

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

DANIELLE BERNARDES DE SOUZA

**USO DO FEMM PARA SIMULAÇÃO DAS CURVAS DE INDUTÂNCIA DE UMA
MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL APLICADA A UM CARRO HÍBRIDO**

GOIÂNIA
2022



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

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: Danielle Bernardes de Souza

Matrícula: 20182011060050

Título do Trabalho: USO DO FEMM PARA SIMULAÇÃO DAS CURVAS DE INDUTÂNCIA DE UMA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL APLICADA A UM CARRO HÍBRIDO

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, 31 / 03 / 2022.

Danielle Bernardes de Souza

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

DANIELLE BERNARDES DE SOUZA

**USO DO FEMM PARA SIMULAÇÃO DAS CURVAS DE INDUTÂNCIA DE UMA
MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL APLICADA A UM CARRO HÍBRIDO**

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,
Campus Goiânia.

Orientador: Prof. Dr. Renato Jayme Dias

GOIÂNIA

2022

So895u Souza, Danielle Bernardes de.
Uso do FEMM para simulação das curvas de indutância de uma máquina a relutância variável aplicada a um carro híbrido / Danielle Bernardes de Souza. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2022.
67 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Renato Jayme Dias.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Departamento das Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.
Inclui anexos.

1. Máquina a relutância variável. 2. Carro híbrido. 3. Método dos elementos finitos. I. Dias, Renato Jayme (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. III. Título.

CDD 620

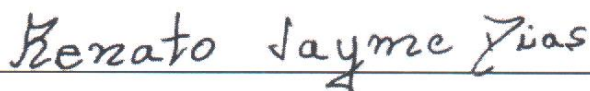
Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva CRB1/ 2.740
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

DANIELLE BERNARDES DE SOUZA

**USO DO FEMM PARA SIMULAÇÃO DAS CURVAS DE INDUTÂNCIA DE UMA
MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL APLICADA A UM CARRO HÍBRIDO**

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,
Campus Goiânia.

Aprovado em 08 de fevereiro de 2022



Prof.: Dr. Renato Jayme Dias (Orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.



Prof.: Me. Charles dos Santos Costa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.



Prof.: Me. Camille Reátegui Silva

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

GOIÂNIA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me proporcionar saúde, oportunidades e condições para concluir o curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

Ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Renato Jayme, pelas orientações, paciência, disposição e dedicação.

Aos meus colegas de instituição Gustavo Vergara, José Maurício e Lucas Gabriel por toda a parceria e colaboração durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha família pela compreensão e apoio prestados em todas as etapas de desenvolvimento do curso e, principalmente, durante a elaboração deste trabalho.

RESUMO

Devido às preocupações ambientais relacionadas à emissão de gases poluentes na atmosfera e do uso de combustíveis fósseis, os carros elétricos ganharam destaque na indústria automotiva, pois são uma alternativa para reduzir este impacto ambiental. O objetivo deste trabalho é apresentar os perfis de indutância do motor a relutância variável 8x6 aplicado a um carro híbrido. São expostas neste trabalho as vantagens do uso de motores elétricos em detrimento dos motores a combustão. Além de apresentar as características construtivas, foi feita uma breve análise matemática dos parâmetros eletromagnéticos e da produção de torque da máquina. Com base no método dos elementos finitos, foram simulados no software *FEMM*, os perfis de indutância de duas configurações de motores para diversos valores de corrente e posicionamento do rotor. Após a obtenção dos resultados da simulação, foi feita a análise dos perfis de indutância obtidos.

Palavras-chave: Máquina a relutância variável (8x6), carro híbrido, indutância, método dos elementos finitos, *FEMM*.

ABSTRACT

Due to environmental concerns related to the emission of gases in the atmosphere and the use of fossil fuels, electric cars have gained prominence in the automotive industry, as they are an alternative to reduce this environmental impact. The objective of this work is to present the inductance profiles of the 8x6 variable reluctance motor applied to a hybrid car. The advantages of using electric motors over combustion engines are exposed in this work. In addition to presenting the constructive characteristics, a brief mathematical analysis of the electromagnetic parameters and the torque production of the machine was made. Based on the finite element method, the operation of two motor configurations for different values of current and rotor positioning was simulated in the FEMM software. After obtaining the simulation results, the inductance profiles obtained were analyzed.

Keywords: Variable reluctance machine (8x6), hybrid car, inductance, finite element method, FEMM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Veículo puramente elétrico.....	18
Figura 2.2 – Veículos híbridos. a) Série b) Paralelo c) Série-Paralelo.	19
Figura 3.1 – MRV 8X6.....	21
Figura 3.2 – Relação de Potência x Torque x Rotação do motor Fiat Uno 2009.	22
Figura 3.3 – Enrolamento da Fase A.....	22
Figura 3.4 – Indutância da MRV em relação ao ângulo do rotor.	25
Figura 4.1 – Exemplo de elementos finitos.....	28
Figura 4.2 – Discretização da MRV utilizando triângulos.	28
Figura 5.1 – Shell interativo do FEMM.	31
Figura 6.1 – Lâmina do motor de 4,27 cv. Dimensões em milímetros.....	32
Figura 6.2 – Lâmina do motor de 8,54 cv. Dimensões em milímetros.....	33
Figura 6.3 – Ícone “New”.....	34
Figura 6.4 – Criação de um novo problema.	34
Figura 6.5 – Definição de Problema.	35
Figura 6.6 – Importando a lâmina para o Femm.	36
Figura 6.7 – Tolerância.	37
Figura 6.8 – Menu de manipulação da visualização.....	37
Figura 6.9 – Lâminas importadas.	37
Figura 6.10 – Biblioteca de materiais.	38
Figura 6.11 – Edição das propriedades dos materiais.	40
Figura 6.12 – Importando novos materiais para a biblioteca.....	40
Figura 6.13 – Definição dos circuitos.	41
Figura 6.14 – Definição dos valores das correntes.	41
Figura 6.15 – Definição do contorno.	42
Figura 6.16 – Modos de Desenho.	43
Figura 6.17 – Definição do contorno do problema (destacado em vermelho).	43
Figura 6.18 – Número de voltas positivo.	44
Figura 6.19 – Número de voltas negativo.....	44
Figura 6.20 – Geometria da MRV completamente definida.....	45
Figura 6.21 – Execução do gerador de malha.....	45
Figura 6.22 – Malha de elementos finitos.....	46
Figura 6.23 – Execução da simulação.	46
Figura 6.24 – Parâmetros eletromagnéticos das MRV.....	47
Figura 6.25 – Acessar parâmetros eletromagnéticos.	47
Figura 7.1 – Curvas de indutância x posição angular do rotor.	48
Figura 7.2 – Fluxo magnético na posição 0° para uma corrente de 5A.	49
Figura 7.4 – Fluxo magnético na posição 30° para uma corrente de 5A.	49
Figura 7.5 – Densidade de fluxo para uma corrente de 1 A.	50
Figura 7.6 – Densidade de fluxo para uma corrente de 5A.	50
Figura 7.7 – Densidade de fluxo para uma corrente de 45 A.	51
Figura 7.8 – Superfície de indutâncias próprias MRV de 4.27 cv.....	51
Figura 7.9 – Superfície de indutâncias próprias MRV de 8.54 cv.....	52
Figura 7.10 – Superfície de indutância mútua na fase B, MRV de 4.27 cv.	52
Figura 7.11 – Superfície de indutância mútua na fase B, MRV de 8.54 cv.	53
Figura 7.12 – Inclinação do caminho das linhas de fluxo, rotor à 50°.	53
Figura 7.13 – Superfície de indutância mútua na fase D, MRV de 4.27 cv.	54
Figura 7.14 – Superfície de indutância mútua na fase D, MRV de 8.54 cv.	54
Figura 7.15 – Inclinação do caminho das linhas de fluxo, rotor à -50° (ou 10°).....	55
Figura 7.16 – Superfície de indutância mútua na fase C, MRV de 4.27 cv.	55

Figura 7.17 – Superfície de indutância mútua na fase C, MRV de 8.54 cv.56

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

DY	Disprósio
EV	<i>Electric Vehicle</i>
FCEM	Força Contra Eletromotriz
FEMM	<i>Finite Elements Methods Magnetis</i>
GEE	Gases do Efeito Estufa
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MRV	Máquina a relutância variável

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Fluxo concatenado
i	Corrente
L	Indutância
v	Tensão
θ	Posição angular
ω	Velocidade angular
D	Coeficiente de atrito viscoso
J	Momento de inércia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL E APRESENTAÇÃO	12
1.1 INTRODUÇÃO.....	12
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
1.3 OBJETIVO DO TRABALHO	14
1.3.1 Objetivo principal.....	14
1.3.2 Objetivos específicos	14
1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	15
2 APLICAÇÃO AUTOMOTIVA DA MRV	16
2.1 INTRODUÇÃO.....	16
2.2 MOTOR A COMBUSTÃO x MOTOR ELÉTRICO	16
2.3 VANTAGENS DO USO DA MRV.....	16
2.4 TIPOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	18
2.5 CONCLUSÃO	19
3 ESTRUTURA E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	21
3.1 INTRODUÇÃO.....	21
3.2 ESTRUTURA.....	21
3.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	23
3.4 ANÁLISE ELETROMAGNÉTICA E PRODUÇÃO DE TORQUE.....	23
3.5 CONCLUSÃO	26
4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	27
4.1 INTRODUÇÃO.....	27
4.2 O MÉTODO E SUAS ETAPAS	27
4.3 VANTAGENS.....	29
4.4 CONCLUSÃO	29
5 O SOFTWARE FEMM.....	30
5.1 INRTODUÇÃO.....	30
5.2 PRÉ-PROCESSAMENTO	30

5.3 PROCESSAMENTO	31
5.4 PÓS-PROCESSAMENTO	31
5.5 CONCLUSÃO	31
6 EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO	32
6.1 INTRODUÇÃO.....	32
6.2 LÂMINAS UTILIZADAS	32
6.3 PRÉ-PROCESSAMENTO	33
6.3.1 Configurações iniciais	34
6.3.2 Importação da lâmina.....	36
6.3.3 Definição das propriedades dos materiais	38
6.3.4 Definição das propriedades dos circuitos.....	40
6.3.5 Definição do contorno	42
6.3.6 Atribuição das propriedades.....	43
6.4 PROCESSAMENTO	46
6.5 PÓS-PROCESSAMENTO	46
6.6 CONCLUSÃO	47
7 RESULTADOS E ANÁLISES DA SIMULAÇÃO	48
7.1 INTRODUÇÃO.....	48
7.2 INDUTÂNCIA PRÓPRIA.....	48
7.3 INDUTÂNCIA MÚTUA	52
7.4 CONCLUSÃO	56
8 CONCLUSÕES	57
8.1 CONCLUSÕES FINAIS	57
8.2 PROPOSTAS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
9 REFERÊNCIAS.....	59
ANEXOS	63

1 INTRODUÇÃO GERAL E APRESENTAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Devido às recentes preocupações com os impactos ambientais, assim como o desenvolvimento de novas tecnologias que viabilizam a produção de carros elétricos no Brasil e no mundo, o setor automobilístico tem sofrido algumas mudanças nos últimos anos. Tais mudanças se referem principalmente à inserção de motores elétricos em substituição dos motores a combustão [1] [2] [3], uma alternativa para redução do consumo de combustíveis fósseis, que se configuram como uma fonte suja e não-renovável de energia [4].

O setor de transportes é uma das principais fontes de emissão de CO_2 na atmosfera, representando cerca de 20% das emissões globais [5], um agravante que, aliado ao alto consumo de combustíveis fósseis, preocupam e impulsionam o desenvolvimento de tecnologia mais limpa como a do motor elétrico, que reduz os impactos ambientais em escala local e global.

Nesta conjuntura, os veículos elétricos vêm apresentando um crescente interesse, por não apresentarem emissão de gases do efeito estufa, além de apresentar maior eficiência em relação aos motores a combustão [6].

Para a produção de veículos elétricos, é necessária a utilização de motores elétricos. Neste enquadramento, a indústria automobilística se beneficiou com o advento das novas tecnologias referentes ao armazenamento de energia elétrica, assim como as inovações no setor da eletrônica de potência, microprocessamento e sensoramento, e é neste cenário que os motores elétricos a relutância variável (MRV) se apresentam como uma alternativa para aplicação nos veículos automotivos, tanto do ponto de vista ambiental quanto do tecnológico e energético [1] [7].

As MRV possuem um baixo custo de fabricação e sua construção é mais simples em relação aos demais motores elétricos, uma vez que não utilizam ímãs permanentes ou bobinas no rotor; possuem tolerância à falta de fases em motores polifásicos, apresentam baixas perdas ôhmicas no rotor, uma vez que não há enrolamentos feitos de cobre, além de possuírem um desempenho satisfatório em velocidades variáveis, fazendo com que sejam competitivas com outras tecnologias

de motores [7] [8].

Nos projetos de construção das MRV são feitos estudos prévios para análise dos resultados. Para isto, são utilizados modelos matemáticos que descrevem as máquinas. O modelo matemático utilizado para a maioria das máquinas elétricas é o método dos elementos finitos [9], que consiste em discretizar um meio contínuo em elementos descritos por equações diferenciais, que serão solucionadas numericamente [10].

Posto isso, pode-se concluir que o desenvolvimento dos projetos das MRV é de suma importância no contexto atual, projetos nos quais a aquisição dos perfis de indutância se configura numa etapa crucial. De posse dos perfis e suas derivadas, é possível fornecer os valores de entradas necessários para resolver o modelo matemático nas simulações computacionais [11]. Desta forma, o objetivo do presente trabalho é a simulação e disponibilização das curvas de indutância da MRV, utilizando o método dos elementos finitos, através do software gratuito *FEMM*, versão 4.2.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As preocupações ambientais envolvendo o aquecimento global, consumo de combustíveis fósseis e segurança energética dos países, são temas discutidos em escala global, conforme visto em [3][5][6][12][13]. Através do referencial mencionado, podemos constatar a forte contribuição do ramo automotivo para o agravamento da poluição ambiental, aumentando as preocupações das autoridades e pesquisadores para criação de alternativas de energia limpa, no setor.

Conforme citado anteriormente, os veículos elétricos vêm apresentando destaque por não emitirem, ou emitirem uma quantidade reduzida, de gases do efeito estufa, além de apresentar maior eficiência em relação aos motores a combustão [6].

Dentre os tipos de motores elétricos mais utilizados nos estudos de aplicação automotiva, se encontram as MRV, conforme abordado nos estudos comparativos entre os tipos de motores elétricos [14][15][16], devido às suas vantagens já mencionadas.

Sua característica marcante é uma estrutura simples em relação aos outros motores elétricos, combinando a simplicidade dos enrolamentos de campo dos

motores de corrente contínua, robustez, além da vantagem de não utilizar ímãs permanentes ou escovas, alta eficiência, densidades de potência e torque satisfatórias, algoritmo de controle simples e tolerância a falhas [16] [17] [18] [19].

As etapas do projeto de uma MRV, são apresentadas detalhadamente em [11], desde o dimensionamento físico, modelagem matemática, levantamento dos perfis de indutância, simulação computacional e desenvolvimento de protótipo, que apesar de ser acionada como gerador, foi muito útil para o desenvolvimento deste trabalho. Em [8], é apresentado uma simulação computacional do acionamento da MRV, operando como motor.

Já em [20] [21] [22], além de discorrerem sobre as etapas do projeto, utilizam o método dos elementos finitos para traçarem os perfis de indutância. Ainda em [21], uma solução de acionamento de uma MRV aplicada em veículos elétricos é apresentada detalhadamente, além de aplicarem cinco métodos de acionamento.

Por fim, podemos observar que, em relação aos aspectos construtivos, de modo geral, as MRV dispõem de um abrangente referencial teórico, destacando as dificuldades em relação à situação tecnológica que outrora fora dependente, mas que os estudos e pesquisas científicas relacionados à aplicação das MRV nos veículos elétricos são recentes. Desta forma, o presente trabalho trará uma contribuição para a literatura, pois aborda a aplicação da MRV como uma alternativa valiosa no contexto atual de preocupação com o meio ambiente, além de apresentar um passo a passo detalhado para a aquisição dos perfis de indutância – uma etapa importante para o projeto da máquina.

1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

1.3.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é levantar os perfis de indutância de uma máquina a relutância variável aplicada a um automóvel híbrido, para diversos valores de corrente e posição do rotor.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Discorrer sobre as vantagens da aplicação da MRV em um veículo híbrido;
- Aplicar o software *FEMM* no projeto de uma MRV;

- Adquirir as curvas de indutância própria da MRV utilizando o método de elementos finitos;
- Adquirir as curvas de indutância mútua da MRV utilizando o método de elementos finitos;

1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi organizado em 8 capítulos conforme descrito a seguir.

O capítulo 2 mostra a aplicação da máquina a relutância variável em carros elétricos e híbridos, ressaltando seus benefícios diante do uso do motor a combustão.

O capítulo 3 contém uma revisão dos princípios de funcionamento da MRV, considerando o equacionamento matemático básico do comportamento eletromagnético e mecânico da máquina.

O capítulo 4 explica o método dos elementos finitos, escolhido para análise do comportamento das indutâncias na MRV.

O capítulo 5 apresenta a ferramenta computacional considerada para aplicação do método dos elementos finitos: o software *FEMM*, evidenciando suas principais partes, funcionalidades e suas vantagens.

O capítulo 6 explica o passo a passo do uso do software *FEMM* para obtenção dos perfis de indutância, própria e mútua, detalhando cada etapa.

No capítulo 7 é apresentado a análise dos resultados obtidos por meio das simulações e tratamento dos dados.

Por fim, o capítulo 8 expõe as conclusões perante os resultados obtidos, tendo como base os objetivos deste trabalho.

2 APLICAÇÃO AUTOMOTIVA DA MRV

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as vantagens da aplicação do motor elétrico sobre o motor a combustão no ramo automotivo, tendo em vista a problemática ambiental, bem como as vantagens do uso da MRV. Serão expostos, de forma breve, os tipos de carros elétricos existentes, e a justificativa da aplicação da MRV em carros híbridos.

2.2 MOTOR A COMBUSTÃO X MOTOR ELÉTRICO

Apesar da prevalência da aplicação do motor a combustão no setor automobilístico [1][23], ele apresenta algumas características que o torna menos atrativo, do ponto de vista ambiental e de conversão de energia, em relação ao motor elétrico.

Os motores a combustão têm um rendimento relativamente baixo na aplicação para carros, apresentando cerca de 21% de eficiência na conversão de energia, desde o motor até a transmissão às rodas, em detrimento dos 62% de eficiência nos carros com motores elétricos [6]. Essa diferença entre os dois tipos aplicação é explicada pelas perdas intrínsecas, em forma de energia térmica e mecânica, existentes no processo de combustão.

Além das perdas mencionadas, outro fator preocupante no uso dos motores à combustão, é a geração de gases nocivos decorrentes da combustão, que são expelidos pelo escapamento. Do ponto de vista global, o setor apresenta altos índices de emissão de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera [13], levando a indústria automobilística a investir em motores com fontes alternativas de energia, com um destaque para a utilização dos motores elétricos.

2.3 VANTAGENS DO USO DA MRV

Em geral, as principais características exigidas para um motor elétrico, aplicado a um carro seriam [17]:

- Alta eficiência;

- Alta densidade de potência e torque;
- Alta controlabilidade;
- Ampla faixa de operação e velocidade;
- Robustez;
- Bom custo benefício.

Nos estudos comparativos, apesar da popularidade dos motores de indução e dos motores síncronos de ímãs permanentes, nas últimas décadas, as MRV vêm apresentando maior interesse devido a elevação dos custos com os materiais magnéticos de terras raras utilizados nos ímãs. Dentre esses materiais, os mais utilizados são o neodímio-ferro-boro (NdFeB) e o Disprósio (Dy) [19], cuja produção está sob o domínio Chinês, cerca de 97% [24], que vêm impondo restrições às importações dos materiais, dificultando a construção de motores com ímãs permanentes.

Além da não utilização de ímãs permanentes, as MRV dispõem de um rotor sem enrolamentos, diminuindo assim, a utilização de cobre e aço. Tal característica contribui para diminuição das perdas na máquina e propicia condições para aplicações em altas velocidades [7].

Juntamente com o baixo custo de construção, as MRV também apresentam outras características como: estrutura robusta, topologia de conversor desenvolvida, alta eficiência, densidades de potência e torque satisfatórias e tolerância a falhas [17][18][19].

Tais características são vantajosas para a aplicação automotiva. A estrutura robusta do motor e a densidade de torque satisfatória, propiciam uma boa relação peso/potência do veículo; a alta eficiência, que já é uma característica das máquinas elétricas em geral, está relacionada, também, com as baixas perdas no processo de conversão de energia, que nas MRV são ainda mais reduzidas devido aos seus aspectos construtivos.

Em contrapartida, o acionamento da MRV depende do conhecimento da posição exata do rotor relacionada a pulsos de corrente para produzir conjugado, o que exige um sistema de controle relativamente complexo do motor. Entretanto, o avanço tecnológico na área da eletrônica de potência, diminuiu os custos dos circuitos eletrônicos dos controladores [7][25], facilitando o aumento da competitividade da MRV. Outra alternativa, é a adoção de softwares adicionais que

possam ser incorporados ao controlador visando o aumento da controlabilidade do motor [25].

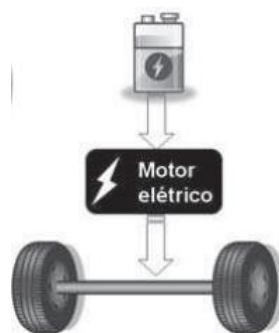
Outro desafio para a aplicação automotiva são as ondulações de torque típicas da MRV, pois causam ruídos acústicos indesejados [19][26]. Estudos têm sido feitos com o intuito de minimizar as ondulações de torque da máquina, envolvendo estratégias de encapsulamento da máquina com material de absorção acústica, adoção de controladores baseados em redes neurais, lógica *fuzzy*, entre outras técnicas apresentadas em [26], que apresentaram entre 3% e 10% de minimização.

2.4 TIPOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

De forma simples, os veículos elétricos são classificados em dois tipos: veículos puramente elétricos, EV, do inglês *Electric Vehicle*, e veículo híbrido elétrico, HEV, do inglês *Hybrid Electric Vehicle*. [14].

Veículos puramente elétricos são movidos por um motor elétrico apenas, não há a presença de motor a combustão. São constituídos do motor, das baterias, conversores, e o sistema de transmissão. As baterias armazenam a energia utilizada durante o funcionamento do carro [1], ver figura 2.1.

Figura 2.1 – Veículo puramente elétrico.

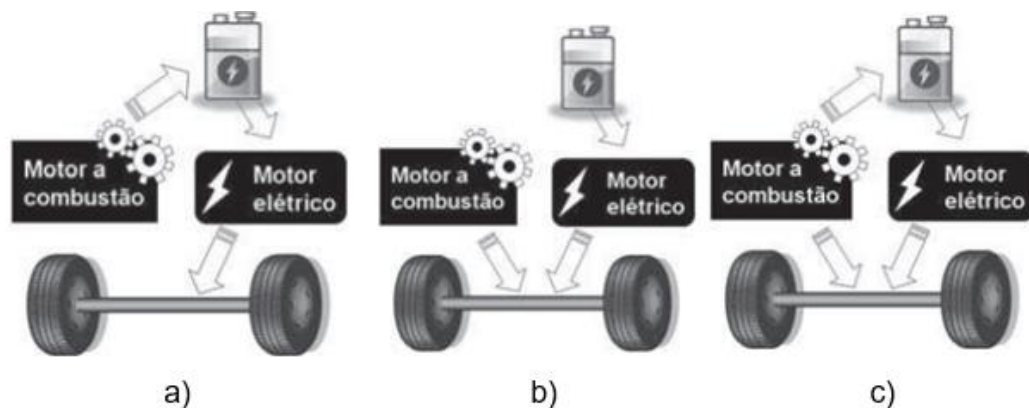


Fonte: [1].

Já os veículos híbridos, combinam a atuação de um motor a combustão com um motor elétrico. Estes, por sua vez, são subdivididos em 3 tipos, relacionados às suas configurações:

- Série: configuração em que o veículo é totalmente movido pelo motor elétrico. O motor de combustão aciona um motor elétrico gerador (alternador), que então fornece energia elétrica para o motor e a bateria [14]. Ver figura 2.2a).
- Paralelo: nessa configuração o veículo é movido pelos dois tipos de motores, em viagens curtas, o motor elétrico pode alimentar o veículo, enquanto em viagens longas, o motor a combustão pode tracionar o veículo [14]. Ver figura 2.2b).
- Série-Paralelo: é a configuração do veículo em paralelo, porém, para este caso, um alternador (gerador) é acoplado ao motor a combustão que carrega a bateria. Durante a operação normal, o motor a combustão move o carro e alimenta o gerador, que por sua vez alimenta a bateria através da unidade de controle eletrônico. Durante a aceleração, o motor elétrico recebe energia da bateria e auxilia o motor combustão [14]. Ver figura 2.2c).

Figura 2.2 – Veículos híbridos. a) Série b) Paralelo c) Série-Paralelo.



Fonte: [1].

Os HEV apresentam maior autonomia, justamente pela utilização de um motor a combustão para contribuir na tração do veículo, além do peso relativamente menor, por não possuir o mesmo conjunto de baterias que o EV possui [1].

2.5 CONCLUSÃO

Em síntese, o capítulo discorreu sobre as problemáticas ambientais do uso do motor a combustão, apresentando as vantagens dos motores elétricos nas aplicações automotivas, bem como as vantagens e desafios do uso da MRV no

setor. Foram apresentados também, os tipos de veículos elétricos classificados hoje. Desta forma, será considerado a aplicação da MRV em um veículo híbrido, com base em suas vantagens sobre os puramente elétricos. Adiante, serão mostrados os princípios de funcionamento da máquina.

3 ESTRUTURA E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

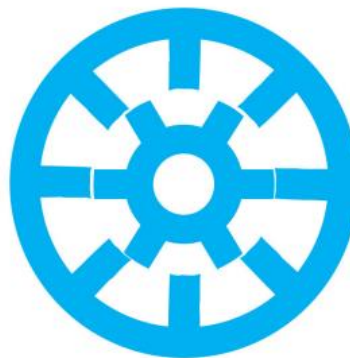
3.1 INTRODUÇÃO

Conforme exposto no capítulo 2, a MRV apresenta diversas vantagens para a aplicação automotiva. Desta forma, neste capítulo, será apresentada a estruturação da máquina, assim como uma breve análise teórica e matemática dos princípios básicos de funcionamento.

3.2 ESTRUTURA

A MRV considerada neste trabalho é uma máquina polifásica com estrutura laminada, de dupla saliência, apresentando 8 polos no estator e 6 polos no rotor (MRV 8x6), conforme a figura 3.1 [7][27], cuja topologia e dimensões se basearam em [28].

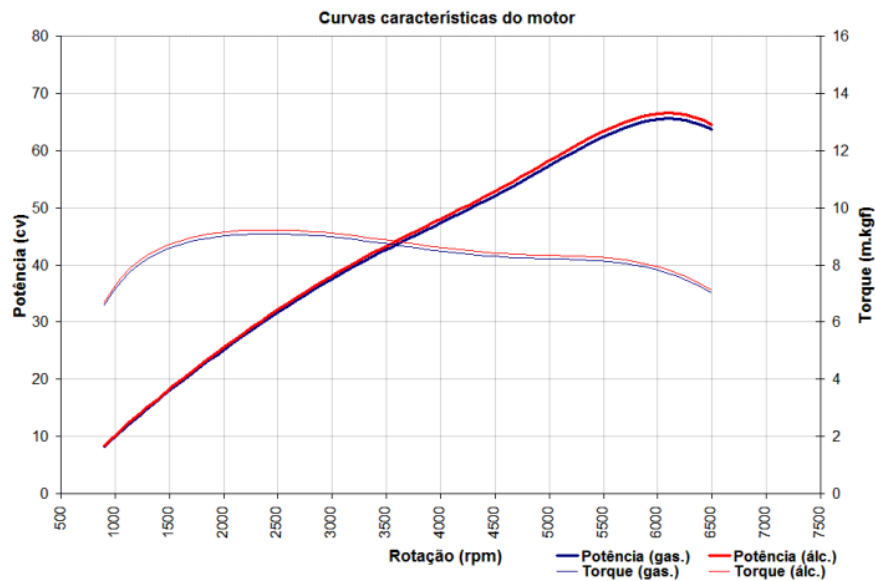
Figura 3.1 – MRV 8X6.



Fonte: [27].

Conforme mostrado em [28], para o dimensionamento físico da lâmina da MRV, foi considerada a aplicação híbrida em um veículo Fiat Uno 2009, com motor de 69 cv 1.0 4 cilindros, cujo gráfico do comportamento do torque, potência e velocidade está mostrado na figura 3.2.

Figura 3.2 – Relação de Potência x Torque x Rotação do motor Fiat Uno 2009.

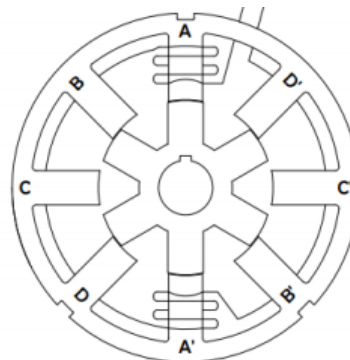


Fonte: [29].

Pode-se observar que o torque médio da máquina a combustão é de aproximadamente 8 kgf.m, que equivale a cerca de 80 N.m. Desta forma, foram consideradas 2 lâminas de MRV, com diferentes contribuições de torque para o veículo: a primeira dimensionada para um motor de 4.27 cv de potência com uma contribuição de 10 N.m de torque, e a segunda, dimensionada para um motor de 8,54 cv, com uma contribuição de 20 N.m no torque total da máquina. Considerou-se uma rotação de 3000 rpm.

Os enrolamentos das fases são compostos por pares de bobinas diametralmente opostas e conectadas em série [27][30], conforme a figura 3.3. Desta forma, a máquina 8x6 apresenta 4 fases.

Figura 3.3 – Enrolamento da Fase A.



Fonte: [27].

3.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Basicamente, o princípio de funcionamento da MRV consiste na tendência do rotor se alinhar com o estator na posição de mínima relutância e máxima indutância [20][30][31]. Desta forma, para que a MRV opere como motor, é necessário que os polos do rotor e estator não estejam completamente alinhados para que haja um torque inicial [7].

Após a energização de uma das fases, os polos energizados do estator atraem o par de polos mais próximos do rotor que busca a posição de maior indutância, que se dá quando os polos do rotor e estator estão completamente alinhados (posição de equilíbrio estável [20]. Portanto, é o chaveamento das correntes das fases que provoca a produção de torque no motor.

Considerando a MRV 8x6, o passo polar do rotor é de 60° , desta forma, espera-se que a indutância seja máxima nas posições de 0° e 60° , e que apresente seus valores mínimos nas posições de 30° e 90° , para uma determinada fase energizada.

A indutância está diretamente associada aos valores da corrente e da posição do rotor. Portanto, é crucial que se saiba a posição instantânea do rotor em relação ao estator. Geralmente são utilizados sensores de posição acoplados ao eixo da máquina [7][27].

3.4 ANÁLISE ELETROMAGNÉTICA E PRODUÇÃO DE TORQUE

A modelagem matemática apresentada a seguir descreve o comportamento eletromagnético e mecânico em uma única fase da MRV 8x6, porém, pode ser generalizada para todas as topologias de MRV.

O objetivo da máquina operando como motor é a produção de um conjugado eletromagnético que provoque a rotação do rotor em uma direção. Desta forma, é necessário conhecer a equação que define o comportamento da produção de conjugado.

Inicialmente, desprezando os valores de indutância mútua, a tensão nos terminais da fase da máquina pode ser descrita pela queda de tensão na resistência da bobina e a tensão induzida devido a variação do fluxo concatenado no tempo:

$$v = R \cdot i + \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (3.1)$$

Em que, i é a corrente, R é a resistência da fase e λ é o fluxo concatenado da bobina da fase.

O fluxo λ é proporcional a corrente e a indutância:

$$\lambda = L \cdot i \quad (3.2)$$

Como vimos anteriormente, os valores de indutância estão diretamente relacionados à posição do rotor e da corrente aplicada, sendo $L(i, \theta)$. Resolvendo as equações (3.1) e (3.2), temos:

$$v = R \cdot i + L \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + i \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (3.3)$$

Como a velocidade angular (ω) é conceitualmente definida como a variação do espaço angular em relação ao tempo, podemos reescrever a equação 3.3 como:

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

O primeiro termo da equação 3.4 se refere à queda de tensão na resistência da fase, o segundo termo se refere à queda de natureza indutiva, já o terceiro se refere à uma força contra eletromotriz, $FCEM$, induzida.

A equação (3.4) descreve a entrada do sistema de conversão eletromecânica de energia. Para o estudo dos parâmetros da saída do sistema, consideramos o equilíbrio das equações elétricas e mecânicas. Desta forma, a energia elétrica gera um conjugado eletromagnético que será convertido em um conjugado mecânico, considerando a inércia do sistema e o atrito na estrutura:

$$T_{elm} = T_{mec} + D\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.5)$$

Onde D , é o coeficiente de atrito viscoso, e J é o momento de inércia do sistema.

O torque eletromagnético T_{elm} em [11] é dado por:

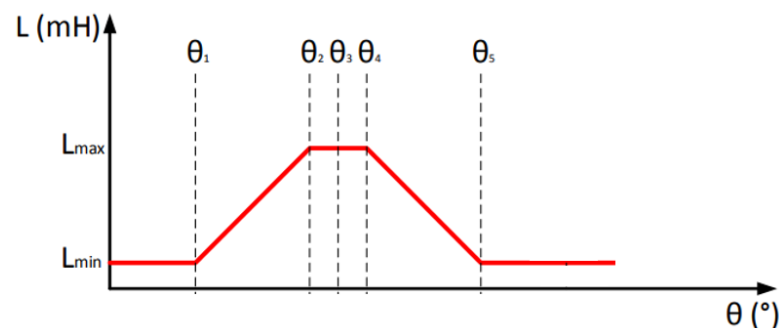
$$T_{elm} = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (3.6)$$

A equação 3.6 mostra que o sentido do torque é determinado pelo sinal do sentido de variação da indutância ($\frac{\partial L}{\partial \theta}$), mas não é influenciado pela corrente, cujo parâmetro se encontra elevado ao quadrado. Essa característica pode ser considerada uma vantagem, pois possibilita a aplicação de uma corrente fluindo em apenas um sentido, diminuindo assim a complexidade dos circuitos de controle [32].

Podemos inferir, também, que o torque é proporcional à derivada da indutância em relação à posição do rotor. Por consequência, se faz necessário energizar a fase no momento certo, para que haja a produção de torque desejado, essa condição exige o monitoramento constante do posicionamento do rotor através de sensores.

Na figura 3.4 podemos observar o comportamento da indutância numa MRV em relação ao posicionamento do rotor, desprezando os efeitos do espalhamento do fluxo e saturação dos materiais [30].

Figura 3.4 – Indutância da MRV em relação ao ângulo do rotor.



Fonte: [30].

- Entre 0 e θ_1 – posição de completo desalinhamento entre o polo do rotor e do estator. O valor da indutância é mínimo e não há contribuição para o torque do motor;
- Posição θ_1 – ponto inicial da sobreposição do polo do rotor com o estator. Como estamos considerando a máquina atuando como motor, é o ponto em que a fase é energizada;
- Entre θ_1 e θ_2 – posição em que se inicia a sobreposição dos polos do rotor e estator. A corrente aplicada provoca um torque positivo na máquina até que a sobreposição seja completa em θ_2 .
- Posição θ_2 – posição de completo alinhamento dos polos em que a fase deve ser desenergizada.
- Entre θ_2 e θ_4 – posição de completo alinhamento entre os polos do rotor e estator. O valor da indutância é máximo e constante, portanto, não há produção de torque, até que a outra fase seja energizada;

- Entre θ_4 e θ_5 – posição em que o rotor e estator se desalinham até atingirem a posição de equilíbrio instável, na qual estão completamente desalinhados. A indutância decresce e a relutância aumenta devido a geometria da máquina. Com a energização da fase nesta posição, será produzido um torque negativo, fazendo a MRV operar como gerador, porém, esta etapa não será abordada neste trabalho.

Na prática, os perfis de indutância não são descritos exatamente como mostrado na figura 3.4, devido à saturação magnética dos materiais que causam uma curvatura próxima aos pontos de alinhamento do rotor e estator, gerando um conjugado negativo [25]. No capítulo 6 deste trabalho, serão demonstrados os perfis de indutância, considerando tais efeitos.

3.5 CONCLUSÃO

Foi apresentado a estrutura da MRV, assim como seus princípios básicos de funcionamento, uma breve análise matemática e a produção do torque eletromagnético e mecânico. Esta análise descreveu o comportamento de uma MRV para uma única fase. Para facilitar a generalização do equacionamento desenvolvido para máquinas polifásicas, as equações serão tratadas como matrizes, para aplicação dos métodos numéricos – método dos elementos finitos – que serão vistos nos próximos capítulos.

4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

4.1 INTRODUÇÃO

A soluções analíticas das equações vistas no capítulo 3 são de difícil resolução para este problema, devido ao fato da MRV 8x6 apresentar uma geometria complexa. Nestes casos, são utilizados métodos numéricos, que fornecem soluções aproximadas.

O método de análise utilizado foi o Método dos Elementos Finitos (MEF), cuja abordagem é facilitada com a utilização de softwares para os cálculos iterativos.

Este capítulo discorre sobre o MEF, suas etapas de aplicação e suas vantagens de utilização.

4.2 O MÉTODO E SUAS ETAPAS

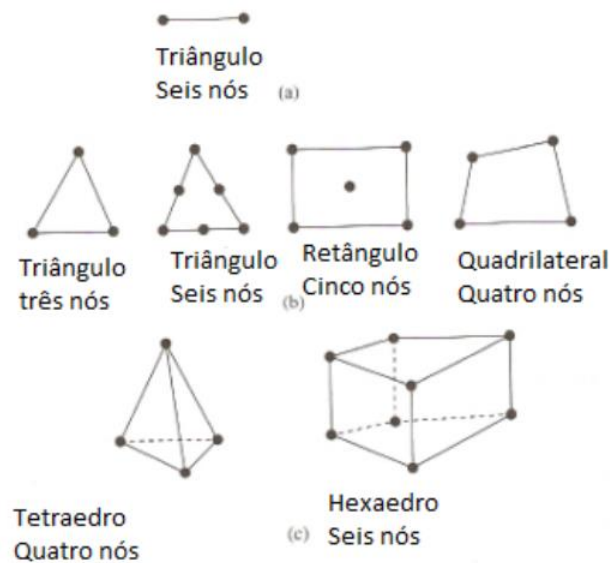
O método dos elementos finitos (MEF), é um método numérico, que consiste na discretização do domínio de um problema, subdividindo-o em pequenos elementos, sem impactos nas propriedades do problema original. Desta forma, o método reduz a resolução dos problemas de solução analítica complexa, em várias equações mais simples que serão resolvidas numericamente [33].

A análise dos elementos finitos envolve quatro partes principais [10][34].

- Discretização da região;
- Derivação das equações a um elemento – a partir da interpolação polinomial, obtém-se uma equação que corresponde a cada elemento;
- Condensação do sistema – ocorre a inclusão das equações nos elementos;
- Resolução do sistema de equações e extração da solução do sistema

A discretização envolve dividir a região de solução em subdomínios, chamado elementos. A determinação do tipo de elemento a ser utilizado depende da complexidade do problema analisado, assim como sua geometria. A Figura 3.1 mostra alguns elementos típicos.

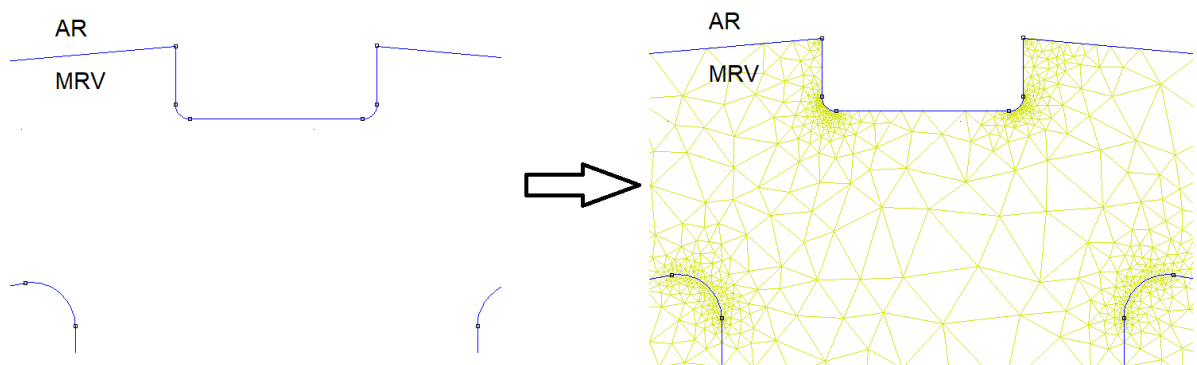
Figura 4.1 – Exemplo de elementos finitos.



Fonte: [10].

Para o levantamento das curvas de indutância da MRV, por se tratar de um modelo bidimensional, foi utilizado o triângulo de três nós, conforme indicado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Discretização da MRV utilizando triângulos.



Fonte: própria autora.

É importante ressaltar que a precisão do modelo depende do número de nós criados pelas conexões dos elementos finitos, quanto maior o número de nós, mais preciso se torna o modelo. Porém, caso a malha definida apresente um número muito grande de nós, a simulação computacional se torna mais lenta nas etapas de derivação, montagem e resolução das equações.

4.3 VANTAGENS

A generalidade do MEF é uma de suas principais vantagens, tornando sua aplicabilidade ampla, não se limitando a problemas magnéticos, como no caso da MRV, mas se mostrando eficaz na análise problemas mecânicos, termodinâmicos, estruturais, problemas na biomedicina, medicina, odontologia, etc [33][10]. O método apresenta também, a possibilidade de apresentar resultados satisfatórios, dependendo do nível de definição da malha. Outra grande vantagem é gama de softwares que utilizam o procedimento disponíveis: ALGOR, STARDYNE/FEMAP, ANSYS, ABAQUS, COSMOS, FEEM, entre outros.

Dentre os softwares citados, foi utilizado o *FEMM – Finite Element Method Magnetics* – por apresentar uma simples utilização e distribuição gratuita.

4.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo foi apresentado o método dos elementos finitos, expondo suas principais etapas de aplicação e suas vantagens, para posterior análise das indutâncias da MRV aplicada a um veículo híbrido. Foi definido a utilização do software de distribuição gratuita *FEMM* para análise das características das indutâncias da MRV, cujo funcionamento será exposto no próximo capítulo.

5 O SOFTWARE FEMM

5.1 INTRODUÇÃO

A ferramenta de simulação e análise utilizada neste trabalho foi a versão 4.2 do software *Finite Element Method Magnetics*, ou simplesmente *FEMM*, que é baseado no MEF que, conforme discutido no capítulo anterior, é um método que apresenta vantagens de utilização. O *FEMM* foi desenvolvido pelo cientista David Meeker. É uma ferramenta de distribuição livre, cujo objetivo é resolver numericamente problemas eletromagnéticos nos domínios bidimensionais e axissimétricos, e em baixa frequência [35].

O software *FEMM* apresenta simplicidade de implementação do modelo, nível de erro adequado para análises bidimensionais, além de possibilitar a análise de problemas práticos com geometria complexa a partir da aplicação das propriedades de simetria do problema, como veremos mais adiante [10][36].

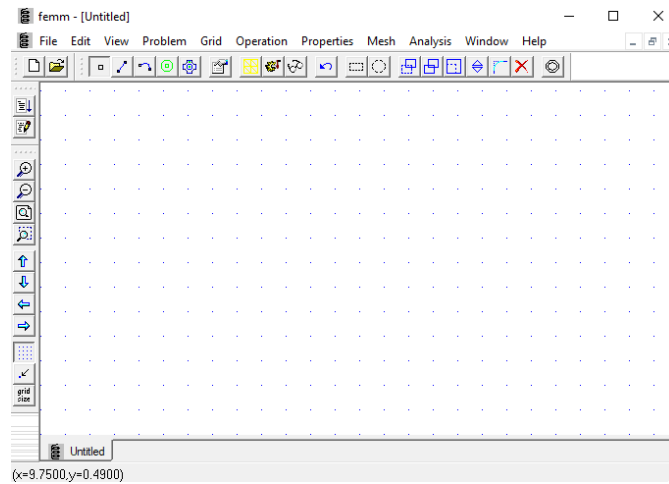
Basicamente, a ferramenta resolve os problemas em três etapas principais: pré-processamento, processamento e pós-processamento, utilizando de diferentes interfaces para implementação de cada etapa.

5.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

A etapa de pré-processamento do problema envolve desde a preparação da geometria do problema, definição das propriedades elétricas, formulação analítica do problema, definição do domínio, definição das condições de contorno, e por fim a formação da malha de elementos finitos [36][37]:

Nesta etapa, utiliza-se o *shell* interativo da ferramenta, figura 5.1, para definição dos parâmetros.

Figura 5.1 – Shell interativo do FEMM.



Fonte: própria autora.

O *shell* contém uma interface tipo CAD para tratar a geometria do problema a ser resolvido e para definição das propriedades elétricas e condições de contorno. Os arquivos Autocad DXF podem ser importados, facilitando a análise de geometrias mais complexas [35].

5.3 PROCESSAMENTO

Nesta etapa, ocorre a resolução do problema. A partir de um script desenvolvido no LUA, linguagem integrada ao shell do *FEMM* para execução de rotinas de programação, são calculados os valores das indutâncias próprias e mútuas para cada posição do rotor e cada valor de corrente considerado.

5.4 PÓS-PROCESSAMENTO

Última etapa da simulação, na qual são avaliados e processados todos os resultados obtidos, mostrados tanto no formato numérico como no formato gráfico.

5.5 CONCLUSÃO

Foram listadas as principais etapa consideradas para execução de um problema no software *FEMM*. Posto isso, será mostrado no próximo capítulo a execução da simulação proposta para este trabalho, apresentando o passo a passo do uso do software, de acordo com as necessidades do problema.

6 EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO

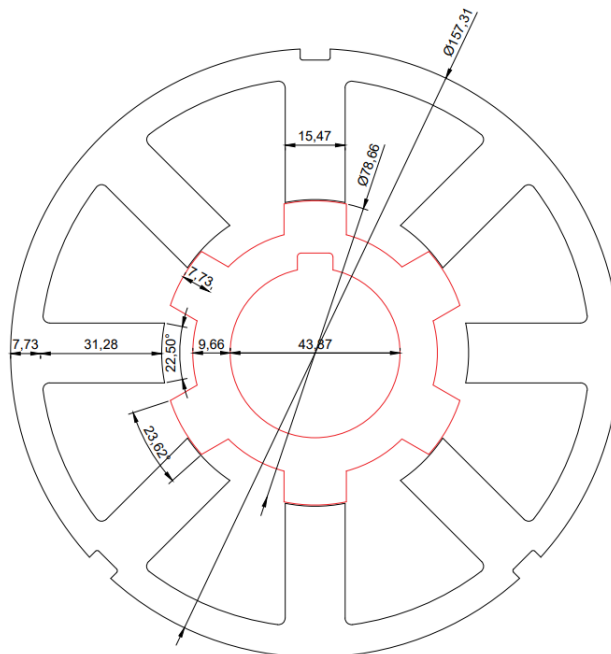
6.1 INTRODUÇÃO

O capítulo 4 percorreu resumidamente sobre as etapas de resolução dos problemas no software *FEMM*, de um modo geral. A seguir, será exposto o passo a passo para execução das etapas a partir do problema tratado para este trabalho, que é a obtenção das curvas de indutância para uma MRV aplicada a um carro híbrido.

6.2 LÂMINAS UTILIZADAS

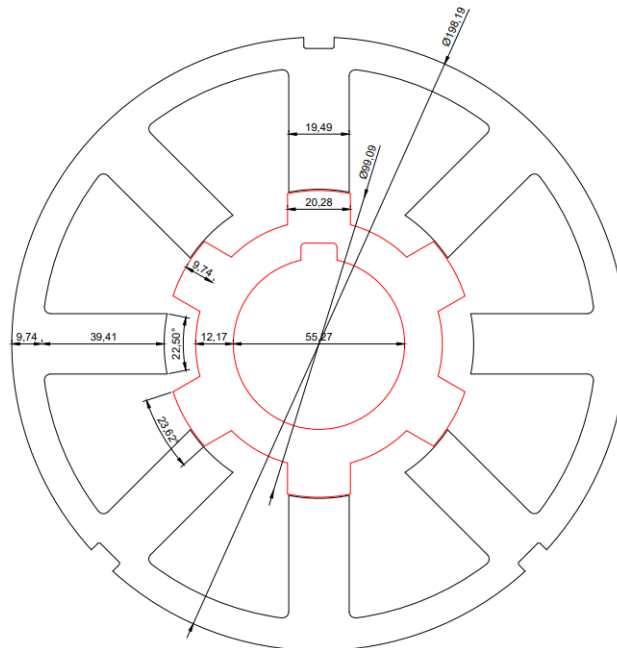
Com base no dimensionamento de [28] foi projetada a lâmina da figura 6.1, dimensionada para um motor de 4,27 cv de potência, e a lâmina da figura 6.2, dimensionada para um motor de 8,54 cv. Considerou-se uma rotação de 3000 rpm.

Figura 6.1 – Lâmina do motor de 4,27 cv. Dimensões em milímetros.



Fonte: própria autora.

Figura 6.2 – Lâmina do motor de 8,54 cv. Dimensões em milímetros.



Fonte: própria autora.

Os valores dos parâmetros adotados no projeto das lâminas estão descritos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Parâmetros construtivos das lâminas das MRV.

PARÂMETROS	MRV 4,27cv	MRV 8,54cv
Ângulos dos polos do estator	22,5°	22,5°
Ângulos dos polos do rotor	23,62°	23,62°
Altura da culatra do rotor	9,66 mm	12,17 mm
Altura da culatra do estator	7,73 mm	9,74 mm
Largura dos polos do estator	15,47 mm	19,49 mm
Largura dos polos do rotor	16,10 mm	20,28 mm
Comprimento dos polos do estator	31,28 mm	39,41 mm
Comprimento dos polos do rotor	7,73 mm	9,74 mm
Diâmetro externo do estator	157,31 mm	198,19 mm
Diâmetro do rotor	78,65 mm	99,10 mm
Comprimento do entreferro	0,31 mm	0,40 mm
Diâmetro do eixo do motor	43,87 mm	55,27 mm

Fonte: [28].

6.3 PRÉ-PROCESSAMENTO

Conforme visto em 5.1 a etapa de pré-processamento envolve a definição dos parâmetros elétricos e magnéticos dos problemas, assim como a definição da geometria, condições e contorno e geração malha de elementos finitos.

A seguir, serão demonstrados os passos para configuração de cada etapa do pré-processamento do software *FEMM*, no estudo da MRV 8x6 aplicada a um veículo elétrico.

6.3.1 Configurações iniciais

Primeiramente, é necessário clicar no ícone “New”, mostrado na Figura 6.3, localizado no canto superior esquerdo da página inicial do *shell* interativo, para que seja configurado os parâmetros iniciais do tipo de problema a ser estudado.

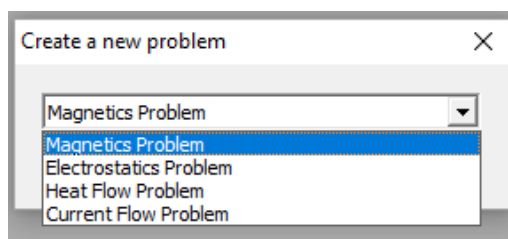
Figura 6.3 – Ícone “New”.



Fonte: própria autora.

Em seguida aparecerá o menu abaixo, Fig. 6.4, para determinação do tipo de problema a ser analisado. Foi escolhido a opção “Magnetics Problem”, já que o objetivo do trabalho é a análise das indutâncias referentes à MRV.

Figura 6.4 – Criação de um novo problema.



Fonte: própria autora.

Após a definição do tipo de problema, será necessário a definição dos parâmetros do problema. Para isto, será necessário clicar na aba “*Problem*” localizada na barra de menu superior do *shell*, desta forma aparecerá a caixa de diálogo mostrada na figura 6.5.

Figura 6.5 – Definição de Problema.

Problem Definition

Problem Type: Planar

Length Units: Millimeters

Frequency (Hz): 60

Depth: 128.64

Solver Precision: 1e-008

Min Angle: 30

Smart Mesh: On

AC Solver: Succ. Approx

Previous Solution:

Prev Type: None

Comment: Add comments here.

OK Cancel

Fonte: própria autora.

Em “*Problem Type*” é definido o Tipo de problema. Esta caixa permite que o usuário escolha a simetria do problema, podendo ser “Planar” ou “Axissimétrica” ((utilizada em problemas de 3D, representados em 2D envolvendo uma simetria rotacional). Funcionalidade importante que possibilita a análise problemas práticos com geometria complexa. Para este trabalho, selecionou-se a opção “Planar”.

Em “*Length Units*” identifica-se qual unidade está associada às dimensões prescritas na geometria do modelo. Atualmente, o programa oferece as opções em polegadas, milímetros, centímetros, metros, *mils*¹ e micrômetros. Como a lâmina foi desenhada no CAD com as dimensões em milímetros, selecionou-se a opção “*millimeters*”.

Logo após, define-se a Frequência (Hz) do problema. A frequência padrão é zero, mas para o problema em questão, foi determinado uma frequência de 60 hertz.

Adiante, a próxima caixa de edição é a especificação de profundidade “*Depth*”. Se um problema planar for selecionado, esta caixa de edição torna-se habilitada. Este valor é o comprimento da geometria na direção “da página”. As unidades da seleção de profundidade são iguais às unidades de comprimento selecionada. Para a MRV de 4,27 cv, determinou-se uma profundidade de 128,64 mm, enquanto para a máquina de 8.54 cv foi de 162,07 mm.

A caixa de opção “*Solver Precision*”, especifica os critérios de parada para o solucionador linear, onde o valor padrão é 10^{-8} .

¹ Grandeza usada na especificação e espessura de fios, equivale a milésimo de polegada, ou um centímetro cúbico.

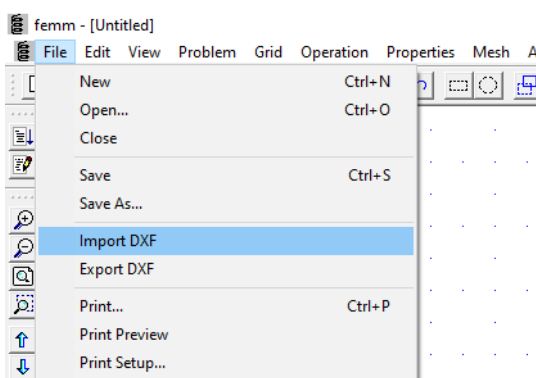
Em “*Min Angle*” é definido a restrição de ângulo mínimo para o programa gerador da malha de elementos finitos. Para malhas muito refinadas, possivelmente se faz necessária a adoção de ângulos mínimos muito pequenos para evitar os problemas de precisão. A caixa de edição aceita valores entre 1 e 33,8°. Foi adotado o valor de 30°.

Para as outras caixas foram utilizadas os valores padrões já definidos. Na caixa de comentário opcional, o usuário pode inserir descrições do problema para identificar os recursos de uma geometria particular.

6.3.2 Importação da lâmina

O desenho elaborado no CAD deve estar no formato DXF para que seja reconhecido pelo software *FEMM*. No menu “*file*”, seleciona-se a opção “*Import DXF*”, conforme figura 6.6.

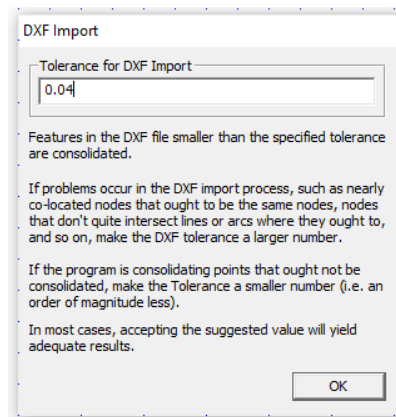
Figura 6.6 – Importando a lâmina para o Femm.



Fonte: própria autora.

Após a seleção do arquivo DXF, a caixa de diálogo da figura 6.7 será aberta, para definição da tolerância para o arquivo. A tolerância exprime a distância máxima entre dois pontos que o programa considera como pontos iguais. Em alguns casos a tolerância precisa ser aumentada ou diminuída. Foi definida uma tolerância de 0.04 para as duas lâminas.

Figura 6.7 – Tolerância.



Fonte: própria autora.

Após a definição da tolerância, era esperado a visualização da lâmina no shell interativo, mas foi necessário clicar no ícone “*blank page*”, Figura 6.8, que dimensiona na tela a geometria do problema inteiro.

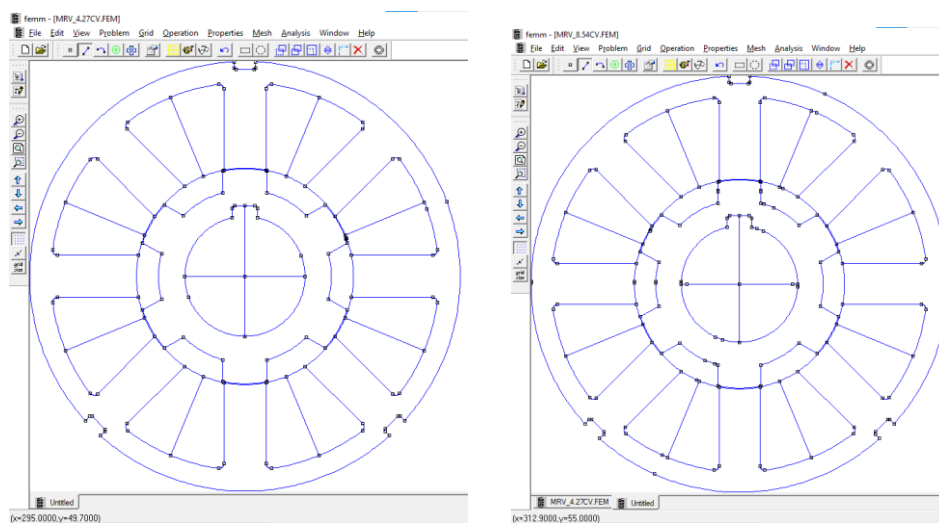
Figura 6.8 – Menu de manipulação da visualização.



Fonte: própria autora.

Após o comando, foi mostrado na tela o desenho da lâmina importada, Figura 6.9, para definição das propriedades.

Figura 6.9 – Lâminas importadas.



a) Lâmina MRV 4.27 cv

b) Lâmina MRV 8.54 cv.

Fonte: própria autora.

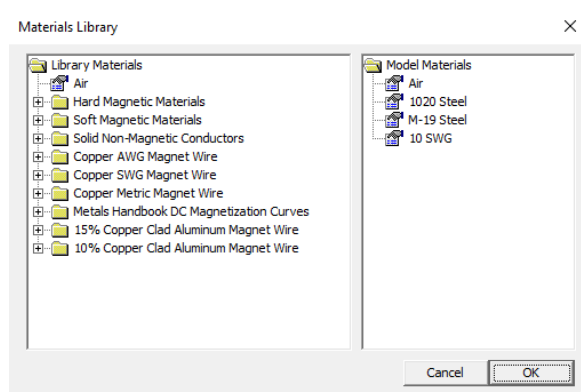
Foram adicionadas algumas marcações no desenho da lâmina para facilitar a definição das propriedades, assim como a simulação do script, como veremos mais adiante.

O próximo passo se trata da definição das propriedades dos materiais utilizados na MRV.

6.3.3 Definição das propriedades dos materiais

O *FEMM* possui uma biblioteca interna de materiais com as suas características já definidas. Para utilizá-la é necessário selecionar a opção “*Properties*” no menu superior, e depois “*Library Materials*”, após a seleção a caixa de diálogo, Figura 6.10, abaixo é mostrada:

Figura 6.10 – Biblioteca de materiais.



Fonte: própria autora.

Esta caixa de diálogo permite ao usuário selecionar os materiais desejados por meio de uma interface de arrastar e soltar.

Os materiais selecionados para compor a estrutura da MRV foram:

- Ar (*air*) para o entreferro da MRV;
- Aço silício M-19 (*M-19 steel*), para o estator e rotor;
- Aço 1020 (*1020 steel*), para o eixo do rotor;
- Fio de cobre 10 SWG², para as bobinas da MRV de 4,27 cv;
- Fio de cobre de 10 AWG para as bobinas da MRV de 8,54 cv.

Para determinação das bitolas dos fios das bobinas, foi utilizado a tabela de fios de cobre no Anexo A.

² SWG – Standard Wire Gauge – bitola padrão britânica. 10 SWG equivale a um fio com diâmetro de 3,25 mm, que é aproximadamente o valor de escala americana 8 AWG – American Wire Gauge – que é de 3,26 mm.

No dimensionamento dos enrolamentos da MRV de 4.27 cv, cuja corrente nominal resultou em 13 A, sendo necessário um fio de bitola 8 AWG, o número de espiras calculado foi de 46 para cada fase, ou seja, cada pólo contaria com 13 enrolamentos. Porém, os valores de indutância máxima encontrados seriam muito baixos, este resultado poderia ser melhorado aumentando o número de enrolamentos.

Ao analisar o projeto dimensional, percebeu-se que seria possível aumentar para 70 o número de espiras em cada fase, com 35 espiras em cada pólo.

Para o dimensionamento dos enrolamentos da MRV de 8.54 cv, cuja corrente nominal calculada resultou em 26 A, foi necessária uma bitola de 5 AWG, com 30 espiras em cada fase, ou seja, cada par de polos contaria com 15 espiras. Porém, o fio 5 AWG possui uma espessura relativamente grossa, além de serem mais caros e mais difíceis de se manusear. Desta forma, foi avaliado a possibilidade de aumentar o número de espiras nas bobinas e utilizar um fio menor.

Com base na tabela do Anexo A, e após uma análise dimensional no desenho da lâmina, foi adotado o fio de 10 AWG, cuja intensidade de corrente considerada, segundo o fabricante, está entre 6,9 A e 10,4 A, que equivale aproximadamente a uma intensidade de corrente três vezes menor que o fio de 5 AWG – 22 A à 33 A. Entretanto, para que a Força Magnetomotriz (F_{mm}), dada pela equação 6.1, não sofra alterações significativas, triplicou-se o número de espiras nas fases, passando a possuírem 100 espiras cada, desta forma a Força Magnetomotriz foi restituída em aproximadamente 90%, devido à alteração do fio.

$$F_{mm} = N \cdot i \quad (6.1)$$

As propriedades dos materiais podem ser alteradas caso seja necessário. Para isto, é preciso dar um duplo clique sobre o material, desta forma, aparecerá a janela abaixo, contendo os principais parâmetros dos materiais, Figura 6.11. Não foi modificada nenhuma propriedade já definida dos materiais selecionados.

Figura 6.11 – Edição das propriedades dos materiais.

The 'Block Property' dialog box for '1020 Steel' shows the following settings:

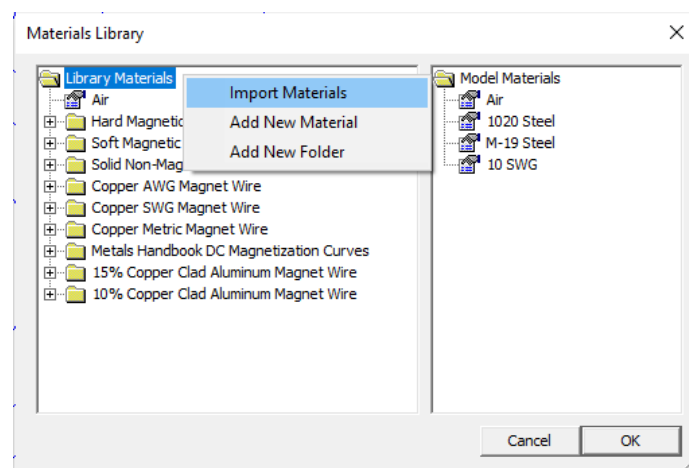
- Name:** 1020 Steel
- B-H Curve:** Nonlinear B-H Curve
- Linear Material Properties:**
 - Relative μ_x : 760
 - Relative μ_y : 760
 - ϕ_{hx} , deg: 0
 - ϕ_{hy} , deg: 0
- Nonlinear Material Properties:**
 - Edit B-H Curve:** (button)
 - ϕ_{hmax} , deg: 20
- Coerdivty:**
 - H_c , A/m: 0
- Electrical Conductivity:**
 - σ , MS/m: 5.8
- Source Current Density:**
 - J , MA/m²: 0
- Special Attributes: Lamination & Wire Type:**
 - Not laminated or stranded (dropdown)
 - Lam thickness, mm: 0
 - Lam fill factor: 1
 - Number of strands: 0
 - Strand dia, mm: 0

Buttons: OK, Cancel

Fonte: própria autora.

Materiais de outras bibliotecas de materiais podem ser importados selecionando a opção “*Import Materials*”, opção do menu do botão direito que aparece quando o ponteiro está sobre a pasta raiz da lista de materiais, Figura 6.12. Para isto, a nova biblioteca de materiais deve estar localizada no mesmo diretório dos arquivos executáveis do *FEMM*, sob o nome de arquivo *mlibrary.dat*.

Figura 6.12 – Importando novos materiais para a biblioteca.



Fonte: própria autora.

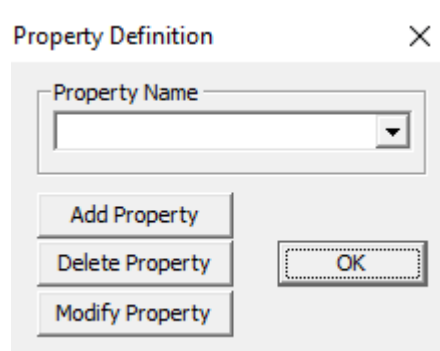
6.3.4 Definição das propriedades dos circuitos

O objetivo das propriedades do circuito é definir os valores da corrente em um ou mais blocos.

Os circuitos podem ser definidos como conectados em série ou em paralelo. Se conectado em "paralelo", a corrente será dividida entre todas as regiões marcadas com essa propriedade de circuito. Se conectado em série, a corrente é aplicada a cada bloco rotulado com aquela propriedade de circuito.

Para determinação dos circuitos é necessário selecionar a opção "*Properties*" no menu superior, e depois "*Circuits*", após a seleção a caixa de diálogo abaixo é mostrada, Figura 6.13:

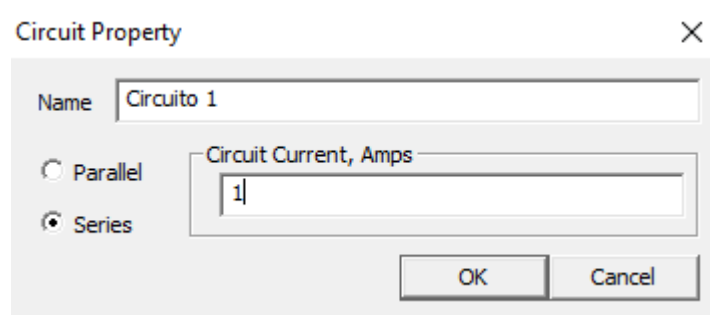
Figura 6.13 – Definição dos circuitos.



Fonte: própria autora.

Selecione a opção "*Add Properties*", a janela abaixo será mostrada, Figura 6.14:

Figura 6.14 – Definição dos valores das correntes.



Fonte: própria autora.

Para ambas MRV apresentadas, por se tratarem de máquinas tetrafásicas, serão definidos quatro circuitos diferentes. Como a simulação leva em conta a energização de apenas uma fase, para análise, determinaremos os valores de corrente para a fase A, enquanto as outras serão definidas com corrente 0A, conforme indicado na Tabela 2:

Tabela 6.2 – Definição das propriedades dos circuitos.

CIRCUITO DEFINIDO	FASE	VALOR DA CORRENTE (A)
Circuito 1	A	1 ³
Circuito 2	B	0
Circuito 3	C	0
Circuito 4	D	0

Fonte: própria autora.

6.3.5 Definição do contorno

As condições de contorno definem os valores iniciais dos campos ao longo do contorno que delimita o domínio do problema. O programa *FEMM* utiliza um tipo de definição do contorno chamado Neumann, desta forma, faz-se necessário a definição do contorno somente na fronteira da geometria da MRV [37].

Para determinar o contorno, primeiramente é necessário selecionar a opção “*Properties*” > “*Boundary*”. Será aberto uma janela igual à da Figura 6.13. Selecione “*Add Properties*” e defina um nome para o contorno, conforme a Figura 6.15:

Figura 6.15 – Definição do contorno.

Fonte: própria autora.

Não foram modificados os parâmetros padrões desta propriedade.

Após a criação do contorno, é necessário definir no respectivo desenho da lâmina, em qual local será delimitado o contorno. Para isso, é preciso utilizar as

³ Inicialmente será definido o valor de corrente de 1A para análise do comportamento do fluxo magnético na MRV. Após essa análise, será implementado um código em linguagem LUA variando o valor da corrente na Fase A, para que seja levantado os perfis de indutância.

ferramentas de modos de desenho representados pelos ícones da Figura 6.16, clicando com o botão direito do mouse sobre o contorno da MRV.

Figura 6.16 – Modos de Desenho.

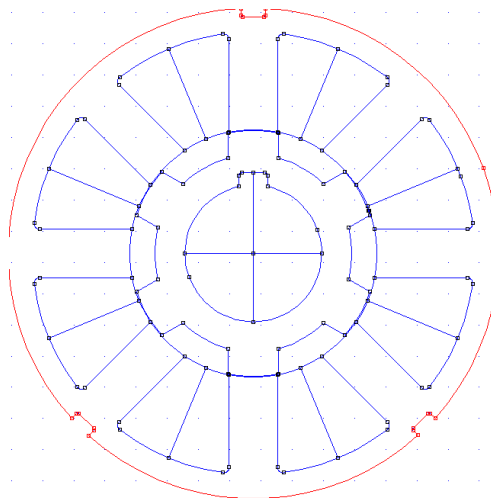


Fonte: própria autora.

Os ícones da Figura 6.16 correspondem aos modos Ponto, Segmento de linha, Segmento de arco, Etiqueta de bloco e Grupo, respectivamente. Todos os desenhos do contorno externo da máquina (ponto, linha e arco) devem ser atribuídos à propriedade “contorno” criada anteriormente.

Utilizando os modos supracitados, foi definido o contorno na região externa da MRV, conforme a figura 6.17:

Figura 6.17 – Definição do contorno do problema (destacado em vermelho).



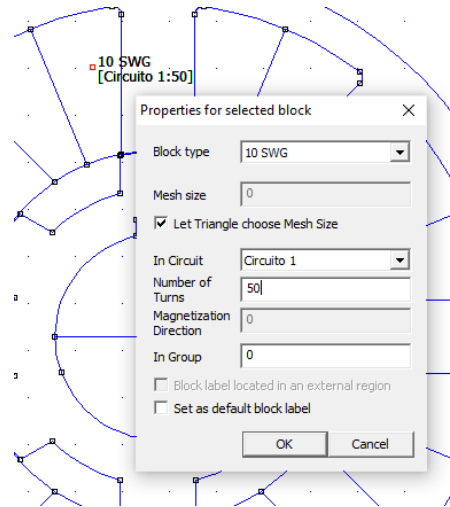
Fonte: própria autora.

6.3.6 Atribuição das propriedades

Com os materiais selecionados, os circuitos criados e propriedades definidas, o próximo passo é atribuí-los à geometria da MRV.

Para atribuição dos materiais, clica-se com o botão esquerdo sobre a área a que se deseja definir, logo após, será criado um “point”. Sobre este ponto criado, clica-se novamente com o botão direito, que será selecionado, por fim, pressione a tecla “espaço” do seu teclado para abrir as configurações do local considerado, Ver Figura 6.18:

Figura 6.18 – Número de voltas positivo.



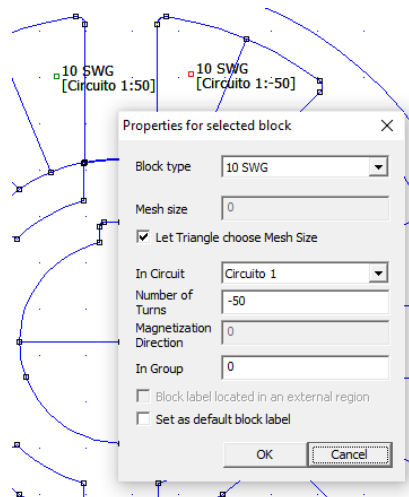
Fonte: própria autora.

Conforme visto na Figura 6.18, o local selecionado se refere ao local da bobina, portanto, selecionou-se o material fio de cobre “10 SWG”. Consideramos esse polo como o polo da Fase A, desta forma, atribuímos a ele o “Circuito 1”. Em “*Number of Turns*” foram consideradas 50 espiras do fio de cobre para composição da bobina.

É importante ressaltar que o número de voltas atribuído a uma etiqueta de bloco pode ser um número positivo ou negativo. Neste caso o sinal no número de voltas indicou a direção do fluxo de corrente associada a um valor positivo.

Para ilustrar um outro exemplo, foi definido o os materiais para a outra parte da mesma bobina, ver figura 6.19:

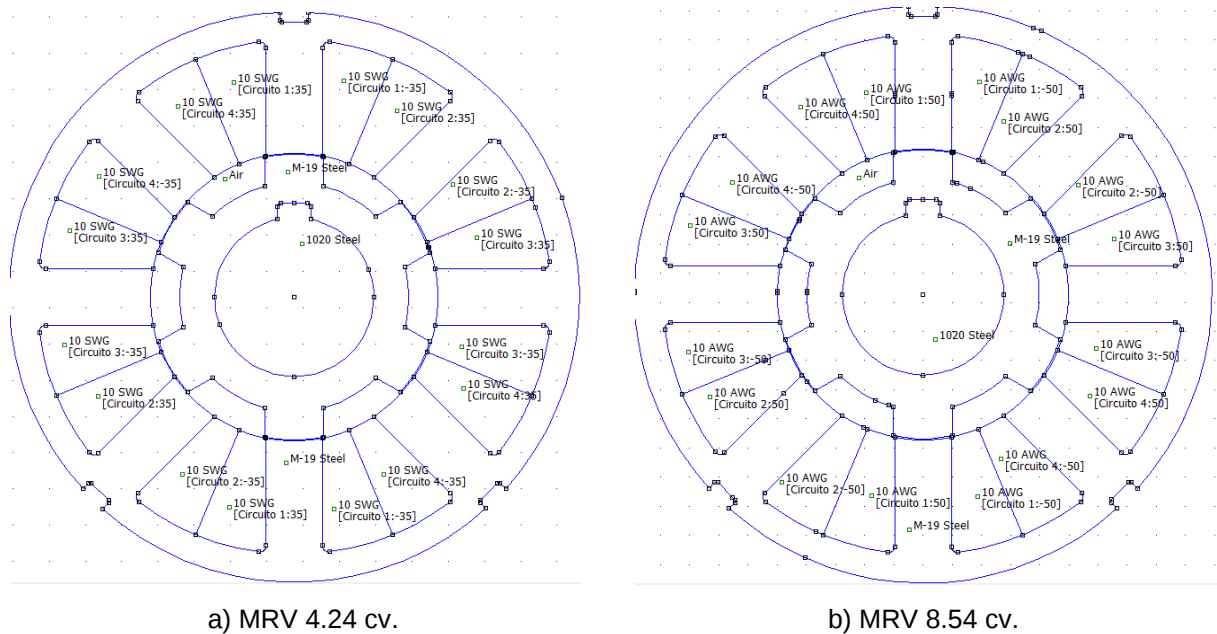
Figura 6.19 – Número de voltas negativo.



Fonte: própria autora.

Foram definidos os materiais, circuitos e propriedades em toda a geometria da MRV conforme indicado na Figura 6.20:

Figura 6.20 – Geometria da MRV completamente definida.



Fonte: própria autora.

Foram retiradas as marcações do centro geométrico da lâmina, mas conservou-se o ponto central, que será utilizado nas etapas de implementação do código LUA. O próximo passo é a geração da malha de elementos finitos.

Definido todos os materiais, circuitos e o contorno do problema, é preciso montar a malha de elementos finitos na geometria da MRV. Para isto, clica-se no ícone mostrado na Figura 6.21:

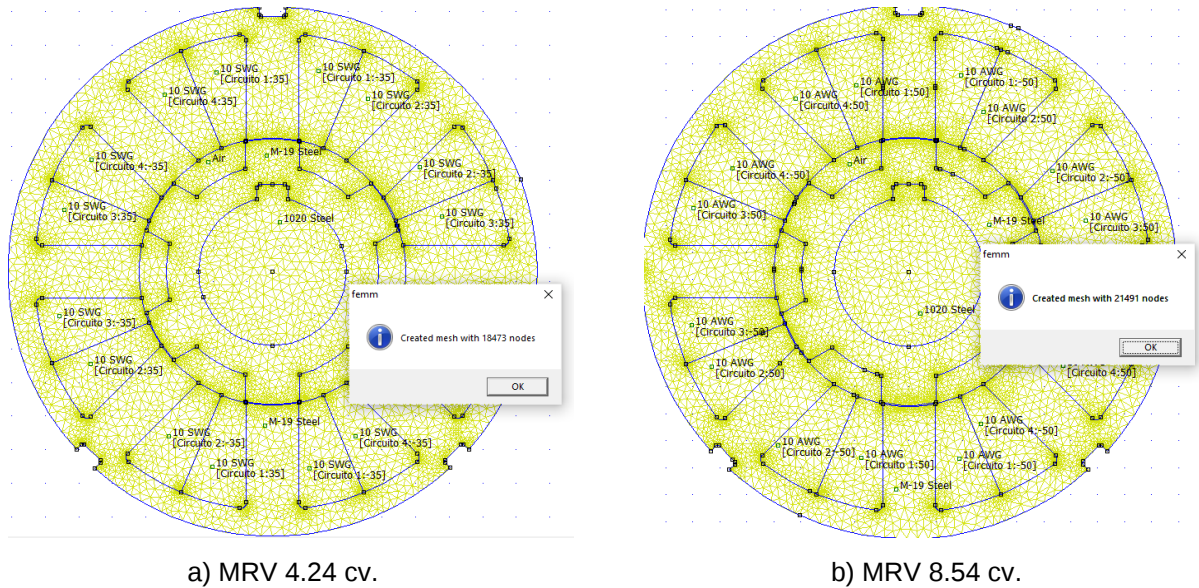
Figura 6.21 – Execução do gerador de malha.



Fonte: própria autora.

O comando resultou em uma malha com 18473 nós para a MRV de 4.27 cv e 21491 nós para a MRV de 8.57 cv, conforme Figura 6.22, isso significa o número de equações que serão montadas para resolução do problema.

Figura 6.22 – Malha de elementos finitos.



Fonte: própria autora.

A geração da malha de elementos finitos é a última parte da etapa de pré-processamento, no MEF. O próximo passo é a etapa de processamento, que envolve a resolução do sistema de equações criados pelo software.

6.4 PROCESSAMENTO

Para execução da simulação, seleciona-se o ícone dado pela figura 6.23:

Figura 6.23 – Execução da simulação.

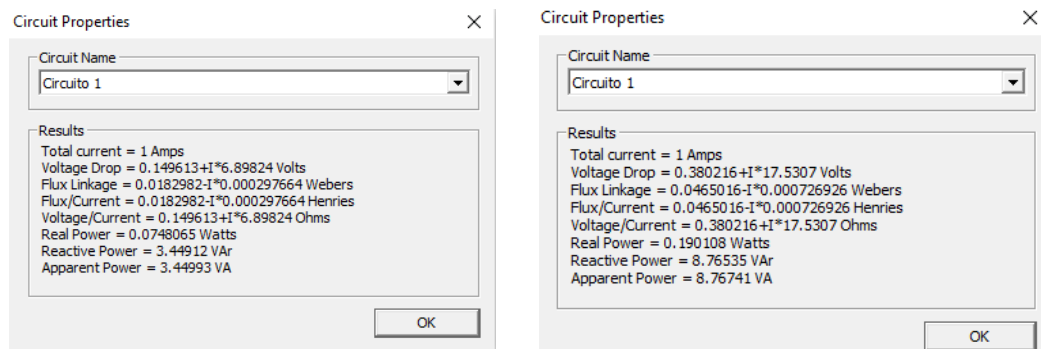


Fonte: própria autora.

6.5 PÓS-PROCESSAMENTO

Após a execução, a ferramenta disponibiliza o valor de indutância, para a corrente pré-definida – 1 A – e para a posição atual do rotor – 0 graus. Além do valor da indutância, são mostrados outros parâmetros eletromagnéticos como a corrente, queda de tensão, fluxo magnético, resistência, potência, etc. Ver figura 6.24.

Figura 6.24 – Parâmetros eletromagnéticos das MRV.



a) MRV de 4.27 cv.

b) MRV de 8.54 cv.

Fonte: própria autora.

Para acessar os dados, após a execução da simulação, é necessário clicar no ícone do indutor no menu superior, conforme figura 6.25:

Figura 6.25 – Acessar parâmetros eletromagnéticos.



Fonte: própria autora.

A fim de coletar todos os valores de indutância, em todas as posições do rotor, lançou-se mão do uso de um script, desenvolvido na linguagem LUA – Anexo B – que calculou e armazenou os valores das indutâncias próprias e mútuas, para todas as posições do rotor, na faixa de valores de corrente definida para cada MRV.

6.6 CONCLUSÃO

O capítulo apresentou as duas lâminas utilizadas e exibiu o passo a passo das etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento da execução do problema no software *FEMM*. Os resultados obtidos serão mostrados e analisados no próximo capítulo.

7 RESULTADOS E ANÁLISES DA SIMULAÇÃO

7.1 INTRODUÇÃO

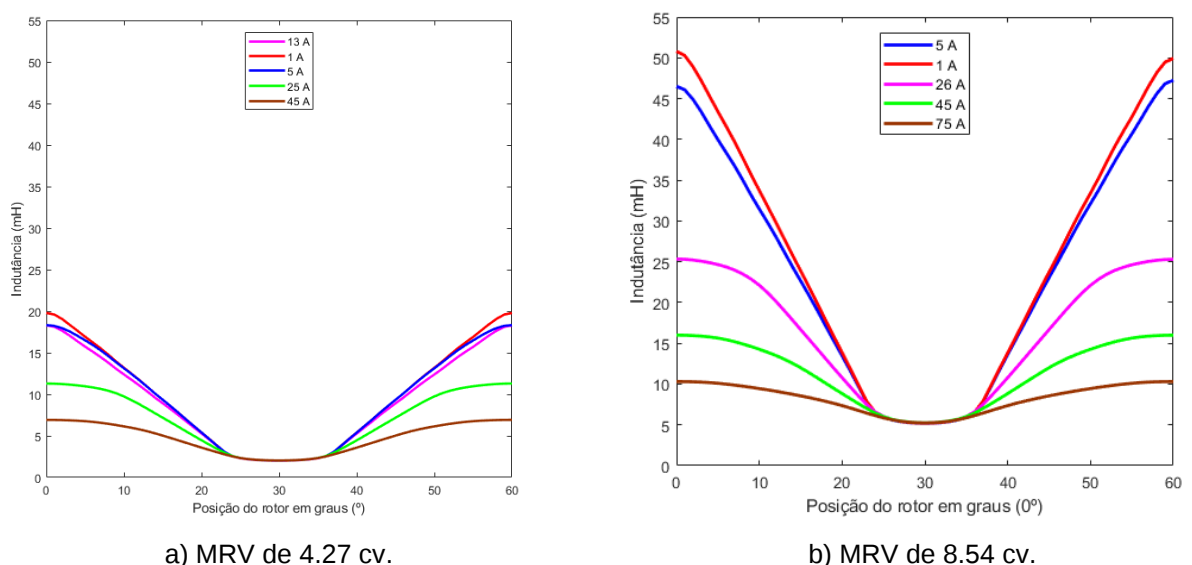
Após a realização das simulações no software *FEMM*, foram obtidos os resultados das indutâncias próprias e mútuas para as duas MRV. Os valores disponibilizados são de natureza complexa, desta forma, foram inicialmente tratados no software *MATLAB* para obtenção dos módulos dos valores. A seguir, serão apresentados os resultados das simulações.

7.2 INDUTÂNCIA PRÓPRIA

A equação 3.2, nos mostra que a indutância é a relação entre o fluxo concatenado por uma bobina e a corrente. Chama-se indutância própria, aquela indutância cujo fluxo tem origem na corrente da bobina da própria fase [11].

Em relação à posição angular, nota-se que para ambas MRV, a indutância própria decresce entre a posição 0° e 30° , como era esperado, pois há um aumento do entreferro entre os polos do estator e do rotor, e conseqüentemente da relutância do sistema. A partir da posição 30° até 60° , a indutância volta a aumentar, pois o entreferro diminui. A figura 7.1 ilustra o comportamento da indutância em relação ao posicionamento angular do rotor, para algumas correntes fixadas.

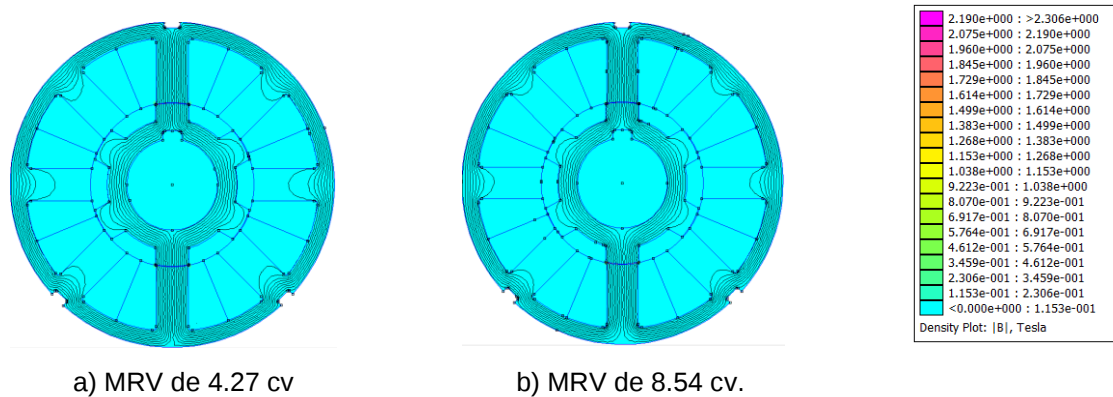
Figura 7.1 – Curvas de indutância x posição angular do rotor.



Fonte: própria autora.

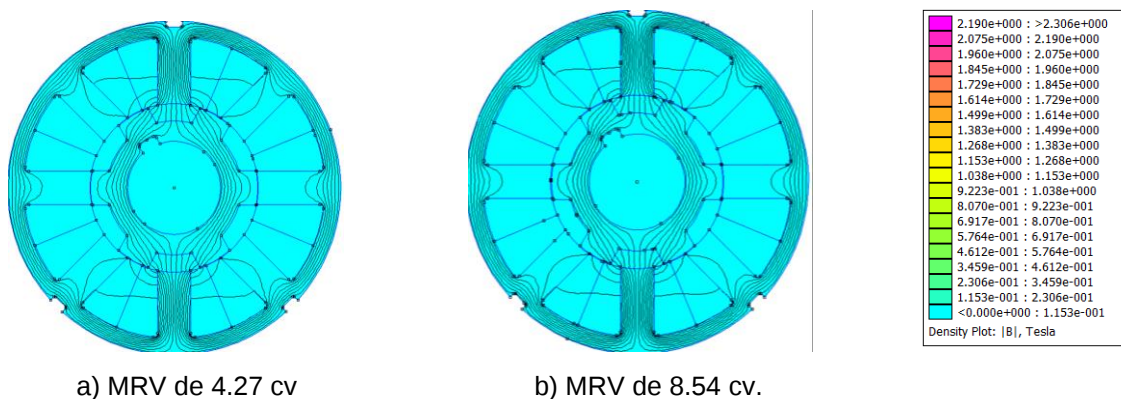
Na posição 0° , o rotor está na posição de completo alinhamento com a fase energizada do estator, ver figura 7.2. É nessa posição que o valor da indutância é máximo.

Figura 7.2 – Fluxo magnético na posição 0° para uma corrente de 5A.



Na posição 30° , o rotor está em completo desalinhamento com a fase, conforme ilustra a figura 7.4. É nessa posição que o valor da indutância é mínimo.

Figura 7.4 – Fluxo magnético na posição 30° para uma corrente de 5A.

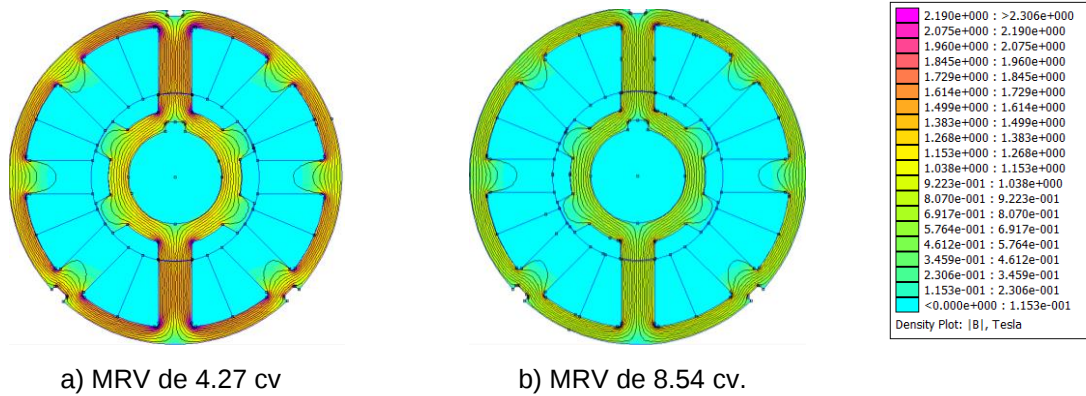


O rotor tem seis saliências igualmente espaçadas, ao gira-lo 60° , ele volta à mesma posição inicial (0°).

Em relação a corrente, ao analisar os dados, pode-se observar que na medida que a corrente aumenta, os valores da indutância diminuem conforme esperado, apresentando um comportamento não linear, devido à saturação magnética do material (aço M-19).

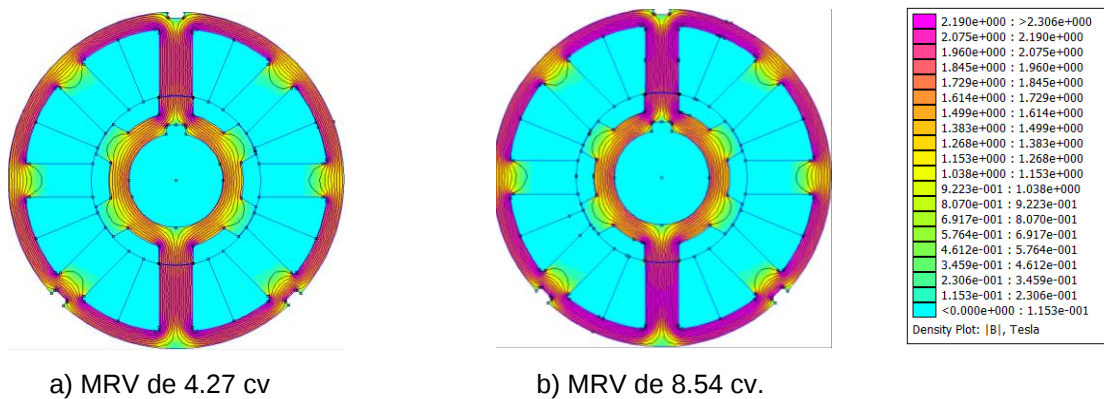
Analisando os resultados nas MRV, para diferentes valores de corrente, pode-se visualizar o comportamento do fluxo magnético. A figura 7.5 ilustra o fluxo magnético, na posição de maior indutância para uma corrente de 1 A.

Figura 7.5 – Densidade de fluxo para uma corrente de 1 A.



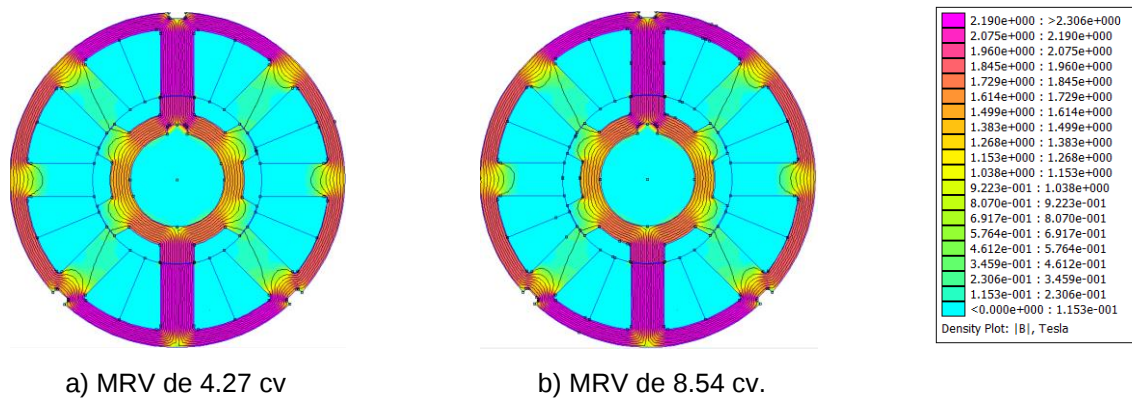
Para uma corrente de 5 A, pode-se perceber um aumento nas linhas de fluxo, como mostrado na figura 7.6:

Figura 7.6 – Densidade de fluxo para uma corrente de 5A.



A distribuição do fluxo nas MRV para uma corrente de 45 A, são expostas na figura 7.7:

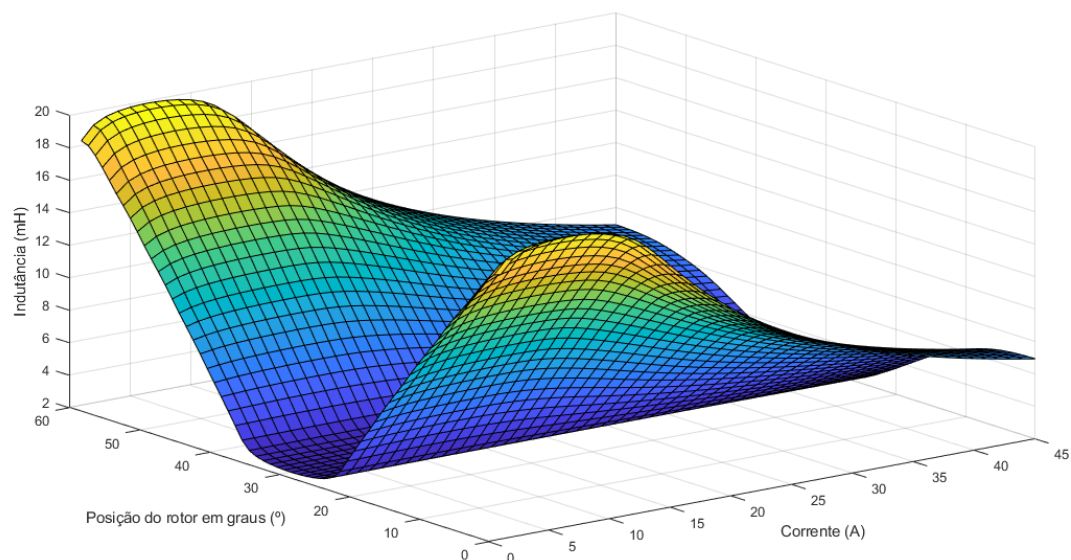
Figura 7.7 – Densidade de fluxo para uma corrente de 45 A.



É importante ressaltar que o valor de pico das duas MRV, será maior do que a corrente nominal calculada. Sendo assim, a simulação foi executada até 45 A, para MRV de 4.27 cv, cuja corrente nominal é de 13 A, e até 75 A para a MRV de 8.54 cv, cuja corrente nominal é de 26 A.

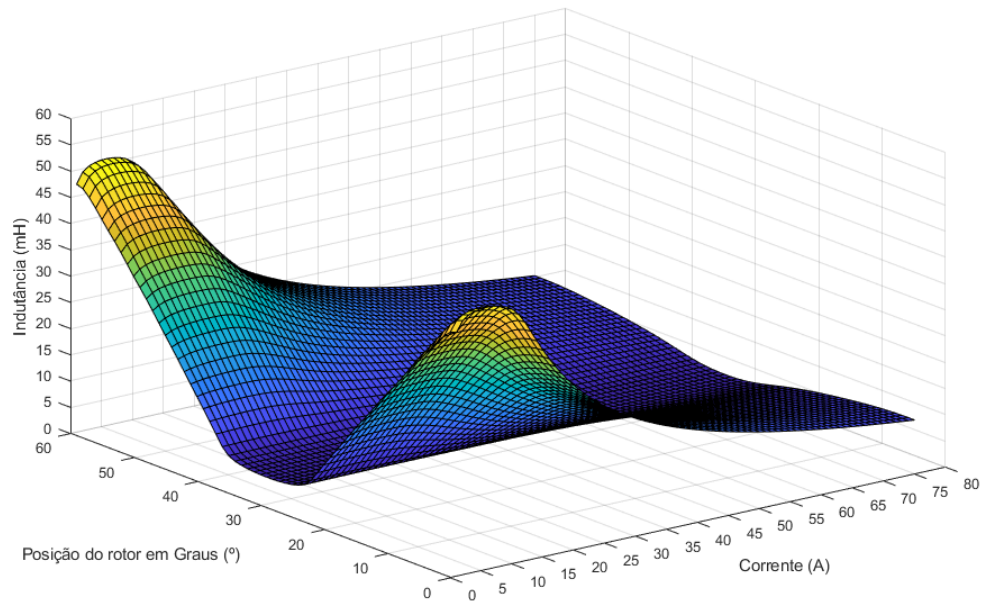
A superfície mostrada na figura 7.8 abaixo, representa todos os valores das indutâncias para cada ângulo da MRV de 4.27 cv, variando a corrente de 1A a 45A.

Figura 7.8 – Superfície de indutâncias próprias MRV de 4.27 cv.



A superfície mostrada na figura 7.9, representa os valores das indutâncias da MRV de 8.54 cv, variando a corrente de 1A a 75A.

Figura 7.9 – Superfície de indutâncias próprias MRV de 8.54 cv.



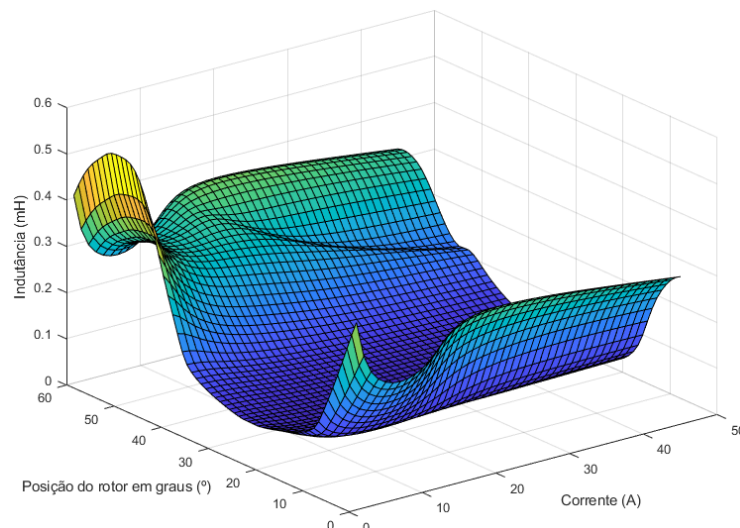
Fonte: própria autora.

7.3 INDUTÂNCIA MÚTUA

A indutância mútua, assim como a própria, também é a relação entre o fluxo e a corrente. Entretanto, a corrente é de outra fase, ou seja, o fluxo considerado tem origem em outra fase [11].

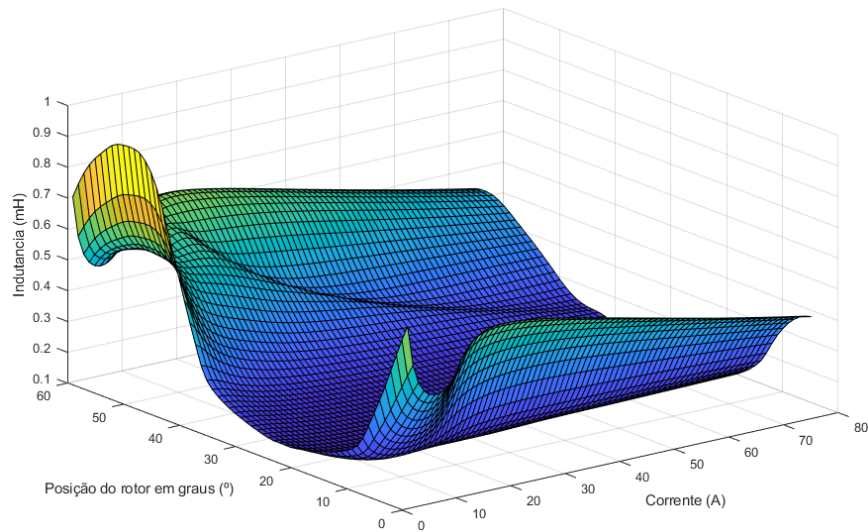
A superfície de indutância mútua presente na fase B, devido à corrente na fase A, da MRV de 4.27 cv, está ilustrada na figura 7.10. A figura 7.11 representa a superfície de indutância mútua na fase B, da MRV de 8.54 cv.

Figura 7.10 – Superfície de indutância mútua na fase B, MRV de 4.27 cv.



Fonte: própria autora.

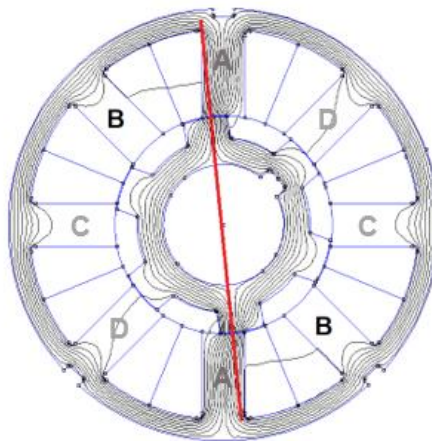
Figura 7.11 – Superfície de indutância mútua na fase B, MRV de 8.54 cv.



Fonte: própria autora.

Para as duas configurações, o comportamento dos valores de indutância mútua nas respectivas bobinas B, foi como o esperado, apresentando seus maiores valores nas posições de 50° do rotor, quando o fluxo magnético percorre um caminho mais próximo à posição da bobina B. Ver figura 7.12.

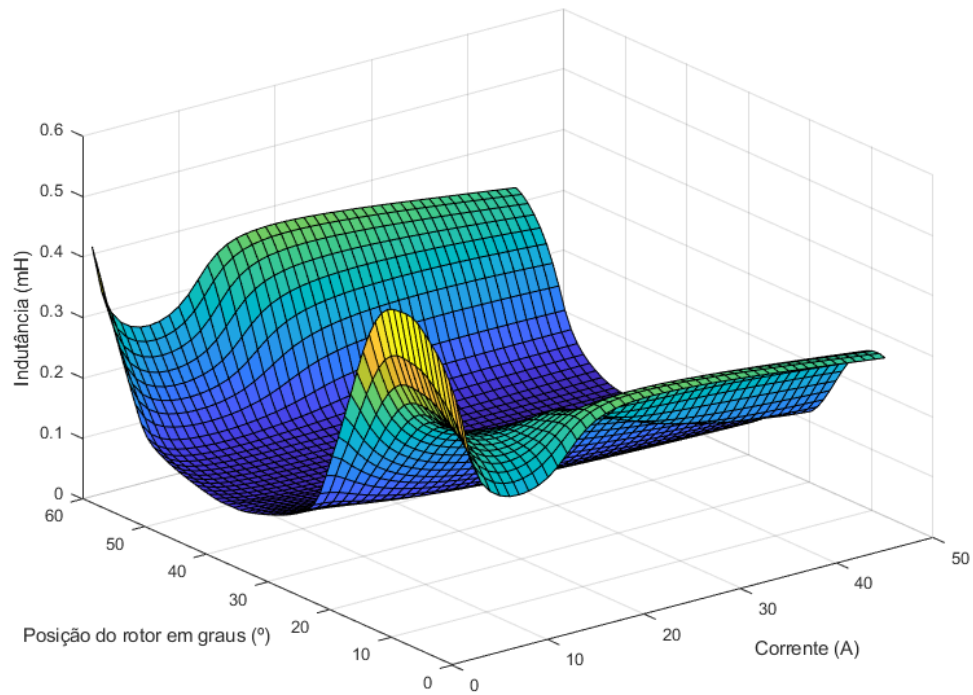
Figura 7.12 – Inclinação do caminho das linhas de fluxo, rotor à 50°.



Fonte: própria autora.

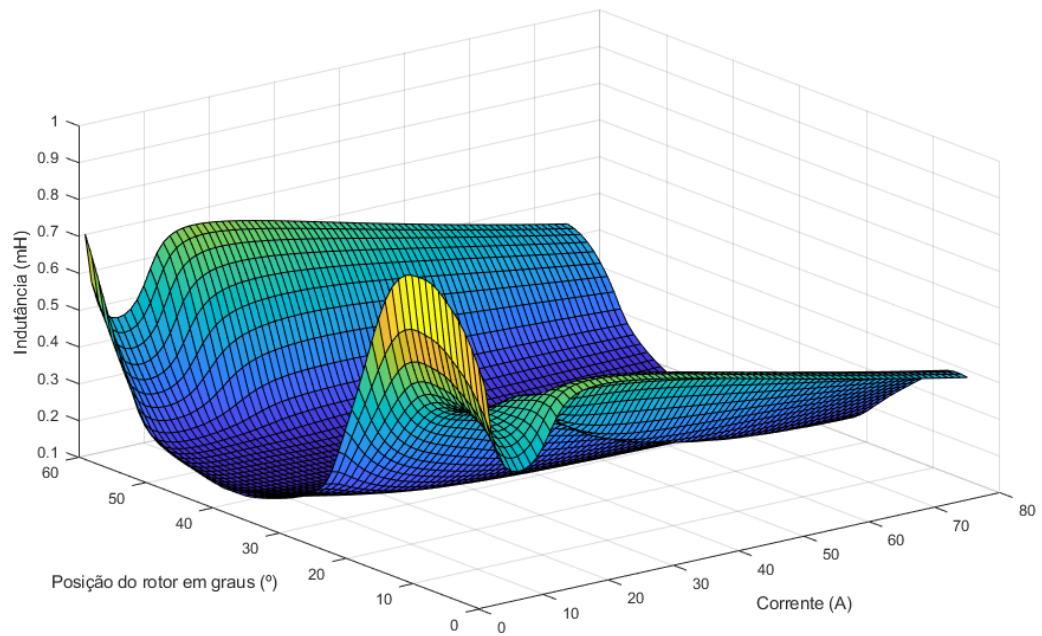
A superfície de indutância mútua presente na fase D, devido à corrente na fase A, da MRV de 4.27 cv, está ilustrada na figura 7.13. A figura 7.14 representa a superfície de indutância mútua na fase D, da MRV de 8.54 cv.

Figura 7.13 – Superfície de indutância mútua na fase D, MRV de 4.27 cv.



Fonte: própria autora.

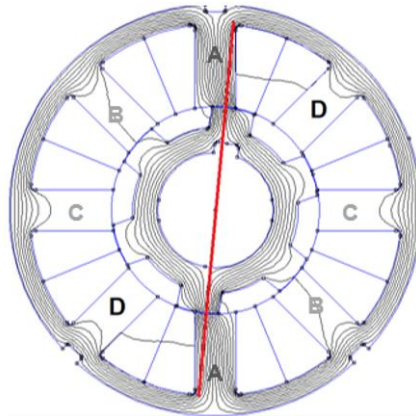
Figura 7.14 – Superfície de indutância mútua na fase D, MRV de 8.54 cv.



Fonte: própria autora.

Tal como a bobina B, as indutâncias mútuas de maiores valores na bobina D estão na posição de 50° do rotor, ver figura 7.15, mas no sentido oposto, que equivale a rotação de 10°.

Figura 7.15 – Inclinação do caminho das linhas de fluxo, rotor à -50° (ou 10°).

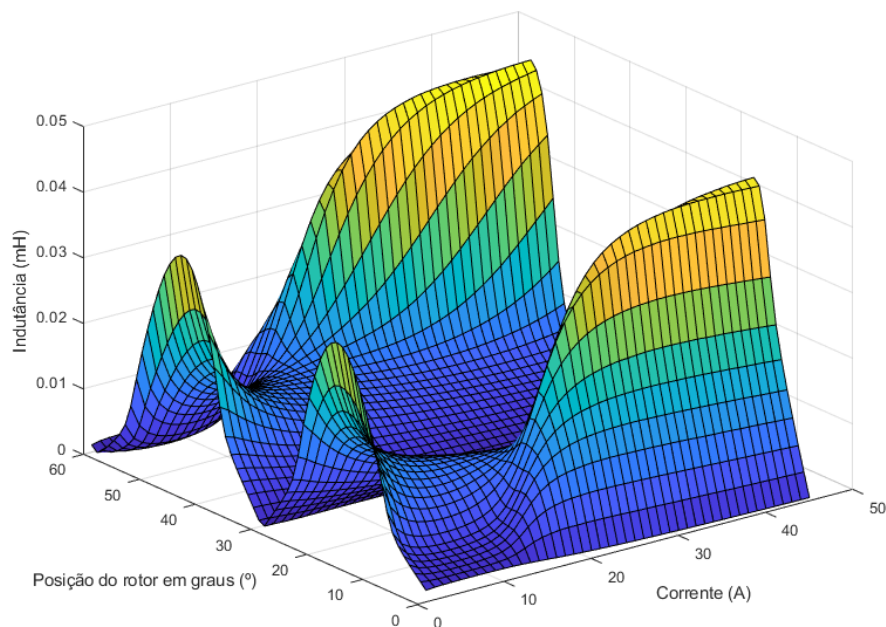


Fonte: Própria autora.

Como as bobinas B e D estão posicionadas simetricamente, o gráfico da superfície de indutância mútua dessas bobinas são igualmente simétricos.

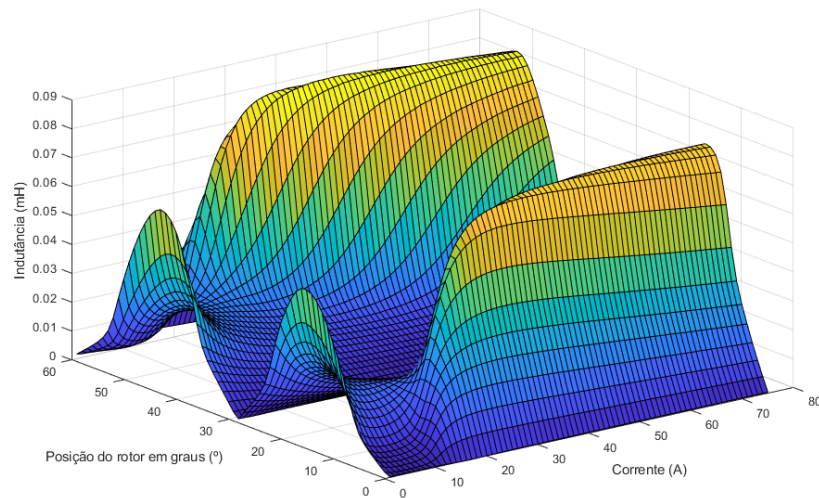
A superfície de indutância mútua presente na fase C, devido à corrente na fase A, da MRV de 4.27 cv, está ilustrada na figura 7.16. A figura 7.17 representa a superfície de indutância mútua na fase C, da MRV de 8.54 cv.

Figura 7.16 – Superfície de indutância mútua na fase C, MRV de 4.27 cv.



Fonte: própria autora.

Figura 7.17 – Superfície de indutância mútua na fase C, MRV de 8.54 cv.



Fonte: própria autora.

Os valores de indutância mútua para a bobina C também está coerente com o esperado. A bobina C se encontra a uma distância maior da fase energizada, desta forma, os valores de pico da indutância mútua na bobina C são bem menores em relação aos valores das indutâncias mútuas nas bobinas B e D.

7.4 CONCLUSÃO

Os valores das indutâncias próprias e mútuas das duas MRV foram apresentados nos gráficos das superfícies, para diversos valores de correntes e posições do rotor. Foram apresentados também as linhas de fluxo, assim como a densidade de fluxo, para as posições de mínimo e máximo alinhamento do rotor para algumas correntes fixadas.

Com base nas superfícies obtidas, e a partir da análise matemática e geométrica do problema, podemos concluir que o comportamento das indutâncias está de acordo como o esperado,

8 CONCLUSÕES

8.1 CONCLUSÕES FINAIS

O presente trabalho alcançou os objetivos propostos, apresentando as superfícies de indutância própria e mútua de duas configurações de MRV aplicada a um carro híbrido, através do uso do software *FEMM*.

Inicialmente, foram expostas as vantagens do uso de motores elétricos em detrimento dos motores a combustão, devido às questões ambientais e de eficiência na conversão de energia. Em seguida, foram expostas as vantagens do uso da Máquina a Relutância Variável sobre outros tipos de máquinas elétricas na aplicação automotiva.

Foi apresentado o software *FEMM*, que aplica o método dos elementos finitos, para análise do comportamento eletromagnético das MRV. Tal análise se configura como uma etapa crucial para o projeto das MRV como motor, uma vez que o torque de saída da máquina é diretamente influenciado pela variação das indutâncias. O programa se mostrou uma ferramenta fundamental, devido a facilidade de utilização e implementação do modelo, além de ser gratuito.

É importante ressaltar também, que o estudo prévio do comportamento eletromagnético das MRV como uma etapa de projeto de máquinas, reduz gastos desnecessários com construção, além de possibilitar a análise e comparação de projetos.

Foi mostrado, detalhadamente, o passo a passo para a obtenção dos valores de indutância através do software *FEMM* e, por fim, apresentou-se as superfícies de indutância própria e mútua para as duas máquinas propostas, cujo comportamento foi de acordo com o esperado.

Portanto, conclui-se que o uso do software *FEMM* para obtenção das curvas de indutância de uma MRV aplicada a um carro híbrido é indispensável para a etapa pré-simulação do projeto das MRV, que no contexto atual, vêm se mostrando como uma alternativa valiosa para aplicação automotiva.

8.2 PROPOSTAS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Simular as MRV no MATLAB, para estudo do rendimento das duas

configurações na aplicação automotiva;

2. Automatizar o projeto da MRV conectando o software *FEMM* no ambiente do MATLAB.

9 REFERÊNCIAS

- [1] CASTRO, B. H. R.; FERREIRA, T. T. **Veículos Elétricos: Aspectos básicos, Perspectivas e Oportunidades**. BNDES Setorial, n. 32, p. 267-310, Rio de Janeiro, 2010.
- [2] CARVALHO, A.; JUNIOR, H. F. **A Sustentabilidade na Indústria Automobilística: Vantagem Competitiva ou Um Sonho Distante?** Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria. 2012.
- [3] REIS, S. R.; SILVA, E. A. **Motores Elétricos Flex a Etanol: uma nova Era no Setor Automotivo Mundial**. Rev. Cienc. Exatas Tecnol., v. 12, n. 12, p. 45-48, 2017.
- [4] VIEIRA, A. C. F. **Energias renováveis e sua eficiência na nova economia energética no Brasil**. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 8, n. 18, p. 211-223, 2021. [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2021\)081813](https://doi.org/10.21438/rbgas(2021)081813).
- [5] CARVALHO, C. H. R. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Texto para Discussão, No. 1606, Brasília, 2011.
- [6] VAZ, L. F. H.; BARROS, D. C.; CASTRO, B. H. R. **Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 41, p. 295-344, mar. 2015.
- [7] SILVEIRA, A. F. V., **Modelagem, construção, testes e análise de desempenho de um gerador a relutância chaveado**. Tese de doutorado – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais, 2008.
- [8] FILHO, M. J. M.; GOMES, L. C.; SILVEIRA, A. F. V; et al. **Simulação Computacional do Acionamento de Protótipo de Motor a Relutância Variável 8/6**. XVI CEEL, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.
- [9] OLIVEIRA, V. S. de. **Aplicação do método dos elementos finitos 3D na caracterização eletromagnética estática de motores de relutância variável com validação experimental**. 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- [10] WOLFF, J. G. B; FILHO, P. B. **Modelagem de Problema Eletrostático Utilizando Elementos Finitos**. Engenharia Elétrica e de Computação Atividades Relacionadas com o Setor Científico e Tecnológico. 2020.
- [11] DIAS, R. J., **Inovações no Projeto de Geradores a Relutância Variável Com Estudo das Influências da Saturação Magnética e das Indutâncias Mútuas**. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Uberlândia, Minas Gerais, 2017.
- [12] SOUZA, M. T. S.; JUNIOR, O. S. **Da Maturidade das Inovações Ambientais Automotivas para Reduzir Gases de Efeito Estufa Ao Surgimento das Tecnologias Disruptivas**. XVII Congresso Latino-Iberoamericano de Gestion Tecnológica. Cidade do México, 2017.

- [13] GOLDSTEIN, M.; AZEVEDO, R. L. S. **Combustíveis alternativos e inovações no setor automotivo: será o fim da "era do petróleo"?**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 23, p. 235-266, mar. 2006.
- [14] LULHE, A. M; DATE, T. **A technology review paper for drives used in electrical vehicle (EV) & hybrid electrical vehicles (HEV)**. 2015 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT). 2015.
- [15] ZERAOULIA, M.; BENBOUZID, M.; DIALLO, D. **Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study**. IEEE VPPC'05, Chicago, United States. pp.280-287. 2005.
- [16] PINDORIYA, R. M., RAIPUROHIT, B. S., KUMAR, R., & SRIVASTAVA, K. N. **Comparative analysis of permanent magnet motors and switched reluctance motors capabilities for electric and hybrid electric vehicles**. 2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT). 2018.
- [17] LEE, C. H.T.; JUNIOR, J. L. K.; ANGLE, M. **Switched Reluctance Motor Drives for Hybrid Electric Vehicles, Switched Reluctance Motor** - Concept, Control and Applications, Ahmed Tahour and Abdel Ghani Aissaoui, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.68911. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/chapters/55383>>. Acesso em 02 de julho de 2021.
- [18] LAN, Y.; BENOMAR, Y.; DEEPAK, K.; AKSOZ, A.; BAGHDADI, M.E.; BOSTANCI, E.; Hegazy, O. **Switched Reluctance Motors and Drive Systems for Electric Vehicle Powertrains: State of the Art Analysis and Future Trends**. Energies 2021, 14, 2079. 2021.
- [19] OMEKANDA, A. M. **Switched Reluctance Machines for EV and HEV Propulsion: State-of-The-Art**. *IEEE Workshop on Electrical Machines Design Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 2013.
- [20] MACHADO, G. O.; FILHO, M. J. M.; SILVEIRA, A. F. V.; GOMES, L. C. **Modelagem Matemática e Análise de Um Motor a Relutância Variável 8/6 Através da Aplicação do Método de Elementos Finitos**. XVI CEEL, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.
- [21] RUBA, M.; FODOREAN, D. **Motor-drive solution for light electric vehicles based on a switched reluctance machine**. IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), 2016.
- [22] OLIVEIRA, B. A. **Modelagem, Simulação e Estudo Comparativo Entre Um Gerador a Relutância Variável 8x6 e Um Gerador a Relutância Variável 12x8**. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Goiás, Goiânia, 2019.
- [23] BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. **Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 41, p. 207-224, mar. 2010.
- [24] WESCHENFELDER, F.; PAULETTI, P.; BITTENCOURT, S.; PELEGRINI, L.; ITO, D.; SCHAEFFER, L. **Situação Atual e Perspectivas da Produção de Ímãs**

Permanentes e Reservas de Terras-raras: Brasil x Mundo. Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração. São Paulo, v. 9, n. 4, p. 309-315, 2012.

[25] CARVALHO, C. F.; SIGNORELLI, M, H. A. **Princípio de Funcionamento e Acionamento do Motor a Relutância Variável.** XVI CEEL, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

[26] HUSAIN, I. **Minimization of Torque Ripple in SRM Drives.** IEEE Transactions On Industrial Electronics, VOL. 49, NO. 1. 2002.

[27] OLIVEIRA, A. A., *et al.* **Modelling, Simulation and Comparative Study between Switched Reluctance Generator 8x6 and Switched Reluctance Generator 12x8.** 18th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'20). Granada (Spain), 1 e 2 de abril, 2020.

[28] JUNIOR, J. M. B. A; **Projeto construtivo de máquina a relutância variável para carro híbrido.** Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Goiás, Goiânia, 2021.

[29] FREITAS, J. C. N. **Projeto e análise ao funcionamento de carros elétricos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade do Minho, Guimarães, 2012.

[30] FILHO, M. J. de M.; GOMES, L. C.; ANDRADE, D. A. de; JUNIOR, J. A. dos S.; SOUZA, W. G. de; OLIVEIRA, C. A. **Proposta de Plataforma para Estudo de Motor a Relutância Variável 8/6.** XIV CEEL, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

[31] BIANCHI, R. B.; GOMES, L. C.; ANDRADE D. A.; RÊGO M. B.; NEVES A. B. F. **Projeto, Modelagem e Levantamento de Curva de Indutância Em Máquina a Relutância Variável 8x6 Utilizando Elementos Finitos.** X CEEL, Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

[32] SCHIMID, V. A. **Análise da Dinâmica das Linhas de Fluxo Magnético, Torque e Indutância de Motor de Relutância Chaveado 6/4 Utilizando o Método dos Elementos Finitos.** E-Locução, Extrema, v. 1, n. 18, p. 430-444. Disponível em: <https://periodicos.faex.edu.br/index.php/e-Locucacao/article/view/294>. Acesso em: 20 dez. 2021.

[33] LOTTI, R. S. et al. **Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos.** Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial. 2006, v. 11, n. 2, pp. 35-43. Epub 15 Maio 2006. ISSN 1980-5500.

[34] SEIXAS, F. J. M.; MALANGE, F. C. V.; RANGEL, R. H. O. G.; FERNANDES, R. C.; OLIVEIRA, P. S. **Motor Linear de Indução Bifásico: Análise do Campo Magnético Pelo Programa Femm.** I World Congress on Systems Engineering and Information Technology. Porto, Portugal, 2013.

[35] MEKER, D. **Finite Element Method Magnetics: Version 4.2: User's Manual.**, 2015. Disponível em: <<http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>>. Acessado em: 09 de julho de 2018.

[36] MAMEDE, A. C. F.; CAMACHO, J. R. **Análise de Motor a Relutância Variável Monofásico Utilizando Elementos Finitos.** XIII CEEL, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

[37] OLIVEIRA, D. N., FERREIRA, G. B. **Método dos Elementos Finitos Como Ferramenta Didática para o Ensino de Eletrostática e Magnetostática.** XXXVII Congresso Brasileiro de Educação Em Engenharia. Fortaleza, Ceará. 12 a 15 de setembro de 2010.

ANEXO A – TABELA DE FIOS METALCORTE/EBERLE

CATÁLOGO DE FIOS METALCORTE/EBERLE

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

NOMENCLATURA	CLASSE TÉRMICA	APLICAÇÕES
EBM 180 Metalterm	H (180°)	É utilizado, em geral, para enrolamentos de motores e transformadores de todos os tipos, que sejam exigidas altas condições de temperatura.

NBR 6727/NBR 5428/NBR 6776

 - Aprovado pelo Underwrites Laboratories Inc. (UL)(E 155802)

TABELA DE DIMENSÕES

Bitola AWG	FIO DE COBRE NU						FIO DE COBRE ESMALTADO			
	Diâmetro(mm)			Secção	Resistência Elétrica	Intensidade de Corrente		GRAU 2 OU CAPA REFORÇADA		
						Prático	Segurança	Acréscimo do Isolante (mm)	Diâmetro Externo (mm)	Rigidez Dielétrica (V)
	nominal	min.	máx.	(mm²)	(Ω/m)	(A)	(A)	min.	máx.	min.
1	7,350	7,280	7,420	42,4	-	86,4	55,7	-	-	-
2	6,540	6,470	6,610	33,6	-	83,7	44,1	-	-	-
3	5,830	5,770	5,890	26,7	-	52,6	35	-	-	-
4	5,189	5,137	5,241	21,147	-	41,7	27,7	94	5,329	3700
5	4,620	4,574	4,666	16,764	-	33,1	22	91	4,755	3600
6	4,115	4,074	4,156	13,229	-	26,3	17,5	89	4,244	3500
7	3,665	3,628	3,702	10,550	-	20,8	13,8	86	3,787	3400
8	3,264	3,231	3,297	8,367	-	16,5	11	84	3,383	3300
9	2,906	2,877	2,935	6,633	-	13,1	8,7	81	3,020	3200
10	2,588	2,562	2,614	5,260	-	10,4	6,9	79	2,695	6200
11	2,304	2,281	2,327	4,169	-	8,2	5,5	76	2,408	6000
12	2,052	2,031	2,073	3,307	-	6,5	4,4	74	2,151	5800
13	1,829	1,811	1,847	2,627	-	5,2	3,5	71	1,923	5600
14	1,628	1,612	1,644	2,082	-	4,1	2,7	81	1,732	6325
15	1,450	1,435	1,465	1,651	-	3,3	2,2	76	1,547	6175
16	1,290	1,277	1,303	1,307	-	2,6	1,7	74	1,384	6000
17	1,151	1,139	1,163	1,040	-	2	1,3	71	1,240	5850
18	1,024	1,014	1,034	0,8235	-	1,6	1,1	66	1,110	5700
19	0,912	0,903	0,921	0,6533	0,026	1,3	0,86	64	0,993	5550
20	0,813	0,805	0,821	0,5191	0,033	1	0,68	58	0,892	5400
21	0,724	0,717	0,731	0,411	0,042	0,81	0,54	56	0,798	5250
22	0,643	0,637	0,649	0,3247	0,054	0,64	0,43	53	0,714	5125
23	0,574	0,568	0,580	0,2588	0,068	0,51	0,34	51	0,643	5000
24	0,511	0,506	0,516	0,2051	0,085	0,41	0,27	48	0,577	4850
25	0,455	0,450	0,460	0,1626	0,108	0,32	0,21	46	0,516	4725
26	0,404	0,400	0,408	0,1282	0,137	0,25	0,17	43	0,462	4600
27	0,361	0,357	0,365	0,1024	0,172	0,20	0,13	41	0,417	4500
28	0,32	0,317	0,323	0,0804	0,218	0,16	0,11	41	0,373	4375
29	0,287	0,284	0,290	0,0647	0,272	0,18	0,084	38	0,338	4250
30	0,254	0,251	0,257	0,050	0,348	0,10	0,067	36	0,302	4150
31	0,226	0,223	0,229	0,0401	0,441	0,078	0,053	33	0,274	3825
32	0,203	0,200	0,206	0,0324	0,548	0,063	0,042	30	0,249	3525
33	0,180	0,177	0,183	0,0254	0,700	0,050	0,033	28	0,224	3250
34	0,160	0,157	0,163	0,0201	0,890	0,039	0,026	25	0,193	2975
35	0,142	0,139	0,145	0,0158	1,136	0,032	0,021	23	0,176	2750
36	0,127	0,124	0,130	0,0127	1,427	0,025	0,017	20	0,160	2525
37	0,114	0,111	0,117	0,0102	1,781	0,020	0,013	20	0,145	2325
38	0,102	0,099	0,105	0,0082	2,239	0,016	0,010	18	0,130	2150
39	0,089	0,086	0,092	0,0062	2,968	0,012	0,008	15	0,114	1975
40	0,079	0,076	0,082	0,0049	3,800	0,009	0,006	15	0,102	1800
41	0,071	0,068	0,074	0,0040	4,747	0,008	0,005	13	0,091	1675
42	0,064	0,061	0,067	0,0032	5,973	0,006	0,004	10	0,081	1525
43	0,056	0,053	0,059	0,0025	7,560	0,005	0,003	10	0,074	1400
44	0,051	0,048	0,054	0,0020	9,115	0,004	0,002	10	0,069	1300

Após Planos
RST 453, Km 2,2 - Distrito Industrial - Cx Postal 938 - CEP: 95110-590 - Caxias do Sul - RS - Fone: (0xx54) 3025 9500 Fax: (0xx54) 3025 9514
Fundição
Rua Dom José Bares, 1501 - Exposição - CEP: 95080-100 - Caxias do Sul - RS - Fone: (0xx54) 3026 3100 Fax: (0xx54) 3026 3135
Eberle Motores Elétricos
BR 116, KM 145, nº 5.000 - São Ciro - CEP: 95059-520 - Caxias do Sul - RS - Fone: (0xx54) 3026 3400 Fax: (0xx54) 3026 3401
www.metalcorte.com
metalcorte@metalcorte.com



EBERLE
MOTORES ELÉTRICOS
Uma empresa Metalcorte

A Metalcorte/Eberle se reserva o direito de alterar as especificações técnicas deste produto, sem prévio aviso - MKT/ Maio 2005

ANEXO B – SCRIPT LUA PARA OBTENÇÃO DAS INDUTÂNCIAS

Foi utilizado o script abaixo para o cálculo das indutâncias próprias e mútuas da MRV de 4.27 cv:

```
-----
--SIMULAÇÃO DA MRV 8X6 20NM – 8,54 CV
--variável para contagem
k=0

name="C:\\Users\\danih\\Figura.bmp"
ext=".bmp"
outfile=openfile("C:\\Users\\danih\\indutancia_propria.txt","w")
outfile2=openfile("C:\\Users\\danih\\indutancia_mutua.txt","w")

--Define o modo de edição
mi_seteditmode("group")

--Comando para variação de corrente
for i=1,45 do
--Modifica o valor de corrente no Circuito 1
mi_modifycircprop("Circuito 1",1,i)

--Comando para variação da posição do rotor
for n=0,60 do
    k=k+1
    --Processamento da solução
    mi_analyze()
    mi_loadsolution()

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

    --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 indutância 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*0.00198963))*(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*0.00198963))*(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*0.00198963))*(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 com base nas coordenadas do ponto
--central do desenho da MRV (87.5606413669113,92.8860404869314)
mi_selectgroup(8)
mi_moverotate(87.5606413669113,92.8860404869314,-1)
end

--Retorna o rotor para posição inicial
mi_selectgroup(8)
mi_moverotate(87.5606413669113,92.8860404869314,1)
end

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

```

O script desenvolvido para o cálculo das indutâncias para a MRV de 8.54 cv será mostrado a seguir:

```

--SIMULAÇÃO DA MRV 8X6 20NM – 8,54 CV
--variável para contagem
k=0

name="C:\\Users\\danih\\Figura.bmp"

```

```

ext=".bmp"
outfile=openfile("C:\\Users\\danih\\indutancia_propria.txt","w")
outfile2=openfile("C:\\Users\\danih\\indutancia_mutua.txt","w")

--Define o modo de edição
mi_seteditmode("group")

--Comando para variação de corrente
for i=1,75 do
--Modifica o valor de corrente no Circuito 1
mi_modifycircprop("Circuito 1",1,i)

--Comando para variação da posição do rotor
for n=0,60 do
    k=k+1
    --Processamento da solução
    mi_analyze()
    mi_loadsolution()

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

    --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 indutância 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*0.00315835))*(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*0.00315835))*(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*0.00315835))*(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 com base nas coordenadas do ponto
--central do desenho da MRV (100.000030968074,102.681238411515)
mi_selectgroup(8)
mi_moverotate(100.000030968074,102.681238411515,-1)
end

--Retorna o rotor para posição inicial
mi_selectgroup(8)
mi_moverotate(100.000030968074,102.681238411515,1)
end

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

```
