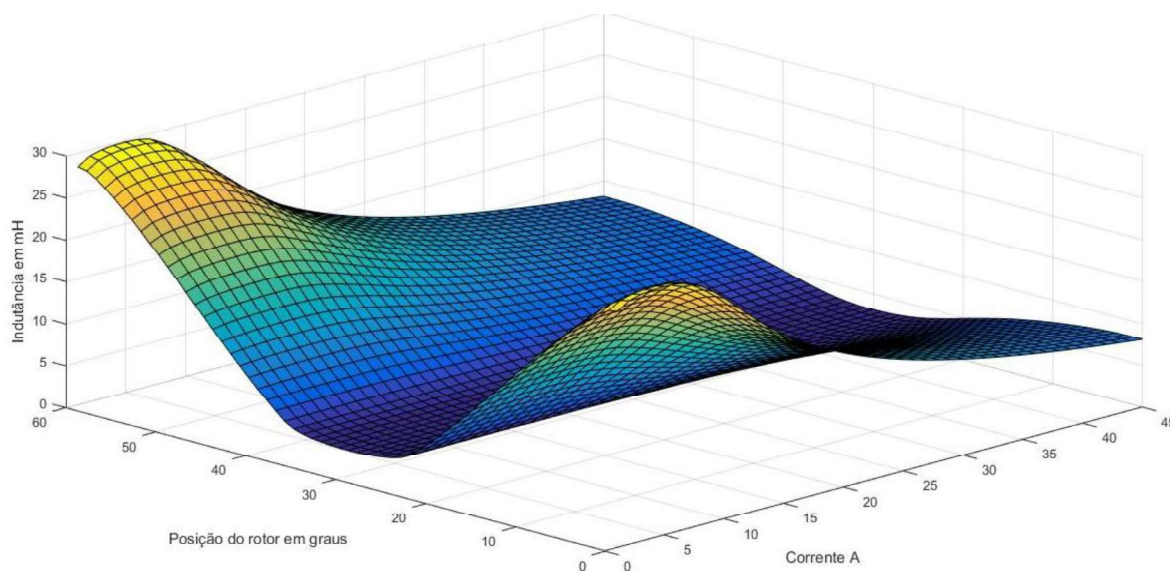
Figura 4.32 - Fluxo MRV 12x8 para corrente de 1A na posição do rotor de 23°



Fonte: Elaborado pela autora

A superfície da Figura 4.33, representa os valores de indutâncias próprias da MRV 8x6, para cada corrente e ângulo simulado.

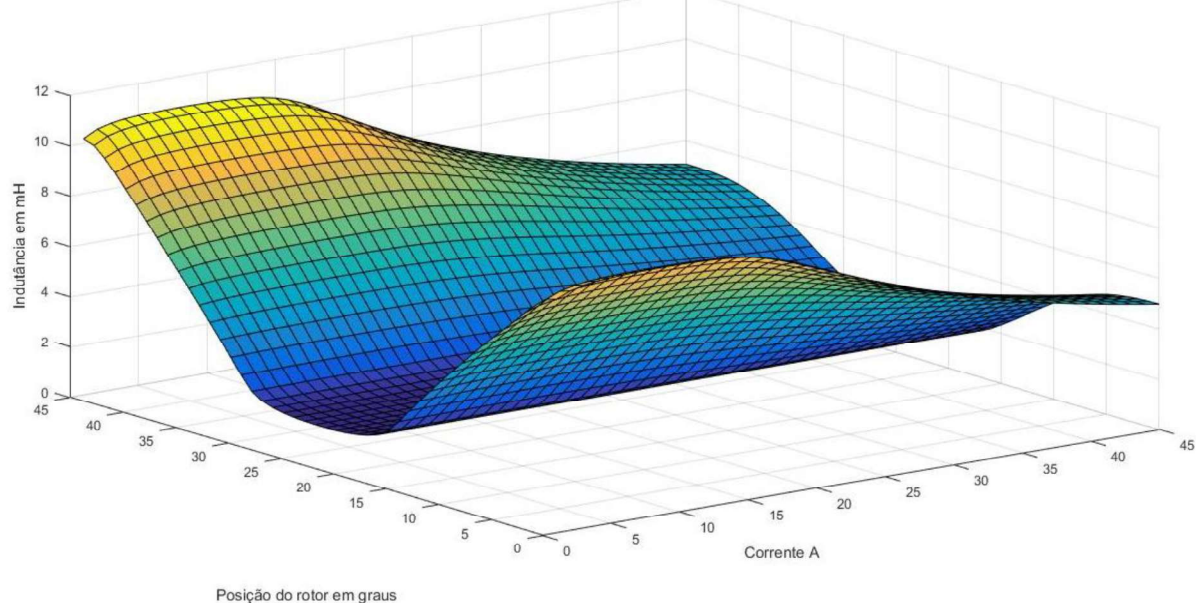
Figura 4.33 - Superfície de indutâncias próprias MRV 8x6



Fonte: Elaborado pela autora

A superfície da Figura 4.34, representa os valores de indutâncias próprias da MRV 8x6, para cada corrente e ângulo simulado.

Figura 4.34 - Superfície de indutâncias próprias MRV 12x8



Fonte: Elaborado pela autora

4.9 CONCLUSÃO

O método dos elementos finitos mostrou-se um importante recurso para a análise e determinação do comportamento do fluxo magnético, permitindo assim determinar os perfis de indutância própria para ambas topologias. Esses perfis de indutância serão utilizados para simulação das máquinas no domínio do tempo, no próximo capítulo.

5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

5.1 INTRODUÇÃO

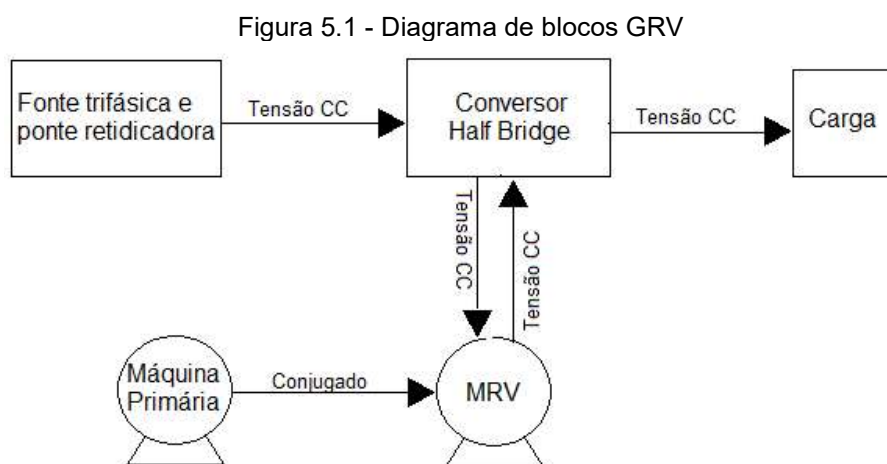
As simulações computacionais tornaram-se uma importante etapa no processo de execução de um projeto, minimizando erros durante a construção, e consequentemente resultando em uma economia de tempo e recursos.

Esse capítulo tem como foco apresentar as etapas de simulação computacional para o gerador a relutância variável 8x6 e o gerador a relutância variável 12x8, no domínio do tempo e realizar o estudo comparativo dos resultados obtidos.

5.2 SIMULAÇÃO

Para a realização do estudo comparativo entre o gerador a relutância variável 8x6 e o gerador a relutância variável 12x8, no domínio do tempo, foram utilizadas a modelagem matemática presente no Capítulo 3, onde foram demonstradas as equações que descrevem o comportamento elétrico e mecânico de ambas as topologias. Mais precisamente a equação (3.21), que descreve a GRV 12x8 (trifásica) e a equação (3.23) que descreve a GRV 8x6 (tetrafásica).

Além disso, para a realização dessa simulação foi necessário compreender o comportamento do fluxo magnético nas máquinas, com a obtenção dos valores de indutância própria, que foram demonstrados no Capítulo 4. A Figura 5.1 representa o diagrama de blocos da MRV.



Fonte: Elaborado pela autora

5.2.1 Perfis de indutância

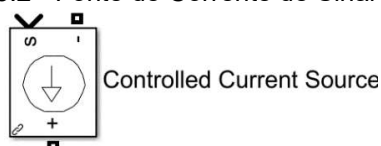
Para a realização da simulação de ambas as topologias no domínio do tempo é necessário saber a todo instante os valores de indutância própria das máquinas em cada posição do rotor. Esses valores, foram obtidos utilizando o método dos elementos finitos, através do software *FEMM*, conforme exposto no Capítulo 4.

Os perfis de indutância própria utilizados nesse trabalho foram os demonstrados nas Figura 4.33 e Figura 4.34 e para as GRV 8x6 e GRV 12x8, respectivamente.

5.2.2 Conversor Half Bridge

Na sessão 2.4, desse trabalho foi explicado o princípio de funcionamento de um conversor Half Bridge para acionamento das máquinas como gerador. As Figura 2.7 e Figura 2.8 , correspondem respectivamente ao conversor utilizado nos geradores a relutância variável 12x8 e gerador a relutância variável 8x6, respectivamente. Como dito anteriormente para a realização da simulação no domínio do tempo foi utilizado o ambiente *Simulink/ MATLAB®*. Para a criação do bloco que representa o conversor HB, foi utilizada uma fonte de corrente de sinal, para representar as bobinas de uma MRV, conforme Figura 5.2.

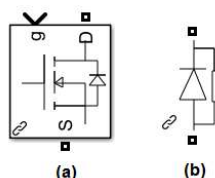
Figura 5.2 - Fonte de Corrente de Sinal



Fonte: Elaborado pela autora

Para a modelagem do conversor, também foram utilizado um modelo pronto MOSFET e diodos, conforme a Figura 5.3.

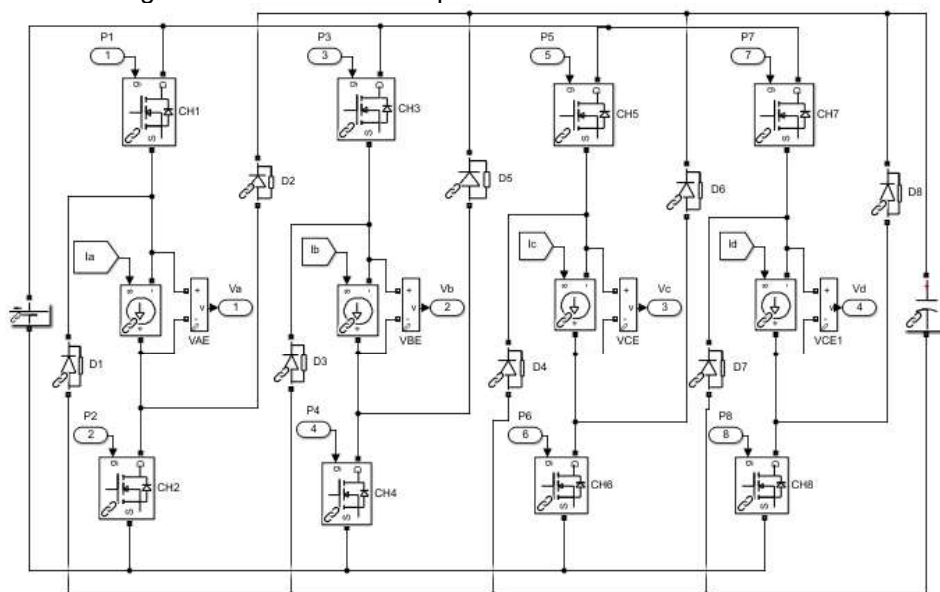
Figura 5.3 - Modelos pronto *Simulink* (a) MOSFET (b) Diodo



Fonte: Elaborado pela autora

O esquema do conversor half bridge para o acionamento da GRV 8x6, é apresentado na Figura 5.4.

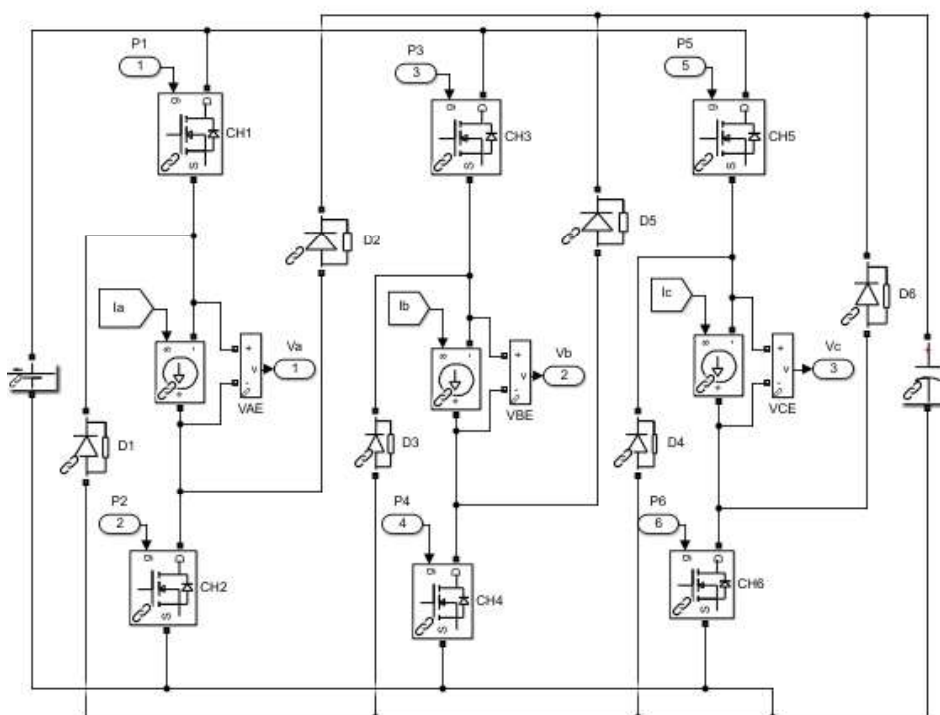
Figura 5.4 - Conversor HB para GRV 8x6 no *Simulink*



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 5.5 representa o esquema do conversor half bridge para o acionamento da GRV 12x8, no ambiente *Simulink*.

Figura 5.5 - Conversor HB para GRV 12x8 no *Simulink*

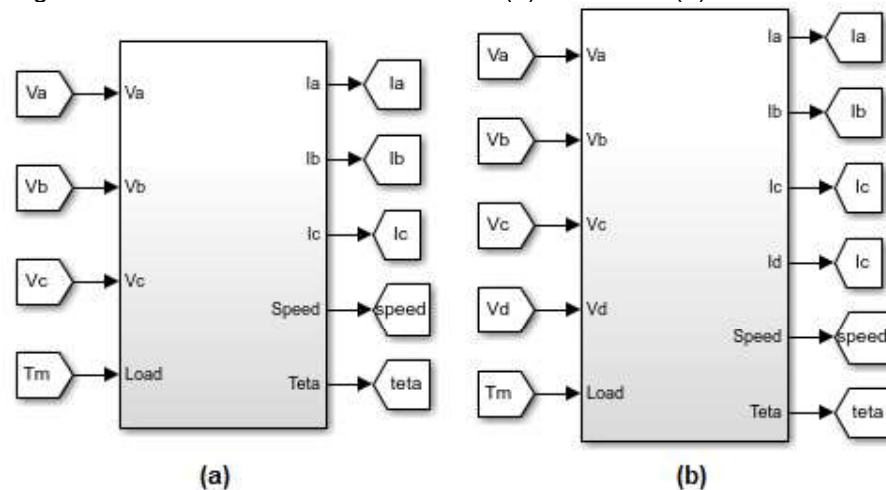


Fonte: Elaborado pela autora

5.2.3 Modelagem da Máquina a Relutância Variável

Para realizar as simulações das máquinas foi criado dentro do *SIMULINK* um bloco, utilizando a função *S-Function*, essa função define como um bloco funciona durante todas as etapas da simulação como: inicialização, atualização e saída. A função foi utilizada para representar as equações (3.21) e (3.23), que descrevem o comportamento elétrico e mecânico da GRV 12x8 e 8x6, respectivamente. A Figura 5.6 representa o bloco utilizado.

Figura 5.6 - Blocos das GRV no *Simulink* (a) GRV 12x8 (b) GRV 8x6



Fonte: Elaborado pela autora

Esse bloco possui como entradas os valores de tensões, provenientes das bobinas da GRV, que são calculadas através do bloco que simula o conversor half-bridge, conforme mostrado na sessão anterior, além da carga mecânica. Como saídas esse bloco possui os valores de corrente, a velocidade angular e o ângulo de posicionamento do rotor.

Segue o script do programa utilizado para realizar a modelagem da máquina a relutância variável trifásica (12x8).

```
function [sys,x0] = Simulink_naolinear(t,x,u,flag,Ra,D,J)
```

```
if abs(flag) == 1,
```

```
%-----
```

```
%      Matriz A
```

```
%-----
```

```
    A = zeros(5,5);
```

```

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

%-----
%      Matriz B
%-----
B = zeros(5,5);
B(4,4) = J;
B(5,5) = 1;

%-----
%      Cálculo das variáveis na fase A
%-----
alpha = rem((x(5)*180/pi),45);
[ indut , deriv ] = 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);

%-----
%      Cálculo das variáveis na fase B
%-----
alpha = rem(((x(5)*180/pi)+30),45);
[ indut , deriv ] = 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);

%-----
%      Cálculo das variáveis na fase C
%-----
alpha = rem(((x(5)*180/pi)+60),45);
[ indut , deriv ] = 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);

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

elseif abs(flag) == 3
    x(4)=125.664;
    sys = x;

elseif abs(flag) == 0
    x0 = [0; 0; 0; 125.664; 0];

```

```

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

else
    sys = [];
end

```

O *script* para a realização da modelagem da máquina a relutância variável tetrafásica (8x6) é análogo ao mostrado anteriormente e está no Apêndice A. No entanto, algumas modificações são necessárias, pois o modelo matemático da MRV trifásica (12x8) é uma matriz de dimensões 5x5, enquanto a MRV tetrafásica (8x6) é uma matriz de dimensões 6x6. Com isso é necessário adicionar ao *script* as componentes das matrizes (A e B) referentes a Equação 3.23 e os cálculos das variáveis na fase D.

5.2.4 Acionamento das chaves

Para o acionamento da MRV, é preciso conhecer a todo o instante a posição angular do rotor, afim de realizar a correta energização das bobinas de cada fase. Como mostrado anteriormente a posição angular é uma saída do bloco que modela a MRV. No gerador o objetivo é provocar a variação da relutância para que o fluxo na bobina varie e a 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. Portanto, foi necessário criar um script que realiza o acionamento das chaves no conversor half-bridge a partir da posição angular do rotor, sendo:

```

%-----
%      Acionamento da fase A
%-----

if (((alpha > 42.3) || (alpha <=12.3)))

    u(1)=1;
    u(2)=1;

else
    u(1)=0;
    u(2)=0;

end

```

```

%-----
%      Acionamento da fase B
%-----

if (alpha > 12.3) && (alpha <=27.3)

    u(3)=1;
    u(4)=1;

else
    u(3)=0;
    u(4)=0;
end

%-----
%      Acionamento da fase C
%-----

if (alpha > 27.3) && (alpha <=42.3)

    u(5)=1;
    u(6)=1;

else
    u(5)=0;
    u(6)=0;
end

```

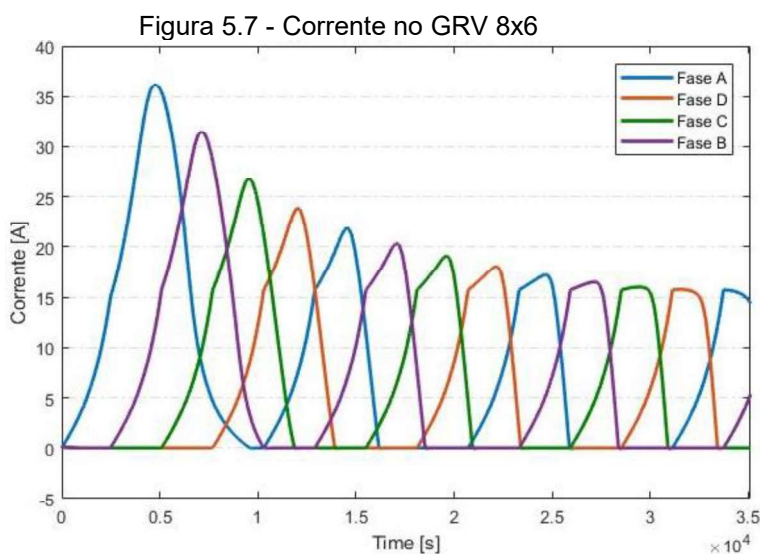
O *script* para o acionamento das chaves da máquina a relutância variável tetrafásica (8x6) é análogo ao mostrado anteriormente e está no Apêndice B, porém foi adicionado mais uma fase. Além disso para a modelagem do sistema, foi utilizado os valores de indutância própria obtidos através da análise de elementos finitos realizadas no Capítulo 4, para a resolução da equação que descreve o comportamento elétrico e mecânico das duas máquinas.

5.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Após finalizada a modelagem do sistema, foram realizadas as simulações (no domínio do tempo). Nessa sessão são apresentadas as curvas tensão e corrente para a máquina a relutância variável sendo acionada como gerador para a MRV 8x6 e MRV 12x8. Logo em seguida, será apresentado o estudo comparativo entre ambas as topologias

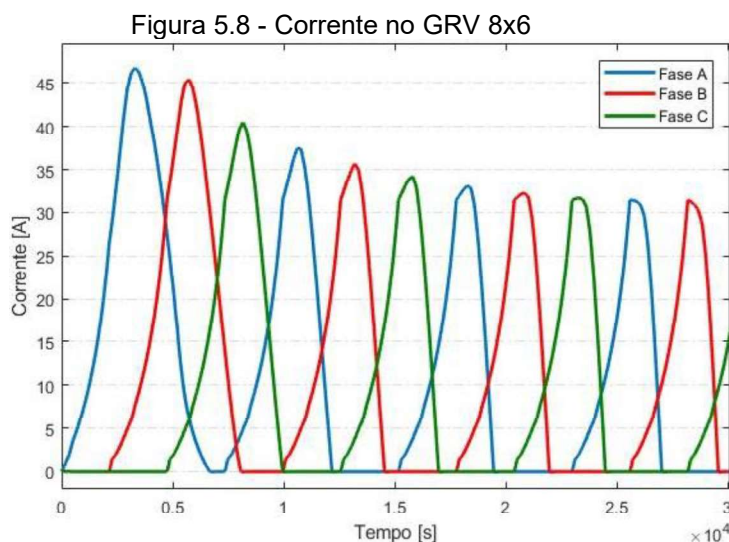
5.3.1 Correntes

A Figura 5.7, representa a curva de corrente para a GRV 8x6. Cada pulso de corrente corresponde a uma das fases da máquina. É possível perceber nesse gráfico que no momento de partida da máquina a corrente atinge valores de 37 A e ao decorrer do tempo atinge uma corrente nominal de 16 A.



Fonte: Elaborado pela autora

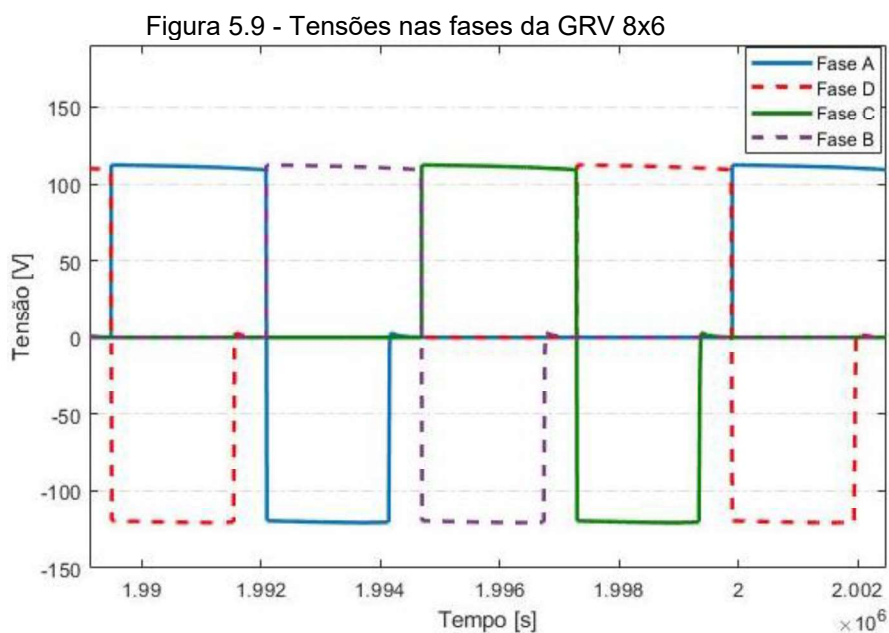
A Figura 5.8, apresenta as formas de onda da corrente para a GRV 12x8. Cada pulso de corrente corresponde a uma das fases da máquina. No momento de partida da máquina a corrente atinge valores de 46 A e ao decorrer do tempo atinge uma corrente nominal de 32 A.



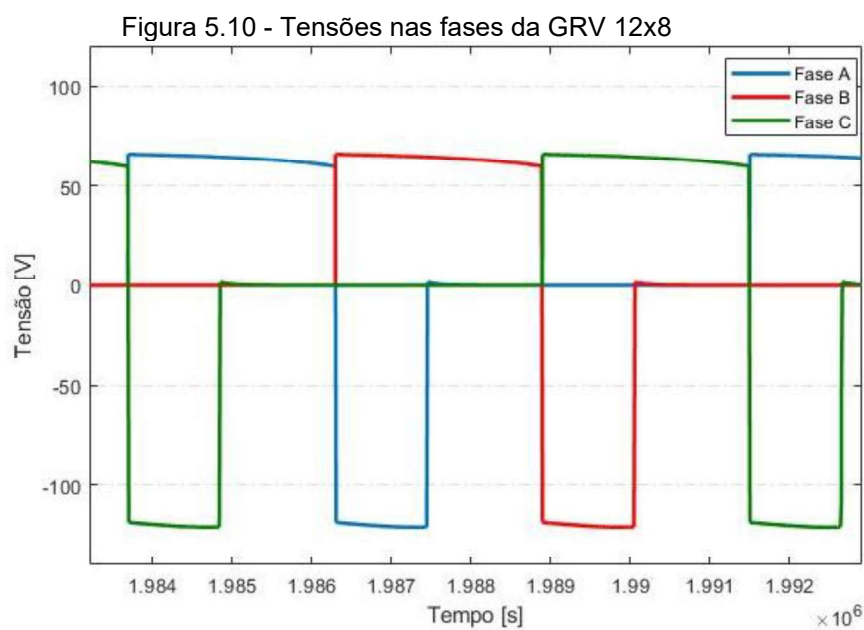
Fonte: Elaborado pela autora

5.3.2 Tensão

A Figura 5.9, representa a curva da tensão para as quatro fases da GRV 8x6, o valor das tensões nas fases corresponde a 102 V.

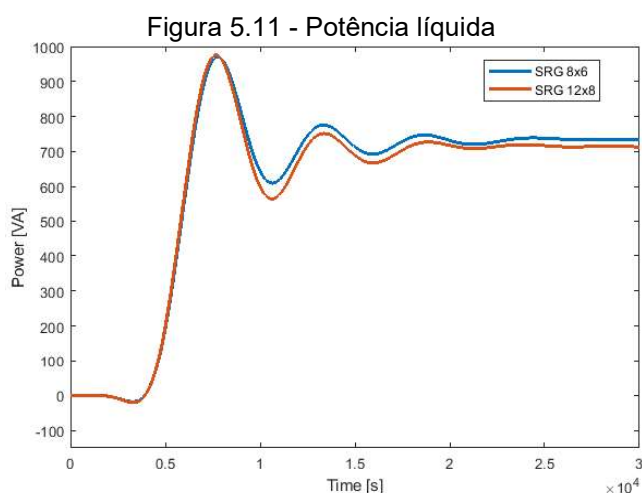


A Figura 5.10, representa a curva da tensão para as fases da GRV 12x8, o valor das tensões nas fases corresponde a 56 V.



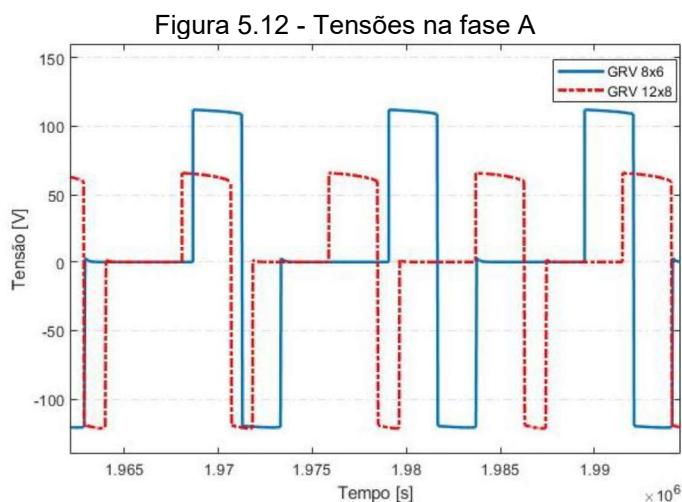
5.3.3 Estudo comparativo

Para que a realização do estudo comparativo entre os dois geradores a relutância variável (GRV 8x6 e 12x8) fosse coerente, foi determinado que a potência de saída líquida de ambas fossem aproximadamente 735,5 VA (1cv) conforme determinado inicialmente no projeto, Figura 5.11. A potência líquida é a diferença entre as potências elétricas de saída (carga) e a potência elétrica de entrada (fonte).



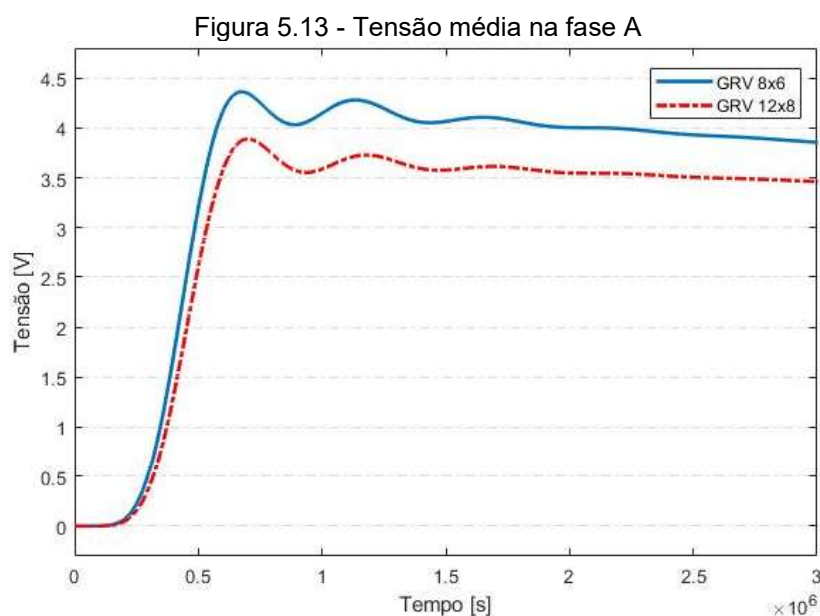
Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 5.12 são representadas as tensões instantâneas na fonte nas GRV. A GRV 8x6 possui uma tensão instantânea maior, apresentando valores de picos de aproximadamente 112 V. Enquanto a GRV 12x8 apresenta valores de pico de aproximadamente 65 V. (Tensão na fonte).



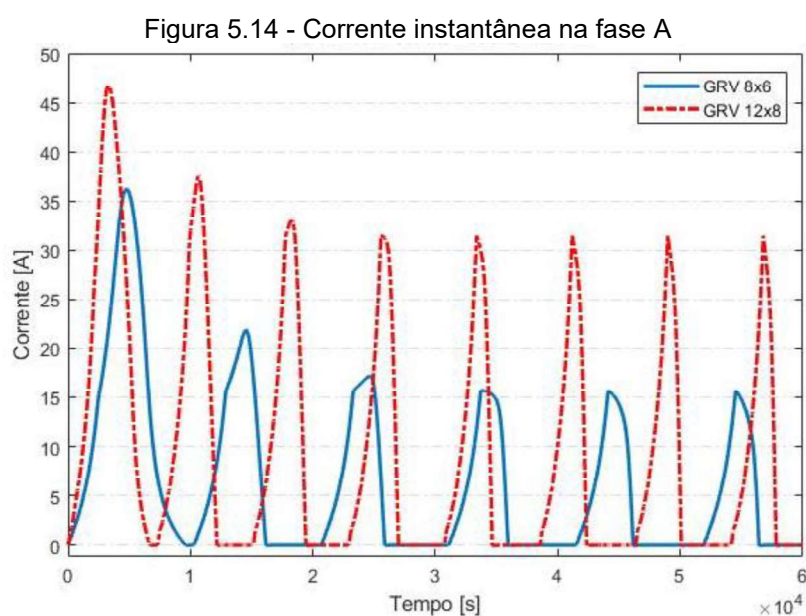
Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 5.13 são representadas as tensões médias na fase A nas GRV. Onde a tensão média na GRV 8x6 apresenta valores de 4,0 V, enquanto na GRV 12x8 apresenta valores de 3,5 V.



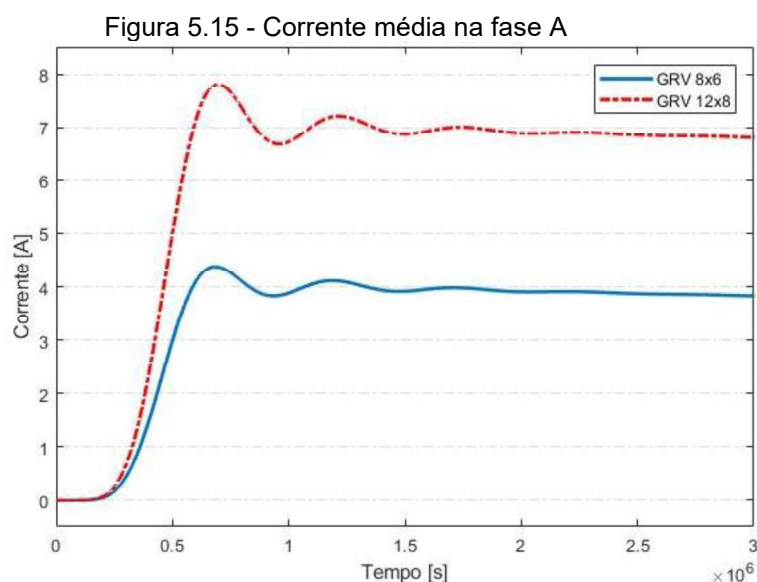
Fonte: Elaborado pela autora

A GRV 12x8 possui valores de pico de corrente maiores que a GRV 8x6. Sendo que na GRV 12x8 apresenta picos de 32 A. Enquanto na GRV 8x6 os valores de picos alcançam 15 A, conforme a Figura 5.14.



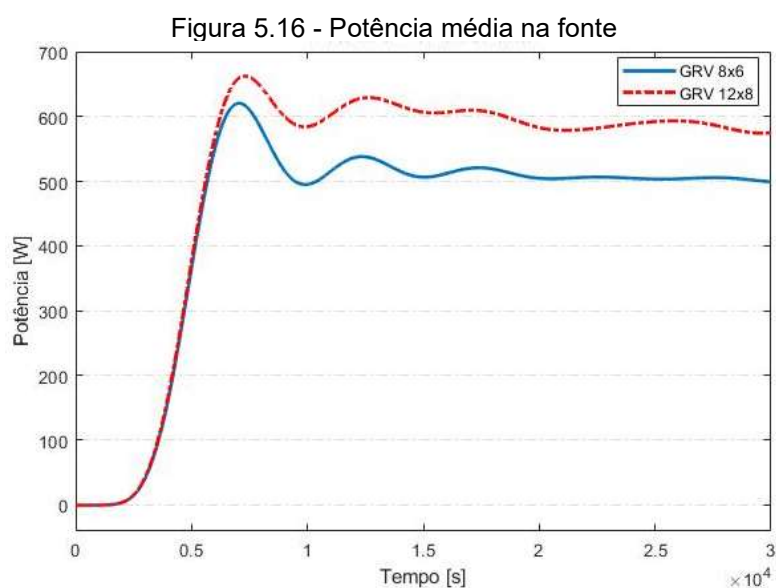
Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 5.15 representa a corrente média na fase A. A GRV 12x8 possui quase o dobro do valor da corrente, tendo um valor médio de 7 A. Enquanto a GRV 8x6 possui uma corrente média de 4 A.



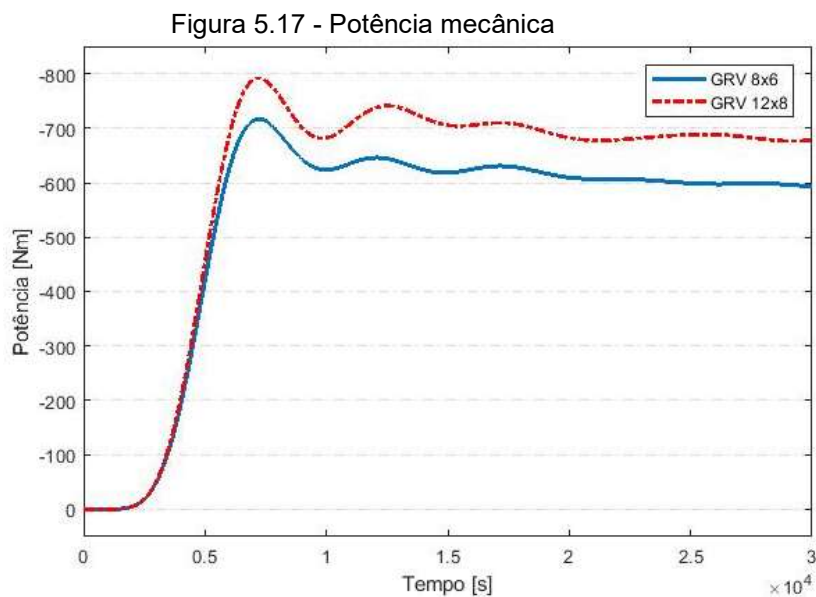
Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 5.16 representa a potência na fonte. A GRV 8x6 possui um valor médio de 600 VA, enquanto a GRV 12x8 possui um valor médio de 500 VA.



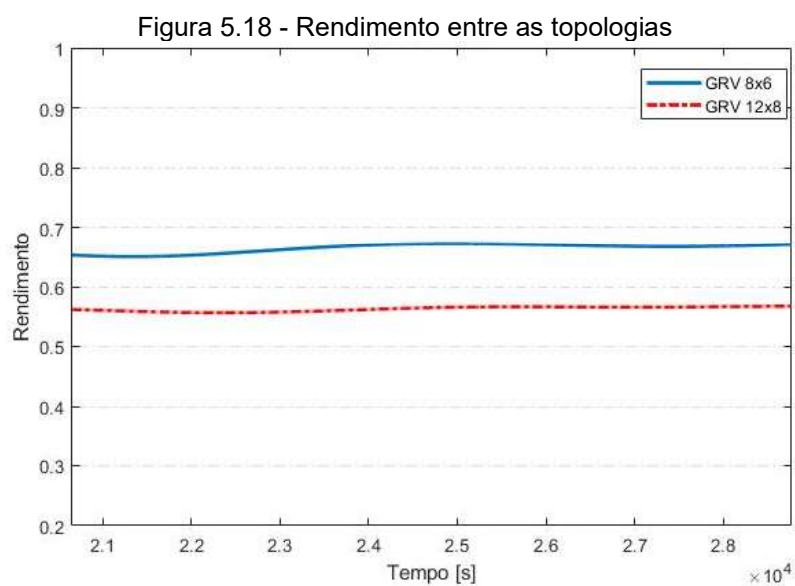
Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 5.17 representa a potência mecânica. Temos que o GRV 8x6 possui um valor médio de 600 N.m, enquanto o GRV possui um valor médio de 700 N.m.



Fonte: Elaborado pela autora

Assim, como dito anteriormente foi realizado o estudo comparativo entre ambas as topologias com uma potência de saída nominal de 735,6 VA. A Figura 5.18 representa o rendimento para as duas topologias.



Fonte: Elaborado pela autora

O rendimento de uma máquina (η) é definido como sendo a relação entre a potência de saída e a potência de entrada. No caso da máquina em estudo, o gerador a relutância variável, temos que a potência de saída é a potência líquida (P_{out}), enquanto a potência de entrada é composta pela potência elétrica da fonte (P_{ein}) e a potência mecânica (P_{mec}), sendo representado pela equação:

$$\eta = \frac{P_{out}}{(P_{ein} + P_{mec})} \quad (5.1)$$

Para a realização do cálculo do rendimento, é necessário utilizar os dados coletados através do ambiente *Simulink* durante as simulações, são esses dados: potência líquida, potência elétrica da fonte e potência mecânica de entrada. A partir desses dados foi realizado o cálculo através da equação 5.1.

Analizando a Figura 5.18, temos que o gerador a relutância variável 8x6 apresentou um rendimento de 0,69 enquanto o gerador a relutância variável 12x8 apresentou um rendimento de 0,59.

5.4 CONCLUSÃO

Ao realizar a análise dos resultados obtidos nas simulações, verifica-se que o gerador de relutância variável 12x8 necessita de mais energia de entrada (fonte) e também de mais potência mecânica para produzir a mesma potência de saída que o gerador de relutância variável 8x6. Além disso o GRV 8x6 possui um rendimento maior que o GRV 12x8.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES FINAIS

Esse trabalho atingiu os objetivos propostos inicialmente, apresentando a modelagem, simulação e estudo comparativo entre o gerador a relutância variável 8x6 e o gerador a relutância variável 12x8. Ambas as topologias de máquinas possuem aspectos construtivos semelhantes em relação a: dimensão da carcaça das máquinas, potência de saída, material das lâminas, quantidade de espiras no estator

Durante o trabalho foram expostos o estudo teórico da máquina a relutância variável, apresentando os princípios de operação básico e as expressões matemáticas que descreviam o comportamento elétrico e mecânico para seu funcionamento.

A análise de elementos finitos foi realizada através da simulação do software FEMM. Essa análise mostrou-se de extrema importância para a verificação do comportamento eletromagnético de ambas as topologias.

A partir dos resultados obtidos através do FEMM e a compreensão do princípio de funcionamento das máquinas, foi realizada a simulação de ambas as topologias no domínio do tempo. Ao realizar a análise dos resultados obtidos nas simulações, verifica-se que o gerador de relutância variável de 12x8 precisa de mais energia de entrada (fonte) e também mais potência mecânica para produzir a mesma potência de saída que o gerador de relutância variável de 8x6.

Portanto, conclui que o gerador de relutância variável 8x6 é mais eficiente com a mesma potência de saída que a outra topologia (GRV12x8). Para operar esta máquina (GRV 8x6), é necessário um conversor com uma ramificação a mais do que o GRV 12x8, portanto, mais chaves IGBT e componentes eletrônicos são usados.

6.2 PROPOSTAS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Testes em bancada das máquinas a relutância variável de topologias 8x6 e 12x8.

REFERÊNCIAS

- [1] R. FIDELIS et al. Development of an Experimental Platform to Drive the Switched Reluctance Machine. **Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ-2016)**, Madrid (Spain), v. 1, n. 14, p. 774-779, May 2016.
- [2] DE PAULA, M. V. et al. Comparative study of torque ripple minimization techniques for a three-phase switched reluctance motor. **Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ-2018)**, Salamanca (Spain), v. 1, n. 16, p. 270-275, April 2018.
- [3] SIADATAN, A.; FATAHI, N.; AND SEDAGHAT, M. Optimum Designed Multilayer Switched Reluctance Motors for use in Electric Vehicles to Increase Efficiency. **IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM-2018)**, v. 1, p. 304-308, 2018.
- [4] MILLER, T. J. E. Electronic Control of Switched Reluctance Machines. [S.l.]: Newness Power Engineering Series, 2001.
- [5] BUKHARI, A. A. S. et al. Design of a High Speed 18/12 Switched Reluctance Motor Drive with an Asymmetrical Bridge Converter for Electric Vehicles. **IEEE International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET-2018)**, 2018.
- [6] BOGUSZ, P.; KORKOSZ, M.; & PILECKI, M. The impact of parameter control on the characteristics of switched reluctance motor designed for small electric vehicle drive. **IEEE Selected Problems of Electrical Engineering and Electronics (WZEE-2015)**, 2015.
- [7] ZHU, J. . C. K. W. E. . X. X. . & Z. Y. Design of a New Enhanced Torque In-Wheel Switched Reluctance Motor with Divided Teeth for Electric Vehicles. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 53, n. 11, NOV. 2017.

- [8] IVANOV, A. . & K. I. Application of maximum power point tracker method in wind energy conversion system based on the switched reluctance generator. **International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)**, p. 472 - 476, 2017.
- [9] KAREGAR, H. K. . Y. M. . & S. A. New structure for high speed and variable speed wind turbine based switched reluctance generator. **IEEE International Conference on Power and Energy**, p. 200 - 205, 2010.
- [10] CHOI, D.-W. . B. S.-I. . & C. Y.-H. A Study on the Maximum Power Control Method of Switched Reluctance Generator for Wind Turbine. **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**, v. 50, n. 1, January 2014.
- [11] RUBA, M. . S. L. . A. J. F. Fault tolerant switched reluctance machine for wind turbine blade pitch control. **IEEE International Conference on Clean Electrical Power (2009)**, v. 1, p. 721-726, 2009.
- [12] SILVEIRA, A. V. F. Modelagem, Construção, Testes e Análise de Desempenho de um Gerador a Relutância Chaveado. [S.l.]: Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- [13] JIAN, L.; XUEGUAN, S.; AND YUNHYUN, C. Comparison of 12/8 and 6/4 Switched Reluctance Motor: Noise and Vibration Aspects. **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**, v. 44, n. 11, p. 4131 - 4134, NOVEMBER 2008.
- [14] PETRUS, V. et al. Design and Comparison of Different Switched Reluctance Machine Topologies for Electric Vehicle Propulsion. **International Conference on Electrical Machines - ICEM**, 2010.
- [15] SMAKA, S. et al. Design Considerations for Novel 8/14 and Comparison with Conventional 8/6 and 8/10 Switched Reluctance Machines. **International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion**, p. 614 - 619, 2012.

- [16] ANDRADE, D. A. et al. Comparative study between a Single-phase and a Three-phase Switched Reluctance Machine. **IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)**, p. 1391-1396, 2011.
- [17] JEONG, G.-I. et al. Performance Comparison of SRMs for Low Voltage Fan Drive. **IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)**, p. 880-884, 2014.
- [18] DRANCA, M. A.; RADULESCU,. Comparative Design Analysis of Three-Phase Switched Reluctance Generators for Micro-Wind Power Applications. **XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)**, p. 597-601, 2018.
- [19] LUKMAN, G. F. et al. Comparative Analysis of 4/2 and 6/4 Poles Switched Reluctance Motors for Electric Supercharger. **IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)**, p. 352 - 357, 2018.
- [20] YAMAN, S. et al. Acoustic Noise and Vibration in Switched Reluctance Machines: A Comparative Study of 12/8 and 8/6 Topologies. **IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)**, p. 1130-1137, 2019.
- [21] FAIZ, J. . S. G. . & G. H. Analysis of Dynamic Behavior of Switched Reluctance Motor-Design Parameters Effects. 15th **IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference.**, p. 532 - 537, 2010.
- [22] ISHIKAWA, T. . H. Y. . & K. N. Optimum Design of a Switched Reluctance Motor Fed by Asymmetric Bridge Converter Using Experimental Design Method. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 50, n. 2, Feb. 2014.
- [23] KRISHNAN, R. Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. [S.I.]: Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [24] DIAS, R. J. Inovações no Projeto de Geradores a Relutância Variável com Estudo das Influências da Saturação Magnética e das Indutâncias Mútuas. [S.I.]: Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Abril, 2017.

- [25] HEIDARIAN, H.; GANJI, B. A Dynamic Simulation Model Based on Finite Element Method for Switched Reluctance Generator. **International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion**, p. 1427 - 1432, 2016.
- [26] HUY, L.-H. Performance Study of a Four-Phase 8/6 Switched Reluctance Generator Using a Nonlinear Model Based on Magnetization Curves. **35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics**, p. 3910 - 3915, 2009.
- [27] WANG, W. . C. H. . W. Q. . D. Y. . Y. S. . L. Z. H. D. Control System of Switched Reluctance Generator. **IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)**, p. 1064 - 1069, 2017.
- [28] XIN DENG, H. Y. . Q. W. R. Z. C. H. . M. X. . & W. X. Development of a compact 60kW three-phase asymmetry half-bridge power convertor with specifically designed busbar for switched reluctance machines. **IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (ElConRusNW)**, p. 311 - 316, 2015.
- [29] OLIVEIRA, A. L.; PELIZARIA, A.; SGUAREZI FILHO, A. J. Finite Element Analysis Simulation Of Switched Reluctance Motor Drive. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, n. 7, p. 1928 - 1933, July 20018.
- [30] THERMAL Stability Analysis of 6/4 Switch Reluctance Motor Using Finite Element Method. **International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)**, p. 382 - 387, 2016.
- [31] FLEURY, A. et al. Wind Powered Switched Reluctance Generator for Rural Properties and Small Communities. **International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ-10)**, Granada (Spain, v. 1, n. 8, p. 1392-1397, April 2010

APÊNDICE A – SCRIPT MODELAGEM DA GRV 8X6

```

function [sys,x0] = Simulink_naolinear(t,x,u,flag,Ra,D,J)

if abs(flag) == 1,

%-----%
%                MATRIZ A
%-----%

    A = zeros(6,6);
    A(1,1) = Ra;
    A(2,2) = Ra;
    A(3,3) = Ra;
    A(4,4) = Ra;
    A(5,5) = D;
    A(6,5) = -1

%-----%
%                MATRIZ B
%-----%

    B = zeros(6,6);
    B(5,5) = J
    B(6,6) = 1;

%-----%
%      Cálculo das variáveis na fase A
%-----%

    alpha = rem((x(6)*180/pi),60);
    [ indut , deriv ] = Findu( abs(x(1)), alpha);
    B(1,1) = indut;
    B(1,6) = x(1)*deriv/(pi/180);
    A(5,1) = 0.5*x(1)*deriv/(pi/180);

%-----%
%      Cálculo das variáveis na fase B
%-----%

    alpha = rem(((x(6)*180/pi)+135),60);
    [ indut , deriv ] = Findu( abs(x(2)), alpha);
    B(2,2) = indut;
    B(2,6) = x(2)*deriv/(pi/180);
    A(5,2) = 0.5*x(2)*deriv/(pi/180);

%-----%

```

```

%          Cálculo das variáveis na fase C
%-----%

alpha = rem(((x(6)*180/pi)+ 90),60);
[ indut , deriv ] = Findu( abs(x(3)), alpha);
B(3,3) = indut;
B(3,6) = x(3)*deriv/(pi/180);
A(5,3) = 0.5*x(3)*deriv/(pi/180);

%-----%
%          Cálculo das variáveis na fase D
%-----%

alpha = rem(((x(6)*180/pi)+45),60);
[ indut , deriv ] = Findu( abs(x(4)), alpha);
B(4,4) = indut;
B(4,6) = x(4)*deriv/(pi/180);
A(5,4) = 0.5*x(4)*deriv/(pi/180);

sys = zeros(6,1);    % a column vector
sys = inv(B)*u-inv(B)*A*x;

elseif abs(flag) == 3,
    x(5)=125.664;

    sys = x;

elseif abs(flag) == 0,
    x0 = [0; 0; 0; 0; 125.664; 0];

    sys = [6 0 6 6 0 0]';

else
    sys = [];

end

```

APÊNDICE B – SCRIPT ACIONAMENTO DAS CHAVES GRV 8X6

```
%-----%
%           Fase A
%-----%
```

```
if (((alpha > 59.3)|| (alpha <=14.3)))
```

```
    u(1)=1;
    u(2)=1;
```

```
else
```

```
    u(1)=0;
    u(2)=0;
```

```
end
```

```
%-----%
%           Fase B
%-----%
```

```
if (alpha > 14.3) && (alpha <=29.3)
```

```
    u(7)=1;
    u(8)=1;
```

```
else
```

```
    u(7)=0;
    u(8)=0;
```

```
end
```

```
%-----%
%           Fase C
%-----%
```

```
if (alpha > 29.3) && (alpha <=44.3) %Fase C
```

```
    u(5)=1;
    u(6)=1;
```

```
else
```

```
    u(5)=0;
    u(6)=0;
```

```
end
```

```
%-----%  
%           Fase D  
%-----%  
  
if (alpha > 44.3) && (alpha <=59.3) %Fase D  
    u(3)=1;  
    u(4)=1;  
  
else  
    u(3)=0;  
    u(4)=0;  
  
end
```

ANEXO A – SCRIPT LUA

A programação LUA é composta por uma série de comandos que devem obedecer às regras de pré-processamento e pós-processamento. Portanto, o LUA possui comandos denominados comuns, comandos de pré-processamento e comandos de pós-processamento.

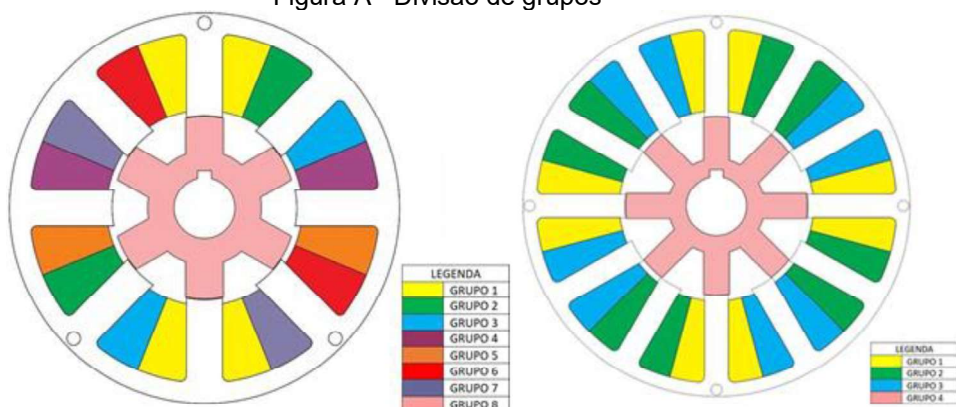
Os comandos de pré-processamento são utilizados para realizar ações antes de executar a operação de análise, isto é, antes de simular o problema e obter os resultados. Para inserir um comando de pré-processamento é necessário inserir o prefixo **mi_** antes do comando.

Já os comandos de pós-processamento são utilizados para realizar ações após a execução da operação de análise, ou seja, são utilizados para manipular os resultados obtidos. A inserção dos comandos de pós-processamento exige a inserção do prefixo **mo_** antes do comando.

Os comandos comuns do LUA são aqueles comandos existentes que não estão associados a um problema particular, ou seja, operações intrínsecas da programação como limpar tela, exibir resultados na tela e outras.

Para a realização da programação é necessário antes, dividir a geometria da máquina em grupos. A Figura 1, representa a divisão de grupo para a programação descrita a seguir, que foi utilizada para a obtenção dos valores de indutância da máquina a relutância variável 8x6 e da máquina a relutância variável 12x8.

Figura A - Divisão de grupos



Para a separação em grupo, conforme a Figura 1, é necessário selecionar todos os elementos (reta, nó, arco) 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.

Segue abaixo a lista das funções utilizadas para a realização da programação deste trabalho:

- `openfile("caminho do arquivo")`: abre um documento especificando o seu caminho dentro dos arquivos do computador;
- `closefile("arquivo")`: fecha um arquivo que foi aberto no script;
- `print()`: mostra alguma variável ou resultado na tela;
- `mi_seteditmode("modo")`: configura o modo de edição atual desejado, podendo ser classificado como "nodes", "segments", "arcsegments", "blocks" ou "groups";
- `mi_modifycircprop("nomedocircuito", "númerodapropriedade", valor)`: permite modificação nos parâmetros de um circuito. Os números das propriedades são classificados da seguinte maneira: 0 para nome do circuito, 1 para valor da corrente elétrica e 2 para forma de ligação das bobinas;
- `mi_selectgroup(group)`: seleciona algum grupo;
- `mi_moverotate("basex", "basey", ânguloderotação)`: permite girar o desenho no valor de graus definido pelo parâmetro de ângulo de rotação em relação a uma base de coordenadas x e y definidas. Uma observação importante é a rotação do desenho no sentido anti-horário para um valor de ângulo de rotação positivo e vice-versa;
- `mi_analyze()`: ação completa para resolver o problema;
- `mi_loadsolution()`: carrega as soluções obtidas do modo de análise;
- `mo_showdensityplot(legend, tipoescala, maiorescala, menorescala, tipo)`: mostra a escala de densidade de fluxo magnético. O valor 0 na opção legenda esconde a legenda e 1 mostra a legenda. Valor 0 no tipo de escala mostra escala de cores e 1 mostra escala cinza. Os parâmetros maior escala e menor escala selecionam os limites da escala a ser seguida. O parâmetro tipo pode ser classificado entre real, imaginário e magnitude sendo: para densidades de fluxo B "bmag", "breal"

e “bimag”; para intensidade de campo magnético H “hmag”, “hreal” e “himag”; para densidade de corrente elétrica J “jmag”, “jreal” e “jimag”;

- `mo_savebitmap(“caminho”)`: permite salvar as imagens geradas pela simulação em formato bitmap;
- `mo_groupselectblock(group)`: seleciona um grupo da geometria para manipulação de resultados;
- `mo_clearblock(group)`: libera um grupo da geometria ao final da manipulação de resultados;
- `mo_blockintegral(tipo)`: calcula a integral dos blocos selecionado de acordo com o tipo da integral. Para o cálculo da integral das indutâncias próprias foi utilizado o tipo 0 e, para as indutâncias mútuas foi utilizado o tipo 1

O cálculo da indutância própria é realizado pela equação (ap.1). Onde A é o fluxo magnético, J é a densidade de corrente elétrica e i é a corrente elétrica na bobina

$$L_{própria} = \frac{\int A \cdot J dV}{i^2} \quad (1)$$

--SIMULAÇÃO DA MRV 8X6

--Criação de algumas variáveis e chamada de funções

k=0 --variável de contagem

name="C:\\ Local onde serão salvas as imagens \\image.bmp"

ext=".bmp"

outfile=openfile("C:\\ Local onde será salvo o arquivo de texto\\"Nome do arquivo de texto que receberá os dados de indutância mútua" txt","w")

outfile2=openfile("C:\\ Local onde será salvo o arquivo de texto\\"Nome do arquivo de texto que receberá os dados de indutância própria".txt","w")

--Escolha do modo edição em grupos

mi_seteditmode("group")

--Loop de variação de corrente

for i=1,45 do

--Modifica o valor de corrente no Circuito 1

mi_modifycircprop("Circuito 1",1,i)

```

--Loop de variação da posição do rotor
for n=0,60 do
k=k+1

--Etapa de processamento da solução
mi_analyze()
mi_loadsolution()

--Etapa de plotagem de gráficos
mo_showdensityplot(1,0,5,0,"bmag")
mo_savebitmap(name..k..ext)

--Etapa de cálculo das indutâncias

--Cálculo da Indutância Própria
mo_groupselectblock(1)
L=mo_blockintegral(0)/i^2
print(n," ",L*1000)
write(outfile,i," ",n," ",L*1000,"\n")
mo_clearblock(1)

--Cálculo da indutancia mutua na bobina 2
mo_groupselectblock(2)
Ansb=mo_blockintegral(1)
mo_clearblock(2)
mo_groupselectblock(3)
Apsb=mo_blockintegral(1)
mo_clearblock(3)
Lmps = (100/(i*0.0003495183))*(Apsb-Ansb)
print(n,Lmps)

--Cálculo da indutancia mutua na bobina 3
mo_groupselectblock(4)
Antb=mo_blockintegral(1)
mo_clearblock(4)
mo_groupselectblock(5)
Aptb=mo_blockintegral(1)
mo_clearblock(5)
Lmpt = (100/(i*0.0003495183))*(Aptb-Antb)
print(n,Lmpt)

--Cálculo da indutancia mutua na bobina 4
mo_groupselectblock(6)
Anqb=mo_blockintegral(1)
mo_clearblock(6)
mo_groupselectblock(7)

```

```

Apqb=mo_blockintegral(1)
mo_clearblock(7)
Lmpq = (100/(i*0.0003495183))*(Apqb-Anqb)
print(n,Lmpq)

--Salvar os dados no arquivo txt e fechar o pós-processamento
write(outfile2,i," ",n," ",Lmps*1000," ",Lmpt*1000," ",Lmpq*1000,"\\n")
mo_close()

--Rotaciona o rotor em 1 grau
mi_selectgroup(8)
mi_moverotate(139.72157,46.461962,-1)
end

--Retorna o rotor para posição inicial
mi_selectgroup(8)
mi_moverotate(139.72157,46.461962,61)
end

--Fecha funções e arquivos abertos no início da simulação
closefile(outfile)
closefile(outfile2)

--Simulação da MRV 12X8 com três circuitos
--Criação de algumas variáveis e chamada de funções
k=0 --variável de contagem
name="C:\\ Local onde serão salvas as imagens \\Image.bmp"
ext=".bmp"
outfile=openfile("C:\\ Local onde será salvo o arquivo de texto\\"Nome do arquivo de
texto que receberá os dados de indutância mútua" .txt","w")
outfile2=openfile("C:\\ Local onde será salvo o arquivo de texto\\"Nome do arquivo de texto
que receberá os dados de indutância própria".txt","w")

--Escolhe edição de grupos
mi_seteditmode("group")

--Loop de variação de corrente
for i=1,45 do

--Modifica o valor da corrente do circuito 1
mi_modifycircprop("Circuit 1",1,i)

--Loop de variação da posição do rotor
for n=0,45 do
k=k+1

```

```

--Etapa de processamento da solução
mi_analyze()
mi_loadsolution()

--Etapa de plotagem dos gráficos
mo_showdensityplot(1,0,5,0,"bmag")
mo_savebitmap(name..k..ext)

--Etapa de cálculo das indutâncias
mo_groupselectblock(1)
L=mo_blockintegral(0)/i^2
c,V,FI=mo_getcircuitproperties("Circuito 1")
print(n," ",L*1000)
write(outfile,i," ",n," ",L*1000,"\n")
mo_clearblock(1)

--calcula da indutancia mutua na bobina 2
mo_groupselectblock(2)
Ansb=mo_blockintegral(1)
print(n,Ansb) -- negativo da bobina 2 e 5
mo_clearblock(2)
mo_groupselectblock(3)
Apsb=mo_blockintegral(1)
print(n,Apsb)-- positivo da bobina 2
mo_clearblock(3)
Lmps = (100/(i*0.0009324634684))*(Apsb-Ansb)
print(n,Lmps)

--calcula da indutancia mutua na bobina 3
mo_groupselectblock(4)
Antb=mo_blockintegral(1)
print(n,Antb) -- negativo da bobina 3
mo_clearblock(4)
mo_groupselectblock(5)
Aptb=mo_blockintegral(1)
print(n,Aptb) -- positivo da bobina 3
mo_clearblock(5)
Lmpt = (100/(i*0.0009324634684))*(Aptb-Antb)
print(n,Lmpt)

--Salvar os dados no arquivo .txt e fechar o pós-processamento
write(outfile2,i," ",n," ",Lmps*1000," ",Lmpt*1000,"\n")
mo_close()

--Rotaciona o rotor em 1 grau
mi_selectgroup(6)

```

```
mi_moverotate(196.62284,213.73495,-1)  
end
```

```
--Retorna o rotor para posição inicial  
mi_selectgroup(6)  
mi_moverotate(196.62284,213.73495,46)  
end
```

```
--Fecha funções e arquivos abertos no início da simulação  
closefile(outfile)  
closefile(outfile2)
```