

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM MOTOR BLDC COM CONFIGURAÇÃO
HALBACH PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Franco Alisson Martins Vieira

Niterói
Outubro de 2019

UFF - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM MOTOR BLDC COM CONFIGURAÇÃO
HALBACH PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Franco Alisson Martins Vieira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Henrique Nogueira Dias

Niterói

Outubro de 2019

(Espaço reservado para a ficha catalográfica)

FRANCO ALISSON MARTINS VIEIRA

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM MOTOR BLDC COM CONFIGURAÇÃO
HALBACH PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e Telecomunicações.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Daniel Henrique Nogueira Dias, D.Sc. (Orientador)
UFF – Universidade Federal Fluminense

Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc.
UFF – Universidade Federal Fluminense

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.Ing.
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Niterói
Outubro de 2019

“Não procure os erros, procure uma solução.”

Henry Ford

Agradecimentos

À Universidade Federal Fluminense (UFF) por proporcionar um ensino gratuito e de qualidade indiscutível.

À minha família pelo constante incentivo: aos meus pais por terem me dado a orientação necessária no decorrer da minha vida e aos meus irmãos que sempre serviram de exemplo, além de serem grandes amigos.

Ao meu orientador Daniel Dias, pela confiança depositada em mim desde o início do curso. Pelo apoio, incentivo, interesse e atenção durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus professores do curso de Mestrado pelos conhecimentos transmitidos.

Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para a chegada desse momento.

Expresso aqui toda a minha gratidão.

Resumo

O desenvolvimento e a pesquisa de motores elétricos mais eficientes estão diretamente relacionados à questão ambiental e atrelados à busca por sistemas de propulsão mais seguros, limpos e econômicos. Esses são os principais fatores que estimulam o desenvolvimento de propulsão elétrica no setor de transporte. Diante desse cenário, esta dissertação mostra a importância do motor de ímãs permanentes sem escova (*Brushless Direct Current* – BLDC) para a aplicação em propulsão elétrica. O objetivo do trabalho é analisar a configuração Halbach para arranjos de ímãs permanentes no rotor de um motor BLDC. A implementação dessas configurações no programa ANSYS foi executada para verificar as seguintes características: a maximização da densidade de fluxo magnético no entreferro da máquina, o incremento na capacidade de transmissão de torque e a possibilidade de utilização de rotor com material paramagnético. Para tanto, são desenvolvidas diferentes configurações de motores BLDC com arranjo Halbach, a partir do motor BLDC convencional. As configurações com arranjo Halbach são realizadas modificando a área do ímã e o material do rotor. O estudo comparativo é realizado por meio das análises magnetostática e de regime permanente. Os resultados comprovam que quanto maior o fluxo do entreferro, maior é o desempenho do torque para um mesmo valor de corrente solicitada. Todas as configurações Halbach com rotor do tipo ferromagnético apresentaram uma capacidade de transmissão de torque superior ao motor BLDC. Para os arranjos com o rotor do tipo paramagnético, uma configuração entre as três propostas superou a capacidade de transmissão de torque do caso convencional. A alta eficiência observada em todas as configurações estudadas evidencia o motivo pelo qual o motor BLDC é uma das principais escolhas quando se trata de tração para veículos elétricos. Fica comprovado que o arranjo Halbach proporciona aumento na densidade de fluxo no entreferro, incremento no torque e redução no peso ao motor BLDC.

Palavras-chave: Motor BLDC; Arranjo Halbach; Propulsão Elétrica; Método dos Elementos Finitos; Veículos Elétricos Leves.

Abstract

The development and research of more efficient electric motors are directly related to the environmental issue and linked to the search for safer and more economical propulsion systems. These are the main factors to stimulate the development of electric propulsion in the transport industry. Given this scenario, this thesis shows the importance of the Brushless Direct Current (BLDC) motor for the application in electric propulsion. The proposal of this work is to analyze the Halbach configuration for permanent magnet arrays on the rotor of a BLDC motor. The implementation of these configurations in the ANSYS Program was performed to verify the following characteristics: maximization of magnetic flux density in the machine air gap, increase in torque transmission capacity and the possibility of using a rotor with paramagnetic material. For this, different configurations of Halbach array BLDC motors are developed from the conventional BLDC motor. Halbach array configurations are performed by modifying the magnet area and rotor material. The comparative study is performed by magnetostatic analysis and steady state analysis. The results show that the higher the air gap flow, the higher the torque performance for the same requested current value. All Halbach ferromagnetic rotor configurations present a higher torque transmission capacity than the BLDC motor. For the paramagnetic rotor arrangements, a configuration among the three proposals exceeded the torque transmission capability of the conventional motor. The high efficiency observed all over the studied configurations show why the BLDC motor is one of the main choices when it comes to traction for electric vehicles. The Halbach arrangement is proven to provide increased air gap flow density, increased torque and reduced weight for the BLDC motor.

Keywords: BLDC Motor; Halbach Array; Electric Propulsion; Finite Element Method; Light Electric Vehicles.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Abreviaturas	xv
Lista de Símbolos	xvi
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Motivação.....	4
1.3 Objetivos	5
1.4 Estrutura da dissertação.....	6
Capítulo 2 - Propulsão elétrica	7
2.1 Histórico da propulsão elétrica.....	7
2.2 Cenário da propulsão elétrica internacional	8
2.3 Cenário da propulsão elétrica nacional	12
2.4 Vantagens da propulsão elétrica.....	13
2.5 Desvantagens da propulsão elétrica	14
2.6 Motores elétricos aplicados à propulsão	14
2.6.1 Motores de indução	15
2.6.2 Motores síncronos de relutância comutada	15
2.6.3 Motores de corrente contínua com escova	15
2.6.4 Motores de ímãs permanentes	16
2.6.4.1 PMSM	17
2.6.4.2 BLDC	17
Capítulo 3 - Motor de ímãs permanentes sem escova e o arranjo Halbach.....	19
3.1 Ímãs permanentes e fluxo magnético	19
3.2 Motor Brushless DC (BLDC)	21
3.3 Princípio de funcionamento	22
3.4 Configurações de motores BLDC	24
3.4.1 Motores de fluxo radial	24
3.4.2 Motores de Fluxo Axial.....	26
3.5 Arranjo Halbach	27
3.6 Motores BLDC com arranjo Halbach	28
Capítulo 4 - Metodologia e modelo proposto.....	30

4.1	Método dos elementos finitos aplicado ao eletromagnetismo	30
4.1.1	Equações de Maxwell.....	30
4.1.2	Equações de Poisson no plano	31
4.1.3	Condições de contorno	32
4.1.4	Método dos elementos finitos	33
4.1.5	Método de Galerkin.....	34
4.1.6	Características de uma solução computacional por elementos finitos	36
4.1.7	Plataforma de simulação	37
4.2	Modelagem do motor BLDC convencional	37
4.2.1	RMxpert	38
4.2.1.1	Parâmetros gerais	39
4.2.1.2	Estatador.....	39
4.2.1.3	Parâmetros da ranhura.....	41
4.2.1.4	Enrolamentos do estator.....	41
4.2.1.5	Rotor.....	42
4.2.2	Maxwell-2D	44
4.2.3	Simplorer.....	44
4.3	Implementação do arranjo Halbach no motor BLDC	46
Capítulo 5 - Análise de resultados.....		51
5.1	Seleção das melhores topologias.....	51
5.2	Resultados da análise magnetostática	53
5.2.1	Densidade de fluxo magnético	53
5.2.2	Linhas de fluxo magnético	55
5.2.3	Densidade de fluxo magnético no entreferro	57
5.3	Resultados da análise do regime permanente.....	59
5.3.1	Motores Halbach do tipo ferromagnético versus motor BLDC convencional.....	60
5.3.1.1	Comparativo de velocidade.....	60
5.3.1.2	Comparativo de torque.....	61
5.3.1.3	Comparativo de torque versus velocidade	62
5.3.1.4	Comparativo de eficiência.....	63
5.3.1	Motores Halbach com rotor do tipo paramagnético versus motor BLDC convencional.....	63
5.3.1.1	Comparativo de velocidade.....	63
5.3.1.2	Comparativo de torque.....	64
5.3.1.3	Comparativo de torque versus velocidade	65
5.3.1.4	Comparativo de eficiência.....	65
Capítulo 6 - Conclusões e trabalhos futuros.....		67

6.1	Conclusões	67
6.2	Trabalhos futuros.....	69
	Referências bibliográficas	71

Lista de Figuras

Figura 1 – Classificação dos motores elétricos	2
Figura 2 – Diagrama esquemático de um navio com sistema convencional	10
Figura 3 – Diagrama esquemático de um navio com IEP	11
Figura 4 – Curva de desmagnetização para os principais tipos de ímãs.....	19
Figura 5 – Motor BLDC típico	21
Figura 6 – Seção transversal do motor CC convencional.....	23
Figura 7 – Diagrama dos blocos básicos de um motor BLDC	23
Figura 8 – Forma de onda para o motor BLDC.....	24
Figura 9 – Motor BLDC de rotor interno	25
Figura 10 – Motor BLDC de rotor externo.....	25
Figura 11 – Configurações do motor BLDC com fluxo axial	26
Figura 12 – (a) Ímãs axiais. b) Ímãs radiais. (c) Campo magnético resultante no arranjo Halbach.....	27
Figura 13 – Arranjo Halbach cilíndrico e o fator k	27
Figura 14 – a) Condições de contorno de Dirichlet. b) Condições de contorno de Neumann .	33
Figura 15 – Representação de elemento triangular	34
Figura 16 – Interface de escolha da máquina no RMxprt.....	38
Figura 17 – Modelo proposto para o estator no RMxprt	40
Figura 18 – Curva BxH do material escolhido para o núcleo do estator e do rotor	40
Figura 19 – Tipo da ranhura	41
Figura 20 – Distribuição dos enrolamentos do estator	42
Figura 21 – Geometria do rotor	43
Figura 22 – Seção transversal do motor BLDC.....	43
Figura 23 – Seção do motor BLDC no Maxwell-2D	44
Figura 24 – Inversor do motor BLDC no Simplorer	45
Figura 25 – Circuito PWM para o acionamento do motor BLDC no Simplorer	45
Figura 26 – Configurações de motor BLDC com arranjo Halbach.....	46
Figura 27 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 1	47
Figura 28 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 2	47
Figura 29 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 3	47
Figura 30 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 4.....	48

Figura 31 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 5	48
Figura 32 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 6	48
Figura 33 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 7	49
Figura 34 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 8	49
Figura 35 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 9	49
Figura 36 – Densidade de fluxo magnético para as configurações com rotor do tipo ferromagnético.....	54
Figura 37 – Densidade de fluxo magnético para as configurações com rotor do tipo paramagnético.....	54
Figura 38 – Linhas de fluxo magnético para as configurações com rotor do tipo ferromagnético.....	55
Figura 39 – Linhas de fluxo magnético para as configurações com rotor do tipo paramagnético.....	56
Figura 40 – Valores extremos das linhas de fluxo magnético dos oito casos estudados.....	56
Figura 41 – Densidade de fluxo magnético no entreferro para as configurações com rotor do tipo ferromagnético.....	57
Figura 42 – Densidade de fluxo magnético no entreferro para as configurações com rotor do tipo paramagnético	58
Figura 43 – Densidade de fluxo magnético médio no entreferro para as oito configurações ..	58
Figura 44 – Gráfico comparativo entre o material utilizado no rotor pela área dos ímãs Halbach.....	59
Figura 45 – Comparativo de velocidade para os casos com rotor do tipo ferromagnético	61
Figura 46 – Comparativo de torque para os casos com rotor do tipo ferromagnético	62
Figura 47 – Curva de torque versus velocidade para os casos com rotor do tipo ferromagnético	62
Figura 48 – Comparativo de eficiência para os casos com rotor do tipo ferromagnético	63
Figura 49 – Comparativo de velocidade para os casos com rotor do tipo paramagnético	64
Figura 50 – Comparativo de torque para os casos com rotor do tipo paramagnético	64
Figura 51 – Curva de torque versus velocidade para os casos com rotor do tipo paramagnético	65
Figura 52 – Comparativo de eficiência para os casos com rotor do tipo paramagnético	66

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Comparação do motor PMSM com o motor BLDC	16
Tabela 2 – Comparação do motor CC convencional com o motor BLDC.....	22
Tabela 3 – Dados gerais Hyperion ZS4045-12T	38
Tabela 4 – Parâmetros gerais da máquina elétrica	39
Tabela 5 – Dados de entrada do estator	39
Tabela 6 – Dimensões da ranhura.....	41
Tabela 7 – Parâmetros do rotor.....	42
Tabela 8 – Densidade de fluxo no entreferro e área dos ímãs para as configurações Halbach propostas	51

Lista de Abreviaturas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
BEV – *Battery Electric Vehicles*
BLDC – *Brushless Direct Current*
BMW – *Bayerische Motoren Werke*
CA – Corrente Alternada
CC – Corrente Contínua
CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz
EDP – Energias de Portugal
EUA – Estados Unidos da América
IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IM – *Induction Motor*
IEP – *Integrated Electric Propulsion*
PHEV – *Plug-in Hybrid Vehicles*
PMBDC – *Permanent Magnet Brushed Direct Current*
PMSM – *Permanent Magnet Synchronous Machine*
PROSUB – Programa de Desenvolvimento de Submarinos da Marinha
RMxprt – *Rotating Machine Expert*
SRM – *Switched Reluctance Motor*
UFF – Universidade Federal Fluminense
US – *United States*
USS – *United States Ship*
VEs – Veículos Elétricos Leves

Lista de Símbolos

\vec{A} – Vetor potencial magnético

B – Densidade de fluxo magnético

D – Densidade de fluxo elétrico

E – Intensidade de campo elétrico

H – Intensidade de campo magnético

J – Densidade superficial de corrente elétrica

M_r – Magnetização residual do material ferromagnético

ρ – Densidade de carga

μ – Permeabilidade magnética

ε – Permissividade elétrica

σ – Condutividade elétrica

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Considerações iniciais

Em busca de um futuro sustentável, é cada vez mais nítido que a mobilidade elétrica proporcione um aumento da eficiência energética na sua utilização em automóveis, navios, trens, aviões e outros meios de transporte, com uma redução significativa nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) que provocam aquecimento global e outros problemas relacionados à poluição [1] e [2]. Devido ao constante aumento das exigências globais com relação à redução do uso dos combustíveis fósseis e à procura por “energias limpas”, juntamente com a busca por sistemas de propulsão com altos desempenhos mais seguros e econômicos, surge a necessidade do desenvolvimento de motores elétricos mais eficientes, com alta densidade de potência e baixo custo [3] e [4].

A aceitação do mercado mundial por veículos elétricos leves (VEs) ocorreu de maneira substancial nos últimos anos devido ao seu enorme potencial em aumentar a competitividade econômica e industrial e, assim atrair investimentos nos principais mercados em desenvolvimento. O apoio contínuo e os compromissos para com o aumento da implantação de VEs na indústria automotiva sugerem que essa tendência não diminuirá na próxima década. De fato, o aumento no volume de vendas somado à crescente concorrência no desenvolvimento de novas tecnologias tende a contribuir para reduções contínuas no custo de fabricação dos VEs, principalmente as baterias, componente de maior custo. Isso reforça a necessidade dos VEs ocuparem uma fatia desse mercado em expansão e, talvez, um papel de liderança na evolução do transporte em todos os modais [5].

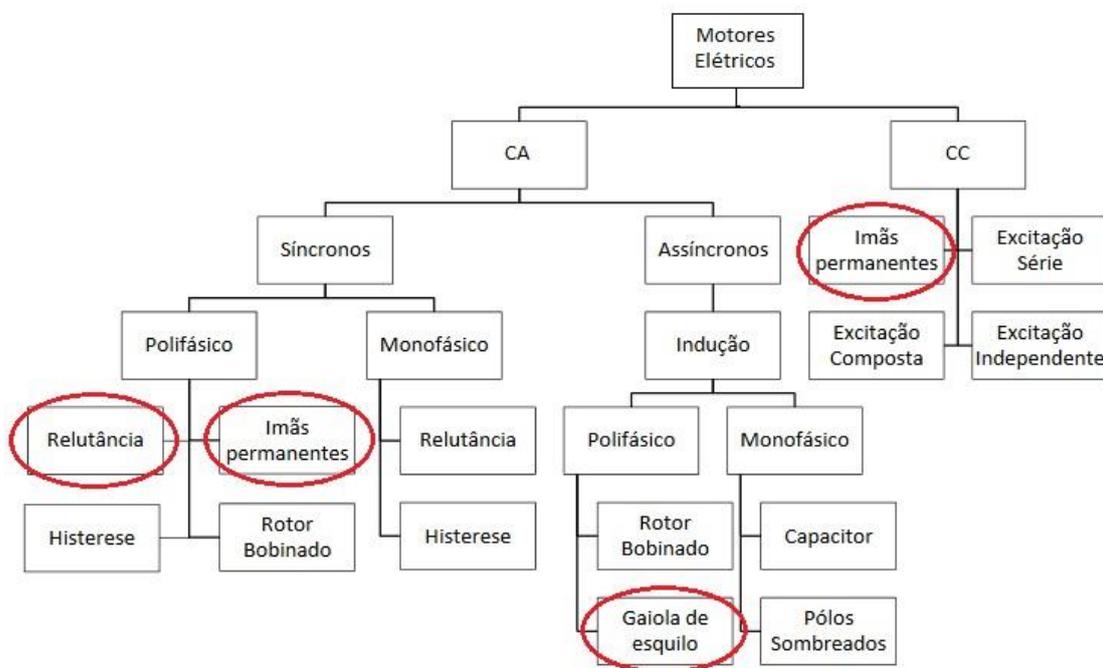
No mesmo caminho, o número de navios de propulsão elétrica em construção também tem aumentado. Inclusive, o uso de propulsão elétrica já é bastante comum nos dias de hoje tanto em navios de cruzeiro comerciais como em navios e submarinos militares. Espera-se que essa tendência continue em aceleração no futuro, devido ao avanço das tecnologias recentes que procuram aumentar a densidade da potência e reduzir o volume e o peso dos motores elétricos, o que permitirá que navios possam se beneficiar das vantagens associadas à propulsão elétrica [6] e [7].

A NASA também vislumbra na propulsão elétrica a melhoria da qualidade de condução e o desempenho das aeronaves para o futuro da aviação. Os principais benefícios incluem o maior controle de velocidade e a redução de ruídos nas aeronaves, além de benefícios ambientais e econômicos [8].

Além da aplicação em mobilidade elétrica, os motores elétricos são utilizados em diversas outras aplicações de uso industrial, doméstico, hospitalar, entre outras [9].

Existem vários tipos de motores elétricos, os principais estão ilustrados na Figura 1. São cinco tipos de motores que se destacam na aplicação envolvendo propulsão elétrica: o motor de indução (*Induction Motor – IM*), o motor de ímã permanente de corrente contínua com escovas (*Permanent Magnet Brushed Direct Current – PMBDC*), o motor de relutância comutada (*Switched Relutance Motor – SRM*), o motor de ímã permanente sem escova (*Brushless Direct Current – BLDC*) e o motor síncrono de ímãs permanentes (*Permanent Magnet Synchronous Motor – PMSM*) [10] e [11].

Figura 1 – Classificação dos motores elétricos



Fonte: elaborada pelo autor.

Devido à sua simplicidade e robustez, com características construtivas e de operação favoráveis, os motores de indução formam o tipo mais comum e amplamente utilizado em aplicações industriais. Eles são mais baratos e a relação tamanho/peso torna-se menos

importante à medida que os veículos aumentam (por exemplo, caminhões, ônibus e navios) [12]. Uma alternativa para os motores de indução é o motor de corrente contínua. Porém, o principal obstáculo na sua aplicação é a presença das escovas e do comutador, que limitam a potência dos motores e exigem manutenção constante. Os motores de relutância comutada (SRM) são de construção simples e robusta. Por outro lado, possuem as desvantagens de ondulação de torque e de ruído acústico inconvenientes, que não impedem o seu uso em VEs [13]. Os motores de ímãs permanentes (PMSM e BLDC) são mais caros devido ao uso de elementos de terras raras em seus ímãs. No entanto, possuem mais eficiência, e a relação de tamanho/peso torna-se mais significativa à medida que os veículos tornam-se menores (aviões ultraleves, VEs e bicicletas elétricas) [14].

Os motores BLDC, foco desta dissertação, operam com o fluxo de campo gerado por ímãs permanentes localizados no rotor e enrolamentos de armadura inseridos no estator da máquina. A literatura indica diversas vantagens dos motores BLDC em comparação aos motores de indução e motores de corrente contínua [9]:

- máquina compacta e maior densidade de potência devido à presença dos ímãs permanentes;
- maior densidade de fluxo no entreferro com melhor desempenho dinâmico;
- alta eficiência;
- facilidade de controle do motor pelo ajuste da corrente;
- redução de ruído;
- vida útil mais longa;
- simplificação da construção e da manutenção.

Com a competitividade do mercado em busca de projetos cada vez mais eficientes e com menores custos, soluções para melhorar a eficiência, o desempenho e as características dos motores elétricos são procurados avidamente. Um arranjo que permite a obtenção de uma maior densidade de fluxo e que eleva a capacidade de transmissão de torque em um motor BLDC é o Halbach. Essa aplicação consiste em organizar os ímãs do rotor geometricamente de forma a aumentar o enlace do fluxo no entreferro da máquina [15]. No entanto, para a

compreensão do seu funcionamento e dos fenômenos físicos associados a essa aplicação é necessária a utilização de ferramentas e métodos consolidados que permitam o seu melhor dimensionamento.

A avaliação eletromagnética com o uso de elementos finitos tem sido cada vez mais importante na fase de projeto de um motor elétrico. Essa ferramenta consiste basicamente em determinar o comportamento da máquina dividindo a sua geometria complexa em pequenas partes e resolvendo a equação do sistema para cada um desses elementos. Quanto maior o número de elementos, mais próximo da realidade serão os resultados obtidos pela simulação.

1.2 Motivação

Com o advento dos ímãs permanentes de alta densidade de energia, os motores BLDC vêm difundindo fortemente a sua utilização como propulsão elétrica nos diversos setores de mobilidade elétrica, estabelecendo-se como uma das melhores e mais atrativas opções por oferecerem maior densidade de potência e eficiência operacional, características tão desejadas nesse ambiente altamente competitivo [15].

Inicialmente adotado em aplicações domésticas e industriais, a utilização dos motores BLDC em propulsão elétrica tem conquistado novos mercados. Os veículos totalmente elétricos e os veículos híbridos utilizam motores BLDC, inclusive carros mais modernos como o Toyota Prius NHW20 [9].

Por envolver aspectos técnicos e econômicos, diversas soluções teóricas podem ser encontradas na construção de um motor elétrico. Com a competitividade do mercado na procura de equipamentos com alto desempenho e menores custos, a busca por alternativas que tragam soluções mais eficientes, sustentáveis e econômicas deve ser explorada. Entretanto, não são encontradas soluções analíticas adequadas que representem geometrias complexas e que descrevam os efeitos do eletromagnetismo, a não linearidade dos materiais e as fontes de campo não estáveis. Por conseguinte, os métodos numéricos como os Elementos Finitos, aplicados em programas computacionais, são utilizados para realizar os estudos necessários para melhorar a qualidade dos produtos e dos projetos. Esses são os principais motivos pelos quais a utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) tornou-se uma ferramenta amplamente usada na Engenharia Elétrica atualmente [16].

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar a configuração Halbach para arranjos de ímãs permanentes no rotor de um motor BLDC, com o emprego do MEF. Essa estratégia consiste em concentrar o fluxo magnético em um espaço lateral do rotor, com a geração de um campo magnético mais forte em comparação ao arranjo convencional, visando maximizar a densidade de fluxo no entreferro do motor e a melhoria da capacidade de transmissão de torque da máquina. A análise é feita com o uso do método dos elementos finitos, que estabelece o comportamento da máquina dividindo a sua geometria complexa em pequenos elementos por meio de simulação computacional. O programa computacional utilizado para a obtenção dos resultados é o Maxwell-2D da ANSYS. Para alcançar o objetivo esperado, contemplam-se as seguintes etapas:

- modelagem do motor BLDC e, posteriormente, a implementação de diferentes topologias e arranjos de ímãs permanentes com o uso da técnica Halbach através da interface gráfica Maxwell-2D;
- análise magnetostática para a obtenção de resultados da densidade de fluxo magnético no entreferro, densidade de fluxo magnético ao longo da máquina, intensidade e distribuição das linhas de campo magnético para todas as configurações;
- análise de regime permanente para a obtenção de resultados de torque, corrente, potência, velocidade e eficiência;
- comparação e discussão dos resultados.

1.4 Estrutura da dissertação

O texto é estruturado em seis capítulos. Este primeiro refere-se à introdução do trabalho e os demais são organizados conforme discutido abaixo:

Capítulo 2 – Aborda os patamares do desenvolvimento dos sistemas de propulsão elétrica no Brasil e no mundo. Também introduz as diversas aplicações em propulsão contendo motores elétricos.

Capítulo 3 – São apresentadas as características dos ímãs permanentes, as topologias de motores BLDC com ímãs permanentes e o seu conceito básico de funcionamento. O arranjo Halbach também é relatado.

Capítulo 4 – Neste capítulo são apresentadas as linhas de ação que resultaram nos parâmetros e as geometrias utilizadas nas simulações. É apresentado também o Método de Elementos Finitos para dispositivos eletromagnéticos. Os modelos são simulados em ambiente ANSYS/Maxwell, o motor BLDC de rotor externo, bem como outros motores BLDC, com o uso de diferentes geometrias com arranjo Halbach.

Capítulo 5 – São apresentados os resultados da simulação do motor BLDC com arranjo Halbach através do Método de Elementos Finitos. A análise dos resultados é realizada da seguinte forma: são selecionadas as melhores topologias de arranjo Halbach para serem comparadas ao motor BLDC por meio de análises magnetostática e de regime permanente.

Capítulo 6 – Trata das conclusões da dissertação e dos trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Propulsão elétrica

Este capítulo aborda o histórico da propulsão elétrica no mundo, mostrando as primeiras aplicações em automóveis, navios e submarinos e também na aviação. Os panoramas, em nível nacional e internacional, são apresentados com base nos recentes projetos executados com essa tecnologia e nas iniciativas em mobilidade elétrica. Além disso, são descritas as principais vantagens e desvantagens da propulsão elétrica. Por fim, será tratado o estado da arte dos principais motores elétricos utilizados e as suas aplicações.

2.1 Histórico da propulsão elétrica

As primeiras utilizações da propulsão elétrica datam do final do século XIX. O desenvolvimento dos veículos elétricos e híbridos começou há quase duzentos anos. Vários inventores na Europa e nos Estados Unidos da América receberam o crédito pelas primeiras invenções e pelo desenvolvimento de veículos elétricos no início do século XIX. Entretanto, foi na última década do século XIX que os veículos elétricos receberam mais atenção em seu desenvolvimento e encontraram as suas primeiras aplicações comerciais. Em Londres, foram produzidos 15 táxis elétricos, inaugurados em 1897. Uma fabricante americana produziu cerca de 500 veículos elétricos do modelo "Columbia" até o fim de 1898. No início do século XX, 38% dos automóveis americanos eram movidos por energia elétrica. Os Estados Unidos da América foi o país onde os veículos elétricos tiveram mais aceitação naquela época. No entanto, em 1920, a sua popularidade diminuiu devido ao preço do petróleo e ao início da produção em massa de veículos com motor de combustão interna, por Henry Ford, tornando-os amplamente acessíveis [17].

Os veículos elétricos desapareceram em 1935, até o seu ressurgimento no início da década de 1970, devido à crise do petróleo no Oriente Médio. A partir da década de 1990 até os dias de hoje, a razão para o desenvolvimento dos veículos elétricos não foi apenas a questão da energia, mas a realização da mobilidade de forma mais sustentável. Recentemente, devido ao avanço da tecnologia, uma tendência de eletrificação na indústria automotiva evoluiu e espera-se que revolucione a indústria [17].

A utilização de motores elétricos para aplicação em propulsão naval também não é uma inovação tecnológica recente. As primeiras aplicações envolvendo a propulsão elétrica nessa área ocorreram antes da Primeira Guerra Mundial, início do século XX. Em 1903, a primeira embarcação dotada de propulsão elétrica foi desenvolvida pela Rússia; o navio “Vandal” era uma pequena embarcação movida a baterias destinada ao transporte de passageiros. Em 1912, a Marinha Americana desenvolveu o “USS Jupiter” que possuía dois motores de indução bobinados (4.1 MW por eixo) e um turbo gerador para alimentá-los [7] e [18].

No período entre as duas grandes guerras, a Marinha Americana investiu fortemente em navios dotados de propulsão elétrica. No entanto, após a segunda guerra mundial, os motores a diesel predominaram e tomaram o lugar dos motores elétricos nos sistemas de propulsão de navios. Durante as décadas de 1980 a 1990, os avanços tecnológicos na área de eletrônica de potência tornaram a transmissão elétrica de energia mais eficiente e compacta. Além disso, o retorno do emprego da propulsão elétrica foi impulsionado, com interesse e desenvolvimento crescentes no setor naval, devido às exigências dos navios militares e dos navios de cruzeiro modernos [19] e [20].

Semelhante aos setores navais e automobilísticos, a aplicação de propulsão elétrica em aviões não é uma tecnologia atual. Em 1883, a primeira aeronave movida à bateria com propulsão elétrica foi prototipada quando o químico francês Tissandier ligou um motor elétrico da Siemens a um dirigível para acionar a sua hélice, conseguindo um primeiro voo em 1883. No entanto, a ascensão do motor de combustão interna e a subsequente invenção da turbina a gás transferiram rapidamente a aviação para essas fontes de potência rotativa, alimentadas por compostos derivativos de petróleo. Além disso, devido à sensibilidade das aeronaves à sua massa, a propulsão elétrica não foi realmente viável por muitos anos. O marco significativo seguinte só foi alcançado em 1973, quando o primeiro avião de asa fixa, tripulado com motor elétrico, fez o seu primeiro voo. Atualmente, as maiorias dos aviões elétricos estão em fase experimental [21] e [22].

2.2 Cenário da propulsão elétrica internacional

O mercado global de energia está mudando rapidamente à medida que novas inovações o tornam mais eficientes, e, portanto, expandindo-se para novas aplicações. Nesse

cenário, a propulsão elétrica apresenta um rápido crescimento na aplicação em veículos elétricos e híbridos, navios mercantes e militares, submarinos e, mais recentemente, na aviação.

O mercado de veículos elétricos está acelerando a transição da indústria em combustíveis fósseis para fornecedores de baterias e tecnologias com propulsão elétrica. Nos últimos dois anos, o seu crescimento na indústria automobilística foi impressionante. De fato, 2017 foi um marco para os automóveis com propulsão elétrica. As vendas de veículos totalmente elétricos BEV (*Battery Electric Vehicles*) e híbridos PHEV (*Plug-in Hybrid Vehicles*) superaram um milhão de unidades, pela primeira vez. No ano de 2018, foram comercializados mais de dois milhões de veículos elétricos [23]. A China é a líder mundial nesse mercado. Os Estados Unidos da América e o Japão seguem em segundo e terceiro lugar, respectivamente. A Noruega e a Alemanha, localizados na Europa, completam os cinco maiores mercados de veículos elétricos no mundo [24].

Nas indústrias aeroespaciais e de aviação, a aplicação da propulsão elétrica ainda está muito atrás dos veículos elétricos e do setor naval. Em todo o mundo, mais de 100 aeronaves movidas à eletricidade estão atualmente em desenvolvimento [25]. Sem dúvidas, a propulsão elétrica poderá causar uma mudança de paradigma devido ao seu potencial para tornar os voos mais silenciosos com emissões reduzidas, mais seguros e com custos menores [21].

Embora os veículos terrestres possam lidar com a massa adicional mais facilmente, nas aeronaves os desafios são bem mais complexos. Elas são muito mais sensíveis à massa devido aos sistemas elétricos de armazenamento e de propulsão não totalmente desenvolvidos. No entanto, a indústria já apresenta diversos modelos que podem revolucionar a aviação nos próximos anos. Assim como nos carros, o grande desafio dos aviões elétricos está na autonomia da bateria. Os modelos atualmente em teste podem realizar apenas voos curtos, de pouco mais de uma hora. Como solução, algumas empresas têm adotado o modelo de motores híbridos, com energia elétrica e combustíveis tradicionais [26]. Além disso, o desenvolvimento de sistemas de propulsão elétrica na aviação ainda é limitado para aeronaves pequenas devido à necessidade de uma alta densidade de potência dos motores elétricos de propulsão.

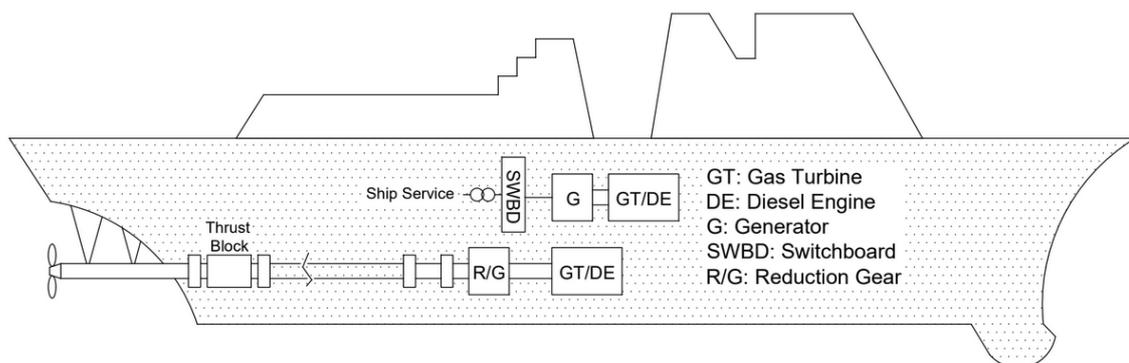
Hoje, os poucos motores elétricos disponíveis para propulsão de aeronaves têm uma potência menor que 100 kW. Grandes motores elétricos já são utilizados atualmente em trens,

navios e submarinos, onde a massa é menos importante em relação à aviação. Essas particularidades levam à forte necessidade do desenvolvimento de motores elétricos leves, projetados especificamente para aplicação em aeronaves [22].

Assim como os VEs, os navios movidos à propulsão híbrida ou elétrica voltaram a ser uma opção vantajosa com o aperfeiçoamento do controle de velocidade dos motores elétricos, através dos semicondutores de potência. É possível que o sistema de propulsão das embarcações consiga operar com valores de eficiência próximos ao nominal por toda a curva de potência, em todas as faixas de velocidade, reduzindo as emissões e o consumo de combustível [19] e [27].

Nos projetos navais que utilizam motores de combustão interna, a planta propulsora principal é independente da planta de geração de energia elétrica, que é chamada de auxiliar. Um novo conceito que permite que o todo o sistema elétrico do navio opere de forma integrada é o sistema elétrico de propulsão integrado IEP (*Integrated Electric Propulsion*), cujas fontes geradoras principais do navio são responsáveis tanto pela alimentação dos motores elétricos da propulsão como das cargas auxiliares. Antes do IEP ser introduzido, a maior parte dos navios empregava um sistema de energia convencional, ilustrado na Figura 2.

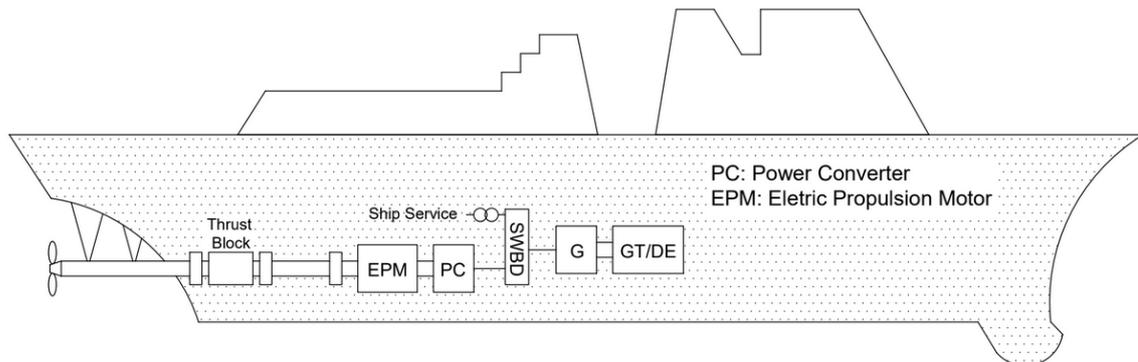
Figura 2 – Diagrama esquemático de um navio com sistema convencional



Fonte: elaborada pelo autor.

Os benefícios trazidos pelo IEP, ilustrado na Figura 3, aumentaram a demanda por energia elétrica tanto em navios militares como em navios civis (comerciais, transatlânticos e de pesquisas), estabelecendo-se dentro do setor naval [7], [17], e [28].

Figura 3 – Diagrama esquemático de um navio com IEP



Fonte: elaborada pelo autor.

Após a Segunda Guerra Mundial, a Marinha Americana, considerada a maior e mais poderosa do mundo, iniciou uma série de estudos para desenvolver máquinas avançadas com maior densidade de potência para aplicação em propulsão em navios de superfície (fragatas, destróieres, contratorpedeiros e cruzadores) e em submarinos [29]. A *US Navy* construiu o Navio Contratorpedeiro *USS Zumwalt*, dotado de IEP, com a presença de um sistema de geração (78MW) e de distribuição de energia fortemente integrado com o sistema de propulsão composto por dois motores de indução de 34 MW. O *Zumwalt* foi o primeiro navio totalmente elétrico da Marinha dos EUA [30].

Nos últimos anos, além da *US Navy*, as Marinhas Britânica e Francesa também conduziram grandes projetos de navios dotados com propulsão elétrica. O navio mais importante desenvolvido pela Marinha Britânica (*Royal Navy*), o porta-aviões *Queen Elizabeth*, é dotado de IEP com quatro motores de indução avançado de 20MW em seu sistema de propulsão [31]. A Marinha Francesa realizou a construção de navios de assalto anfíbio da classe *Mistral* dotados de IEP com motores elétricos de propulsão síncronos de 7MW [32].

Cerca de 90% do comércio mundial é transportado por mar, de acordo com as Nações Unidas. Sem dúvida, o maior desafio ecológico é o transporte comercial. A indústria naval também está atenta quanto ao desenvolvimento de navios híbridos e elétricos para reduzir a dependência de combustíveis fósseis nos navios mercantes, transatlântico e de transporte de passageiros [33].

Por meio da parceria entre a empresa alemã Siemens e o estaleiro Fjellstrand, foi construída na Noruega a primeira balsa elétrica sem emissões do mundo. Essa embarcação, em serviço desde o início de 2015, não emite gases de efeito estufa e opera de forma quase silenciosa.

O navio é totalmente operado com baterias, que são carregadas através de energia hidrelétrica local. Portanto, não há emissões diretas ou indiretas. A balsa, totalmente elétrica, percorre seis quilômetros 34 vezes por dia; cada viagem com duração aproximada de 20 minutos. O “*ferry*”, com 80 metros de comprimento, é movido por dois motores elétricos, cada um com uma potência de 450kW, alimentados por baterias de íons de lítio [34].

A Noruega é referência no setor. Ao longo da sua costa há pelo menos cinquenta rotas capazes de sustentar navios operados por bateria. Além disso, espera-se que as baterias se tornem consideravelmente mais eficientes e menos caras nos próximos anos, o que pode torná-la mais atrativa do que o diesel, fonte de combustível mais popular atualmente [34].

2.3 Cenário da propulsão elétrica nacional

No Brasil, a empresa WEG, a maior fabricante de motores elétricos da América Latina, é destaque na aplicação de propulsão elétrica no setor naval. A WEG oferece uma solução completa com motores, alternadores, automação e transformadores para o segmento naval. Mais de 60 embarcações já operam com o sistema diesel-elétrico fornecido pela empresa brasileira [35]. Além disso, a WEG também desempenha um papel estratégico na indústria de defesa nacional, na fabricação de motores elétricos e no fornecimento de peças para os novos submarinos convencionais para o Programa de Desenvolvimento de Submarinos da Marinha (PROSUB) [36].

Na indústria automobilística, os veículos elétricos e híbridos estão invadindo o mercado brasileiro. Com preços mais competitivos, muitos lançamentos chegarão ao país trazendo com eles uma tecnologia mais avançada e ecológica ao setor, com redução das emissões e aumento da eficiência energética em mobilidade. Para fomentar esse mercado, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) aprovou, em 2018, uma regulação específica para o segmento, que prevê a possibilidade de livre negociação de preços de recarga [37]. Por

meio dessa regulamentação, qualquer empresa poderá instalar um posto de recarga em uma rodovia ou em um estabelecimento comercial [38].

Segundo a CPFL Energia, um dos maiores grupos privados do setor elétrico brasileiro, o Brasil precisará de 80 mil eletropostos públicos até 2030 para acompanhar o ritmo de crescimento do mercado de veículos elétricos nacionais [38]. Por meio de uma parceria entre a BMW Brasil e a EDP, foi inaugurado o maior corredor para recarga de veículos elétricos da América Latina, localizado na Rodovia Presidente Dutra. As estações de recarga permitirão realizar uma viagem completa em veículo elétrico entre São Paulo e Rio de Janeiro, as duas cidades mais populosas do Brasil [39]. No mesmo caminho, já existe uma malha no sul, conhecida como Corredor Elétrico Sul, que interliga Curitiba (PR) a Florianópolis (SC) [40].

2.4 Vantagens da propulsão elétrica

Atualmente, quase a totalidade da mobilidade mundial utiliza a propulsão com motores de combustão interna. Em um motor de combustão interna, a energia mecânica é gerada pela queima de combustível que é transferida por um eixo motor para girar as rodas de veículos ou por uma engrenagem redutora para o eixo propulsor de navios. No entanto, na propulsão mecânica tradicional e em algumas condições de operação, o motor não opera na faixa de rendimento ótimo [7]. Por essa razão, o sistema de propulsão elétrica ou híbrido, instalado no lugar da propulsão convencional, pode melhorar consideravelmente os índices de desempenho do sistema propulsor [41]. Essa filosofia de projeto não é nova e, de fato, é encontrada em toda a indústria, em veículos terrestres e ferroviários, no segmento naval e na aviação. Dentro desses setores, a utilização de propulsão elétrica demonstrou ter vários benefícios, incluindo [19], [42], [43], [44]:

- maior eficiência e desempenho do sistema de propulsão, particularmente com carga parcial;
- redução nas emissões de poluentes;
- custos operacionais mais baixos devido ao menor consumo de combustível;
- custos de manutenção mais baixos em comparação com motores diesel;

- níveis de ruído e vibração reduzidos;
- flexibilidade de projeto: os equipamentos presentes na propulsão elétrica podem ser instalados em lugares diferentes, devido à realização da transmissão de energia por cabos;
- melhor controle de velocidade dos motores devido ao acionamento quase instantâneo dos semicondutores de potência.

2.5 Desvantagens da propulsão elétrica

As principais desvantagens e riscos associados à utilização da propulsão elétrica para mobilidade estão listadas a seguir [7], [19], [41]:

- custo inicial maior em comparação aos sistemas de propulsão baseados em motores de combustão;
- a tecnologia de baterias possui uma autonomia menor em comparação à quantidade de alcance de um tanque de combustível, principalmente na aviação;
- problemas de qualidade de energia produzidos por harmônicos pelos inversores de frequência na rede elétrica de um IEP.

2.6 Motores elétricos aplicados à propulsão

A busca pela definição das melhores alternativas que envolvam os motores elétricos para aplicação em propulsão elétrica está em plena evolução. As pesquisas relativas aos motores de propulsão buscam cada vez mais equipamentos que possuam os seguintes requisitos: formato compacto, confiabilidade, custo, peso e volume reduzidos, eficiência e baixo ruído. Para aplicações em propulsão de VEs, navios e na aviação, foram propostos diversos tipos diferentes de motores elétricos.

A seguir estão descritas as principais características de cada tipo de motor e a sua contribuição para aplicação em propulsão elétrica.

2.6.1 Motores de indução

Os motores de indução são os mais comuns na atualidade e os mais utilizados na indústria devido à sua simplicidade, à confiabilidade, à reduzida manutenção e ao seu baixo custo. Os motores de indução são divididos em dois tipos: rotor bobinado e o de gaiola de esquilo. Os motores com rotor bobinado não são muito utilizados em aplicações com propulsão elétrica devido à sua construção mais complexa, mais cara e com elevada manutenção [45].

Os motores de indução de gaiola de esquilo (IM) têm sido utilizados com sucesso em VEs, em veículos comerciais (ônibus e trens) e também em navios mercantes e militares [46]. A fabricante americana Tesla é a pioneira em automóveis que utilizam motores de indução.

2.6.2 Motores síncronos de relutância comutada

Os motores síncronos de relutância comutada ou SRM (*Switched Reluctance Motor*) são mais uma opção para o uso em propulsão elétrica. A construção do estator assemelha-se a de um motor de indução e o rotor é constituído por ferro laminado com polos salientes. Possuem construção robusta, controle simples e operação em alta velocidade. A sua principal vantagem em relação aos motores de ímãs permanentes é o seu bom funcionamento em temperaturas elevadas, o que pode levar à desmagnetização dos ímãs. Por outro lado, as maiores desvantagens desse tipo de motor são o alto *ripple* de torque e o ruído acústico. [45], [47] e [48].

2.6.3 Motores de corrente contínua com escova

Os motores CC com escovas são bem conhecidos pela sua capacidade de atingir alto torque em baixa velocidade e pelas suas características de velocidade de torque adequadas para a exigência de tração. O controle de velocidade, ajustado através do nível de tensão, é

adequado para impulsionar um veículo e fácil de ser controlado. Devido à essa característica, o seu sistema de acionamento é mais barato. No entanto, os motores CC com escovas têm uma construção volumosa, baixa eficiência, baixa confiabilidade e maior necessidade de manutenção, principalmente devido à presença do comutador mecânico e das escovas. É difícil reduzir o tamanho dos motores CC com escovas, tornando-os mais pesados e caros. Além disso, o atrito entre as escovas e o comutador restringe a velocidade máxima do motor. Com o aparecimento de novas tecnologias, principalmente com o advento dos ímãs permanentes, os motores CC perderam espaço [49].

2.6.4 Motores de ímãs permanentes

A principal vantagem dos motores ímãs permanentes é que eles são menores (para a mesma relação de potência) do que os motores de indução e os motores CC com escovas. No entanto, a sua principal desvantagem é o preço, devido ao custo dos ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro (NdFeB).

Os motores de ímãs permanentes podem ser divididos de acordo com a forma de onda da tensão induzida nos enrolamentos do estator: PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*) e BLDC (*Brushless Direct Current*) [47]. A Tabela 1 traz uma análise comparativa dos dois tipos de motores.

Tabela 1 – Comparação do motor PMSM com o motor BLDC

Propriedade	Motor PMSM	Motor BLDC
Densidade de fluxo	Senoidal	Quadrada
Excitação do campo	Senoidal	Trapezoidal
Densidade de potência	Menor	Maior
Custo	Maior	Menor
Velocidade	Devido à saliência no rotor, não é adequado para altas velocidades.	Adequado para altas velocidades.
Controle	Necessita de um sistema de controle mais sofisticado. O controle PMSM envolve a operação vetorial.	Chaveamento eletrônico com a utilização de transistores. Possui um controle do motor mais simples.

Fonte: elaborada pelo autor.

2.6.4.1 PMSM

O *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) possui uma construção semelhante ao motor síncrono. A forma de onda da tensão induzida nos enrolamentos do estator também é senoidal. A única diferença está no rotor. Ao contrário do motor síncrono, não há enrolamento no rotor do motor PMSM. O seu campo de excitação é produzido pelos ímãs permanentes do rotor.

Os motores PMSM são mais robustos do que os motores BLDC e mais compactos e leves em comparação com os motores de indução. São motores que possuem uma maior faixa de potência com tecnologia já comum no setor naval. A Indar, que fabrica equipamentos elétricos sob medida, possui em sua linha o motor síncrono de ímãs permanentes PMSM. Esse motor consegue suprir uma faixa de 800 kW até 11000 kW. A empresa espanhola já forneceu a tecnologia de propulsão elétrica para mais de 400 navios. O PMSM consegue atender diversos tipos de embarcação: navios de passageiros, navios de investigação, navios especiais (rebocadores, quebra-gelo e navios de pesca), navios de carga etc [50].

2.6.4.2 BLDC

Os motores BLDC possuem uma aplicabilidade voltada para propulsão elétrica em VEs. Esses veículos incluem bicicletas elétricas, carros, aeromodelos, entre outros. As montadoras utilizam geralmente: motor de indução, motor CC com escovas e o motor BLDC. Pesquisas recentes indicam que o motor BLDC pode competir com o motor de indução para propulsão de automóveis [51].

A maioria dos veículos híbridos e elétricos existentes, como o Toyota Prius, o Chevrolet Bolt, o Nissan Leaf e o BMW i3, utilizam motores com ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro (NdFeB) para propulsão elétrica [45]. De fato, os fabricantes de carros elétricos preferem os motores BLDC porque a eficiência é maior e o resfriamento do rotor é mais simples. Além disso, os motores BLDC também podem operar com “fator de potência unitário”, o que significa que o inversor pode operar em seus níveis máximos de eficiência. Os fabricantes de automóveis e cientistas esperam que o motor BLDC domine o mercado. [52].

O motor BLDC está presente também na aviação. Recentemente, a MagniX testou com sucesso um motor BLDC de 350 HP para um sistema de propulsão elétrica para aeronaves. Essa aeronave, totalmente elétrica, é voltada para voos de passageiros e cargas de até 1.000 milhas, proporcionando propulsão livre de emissões a baixos custos operacionais [53].

No capítulo 3, serão descritos o princípio de funcionamento e as principais características do motor BLDC, assim como a aplicação do arranjo Halbach para esse tipo de máquina.

Capítulo 3 - Motor de ímãs permanentes sem escova e o arranjo Halbach

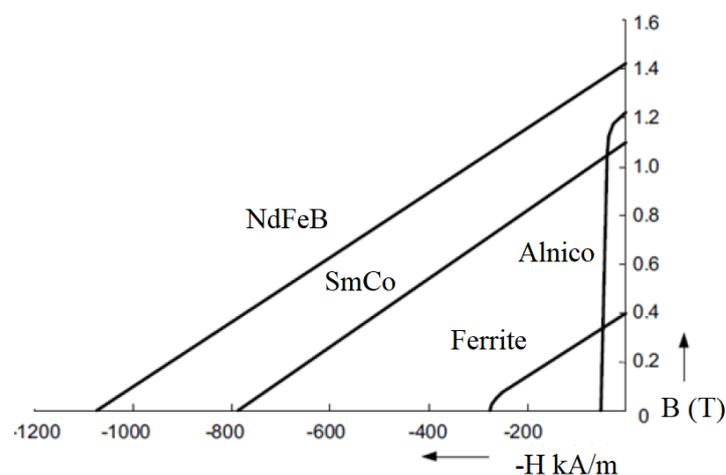
Neste capítulo, será apresentada uma breve revisão dos motores BLDC com ênfase no estudo dos ímãs permanentes, no seu princípio de funcionamento e nas diferentes possibilidades de configurações dos motores de ímãs permanentes sem escovas. Por último, será mostrado o arranjo Halbach, uma aplicação com finalidade de aumentar o torque produzido pelo motor BLDC.

3.1 Ímãs permanentes e fluxo magnético

O advento dos ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro, chamados de ímãs de terras raras, abriu novas oportunidades para o uso de topologias de máquinas não convencionais, foco da dissertação, permitindo projetos de máquinas com melhor desempenho, tipicamente em termos de mais eficiência ou maior relação torque-peso.

Os ímãs permanentes são capazes de produzir campo magnético no entreferro sem a necessidade de enrolamento de excitação e sem a dissipação de energia elétrica. A energia externa está envolvida apenas na mudança da energia do campo magnético, não da manutenção. Como qualquer outro material ferromagnético, um ímã permanente pode ser descrito pela sua curva de histerese, conforme mostrado na Figura 4 [9].

Figura 4 – Curva de desmagnetização para os principais tipos de ímãs



Fonte: elaborada pelo autor.

Pela curva de desmagnetização acima, é possível observar como um ímã se comporta quando está sujeito à magnetização de um campo externo. Em ímãs permanentes, é desejável uma elevada indução remanente para permitir a criação de campos elevados no circuito magnético, no qual o ímã está inserido, e um elevado valor de campo coercitivo para evitar a desmagnetização [9].

Existem três classes de ímãs permanentes que são utilizadas nos motores BLDC:

- alnicos (Al, Ni, Co, Fe);
- cerâmicos (ferrite);
- ímãs de terras raras (samário-cobalto e neodímio-ferro-boro).

A principal vantagem do alnico é a alta densidade de fluxo remanente magnético. No entanto, a sua força coercitiva é muito baixa e a curva de desmagnetização não é linear. Portanto, é muito fácil não só magnetizar, mas também desmagnetizar o alnico. Esse tipo de material dominou o mercado de motores de ímãs permanentes entre meados da década de 1940 até o final da década de 1960, quando os ferrites tornaram-se os materiais mais utilizados [9].

Os ferrites de bário e estrôncio foram inventados na década de 1950. Esse tipo de ímã possui uma força coercitiva maior do que a do alnico, mas, ao mesmo tempo, tem uma menor densidade de fluxo magnético remanente. As principais vantagens dos ferrites são o baixo custo e a sua alta resistência elétrica, o que significa que não há perdas de corrente de Foucault no volume do ímã [9].

Por último, os ímãs de terras raras possuem duas gerações. A primeira geração, ímãs permanentes de samário e cobalto, foi produzida no início da década de 1970. É um tipo de material magnético rígido, com a vantagem de possuir alta densidade de fluxo remanente, alta força coercitiva e curva de desmagnetização linear. É bem adequado para construir motores com baixo volume e alta densidade de potência. O seu elevado custo é o único inconveniente [9].

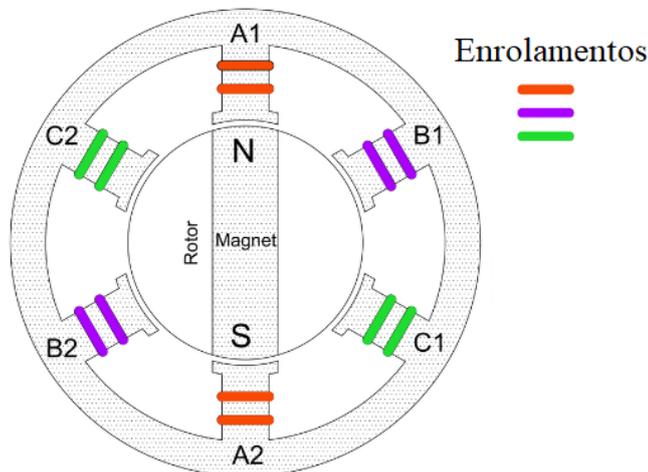
Com o desenvolvimento nos últimos anos de uma segunda geração de ímãs de terras raras de neodímio-ferro-boro, um progresso notável em relação à redução dos custos das matérias-primas foi alcançado. Essa nova geração possui propriedades magnéticas melhores do que os ímãs de samário e cobalto. No entanto, as principais limitações desses ímãs são a sua baixa temperatura de curie (temperatura em que o ímã perde suas propriedades

magnéticas) e o baixo coeficiente de temperatura de remanência e de coercitividade. Esses ímãs possuem um enorme potencial para melhorar consideravelmente a relação de desempenho e custo para muitas aplicações [9].

3.2 Motor Brushless DC (BLDC)

Como o próprio nome sugere, um motor sem escovas não necessita de anéis deslizantes ou de comutador mecânico, como é exigido em motores CC convencionais ou em máquinas de corrente alternada síncrona para conexão aos enrolamentos do rotor [54]. A construção dos motores BLDC também é semelhante aos dos motores síncronos de corrente alternada convencional. A Figura 5 ilustra a estrutura de um motor *Brushless* DC trifásico típico. Os enrolamentos do estator são similares a de um motor polifásico, e o rotor é composto de um ou mais ímãs permanentes. Para realizar o controle das chaves eletrônicas, é utilizado o sensor de efeito Hall, o mais comum. No entanto, alguns motores usam sensores ópticos. Os motores BLDC apresentam a forma de onda da força eletromotriz trapezoidal [9].

Figura 5 – Motor BLDC típico



Fonte: elaborada pelo autor.

Embora seja dito que os motores CC sem escovas e os motores CC convencionais são semelhantes em suas características estáticas, eles realmente têm diferenças notáveis em alguns aspectos [56]. A Tabela 2 compara as vantagens e desvantagens desses dois tipos de motores. A principal diferença entre os dois tipos de motores é a comutação. Em um motor

CC convencional, a comutação é realizada por escovas e comutador. Já no motor BLDC, são utilizados dispositivos semicondutores, como transistores [9].

Tabela 2 – Comparação do motor CC convencional com o motor BLDC

Motor CC convencional	Motor BLDC
Comutação utilizando escovas.	Comutação eletrônica, geralmente utilizando sensores de posição hall.
Requer manutenção periódica.	Requer menos manutenção devido à ausência das escovas.
Vida útil mais curta.	Vida útil longa.
Em velocidades mais altas, o atrito da escova aumenta, reduzindo o torque útil.	Permite a operação em todas as velocidades com carga nominal.
Eficiência moderada.	Não há queda de tensão nas escovas. Portanto, possui mais eficiência.
A inércia do rotor é maior. Isso limita a característica dinâmica.	A inércia do rotor é baixa porque tem ímãs permanentes no rotor. Isso melhora a resposta dinâmica.
A faixa de velocidade é menor. Permite limitações mecânicas pelas escovas.	A faixa de velocidade é maior. Portanto, nenhuma limitação mecânica é imposta por escovas ou comutador.
Devido à presença de escovas, apresentam ruído.	Baixo ruído.
Custo menor.	Devido à presença de ímãs permanentes, possui um custo de construção mais elevada.
Sistema de controle mais simples e barato.	Sistema de controle mais complexo e caro.

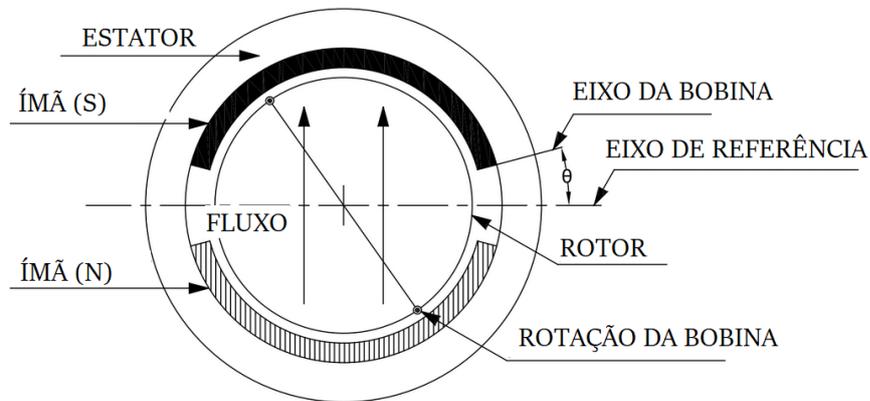
Fonte: elaborada pelo autor.

3.3 Princípio de funcionamento

A Figura 6 mostra a comutação de um rotor de um motor CC elementar girando em um campo magnético fixo, que é produzido por 2 polos, nesse caso, um norte (N) e outro sul (S). Nesse tipo de motor, o sentido da corrente que percorre a espira é realizado através da escova, acompanhado de comutador. A comutação ocorre no instante em que a posição

angular do rotor é tal que a tensão induzida é nula, mantendo a rotação no mesmo sentido [54].

Figura 6 – Seção transversal do motor CC convencional

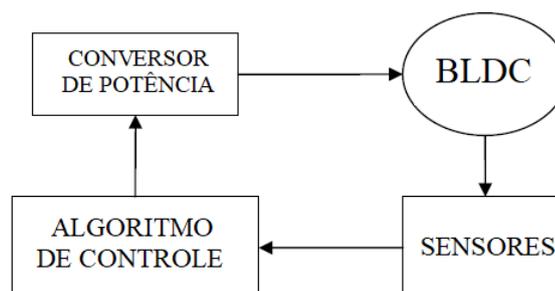


Fonte: elaborada pelo autor.

Já um motor BLDC é definido como uma máquina síncrona de ímãs permanentes com realimentação da posição do rotor. Os motores sem escovas geralmente são trifásicos e controlados, utilizando uma ponte semicondutora. O motor requer um sensor de posição do rotor para fornecer a sequência de comutação adequada. Com base na posição do rotor, os dispositivos de potência são comutados sequencialmente. Diferente da comutação da corrente da armadura que usa escovas, a comutação eletrônica elimina os problemas associados à escova e ao arranjo do comutador, por exemplo, faíscas e desgastes, tornando assim um BLDC mais robusto em comparação a um motor CC convencional [57].

O motor BLDC, conforme o diagrama de blocos básico mostrado na Figura 7, possui quatro elementos principais: conversor de potência, algoritmo de controle, sensores de posição e o motor. Basicamente, é um motor eletrônico que requer um inversor trifásico que atua ao receber o pulso lógico de comutação dos sensores de posição [57].

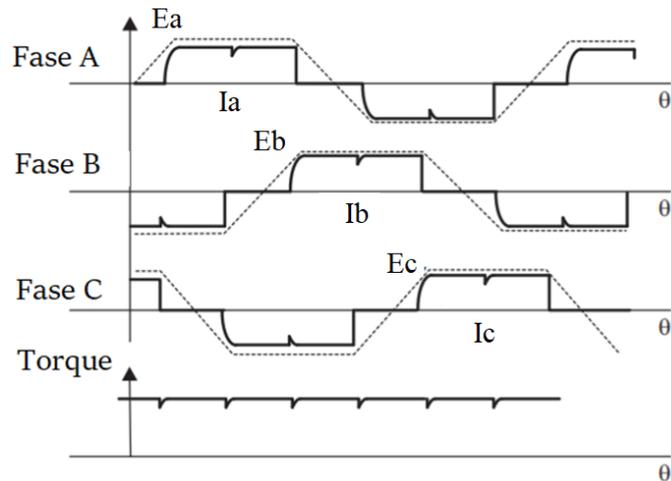
Figura 7 – Diagrama dos blocos básicos de um motor BLDC



Fonte: elaborada pelo autor.

A comutação de um motor BLDC trifásico é realizada energizando uma fase positivamente e a outra fase negativamente, deixando a terceira aberta, conforme ilustrado na Figura 8. A forma de onda da força eletromotriz gerada em um motor BLDC é trapezoidal e a corrente de armadura possui a forma de uma onda quadrada.

Figura 8 – Forma de onda para o motor BLDC



Fonte: elaborada pelo autor.

3.4 Configurações de motores BLDC

Dependendo do tipo de aplicação, existem diferentes possibilidades de configurações para os motores BLDC com ímãs permanentes. A seguir, serão mostradas com mais detalhes as possibilidades de configurações dos motores BLDC, de acordo com a direção do fluxo: radial ou axial.

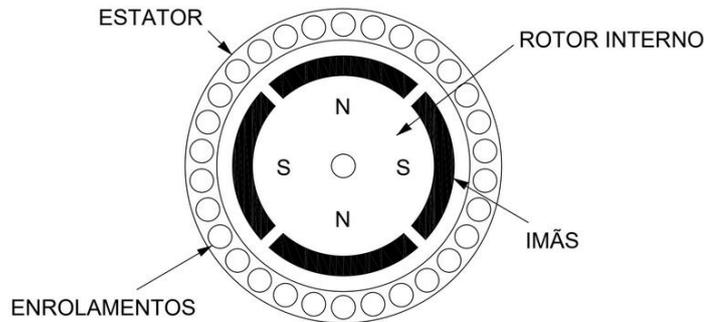
3.4.1 Motores de fluxo radial

Na maioria dos motores, o fluxo cruza do rotor para o estator na direção radial. Com base na posição relativa do estator e do rotor, o motor BLDC de fluxo radial pode ser classificado como [57], [58] e [59]:

- Rotor interno - Os ímãs permanentes incorporados no rotor estão no centro da máquina, que é envolvida pelos enrolamentos do estator, conforme ilustrado na Figura 9. Esse tipo de motor fornece um diâmetro menor. Suas principais vantagens são a facilidade de

resfriamento do estator, a alta velocidade e a baixa inércia. A principal desvantagem é a dificuldade de montagem dos enrolamentos.

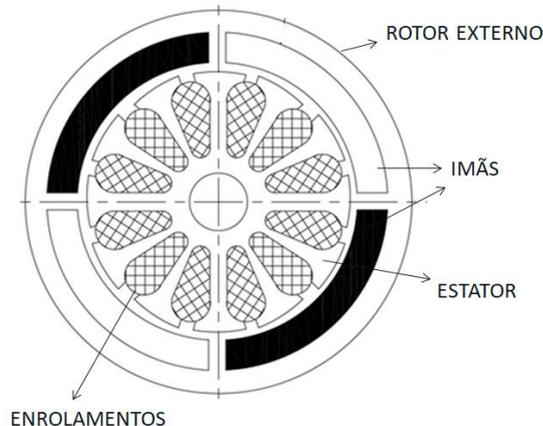
Figura 9 – Motor BLDC de rotor interno



Fonte: elaborada pelo autor.

- Rotor externo - As bobinas do estator formam o centro (núcleo) do motor enquanto que os ímãs permanentes giram dentro de um rotor que rodeia o estator, de acordo com a Figura 10. Em geral, os motores BLDC de rotor externo são utilizados em aplicações de velocidade contínua e possuem como vantagens mais facilidade e menor custo de fabricação por apresentarem uma distribuição mais econômica dos ímãs em sua construção, em comparação às outras topologias de motor de ímãs permanentes sem escova. Apresentam vantagens como: elevado torque e baixa velocidade, em comparação a um motor de rotor interno do mesmo tamanho. Devido ao raio mais elevado do rotor em relação ao estator é possível a utilização de mais polos. A sua principal desvantagem é a localização dos enrolamentos no núcleo do motor, que dificulta o processo de resfriamento do estator.

Figura 10 – Motor BLDC de rotor externo

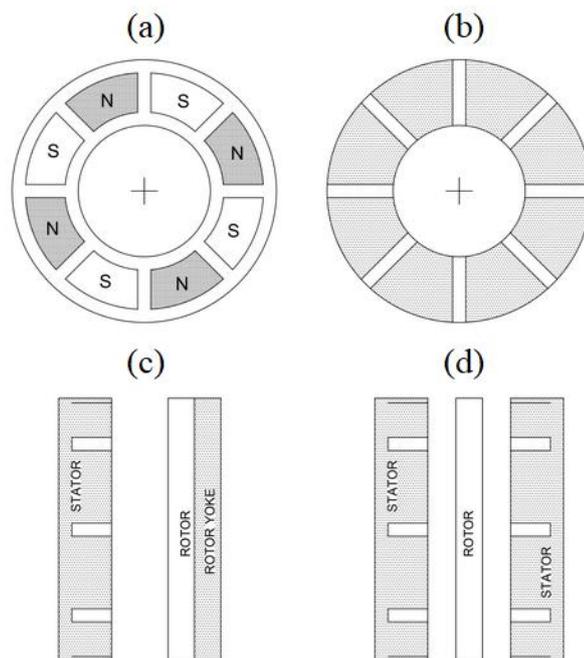


Fonte: elaborada pelo autor.

3.4.2 Motores de Fluxo Axial

O motor BLDC de fluxo axial é uma alternativa atraente ao motor de fluxo radial devido à sua construção compacta e à alta densidade de potência. Nesses motores, o fluxo flui na direção axial e os enrolamentos são orientados ao longo da direção radial. A Figura 11 (a) mostra uma visão de um rotor com ímãs de polaridade alternada. Esses ímãs produzem um fluxo axial que interage com enrolamentos em *slots* radiais, conforme ilustra a Figura 11 (b). Em muitas aplicações, um rotor é acoplado a um estator como mostrado na Figura 11 (c), configuração que possui elevado torque e força axial devido aos ímãs do rotor que tentam fechar o entreferro. A Figura 11 (d) mostra uma configuração com dois estatores, topologia que apresenta melhor desempenho devido às forças no rotor serem equilibradas [54].

Figura 11 – Configurações do motor BLDC com fluxo axial



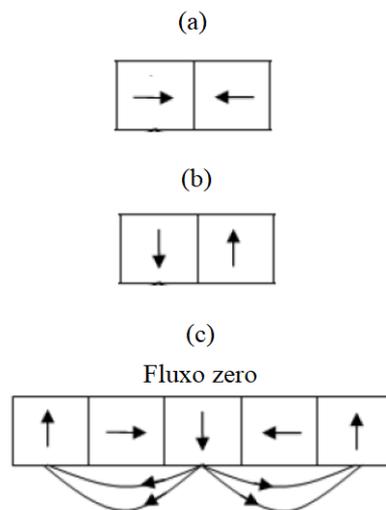
Fonte: elaborada pelo autor.

Tanto na concepção como na análise, os motores de fluxo axial apresentam uma topologia mais complicada em comparação com os motores de fluxo radial. Isto se deve ao fato de possuírem forças de atração axial mais elevada e mudanças de dimensões com raio, e também ao torque, que não é produzido por meio de um raio constante como acontece em motores radiais cilíndricos [54].

3.5 Arranjo Halbach

É um conjunto de ímãs orientados de maneira específica de modo a maximizar o campo magnético em uma direção preferencial, reduzindo a dispersão e cancelando o campo no lado oposto. Isso é conseguido orientando os ímãs para que os seus pólos fiquem fora de fase, normalmente em 90° [9]. Essa nova configuração de ímãs permanentes é chamada de arranjo Halbach, conforme ilustrado na Figura 12: (a) os componentes de arranjo axial, (b) os componentes de arranjo radial e (c) a distribuição de fluxo magnético resultante do arranjo Halbach [61].

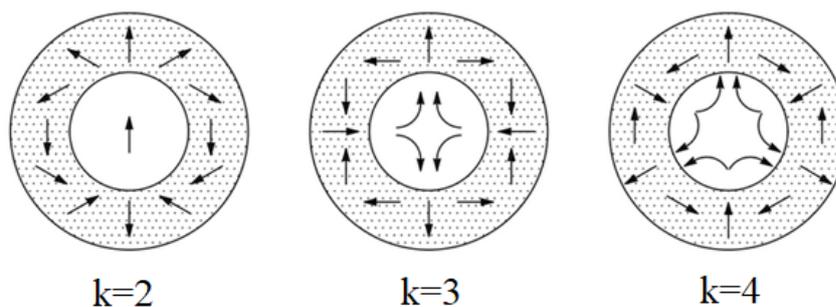
Figura 12 – (a) Ímãs axiais. b) Ímãs radiais. (c) Campo magnético resultante no arranjo Halbach



Fonte: elaborada pelo autor.

Além de configurações lineares ou planas, o arranjo Halbach também pode ser empregado em arranjos circulares ou cilíndricos (ver Figura 13).

Figura 13 – Arranjo Halbach cilíndrico e o fator k



Fonte: elaborada pelo autor.

A direção da magnetização para esse tipo de arranjo é dada por:

$$M = M_r \left[\cos\left((k-1)\left(\vartheta - \frac{\pi}{2}\right)\right)_r + \sin\left((k-1)\left(\vartheta - \frac{\pi}{2}\right)\right)_\theta \right]$$

Em que M_r é a magnetização residual do material ferromagnético. Um valor positivo de $k-1$ traz um campo magnético interno e um valor negativo traz um campo magnético externo. A Figura 13 mostra como fica o arranjo para cada fator k apresentado, em que o mais utilizado para motores BLDC é $k=4$ [62].

Embora ainda não seja comum, a aplicação do arranjo Halbach em motores BLDC oferece benefícios mensuráveis em relação aos projetos convencionais. Esse tipo de arranjo consegue confinar um campo magnético intenso no núcleo ferromagnético do motor. A adição de um ímã permanente com orientação tangencial entre os ímãs radiais concentra o fluxo magnético e fornece um aumento no componente fundamental da força eletromotriz, aumentando a capacidade de transmissão de torque da máquina. Outro facilitador é que a aplicação do arranjo Halbach não requer laminação ou ferro em volta, então o motor é essencialmente sem ferro no rotor. Isso reduz significativamente as perdas por correntes parasitas e histerese. A eliminação de ferro ou laminação também reduz o peso e a inércia, permitindo que o motor dê partida e pare mais rápido e alcance velocidades superiores para aplicações altamente dinâmicas. A principal desvantagem dos motores com arranjo Halbach é o custo e o processo relativamente trabalhoso de montagem dos ímãs [9], [61], [62].

3.6 Motores BLDC com arranjo Halbach

Praveen et al. [62], Milimonfared e Moghani [63] e Liu et al. [64] afirmam que o motor BLDC com arranjo Halbach apresenta as seguintes vantagens em comparação ao motor BLDC convencional:

- torque maior;
- variação de torque (*cogging torque*) menor;
- rotor sem necessidade de ferro em sua construção, com aumento da densidade da potência, redução do peso do motor e perdas no núcleo;
- menores perdas por corrente parasita.

Liu et al. [64] faz a comparação de um motor BLDC convencional com um motor BLDC com arranjo Halbach para aplicação em volante de inércia. Para essa aplicação, caso o custo não seja considerado, o motor Halbach é uma escolha ideal, pois além de apresentar as vantagens acima, também aumenta a inércia do volante.

Xue et al. [65] compara dois motores BLDC com as mesmas dimensões de estator e rotor, mas com diferentes tipos de disposição dos ímãs no rotor da máquina:

- dois segmentos de ímã por polo (1P2s);
- três segmentos de ímã por polo (1P3s).

Os dois motores apresentam torque superior ao motor BLDC com magnetização radial. O torque máximo no motor do arranjo Halbach 1P3s é ligeiramente maior do que o torque máximo no motor do arranjo Halbach 1P2s. No entanto, o motor 1P2s possui estrutura e fabricação mais simples [65].

Kumar [66] apresenta uma nova topologia do motor BLDC de fluxo radial de rotor duplo com arranjo Halbach visando aumentar a densidade de torque do motor. O projeto completo do motor é realizado e comparado com o motor BLDC de rotor duplo convencional das mesmas especificações e volume. O desempenho obtido no projeto proposto é considerado satisfatório. As características de comportamento de torque versus a corrente do motor com arranjo Halbach apresentam uma melhoria de 16% em comparação ao motor BLDC de rotor duplo convencional. Por essa vantagem, o autor afirma que os motores BLDC com arranjo Halbach são candidatos adequados para aplicações de alta densidade de torque, como veículos elétricos.

No capítulo 4, serão apresentados o Método de Elementos Finitos para dispositivos eletromagnéticos, os parâmetros construtivos do motor BLDC convencional e as geometrias propostas para a implementação do arranjo Halbach no rotor externo do motor BLDC.

Capítulo 4 - Metodologia e modelo proposto

O objetivo deste capítulo é mostrar os detalhes da implementação do modelo do motor BLDC por meio do método de elementos finitos (MEF). É apresentada a formulação básica do MEF e a sua aplicação em projeto de motores elétricos. Para isso, foi utilizado o software ANSYS que emprega o MEF na resolução de problemas físicos. São descritas as ferramentas utilizadas neste trabalho e que estão presentes na plataforma de simulação, bem como as etapas para a modelagem do motor BLDC. Por último, são apresentadas as configurações dos motores BLDC utilizando o arranjo Halbach, objetos de estudo do presente trabalho.

4.1 Método dos elementos finitos aplicado ao eletromagnetismo

A aplicação do MEF no eletromagnetismo nessa dissertação tem como objetivo desenvolver um modelo matemático fundamentado nas equações de Maxwell e nas leis de comportamento dos materiais por meio da discretização dos campos para a análise do problema de magnetostática aplicado a um motor BLDC. Para execução do programa, foi utilizado o método dos elementos finitos com simulação eletromagnética do tipo bidimensional. Esse item foi totalmente baseado nas referências [67], [68], [69], [70] e [71].

4.1.1 Equações de Maxwell

As equações de Maxwell são um conjunto de equações diferenciais usadas para descrever as propriedades dos campos elétricos e magnéticos, as quais são dadas abaixo:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (4)$$

Em que:

E – Intensidade de campo elétrico;

H – Intensidade de campo magnético;

D – Densidade de fluxo elétrico;
 B – Densidade de fluxo magnético;
 J – Densidade superficial de corrente elétrica;
 ρ – Densidade de carga.

Entre as intensidades e as densidades de fluxo elétrico e magnético existem ainda as seguintes relações, válidas para materiais isotrópicos lineares:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (6)$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (7)$$

μ – Permeabilidade magnética;
 ε – Permissividade elétrica;
 σ – Condutividade elétrica.

Para o estudo de campos magnéticos estáticos, os quais serão abordados mais adiante pelo método dos elementos finitos, necessita-se considerar apenas as equações 8, 9 e 10:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (9)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (10)$$

As equações acima são as equações fundamentais da magnetostática.

4.1.2 Equações de Poisson no plano

As equações de Maxwell são raramente solucionadas na forma em que estão colocadas nas expressões 8, 9 e 10, pois implicaria na busca de uma solução (analítica ou numérica) que satisfizesse as três equações simultaneamente, o que torna o processo de solução em geral mais difícil, sobretudo quando se procura uma solução numérica aproximada. Para tanto, introduz-se uma grandeza vetorial auxiliar chamada de "Vetor potencial" para facilitar a solução numérica. O vetor potencial magnético \vec{A} é definido de tal forma que a densidade de campo magnético B seja obtida por meio do seu rotacional:

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} \quad (11)$$

Considerando que a relação abaixo vale para qualquer função vetorial:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{A}) = 0 \quad (12)$$

Portanto, a definição do vetor potencial acima satisfaz a equação 9:

$$\nabla \cdot \vec{B} = \nabla \cdot (\nabla \times \vec{A}) = 0 \quad (13)$$

Substituindo a equação (10) na equação (11), obtém-se:

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (14)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \quad (15)$$

Aplicando o rotacional na equação (15) e substituindo na equação (8), resulta em:

$$\nabla \times \vec{H} = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (16)$$

Considerando-se apenas materiais isotrópicos lineares pode-se escrever ainda:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \mu \cdot \vec{J} \quad (17)$$

A expressão no lado esquerdo do sinal de igualdade pode ser expandida, resultando:

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} = \mu \cdot \vec{J} \quad (18)$$

Como:

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \quad (19)$$

No caso bidimensional, a equação de Poisson para a magnetostática toma a seguinte forma:

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \cdot \vec{J} \quad (20)$$

O operador ∇^2 é chamado de Laplaciano. Nas regiões do domínio em estudo em que J é zero, vale a equação de Laplace:

$$\nabla^2 \vec{A} = 0 \quad (21)$$

A expressão 20 representa uma equação diferencial parcial de segunda ordem, as quais descrevem os problemas conhecidos como "Problemas de valores de contorno". Escrita de uma forma mais explícita a equação:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu \cdot \vec{J} \quad (22)$$

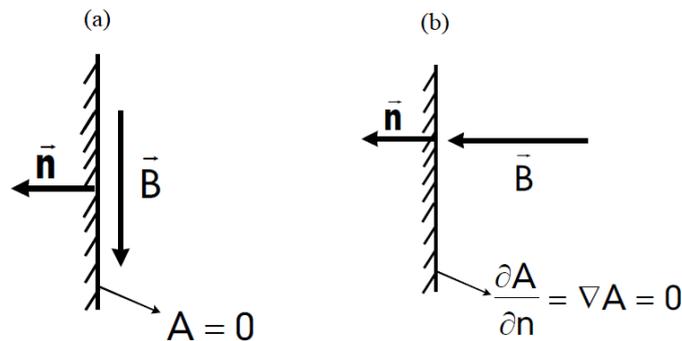
A determinação do campo nas direções x e y se reduz à determinação do potencial A (x,y), segundo essas direções. Como no caso de equações diferenciais ordinárias, a solução completa da Equação de Poisson depende dos valores do potencial na fronteira do domínio em estudo.

4.1.3 Condições de contorno

Os dois tipos mais comuns de condições de contorno (condições de fronteira) que ocorrem no eletromagnetismo são os seguintes:

1. Condição de Dirichlet: nessa condição, os potenciais são impostos e constantes ao longo da fronteira (em geral igual à zero). Devido a isso e à interpretação do potencial vetor magnético em duas dimensões, o vetor densidade de fluxo magnético é paralelo a uma fronteira definida com condição de Dirichlet, conforme mostrado na Figura 14 (a);
2. Condição de Neumann: a variação do potencial na direção perpendicular ao contorno é igual a zero. Neste caso, o vetor densidade de fluxo magnético é perpendicular à fronteira, conforme ilustra a Figura 14 (b).

Figura 14 – a) Condições de contorno de Dirichlet. b) Condições de contorno de Neumann



Fonte: elaborada pelo autor.

Uma vez definido o problema de valor de contorno que se deseja resolver, pode-se passar para a sua solução por meio do método dos elementos finitos.

4.1.4 Método dos elementos finitos

Após a definição do problema do tipo contínuo, com todos os pontos do domínio incluídos, o MEF transforma esse domínio contínuo em um domínio discreto.

O MEF pode ser derivado basicamente por dois caminhos:

1. Método de Ritz: as equações discretas são obtidas por meio da minimização de funções de energia, com a utilização de princípios variacionais.
2. Método de Galerkin: um caminho mais rápido para a derivação é a aplicação de métodos residuais para a obtenção das equações discretas. É um dos métodos residuais

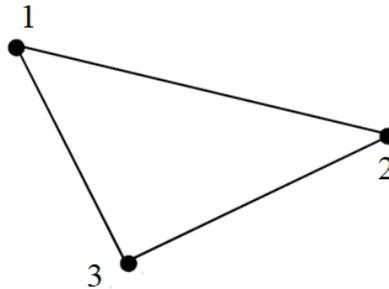
mais utilizados para aplicações no eletromagnetismo, o qual é objeto da descrição contida no item a seguir:

4.1.5 Método de Galerkin

Nesta dissertação, conforme citado no início deste capítulo, foi utilizado o método dos elementos finitos com simulação eletromagnética do tipo bidimensional. Por simplificação, será mostrada a formulação de um problema de magnetostática bidimensional usando elementos finitos. Para a resolução pelo método de Galerkin, as seguintes premissas são adotadas:

1. Representação em duas dimensões, sendo consideradas variações em função apenas das coordenadas x e y ;
2. Os elementos são triangulares e de primeira ordem: A variação do vetor potencial magnético no plano xy será determinada a partir de uma função polinomial de primeira ordem e cada elemento triangular será definido por somente três vértices.

Figura 15 – Representação de elemento triangular



Fonte: elaborada pelo autor.

Considerando-se o elemento triangular mostrado na Figura 15, obtém-se para a solução aproximada:

$$\bar{A}(x, y) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \beta_2 \cdot y \quad (23)$$

Onde a função $\bar{A}(x, y)$ fornece os potenciais nos nós 1, 2 e 3, obtém três equações que permitem determinar os coeficientes β_0 , β_1 e β_2 .

$$\bar{A}(x_1, y_1) = \bar{A}_1 \quad (24)$$

$$\bar{A}(x_2, y_2) = \bar{A}_2 \quad (25)$$

$$\bar{A}(x_3, y_3) = \bar{A}_3 \quad (26)$$

Portanto, os coeficientes β_0 , β_1 e β_2 podem ser determinados como:

$$\begin{pmatrix} \bar{A}_1 \\ \bar{A}_2 \\ \bar{A}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{2\Delta} \begin{pmatrix} x_2y_3 - x_3y_2 & x_3y_1 - x_1y_3 & x_1y_2 - x_2y_1 \\ y_2 - y_3 & y_3 - y_1 & y_1 - y_2 \\ x_3 - x_2 & x_1 - x_3 & x_2 - x_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{A}_1 \\ \bar{A}_2 \\ \bar{A}_3 \end{pmatrix} \quad (28)$$

$$2\Delta = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \quad (29)$$

Onde Δ é a área do triângulo em m^2 .

Considerando:

$$\begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{2\Delta} \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{A}_1 \\ \bar{A}_2 \\ \bar{A}_3 \end{pmatrix} \quad (30)$$

Reescrevendo a equação 22:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu \cdot \vec{J} \quad (31)$$

Dessa forma, o vetor potencial magnético depende da posição xy e está na direção z. Por meio do método residual de Galerkin, a equação (31) pode ser resolvida para todo o domínio. Dessa forma, o problema pode ser escrito matricialmente resultando na seguinte equação:

$$\frac{1}{4\mu^e 2\Delta} \begin{pmatrix} b_1^2 + c_1^2 & b_1b_2 + c_1c_2 & b_1b_3 + c_1c_3 \\ b_1b_2 + c_1c_2 & b_2^2 + c_2^2 & b_2b_3 + c_2c_3 \\ b_1b_3 + c_1c_3 & b_2b_3 + c_2c_3 & b_3^2 + c_3^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{A}_1 \\ \bar{A}_2 \\ \bar{A}_3 \end{pmatrix} = \frac{J^e \Delta}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (32)$$

$$[S][A] = [J] \quad (33)$$

Em que:

[S] - Matriz global com informações geométricas e magnéticas;

[A] - Vetor contendo o potencial magnético nos nós dos elementos;

[J] - Vetor contendo os valores das correntes nos nós.

O problema descrito pela equação 32 é somente para um elemento finito triangular. Para um problema composto por vários elementos finitos com N nós, a matriz [S] será quadrada com dimensão $N \times N$.

4.1.6 Características de uma solução computacional por elementos finitos

Nos itens anteriores, foram discutidas as formulações básicas do MEF aplicadas ao eletromagnetismo. A sua implementação é amplamente utilizada por meio de softwares para analisar o comportamento de dispositivos eletromagnéticos e obter respostas para inúmeros problemas de engenharia. A simulação computacional envolvendo MEF é realizada em três etapas:

- i) Pré-processamento;
- ii) Resolução do problema;
- iii) Pós-processamento.

O pré-processamento é onde o usuário fornece os dados de entrada com as informações pertinentes ao problema a ser resolvido, tais como a geometria, dados do material, permeabilidade relativa, condições de contorno, tipo de elemento, grau de refino da malha etc. A geometria pode ser simplificada de acordo com as simetrias.

O próximo passo da simulação é resolver o problema. Nela, a partir dos dados de entrada, são executadas as rotinas de cálculos pelas equações de elementos finitos aplicados ao eletromagnetismo, mostrado nos itens anteriores. Caso os cálculos tenham interação, então as informações de saída de dados são utilizadas para a realimentação da resolução do problema. Caso contrário, as informações serão passadas à última etapa para visualização.

Por fim, o módulo de pós-processamento, o usuário pode visualizar os resultados computacionais como a intensidade do campo magnético e a densidade do fluxo magnético. Grandezas como perdas, indutância, energia, força, entre outras também podem ser calculadas. O pós-processamento dá a chance ao usuário de modificar a geometria, os parâmetros do material ou a malha para obter resultados mais precisos.

4.1.7 Plataforma de simulação

A plataforma para modelagem e simulação do motor BLDC foi o ANSYS Electronics. Dentro dele, existem diversos outros programas secundários que foram utilizados na simulação: o RMxpert, o Maxwell e o Simplorer.

O RMxpert (*Rotating Machine Expert*) é uma ferramenta de projeto baseada em modelos para criar máquinas personalizadas. A plataforma utiliza a teoria analítica e os métodos de circuitos magnéticos equivalentes para calcular o desempenho da máquina e tomar as decisões iniciais de dimensionamento. O RMxpert desenvolve um projeto de uma máquina elétrica apenas com os parâmetros definidos pelo usuário, com diversas opções de máquinas elétricas existentes. O programa é capaz de configurar automaticamente a geometria, os materiais e as condições de contorno para um projeto em 2-D ou 3-D, para posterior análise em elementos finitos. No processo de inserção dos dados de projeto no RMxpert, o usuário deve especificar as dimensões do estator e do rotor da máquina e os parâmetros relacionados, como o tipo de máquina, o número de polos da máquina e o tipo de controle.

Já o ANSYS/Maxwell é uma ferramenta que realiza a simulação de campo eletromagnético de baixas frequências, utilizando a análise dos elementos finitos, resolvendo problemas eletromagnéticos pelas equações de Maxwell em uma região finita do espaço, com fronteiras apropriadas e condições iniciais especificadas pelo usuário para dispositivos eletromagnéticos ou eletromecânicos que sejam 2D ou 3D, como motores, transformadores, atuadores, sensores, bobinas etc.

Por último, o Simplorer é um editor de circuito eletrônico externo utilizado para integrar a máquina e o conversor de potência, responsável pelo circuito de acionamento do motor.

4.2 Modelagem do motor BLDC convencional

A tabela 3 resume os dados do motor Hyperion ZS4045-12T, projetado para a utilização em propulsão de aeromodelos. O motor apresenta uma faixa de corrente típica, provavelmente associada à variação na capacidade de troca térmica do motor, dependendo do fluxo de ar que passe por ele.

Tabela 3 – Dados gerais Hyperion ZS4045-12T

Peso	621 g
Kv	247 rpm/V
Tensão	24 v
Corrente de Magnetização	5,40 A
Resistência por Fase	0,028 Ω
Corrente Típica	55-85 A
Corrente Máxima	85 A
Potência Máxima	2900 W
Faixa de Tensão	22,2 – 44,4 V

Fonte: elaborada pelo autor.

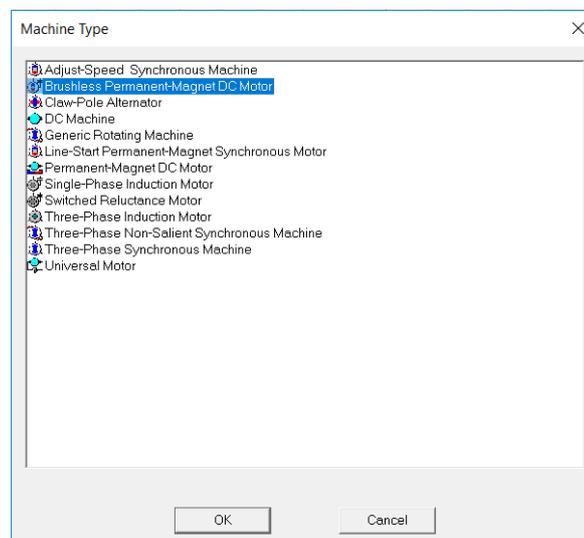
A modelagem do motor BLDC envolve duas etapas:

- dados de entrada dos parâmetros construtivos da máquina através do RMxpert;
- análise de elementos finitos por meio do Maxwell-2D.

4.2.1 RMxpert

Primeiramente, é necessário escolher qual máquina elétrica será projetada no RMxpert de acordo com a Figura 16.

Figura 16 – Interface de escolha da máquina no RMxpert



Fonte: elaborada pelo autor.

A janela de seleção de máquinas inclui todas as máquinas CA e CC disponíveis no programa, com cada máquina tendo as suas próprias dimensões predefinidas e as propriedades mecânicas. No RMxprt são inseridos todos os dados construtivos utilizados no processo de construção da máquina elétrica como tipos e dimensões do estator e rotor, tipo de material entre outros dados.

A seguir são mostrados passo a passo como foi modelado o motor BLDC no RMxprt:

4.2.1.1 Parâmetros gerais

Os parâmetros gerais da máquina são os seguintes:

Tabela 4 – Parâmetros gerais da máquina elétrica

Tipo de máquina	BLDC
Número de polos	14
Posição do rotor	Rotor externo

Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.1.2 Estator

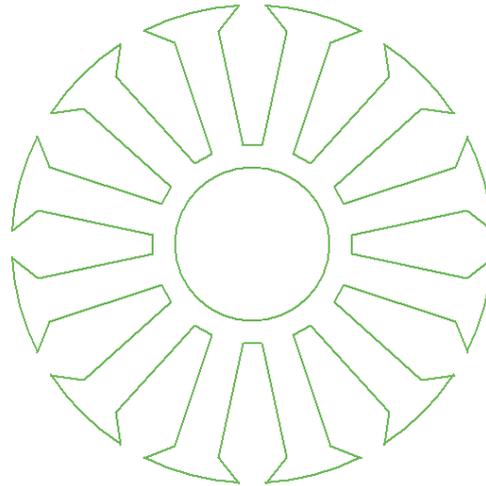
Os dados do estator são mostrados na Tabela 5 e o seu modelo mostrado na Figura 17.

Tabela 5 – Dados de entrada do estator

Diâmetro externo	40,1 mm
Diâmetro interno	13 mm
Comprimento	46,2 mm
Fator de empilhamento	0,95
Material	M36_29G_3DSF0.950
Número de ranhuras	12

Fonte: elaborada pelo autor.

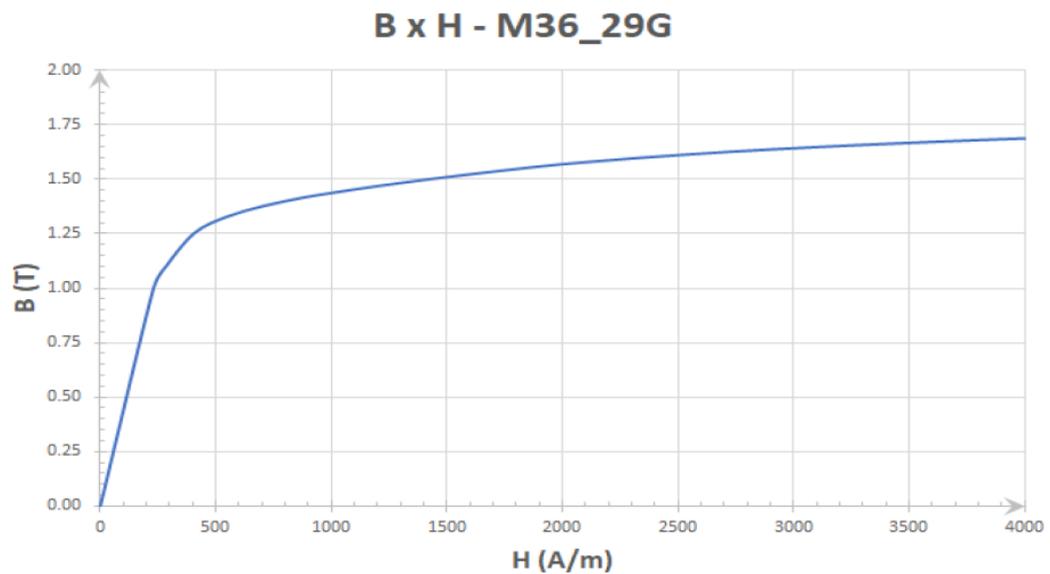
Figura 17 – Modelo proposto para o estator no RMxprt



Fonte: elaborada pelo autor.

De forma a evitar a saturação, o material escolhido para o núcleo do estator e do rotor foi o aço silício M36_29G_3DSF0.950, por ser um material de alta permeabilidade magnética, mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Curva BxH do material escolhido para o núcleo do estator e do rotor



Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.1.3 Parâmetros da ranhura

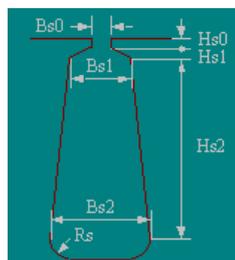
Detalhes sobre as dimensões e o tipo da ranhura são mostrados na Tabela 6 e na Figura 19.

Tabela 6 – Dimensões da ranhura

Hs0	0,001 mm
Hs1	2,2 mm
Hs2	9,55 mm
Bs0	2,22 mm
Bs1	5,7 mm
Bs2	1,64 mm
Rs	0 mm

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 19 – Tipo da ranhura

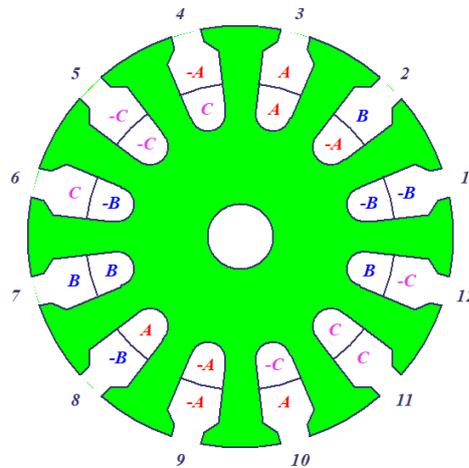


Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.1.4 Enrolamentos do estator

O tipo de enrolamento (ver Figura 20) utilizado no motor é conhecido como dLRK, nomeado em homenagem à Lucas, Retzbach e Küfuss que, em 2001, documentaram esse esquema em motores para aeromodelos.

Figura 20 – Distribuição dos enrolamentos do estator



Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.1.5 Rotor

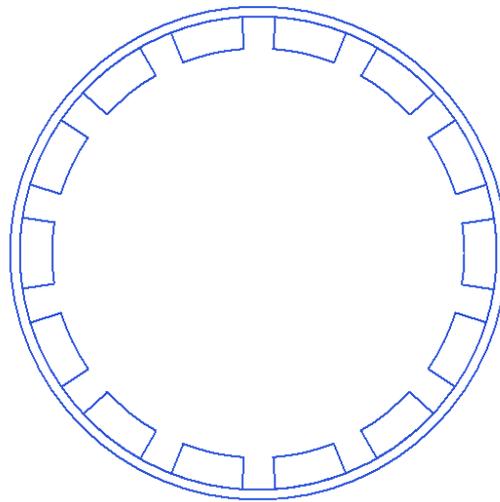
Os parâmetros do rotor são mostrados na Tabela 7. O rotor tem ímãs permanentes externos, como mostrado na Figura 21.

Tabela 7 – Parâmetros do rotor

Diâmetro externo	48,75 mm
Diâmetro interno	40,55 mm
Comprimento	46,2 mm
Fator de empilhamento	0,95
Material	Steel-Type: M36_29G
Porcentagem de ocupação	69,4%
Tipo de polo	1
Material	NdFe35
Espessura	3,1 mm

Fonte: elaborada pelo autor.

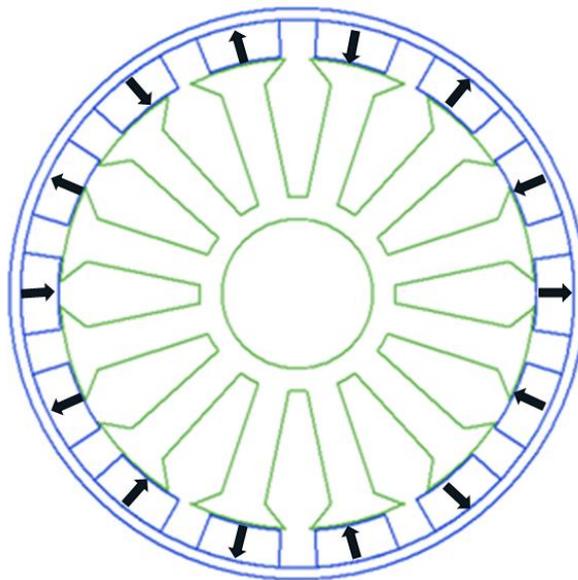
Figura 21 – Geometria do rotor



Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 22 mostra a seção transversal do motor BLDC criado após os passos descritos.

Figura 22 – Seção transversal do motor BLDC



Fonte: elaborada pelo autor.

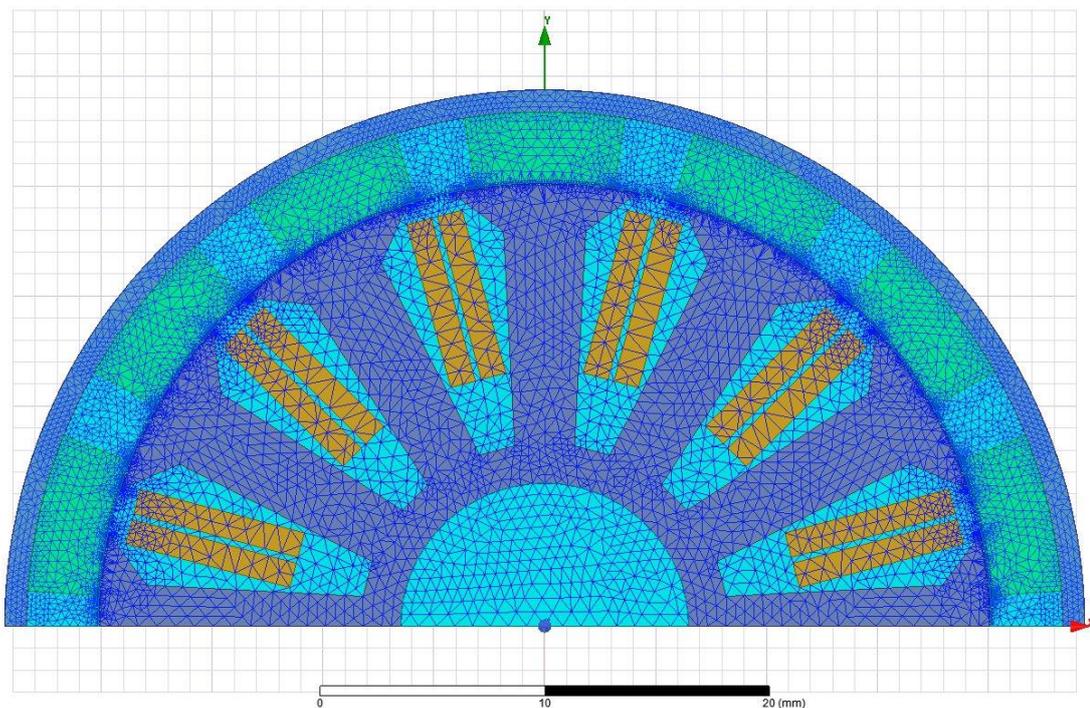
Após a modelagem do motor no RMxpert, existe uma opção no ANSYS para gerar tanto o modelo 2D no Maxwell quanto o modelo do circuito de acionamento no Simplorer, apresentados nos próximos itens.

4.2.2 Maxwell-2D

A geometria preparada no RMXprt é transferida para o ambiente Maxwell-2D. As excitações dos enrolamentos são atribuídas automaticamente e o próprio software decide a simetria na geometria, e a configuração do modelo são gerados com otimizações. As condições de contorno foram definidas como vetor potencial igual a zero no limite externo da máquina, ou seja, no raio externo do rotor.

A Figura 23 mostra o modelo do motor BLDC com o desenho final das malhas contendo um total de 7801 elementos. O modelo 2D do Maxwell otimiza o tempo de simulação, ao gerar a geometria do motor BLDC com simetria de 180°.

Figura 23 – Seção do motor BLDC no Maxwell-2D



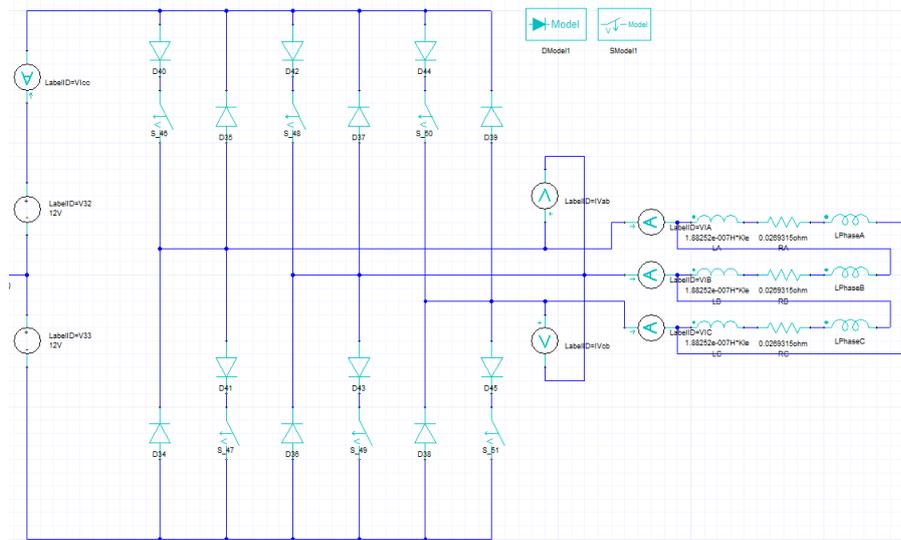
Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.3 Simplorer

A simulação do Maxwell foi realizada em conjunto com o Simplorer, outra ferramenta presente no ANSYS, responsável por simular concomitantemente o circuito de acionamento. O modelo do inversor gerado automaticamente a partir do RMXprt no software Simplorer é

mostrado na Figura 24. O circuito do inversor consiste de seis chaves Mosfet com diodos antiparalelos. Além do inversor, cada bobina do motor BLDC foi associada ao enrolamento de uma fase e cada enrolamento foi associado a uma indutância equivalente. Portanto, a corrente que passa nos enrolamentos do Maxwell depende do circuito do Simplorer, da mesma forma que a tensão induzida, representada pelas indutâncias “LPhase” no circuito do Simplorer, depende do Maxwell, de modo que essas variáveis são atualizadas em tempo real, a cada passo de simulação.

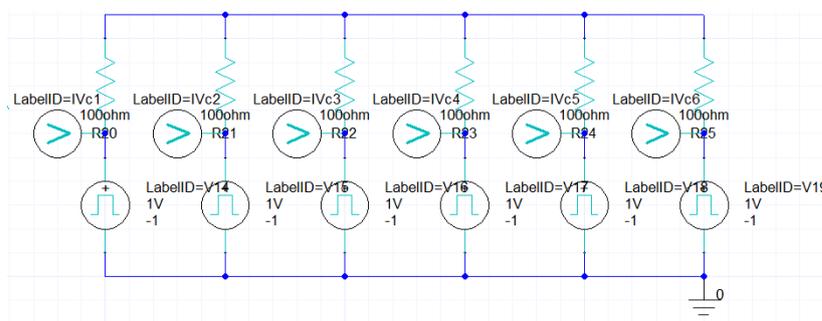
Figura 24 – Inversor do motor BLDC no Simplorer



Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 25 mostra o circuito que gera os pulsos para o disparo das chaves controladas por tensão, no qual o tempo de disparo está sincronizado com a posição rotórica do motor BLDC do Maxwell.

Figura 25 – Circuito PWM para o acionamento do motor BLDC no Simplorer



Fonte: elaborada pelo autor.

4.3 Implementação do arranjo Halbach no motor BLDC

Os ímãs do arranjo Halbach é do mesmo tipo do motor convencional NdFe35. Eles não fazem parte dos polos da máquina convencional e a sua função é direcionar o fluxo magnético para o entreferro da máquina. Para isso, a magnetização foi modificada para os componentes cilíndricos no sentido do componente Phi. Foi necessário criar dois tipos de ímã NdFe35, um com sentido negativo do componente Phi e outro com sentido positivo do componente Phi, conforme mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Configurações de motor BLDC com arranjo Halbach

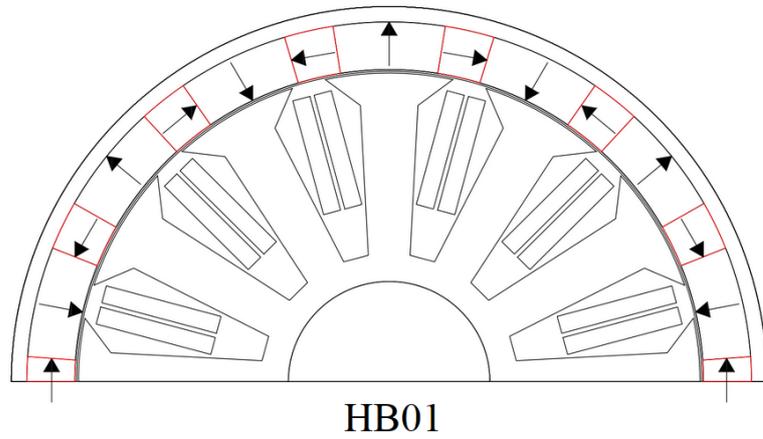
Name	Type	Value	Units	Name	Type	Value	Units
Relative Permeability	Simple	1.09978		Relative Permeability	Simple	1.09978	
Bulk Conductivity	Simple	625000	siemens/m	Bulk Conductivity	Simple	625000	siemens/m
Magnetic Coercivity	Vector			Magnetic Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector Mag	-820000	A_per_meter	- Magnitude	Vector Mag	-820000	A_per_meter
- R Component	Unit Vector	0		- R Component	Unit Vector	0	
- Phi Component	Unit Vector	1		- Phi Component	Unit Vector	-1	
- Z Component	Unit Vector	0		- Z Component	Unit Vector	0	
Core Loss Model		None	w/m ³	Core Loss Model		None	w/m ³
Mass Density	Simple	7400	kg/m ³	Mass Density	Simple	7400	kg/m ³
Composition		Solid		Composition		Solid	
Young's Modulus	Simple	0	N/m ²	Young's Modulus	Simple	0	N/m ²
Poisson's Ratio	Simple	0		Poisson's Ratio	Simple	0	
Magnetostriction	Custom	<input type="text" value="Edit..."/>		Magnetostriction	Custom	<input type="text" value="Edit..."/>	
Inverse Magnetostriction	Custom	<input type="text" value="Edit..."/>		Inverse Magnetostriction	Custom	<input type="text" value="Edit..."/>	

Fonte: elaborada pelo autor.

Agora, é necessário modelar os ímãs do arranjo Halbach a partir do modelo do motor BLDC convencional descrito no item 4.2. O modelo convencional foi exportado para o AUTOCAD para o desenho dos diferentes arranjos de ímãs permanentes. Foram propostas nove configurações de motor BLDC com arranjo Halbach:

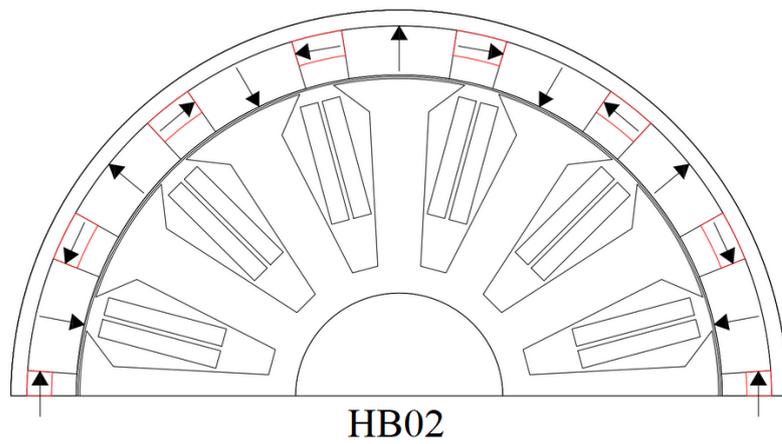
- HB01 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 1;
- HB02 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 2;
- HB03 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 3;
- HB04 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 4;
- HB05 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 5;
- HB06 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 6;
- HB07 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 7;
- HB08 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 8;
- HB09 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 9.

Figura 27 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 1



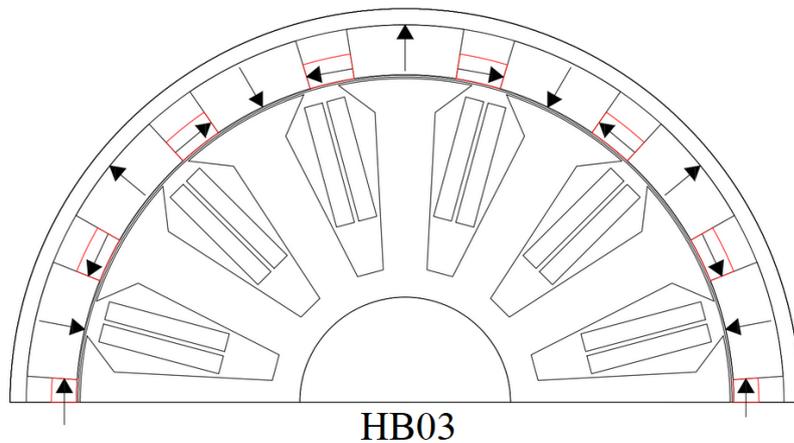
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 28 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 2



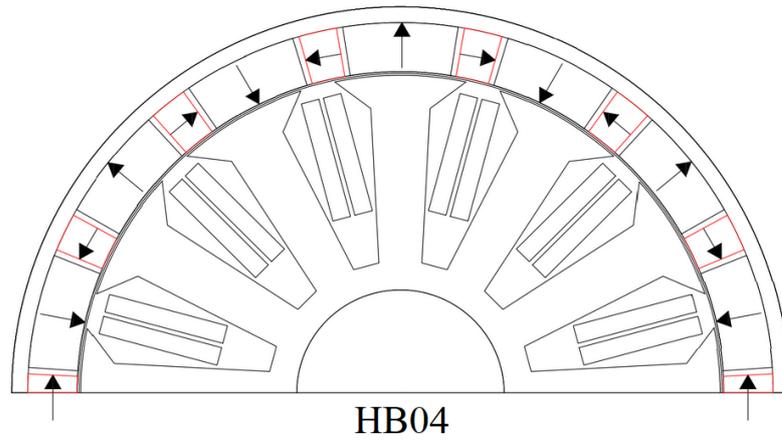
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 29 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 3



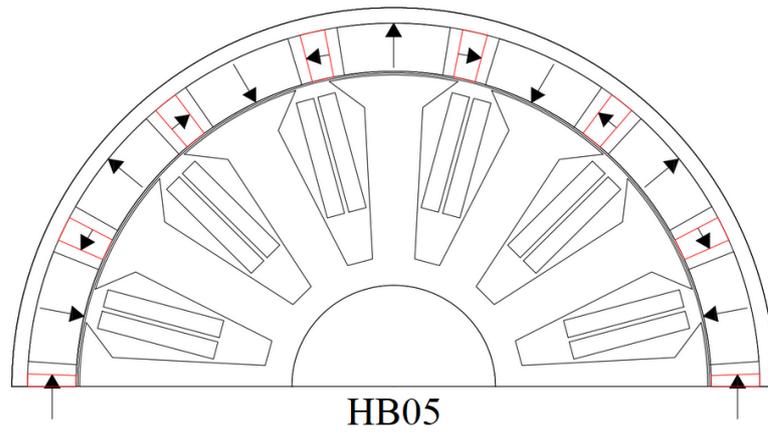
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 30 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 4



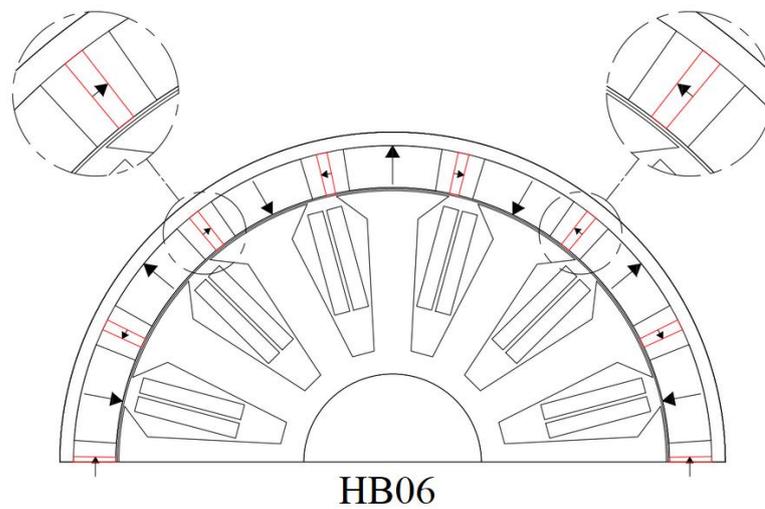
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 31 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 5



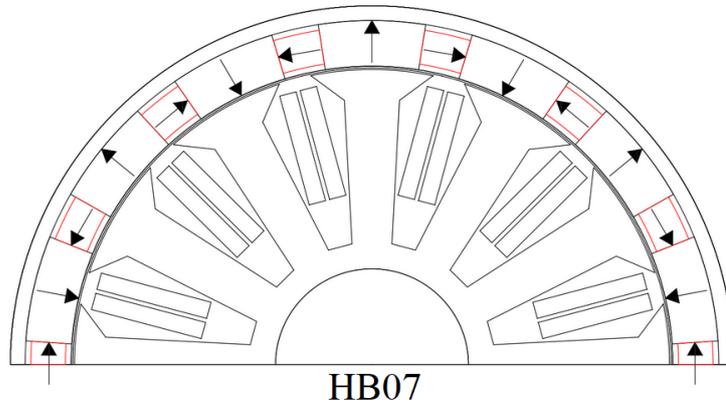
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 32 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 6



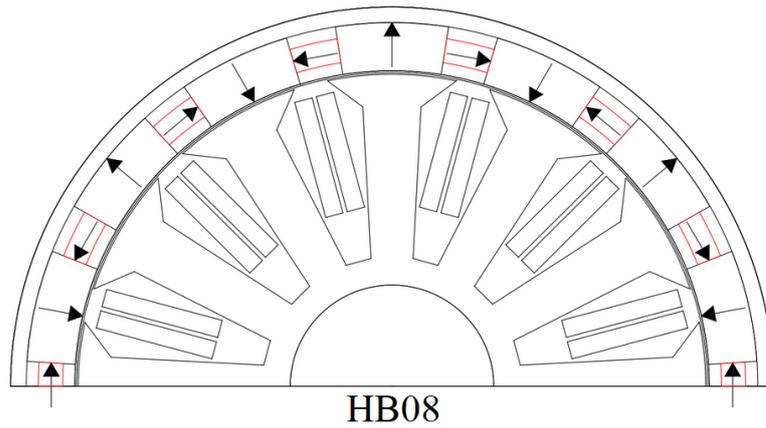
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 33 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 7



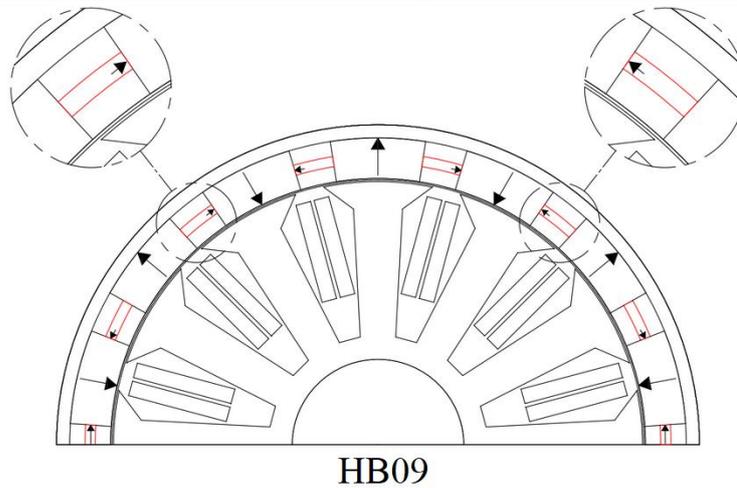
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 34 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 8



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 35 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 9



Fonte: elaborada pelo autor.

Este capítulo apresentou uma breve introdução ao método dos elementos finitos aplicado ao eletromagnetismo, as etapas da modelagem do motor BLDC convencional pelos programas Rmxprt e Maxwell e as configurações com a utilização do arranjo Halbach. Os resultados e as configurações de simulação serão apresentados no próximo capítulo.

Capítulo 5 - Análise de resultados

Neste capítulo, são apresentados os detalhes da simulação do motor BLDC com arranjo Halbach por meio do MEF e a análise dos resultados obtidos. A análise efetuada está dividida em três partes:

1. Seleção das melhores topologias de arranjo Halbach por meio dos resultados obtidos da densidade de campo magnético no entreferro para o motor BLDC convencional e para as 9 (nove) configurações Halbach apresentadas no item 4.3, por meio da análise magnetostática.

2. Análise da densidade de fluxo magnético no entreferro, das linhas de campo magnético e da densidade de fluxo no motor para todas as configurações selecionadas no item 5.1.

3. Análise do regime permanente: apresentação e discussão dos gráficos de corrente-torque, torque-velocidade, corrente-velocidade e eficiência do motor BLDC convencional e as configurações com arranjo Halbach.

5.1 Seleção das melhores topologias

A tabela 8 mostra os valores de densidade de fluxo magnético médio no entreferro para o motor BLDC e para os modelos propostos no item 4.3.

Tabela 8 – Densidade de fluxo no entreferro e área dos ímãs para as configurações Halbach propostas

Configuração	B (T)	B (pu)	Área (mm ^a)	Área (pu)	B (pu)/Área
BLDC	0,62	-	-	-	-
HB01	0,95	1	9,31	1	1
HB02	0,74	0,78	4,84	0,52	1,51
HB03	0,84	0,89	4,49	0,48	1,84
HB04	0,87	0,92	6,98	0,75	1,22
HB05	0,83	0,87	4,65	0,50	1,74
HB06	0,74	0,78	2,33	0,25	3,11
HB07	0,86	0,91	6,98	0,75	1,22
HB08	0,78	0,82	4,65	0,50	1,65
HB09	0,62	0,66	2,33	0,25	2,62

Fonte: elaborada pelo autor.

Os valores foram obtidos da análise magnetostática por meio do ANSYS. A área dos ímãs Halbach para as nove configurações referidas no item 4.3 também são apresentadas. Os dados do motor HB01 foram considerados como valores-base.

A Tabela 8 foi elaborada para selecionar as melhores topologias Halbach para serem comparadas com o motor BLDC convencional. A primeira topologia escolhida foi a HB01 por possui a maior densidade de fluxo magnético (B) no entreferro. Esse valor supera em 57% a densidade de fluxo magnético do motor BLDC convencional. Nesse arranjo, todo espaço entre os ímãs originais do motor BLDC são preenchidos com ímãs com polarização Halbach, sendo a configuração com a maior área de ocupação dos ímãs entre todas as estudadas.

A segunda configuração selecionada foi a HB03. Além de buscar a maximização do campo magnético no entreferro, aspecto principal do arranjo Halbach, deve-se levar em consideração a quantidade de ímãs no rotor, fator que impacta diretamente no custo de fabricação de uma máquina elétrica. Apesar de reduzir em mais da metade a área de ocupação dos ímãs, essa topologia ainda consegue manter 88% da densidade de campo magnético em relação ao arranjo HB01.

Por último, o motor HB06 foi o escolhido por possuir a melhor relação de densidade de fluxo magnético e área de ocupação dos ímãs Halbach entre todas as configurações analisadas. Essa topologia utilizou somente 25% da área dos ímãs Halbach em comparação ao arranjo HB01 e conseguiu manter 78% da densidade de campo magnético no entreferro,

Uma das características do arranjo Halbach é a possibilidade de utilizar o rotor sem a necessidade de ferro em sua construção. Dessa forma, para cada configuração, será simulada uma máquina elétrica com rotor de material paramagnético para comprovar a propriedade de confinamento do campo magnético no entreferro, presente em máquinas com arranjo Halbach. Portanto, serão comparadas as seguintes configurações:

- BLDC – Motor convencional sem arranjo Halbach com rotor do tipo ferromagnético;
- BLDCP – Motor convencional sem arranjo Halbach com rotor do tipo paramagnético;
- HB01 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 1;
- HB01P – Motor BLDC com arranjo Halbach e rotor do tipo paramagnético na configuração 1;
- HB03: Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 3;

- HB03P – Motor BLDC com arranjo Halbach e rotor do tipo paramagnético na configuração 3;
- HB06 – Motor BLDC com arranjo Halbach na configuração 6;
- HB06P – Motor BLDC com arranjo Halbach e rotor do tipo paramagnético na configuração 6.

Para a simulação das configurações, considerando o rotor de material paramagnético, foi escolhido o material polietileno, definido como “*polyethylene*” (plástico), na biblioteca de materiais do Maxwell. A permeabilidade relativa desse material é igual a um, magneticamente vista como se fosse ar.

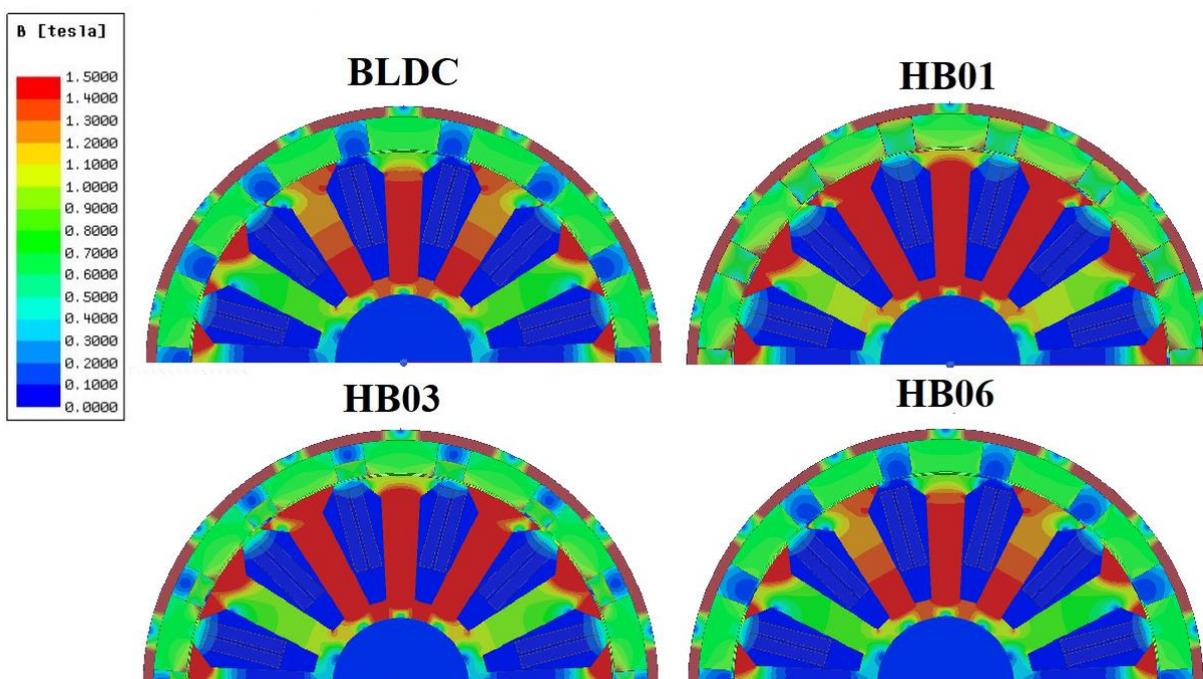
5.2 Resultados da análise magnetostática

5.2.1 Densidade de fluxo magnético

As Figuras 36 (rotor do tipo ferromagnético) e 37 (rotor do tipo paramagnético) apresentam a densidade de fluxo magnético para todas as configurações destacadas no item 5.1. A cor vermelha representa a maior densidade de fluxo; a azul, a menor.

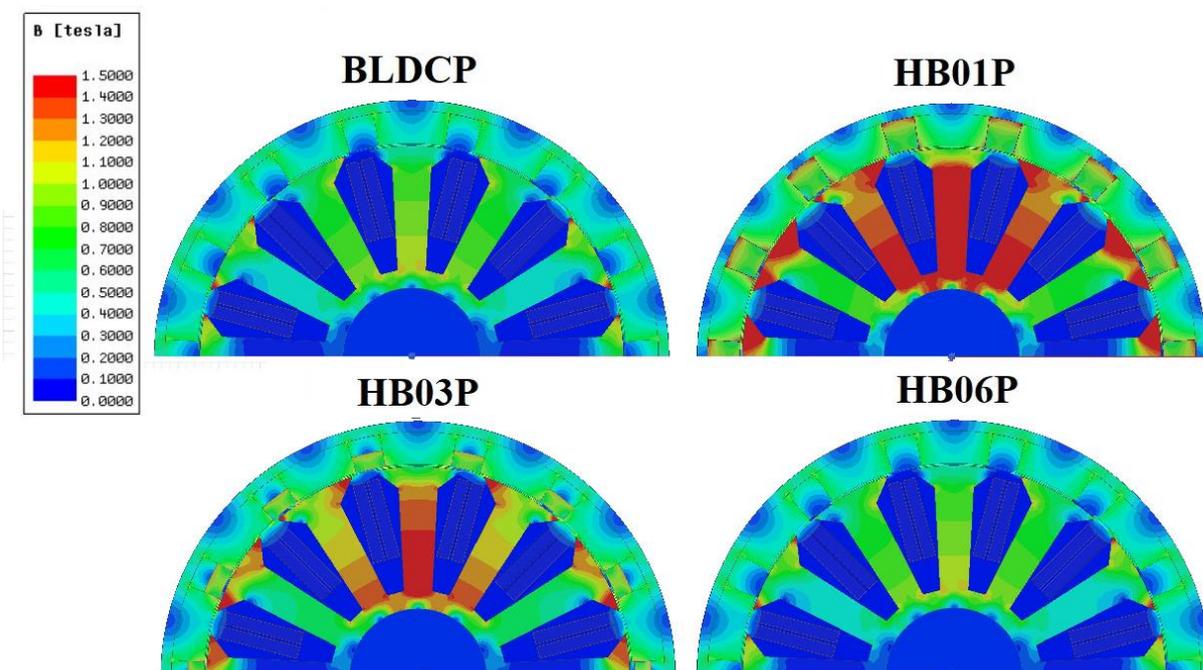
Analisando a densidade de fluxo magnético para os casos com rotor do tipo ferromagnético, fica claro que o fluxo será mais intenso nos locais de maior permeabilidade relativa, ou seja, nas regiões do entreferro, do estator e do rotor. Aumentando-se a área dos ímãs Halbach, aumenta também a concentração de fluxo magnético no entreferro e no estator da máquina. O motor HB01, modelo com a maior área de ímãs Halbach, é a configuração que apresenta a maior concentração da coloração vermelha, ou seja, é o modelo que possui o fluxo magnético mais intenso naquelas regiões.

Figura 36 – Densidade de fluxo magnético para as configurações com rotor do tipo ferromagnético



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 37 – Densidade de fluxo magnético para as configurações com rotor do tipo paramagnético



Fonte: elaborada pelo autor.

Por outro lado, todas as configurações com rotor do tipo paramagnético, por possuírem permeabilidade magnética baixa e, conseqüentemente, uma relutância elevada, não permitem

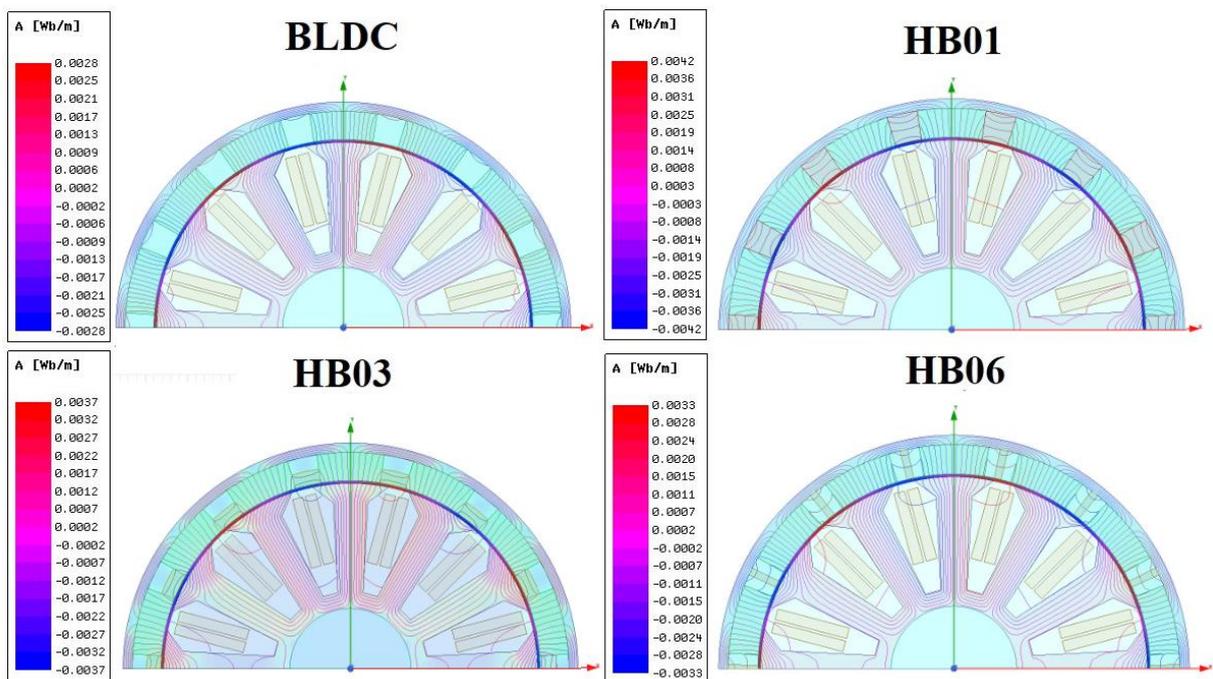
o aumento da densidade de fluxo na região rotórica, apresentando coloração azul. Dessa forma, o fluxo será mais intenso nos locais de maior permeabilidade relativa, ou seja, na região do entreferro e no estator. O motor HB01P é o modelo que apresenta a maior densidade de fluxo magnético nessas regiões entre as máquinas com rotor do tipo paramagnético analisadas.

5.2.2 Linhas de fluxo magnético

As linhas de fluxo magnético serão analisadas para comprovar a magnitude da densidade de fluxo vista anteriormente. As cores denotam apenas os sentidos do fluxo, sendo o vermelho e o azul os picos extremos, com maiores valores absolutos.

A Figura 38 apresenta as linhas de fluxo magnético para as configurações com rotor do tipo ferromagnético e a Figura 39 para os casos com rotor do tipo paramagnético.

Figura 38 – Linhas de fluxo magnético para as configurações com rotor do tipo ferromagnético

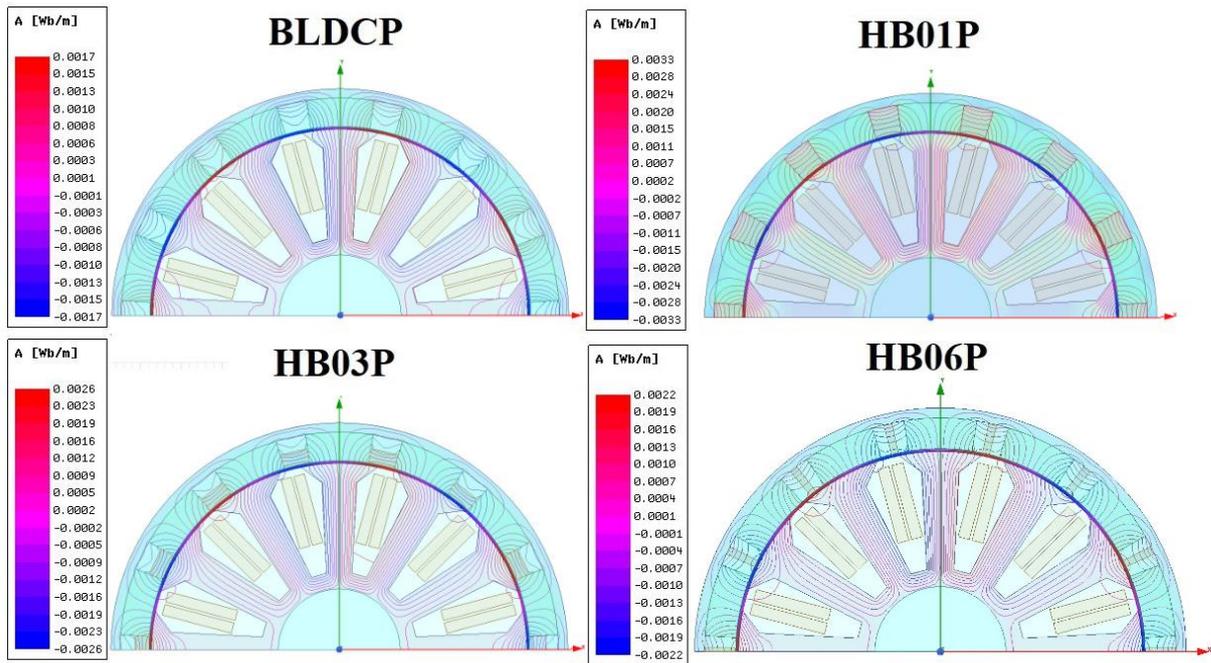


Fonte: elaborada pelo autor.

Para os casos Halbach + paramagnético, como o caminho na região do rotor é de alta relutância devido à baixa permeabilidade magnética do plástico, a concentração de fluxo naquele local é dispersa. No entanto, para todos os casos Halbach, independente da permeabilidade magnética do rotor, à medida que a área dos ímãs Halbach aumenta, a

concentração das linhas naquela região fica menos intensa, ou seja, o campo magnético diminui na região rotórica. Desse modo, as linhas de fluxo estão mais voltadas para o lado interno do motor, na região do entreferro acima dos ímãs Halbach, comprovando o que foi dito anteriormente.

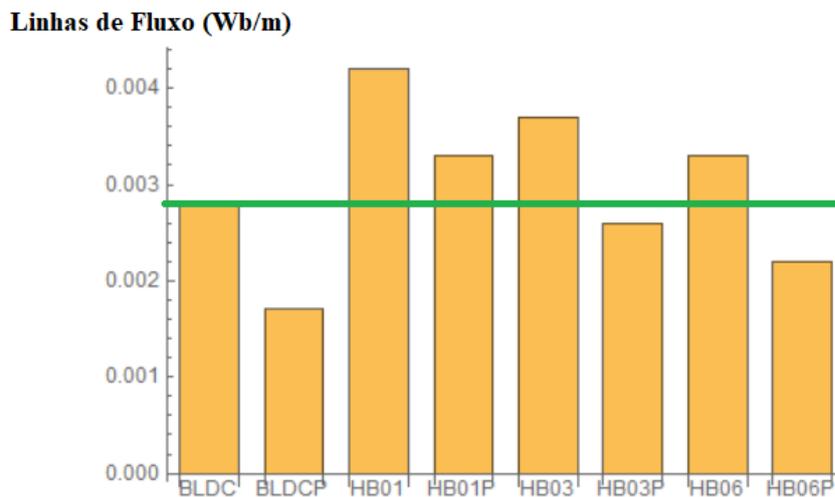
Figura 39 – Linhas de fluxo magnético para as configurações com rotor do tipo paramagnético



Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 40 traz os valores extremos para todos os casos analisados.

Figura 40 – Valores extremos das linhas de fluxo magnético dos oito casos estudados



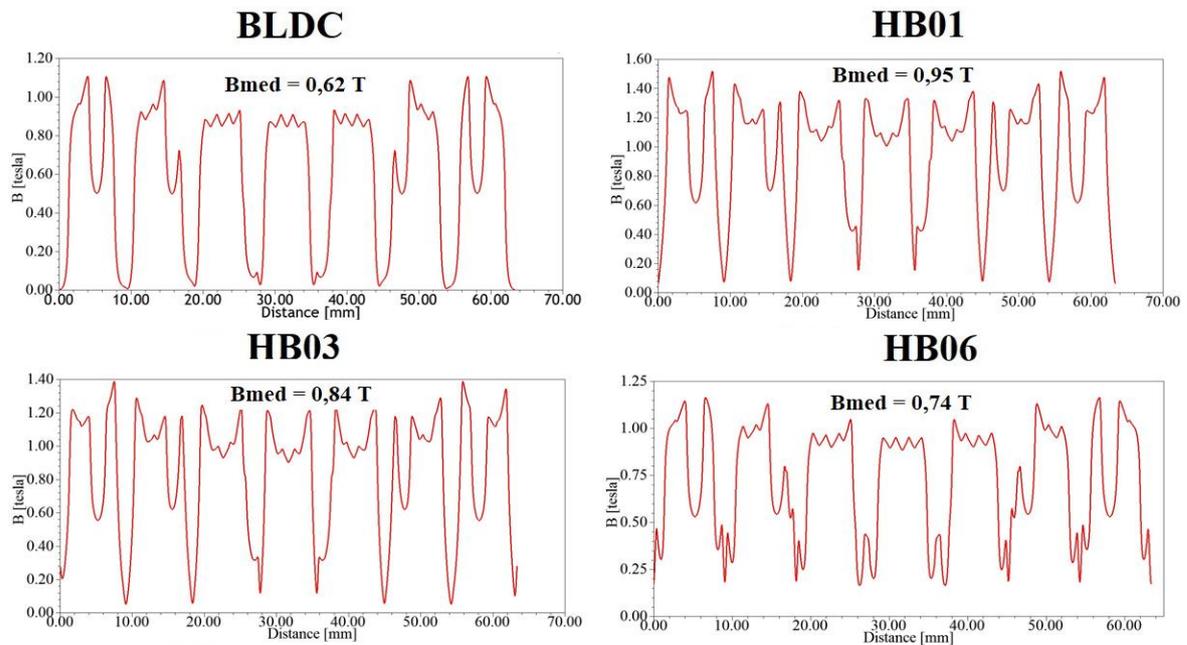
Fonte: elaborada pelo autor.

A configuração HB01 possui o maior valor, 0,0042 Wb/m. Já o motor BLDCP apresenta o menor valor, 0,0017 Wb/m, o que já era esperado. Todos os casos Halbach + ferromagnético apresentam picos extremos mais elevados do que o motor BLDC convencional. Os casos Halbach + paramagnético também superam o motor BLDC convencional com rotor do tipo paramagnético. Inclusive, a configuração HB01P, com 0,0033 Wb/m, supera também o motor BLDC convencional com rotor do tipo ferromagnético, que possui o valor extremo de 0,0028 Wb/m. Ou seja, esses valores estão coerentes com o que foi discutido até o momento.

5.2.3 Densidade de fluxo magnético no entreferro

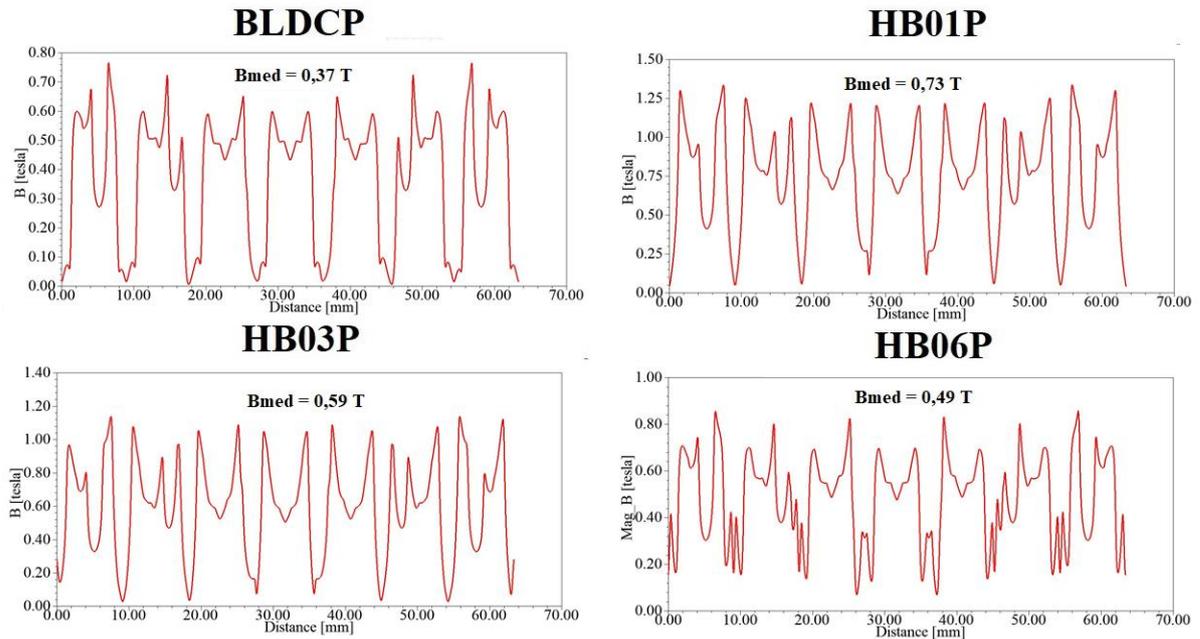
As Figuras 41 e 42 apresentam a densidade de fluxo no entreferro para os modelos com rotor do tipo ferromagnético e do tipo paramagnético, respectivamente, destacadas no item 5.1. Foi necessária a criação de um arco de 64,34 mm passando pelo Maxwell-2D, do entreferro do motor para a plotagem da densidade de fluxo naquela região. Assim, é possível ver todo o ciclo de densidade de fluxo magnético no entreferro para todos os casos.

Figura 41 – Densidade de fluxo magnético no entreferro para as configurações com rotor do tipo ferromagnético



Fonte: elaborada pelo autor.

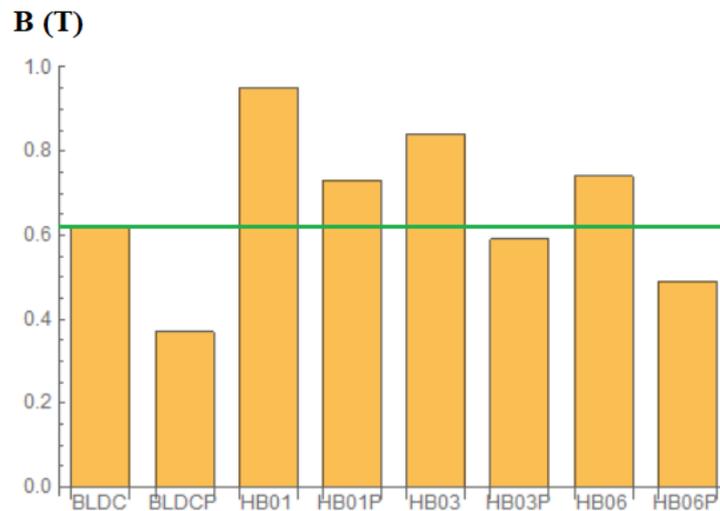
Figura 42 – Densidade de fluxo magnético no entreferro para as configurações com rotor do tipo paramagnético



Fonte: elaborada pelo autor.

Com base nos gráficos acima, a Figura 43 ilustra os valores da densidade de fluxo magnético médio no entreferro para todos os casos estudados.

Figura 43 – Densidade de fluxo magnético médio no entreferro para as oito configurações



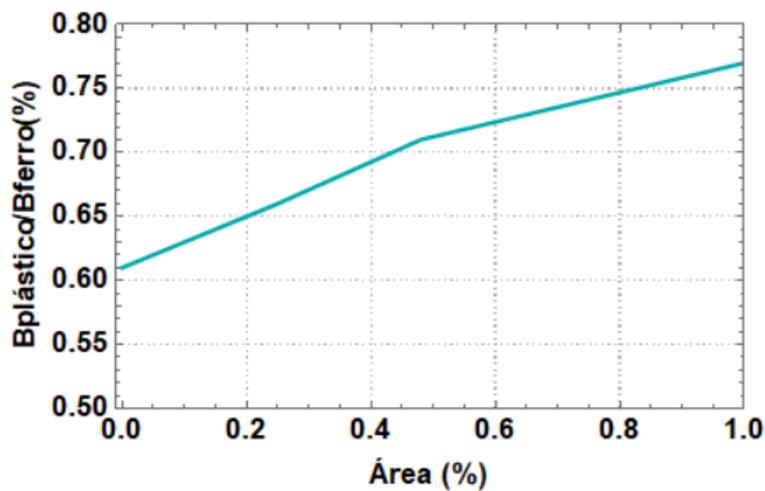
Fonte: elaborada pelo autor.

O arranjo que apresentou o maior valor foi o caso HB01, com 0,95 Tesla. Esse valor supera em 54% o caso BLDC convencional, com o valor de 0,62 Tesla. Ao diminuir em 52% a área do ímã Halbach, na configuração HB03, ele ainda consegue um valor considerável de 0,84 Tesla, mantendo em 88% a densidade de fluxo magnético em comparação ao HB01. O

caso que apresentou o menor valor de densidade de fluxo magnético médio no entreferro foi o BLDCP, com 0,37 Tesla.

A Figura 44 traz um gráfico comparativo entre o valor médio da densidade de fluxo magnético, para os rotores do tipo paramagnético (plástico) e do tipo ferromagnético (aço), de acordo com a área dos ímãs Halbach. Os resultados mostram que à medida que a área dos ímãs Halbach cresce, a capacidade de manter a densidade de fluxo magnético no entreferro também eleva-se com a utilização do rotor do tipo paramagnético (plástico).

Figura 44 – Gráfico comparativo entre o material utilizado no rotor pela área dos ímãs Halbach



Fonte: elaborada pelo autor.

5.3 Resultados da análise do regime permanente

Em todos os estudos foram considerados a tensão de alimentação constante e nominal em 24 V e o aumento linear da carga mecânica com o tempo.

O motor BLDC convencional foi definido como o caso-base. O material do rotor do motor BLDC, conforme descrito no capítulo 4, é de aço e do tipo ferromagnético. O seu intervalo de operação está entre 6247rpm e 5246rpm, correspondente à velocidade a vazio e à velocidade da potência máxima de 1300W, respectivamente. Esses valores propiciaram uma corrente de entrada com variação entre 0 a 54 A.

Logo, para todos os casos Halbach, houve variação paramétrica da velocidade nominal, de forma que a corrente de entrada variasse de 0 a 54 A. Ou seja, a tensão foi

mantida constante e nominal e o intervalo de velocidade de cada configuração foi ajustado do valor correspondente a vazio até o valor correspondente à potência máxima de 1300W.

Foram realizadas 16 simulações para cada caso, com o intuito de observar outras variáveis como a corrente de entrada e o comportamento do torque para a elaboração gráfica das curvas de performance, vista em cada configuração.

A eficiência do motor pode ser calculada a partir da potência mecânica de saída sobre a potência elétrica de entrada. As perdas mecânicas de atrito e de ventilação foram desconsideradas.

Foi escolhido o tempo de simulação de 3 ms com passo de $0,1\mu\text{s}$, tempo suficiente para a máquina entrar em regime permanente.

Para melhorar a visualização e a comparação de cada um dos parâmetros obtidos nas configurações estudadas, serão realizadas duas comparações:

01) Motores Halbach com rotor do tipo ferromagnético versus motor BLDC convencional.

02) Motores Halbach com rotor do tipo paramagnético versus motor BLDC convencional.

5.3.1 Motores Halbach do tipo ferromagnético versus motor BLDC convencional

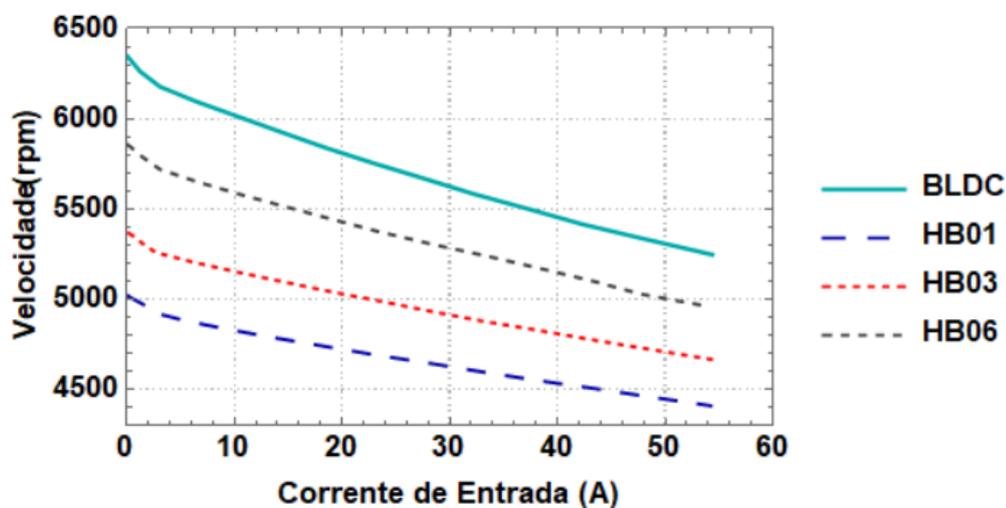
5.3.1.1 Comparativo de velocidade

Conforme observado na Figura 45, as curvas obtidas para cada caso apresentam a seguinte característica: a velocidade parte do ponto a vazio e decresce linearmente, conforme a carga aumenta.

O motor BLDC possui um intervalo de operação da velocidade entre 5247rpm e 6347rpm. Com base nos resultados obtidos na solução magnetostática, analisada anteriormente, essa configuração possui a densidade de fluxo no entreferro de 0,62 Tesla. Os resultados obtidos demonstram que à medida que a densidade de fluxo no entreferro no motor

cresce, o intervalo de operação da velocidade do motor diminui. Para o caso HB01, que possui a maior densidade de fluxo no entreferro de todas as configurações estudadas, 0,95 Tesla, é o motor que atinge velocidades menores, e o seu intervalo de operação da velocidade varia entre 4408rpm e 5017rpm. Já para o caso HB03, o intervalo de operação é de 4662rpm até 5365rpm, com uma densidade de fluxo no entreferro de 0,84 Tesla. A última configuração Halbach, com rotor do tipo ferromagnético (HB06), possui uma densidade de fluxo magnético no entreferro de 0,74 Tesla, e o seu intervalo de operação fica entre 4959rpm a 5857rpm.

Figura 45 – Comparativo de velocidade para os casos com rotor do tipo ferromagnético



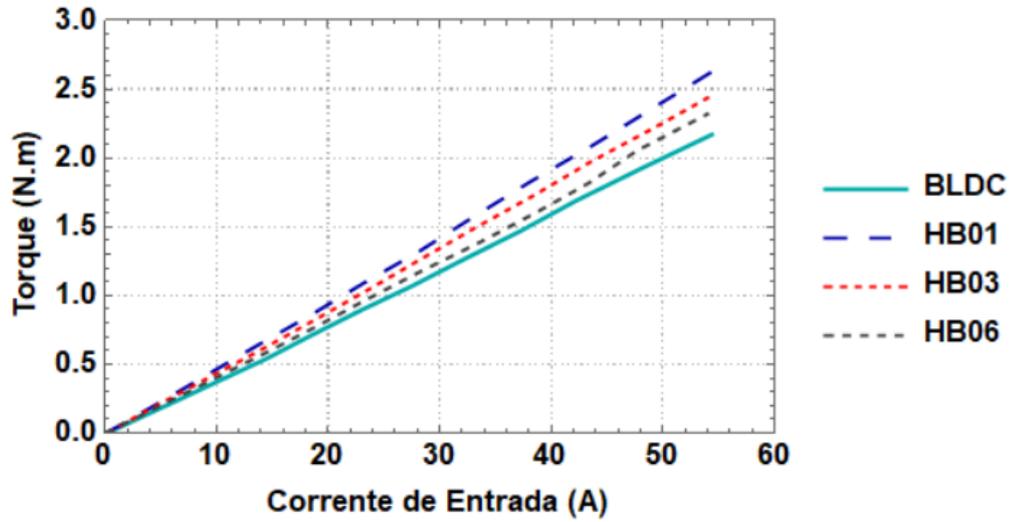
Fonte: elaborada pelo autor.

5.3.1.2 Comparativo de torque

Como pode ser observado na Figura 46, é possível notar que há um aumento no torque para todas as configurações Halbach com rotor de aço em comparação com o motor BLDC convencional.

O motor HB01, modelo com a maior área de ímãs Halbach, obteve uma melhoria de até 24% no torque. A configuração HB03, que possui aproximadamente metade da área de ímãs do motor HB01, conseguiu superar o motor BLDC em 17%. Por último, o motor HB06, configuração com a menor área de ímãs, consegue um incremento no torque de até 10% em comparação ao caso convencional. Os resultados comprovam o que foi visto anteriormente, quanto maior o fluxo magnético no entreferro maior é o desempenho do torque para um mesmo valor de corrente solicitada.

Figura 46 – Comparativo de torque para os casos com rotor do tipo ferromagnético

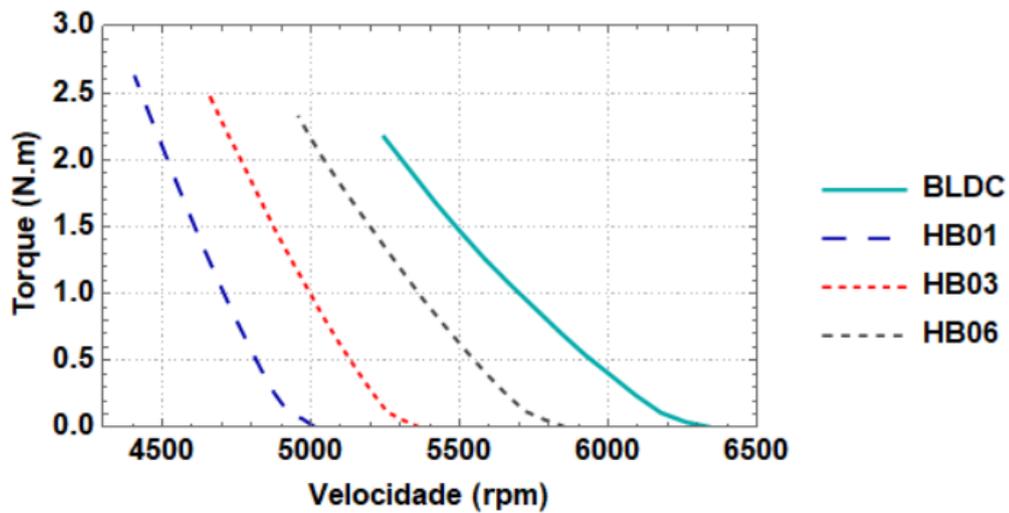


Fonte: elaborada pelo autor.

5.3.1.3 Comparativo de torque versus velocidade

A Figura 47 traz as curvas características de torque versus velocidade para o motor BLDC e para os casos Halbach com rotor do tipo ferromagnético. Para todos os casos, o torque aumenta linearmente à medida que a velocidade da máquina diminui.

Figura 47 – Curva de torque versus velocidade para os casos com rotor do tipo ferromagnético

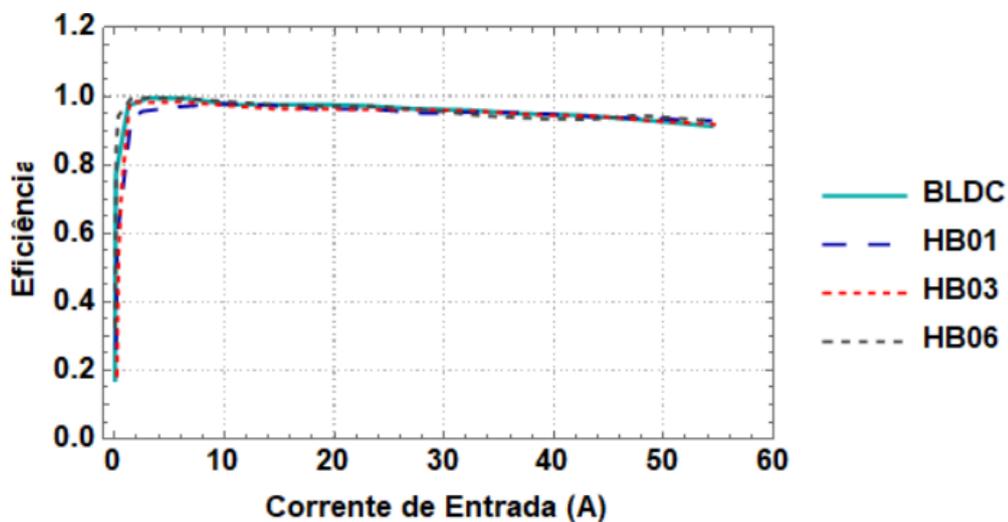


Fonte: elaborada pelo autor.

5.3.1.4 Comparativo de eficiência

A eficiência do motor pode ser calculada a partir da potência mecânica de saída sobre a potência elétrica de entrada. As perdas mecânicas foram desconsideradas. Todos os modelos apresentaram comportamento de eficiência (acima de 90%) em praticamente todos os modelos. Ou seja, não foi observada, conforme ilustrado na Figura 48, variação significativa de eficiência com as modificações das configurações utilizando ímãs Halbach.

Figura 48 – Comparativo de eficiência para os casos com rotor do tipo ferromagnético



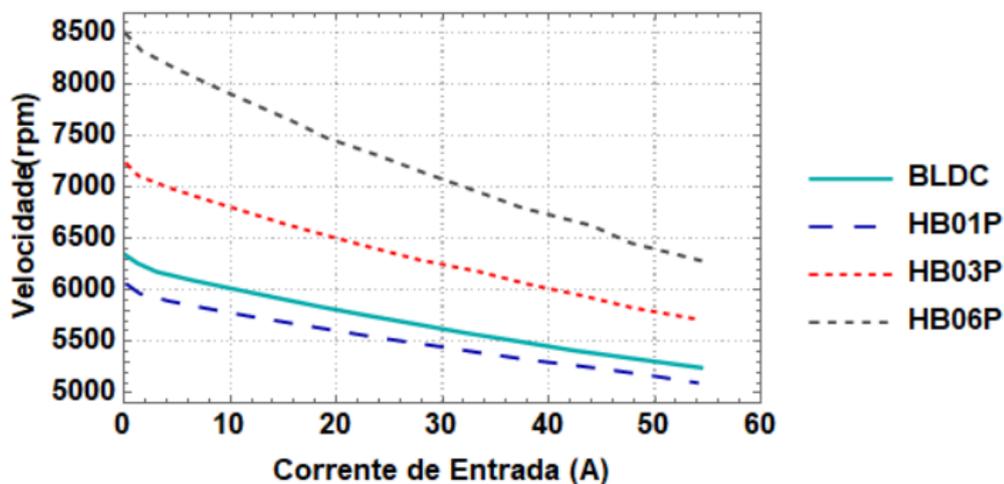
Fonte: elaborada pelo autor.

5.3.1 Motores Halbach com rotor do tipo paramagnético versus motor BLDC convencional

5.3.1.1 Comparativo de velocidade

Similarmente aos casos com rotor do tipo ferromagnético, os motores operam em velocidades menores à medida que a densidade de fluxo magnético no entreferro aumenta. Como o motor HB01P é o único das configurações com rotor do tipo paramagnético que possui densidade de fluxo magnético superior ao motor BLDC, apenas a sua curva fica deslocada abaixo do caso convencional. O seu intervalo de operação da velocidade fica entre 5099rpm e 6056rpm, conforme ilustrado na Figura 49.

Figura 49 – Comparativo de velocidade para os casos com rotor do tipo paramagnético



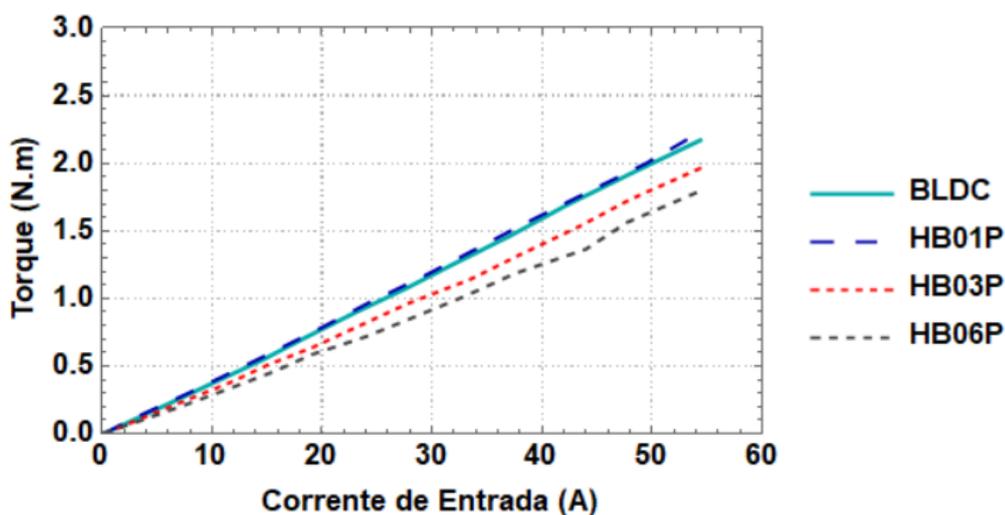
Fonte: elaborada pelo autor.

As demais curvas ficam acima da curva do BLDC convencional, pelo fato dos modelos HB03P e HB06P possuírem densidade de fluxo magnético no entreferro menor.

5.3.1.2 Comparativo de torque

A única configuração com rotor de plástico que consegue um incremento de torque em comparação ao motor BLDC é o caso HB01P. Esse motor consegue uma melhoria de até 9%, conforme ilustrado na Figura 50.

Figura 50 – Comparativo de torque para os casos com rotor do tipo paramagnético



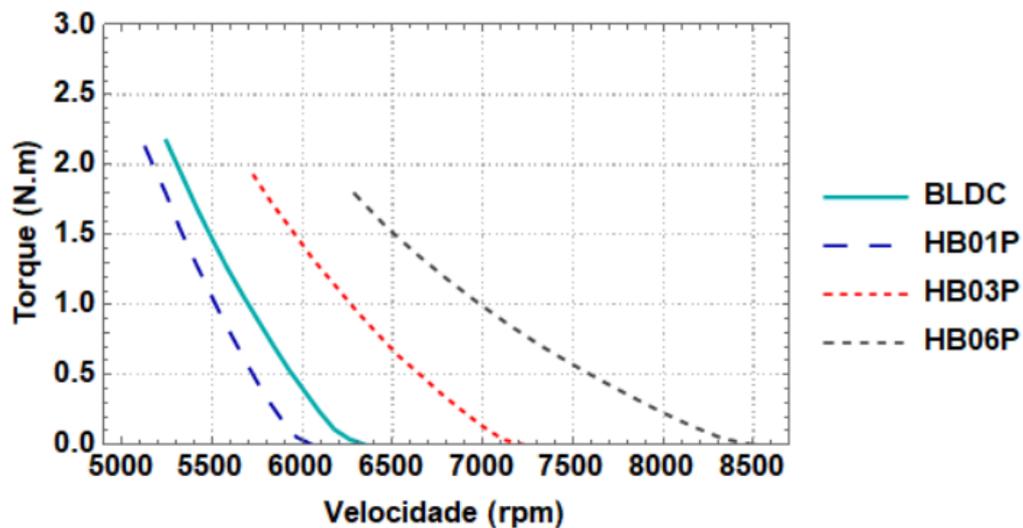
Fonte: elaborada pelo autor.

Os demais modelos não conseguem superar o caso convencional.

5.3.1.3 Comparativo de torque versus velocidade

A Figura 51 apresenta as curvas características de torque versus velocidade para os casos Halbach com rotor do tipo paramagnético.

Figura 51 – Curva de torque versus velocidade para os casos com rotor do tipo paramagnético



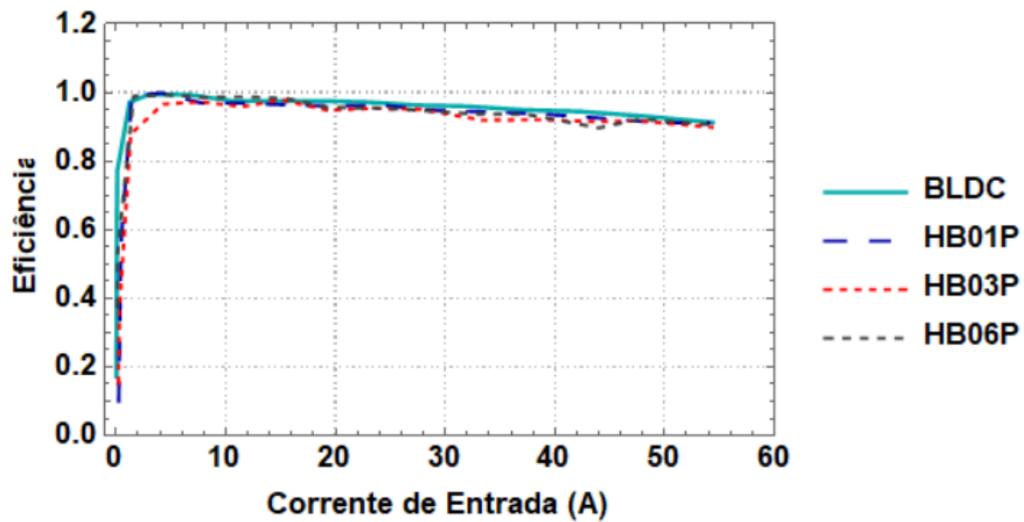
Fonte: elaborada pelo autor.

Semelhante à seção anterior, o torque aumenta linearmente conforme a velocidade da máquina diminui. À medida que a área dos ímãs Halbach diminui, maior é o intervalo entre a velocidade a vazio e a velocidade para a potência máxima de entrada (1300W). O Caso HB06P é o motor que possui a mais ampla faixa de operação, com a sua velocidade variando entre 6289rpm e 8503rpm, aproximadamente.

5.3.1.4 Comparativo de eficiência

Equivalente aos modelos Halbach com rotor do tipo ferromagnético, os casos com rotor do tipo paramagnético também apresentaram valores de eficiência acima de 90%, em todo o intervalo de operação estudado, conforme mostrado na Figura 52.

Figura 52 – Comparativo de eficiência para os casos com rotor do tipo paramagnético



Fonte: elaborada pelo autor.

Este capítulo apresentou os resultados que levaram à escolha dos melhores arranjos de ímãs Halbach no rotor do motor BLDC. Posteriormente, foi feita uma análise comparativa, seguida de discussão, para os modelos propostos e o motor BLDC convencional. As conclusões e as propostas de trabalhos futuros serão abordadas no próximo capítulo.

Capítulo 6 - Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões

Conforme proposto no escopo desta dissertação, inicialmente, foram apresentados o panorama da propulsão elétrica em nível nacional e internacional, novos conceitos e os tipos de motores elétricos que viabilizaram a aplicação da propulsão elétrica em mobilidade. O advento dos ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro proporcionou um acentuado desenvolvimento de motores elétricos empregados na propulsão elétrica, especialmente no caso dos motores BLDC.

A busca por motores elétricos que apresentem elevada densidade de potência proporcionou o desenvolvimento, a partir do motor BLDC convencional, de diferentes configurações de motores BLDC com arranjo Halbach. Os modelos com arranjo Halbach foram implementados, modificando a área do ímã e o material do rotor.

A implementação dessas configurações no programa ANSYS foi executada para a verificação das seguintes características associadas aos motores BLDC com arranjo Halbach, ou seja:

- confinamento do campo magnético intenso no núcleo ferromagnético do motor, permitindo a maximização da densidade de fluxo magnético no entreferro da máquina;
- incremento na capacidade de transmissão de torque;
- a possibilidade de utilização de rotor do tipo paramagnético no motor BLDC, permitindo a redução do peso, e da inércia do motor.

Foram propostos nove tipos de arranjos de ímãs permanentes utilizando a técnica Halbach. Por meio da análise dos resultados obtidos da densidade de fluxo magnético no entreferro, foram selecionadas três topologias. A partir desses modelos, foram desenvolvidas e simuladas seis configurações para serem comparadas ao motor BLDC convencional:

- rotor do tipo ferromagnético: HB01, HB03 e HB06;
- rotor do tipo paramagnético: HB01P, HB03P e HB06P.

Para cada um dos modelos dos motores foram realizadas duas simulações:

- análise magnetostática para a obtenção de resultados da densidade de fluxo magnético, especialmente no entreferro, e distribuição das linhas de campo magnético para todas as configurações;
- análise do regime permanente para a obtenção de resultados de torque, corrente, velocidade e eficiência.

Assim, pode-se comparar o efeito que o arranjo Halbach provoca no desempenho dinâmico do motor, à medida que a área dos ímãs aumenta.

No que diz respeito à análise magnetostática, pode-se concluir que o arranjo Halbach proporciona um aumento de densidade de fluxo magnético no entreferro do motor.

Todas as configurações Halbach com rotor do tipo ferromagnético apresentaram densidade de fluxo magnético médio superior ao motor BLDC. O modelo com a maior densidade de fluxo magnético médio no entreferro foi o HB01, com 0,95 Tesla, superando em 54% o caso convencional.

Foi confirmado também que à medida que a área dos ímãs Halbach cresce, a capacidade de manter a densidade de campo magnético no entreferro também se eleva com a utilização do rotor do tipo paramagnético (plástico). O caso HB01P conseguiu manter em 77% a densidade de fluxo no entreferro em comparação ao HB01 e, inclusive, superou o motor BLDC convencional em 12%.

A solução de regime permanente proporcionou os resultados para a montagem das curvas características de torque, velocidade e eficiência pela variação da corrente de entrada. Por meio dos resultados obtidos, foi comprovado que quando há um aumento na densidade de fluxo magnético do entreferro entre os casos, a capacidade de transmissão de torque se eleva e o motor opera em velocidades menores.

Validando os resultados da solução magnetostática, quanto maior o fluxo do entreferro maior é o desempenho do torque para um mesmo valor de corrente solicitada. Todas as configurações Halbach com rotor do tipo ferromagnético apresentaram uma capacidade de transmissão de torque superior ao motor BLDC. O modelo HB01, com maior área de ímãs no entreferro, obteve uma melhoria de 24% em comparação ao caso convencional. Os casos HB03 e HB06 conseguiram um incremento no torque de até 17% e 10%, respectivamente.

Para os arranjos com rotor do tipo paramagnético, o modelo HB01P conseguiu superar a capacidade de transmissão de torque em até 9% em relação ao motor BLDC com magnetização radial. Esse resultado mostra o grande benefício que o arranjo Halbach pode proporcionar em aplicações em que se deseja uma redução no peso do motor.

Apesar dos casos HB03P e HB06P terem apresentado torque inferior, eles podem ser aplicados em situações em que seja necessária uma redução de custos e em cargas com características de baixo torque e alta velocidade.

Os resultados mostraram que a eficiência de todas as configurações com arranjo Halbach varia pouco em comparação ao caso convencional. Todos os modelos apresentaram eficiência extremamente elevada, o que confirma o grande potencial do uso de motores BLDC em sistemas de propulsão elétrica.

Por fim, fica evidenciado o grande potencial de aplicação dos elementos finitos para a modelagem de motores elétricos, que permite prever de maneira satisfatória o desempenho do motor ainda em fase de projeto, com a possibilidade de ajustes em dimensões e materiais e de contribuição como parte de uma otimização dos projetos dos motores.

6.2 Trabalhos futuros

A aplicação do arranjo Halbach no motor BLDC obteve resultados expressivos nos dois aspectos estudados: magnetostático e o de regime permanente em relação ao caso convencional, comprovando a eficácia da metodologia Halbach e dos modelos propostos. Dentre as múltiplas opções de estudos e trabalhos futuros, pode-se citar:

- a realização de estudo comparativo de densidade de potência e inércia para as configurações analisadas;
- a efetivação da simulação de todas as configurações de motor BLDC com arranjo Halbach em outros programas, por exemplo, o COMSOL e o FEMM;
- a implementação do arranjo Halbach em motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM);
- o estudo da otimização da geometria dos ímãs dos modelos de motor BLDC com arranjo Halbach estudados;

- o desenvolvimento de uma metodologia de análise econômica para a averiguação da viabilidade do custo adicional referente aos ímãs, devido ao arranjo Halbach;
- o projeto de motor BLDC otimizado para o atendimento de carga específica.

Referências bibliográficas

- [1] CALEF, D.; GOBLE, R. **The allure of technology: How France and California promoted electric and hybrid vehicles to reduce urban air pollution.** p. 1-34, mar. 2007.
- [2] WILLS, W.; ROVERE, E. **Light vehicle energy efficiency programs and their impact on Brazilian CO2 emissions.** Energy Policy. Centro de Estudos Integrados sobre Meio Ambiente e Mudanças Climáticas – Centro Clima/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, p. 6453-6462, jul. 2009.
- [3] SANTOS, N. C.; SILVA, R. G.; JUNIOR, A. M. **Electric vehicles in Brazil as an alternative to the reduction of air pollution caused by fossil fuels.** International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Salamanca, Spain, p. 692-697, mar. 2018.
- [4] JAPE, S. R.; THOSAR, A. **Comparison of Electric Motors For Electric Vehicle Application.** International Journal of Research in Engineering and Technology. v. 06, p. 12-17, sep. 2017.
- [5] CAZZOLA, P.; et. al. **Towards Cross-Modal Electrification. Electric Vehicles Initiative.** International Energy Agency. Clean Energy Ministerial. Technology., may 2018.
- [6] NORD, T. **Voltage Stability in an Electric Propulsion System for Ships.** 2006. Thesis (Master of Science) – Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2006.
- [7] ALVES, R. **Propulsão elétrica de navios.** 2007. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) – Universidade Rio de Janeiro Federal – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.
- [8] CONNER, M. **The Leading Edge Asynchronous Propeller Technology to Demonstrate Electric Propulsion Technologies.** NASA Armstrong Flight Research Center, jun. 2018. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/centers/armstrong/Features/leaptech.html>>. Acesso em: 18 fevereiro 2019.
- [9] GIERAS, J. F. **Permanent magnet motor technology: design and applications,** 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [10] BALATANU, A.; FLOREA, L. M. **Comparison of Electric Motors For Electric Vehicles Propulsion.** International Conference of Scientific Paper Afases, 2013. Faculty of Electrical Engineering, University Polytechnic of Bucharest, Romania, may 2013.

- [11] DOORDUIN, W.; et. al. **The Use of Electric Motors For The Propulsion of Seagoing Vessels**. Rotterdam Mainport University of Applied Sciences – RMU.
- [12] TABBACHE, B.; BENBOUZID, M.; KHELOUI, A.. **Design and Control of the Induction Motor Propulsion of an Electric Vehicle**. University of Brest. Electrical Engineering Department, Polytechnic Military Academy, Algiers, Algeria, may 2014.
- [13] EVANGELINE, J.; KUMAR, S. **Minimization of Torque Ripple in Switched Reluctance Motor Drive – A Review**. Lecture Notes in Electrical Engineering, p. 287-294, apr. 2011.
- [14] XIA, C. L. **Permanent Magnet Brushless DC Motor Drive and Controls**. Tianjin University, P.R. China, 2012.
- [15] JIAN, L.; CHAN K. T. Design and Analysis of an Integrated Halbach-magnetic-geared. Department of Electrical and Electronic Engineering, The University of Hong Kong. **Journal of Asian Electric Vehicles**, v. 7, n. 1, p. 1213-1219, jun. 2009.
- [16] BARGALLO, R. **Finite Elements for Electrical Engineering**. Universitat Politècnica de Catalunya. Electrical Engineering Department, 2006.
- [17] CHAN, C. C. **The Rise & Fall of Electric Vehicles in 1828-1930: Lessons Learned**. IEEE, v. 101, n. 1, p. 206-212, jan. 2013.
- [18] SKJONG, E.; at al. **The Marine Vessel’s Electrical Power System: From Its Birth to Present Day**. Proc. IEEE, v. 103, n. 12, p. 2410-2424, dec. 2015.
- [19] RODRIGUES, T. **Efeito da inserção de propulsão elétrica na qualidade de energia elétrica em navios**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.
- [20] YANG, T.; et. al. **History and Recent Advancements of Electric Propulsion and Integrated Electrical Power Systems for Commercial & Naval Vessels**. The University of Nottingham.
- [21] BERGER, R. **Aircraft Electrical Propulsion – The Next Chapter of Aviation? Think: Act**. London, United Kingdom, 2017.
- [22] HEPPELLE, M. **Electric Flight – Potential and Limitation**. German Aerospace Center. Institute of Aerodynamics and Flow Technology. Braunschweig, Germany.
- [23] WU, H.; et. al. **New Market. New Entrants. New Challenges. Battery Electric Vehicles**. Deloitte. London, United Kingdom, 2019.
- [24] **Lubes’n’Greases Perspective On Electric Vehicles**. LNG Publishing Company. Virginia, United States, 2019.

- [25] **BBC** – Norway’s Plan For a Fleet of Electric Planes, 2018. Disponível em: <<http://www.bbc.com/future/story/20180814-norways-plan-for-a-fleet-of-electric-planes>>. Acesso em: 2 março 2019.
- [26] **Blog Todos a Bordo:** Indústria aposta em aviões elétricos; Veja modelos em desenvolvimento, 2017. Disponível em: <<https://todosabordo.blogosfera.uol.com.br/2017/11/29/avioes-eletricos-modelos-em-desenvolvimento/?cmpid=copiaecola>>. Acesso em: 2 março 2019.
- [27] **Hybrid and electric propulsion systems.** Marine Engine And Propulsion Systems. Disponível em: <<https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/marine/hybrid-electric-propulsion-systems.pdf>>. Acesso em: 5 março 2019.
- [28] KIM, S.Y.; et al. **A Naval Integrated Power System With a Battery Energy Storage System:** Fuel Efficiency, Reliability, and Quality of Power, IEEE Electrification Magazine. P. 22–33, jun. 2015.
- [29] DOERRY, N.; AMY, J.; KROLICK, C. **History and the Status of Electric Ship Propulsion Integrated Power Systems and Future Trends in the U.S. Navy.** Proceedings of the IEEE, v. 103, n. 12, p. 2243-2251, dec. 2015.
- [30] **The Electric Warship.** After years of research, development, and debate, the USS *Zumwalt*, the first of a new class of high-tech destroyers, nears completion. Disponível em: <<https://spectrum.ieee.org/aerospace/military/the-electric-warship>>. Acesso em: 7 março 2019.
- [31] **Queen Elizabeth Class (QEC) – HMS QUEEN ELIZABETH and HMS PRINCE OF WALES.** World’s Largest Electric Propelled Warships. GE Power Conversion. Case Study.
- [32] CHAIGNO, J. P.; SEKULA, V. **Propulsion électrique sur les Bâtiments de projection et de commandement Mistral et Tonnerre et les nouveaux méthaniers:** a principaux avantages pour ces navires et pour les armateurs, REE n. 3, mar. 2006.
- [33] JOSEPHS, L. **The electric revolution is coming to freighters and cruise ships,** jul. 2017. Disponível em: <<https://qz.com/1039133/the-electric-revolution-is-coming-to-freighters-and-cruise-ships/>>. Acesso em: 8 março 2019.
- [34] Siemens – Bluedrive PlusC. Marine & Shipbuilding. Makes vessels safer, more profitable and environmentally friendly. Disponível em: <<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:36bce2d7-5781-47b2-b26b-954c0db64b35/version:1567605879/bluedrive-plusc.pdf>>. Acesso em: 5 março 2019.
- [35] WEG – Soluções para o Segmento Naval, jul. 2015. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h8c/hf3/WEG-solucoes-para-o-segmento-naval500-26247-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 11 março 2019.

- [36] PROSUB – Programa de Desenvolvimento de Submarinos. Ministério da Defesa. Marinha do Brasil. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/prosub/nacionalizacao>>. Acesso em: 11 março 2019.
- [37] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução N° 819 de 19 de junho de 2018. Estabelece os procedimentos e as condições para a realização de atividades de recarga de veículos elétricos. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2018819.pdf>>. Acesso em: 20 março 2019.
- [38] CPFL Energia – CPFL Energia prevê 80 mil eletropostos em 2030 para acompanhar expansão de veículos elétricos no Brasil, nov. 2018. Disponível em: <<https://www.cpfl.com.br/releases/Paginas/cpfl-energia-preve-oitenta-mil-eletropostos-em-vinte-trinta-para-acompanhar-expansao-de-veiculos-eletricos-no-brasil.aspx>>. Acesso em: 20 março 2019.
- [39] ESTAPAR – BMW e EDP criam eletropostos para carros elétricos na Rodovia Presidente Dutra. Disponível em: <<https://www.estapar.com.br/blog/bmw-e-edp-criam-eletropostos-carros-eletricos-na-rodovia-presidente-dutra>>. Acesso em: 21 março 2019.
- [40] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Recarga de Veículos Elétricos: Levantamento de informações do Corredor Elétrico Sul do Brasil, 2018.
- [41] CARLINI, M.; et. al. **A Hybrid Electric Propulsion System For a Forest Vehicle**, p. 2019–2023, 2019.
- [42] AJIOKA, Y.; OHNO, K. **Electric Propulsion Systems for Ships**. Hitachi Review, v. 52, p. 231–232, 2013.
- [43] MCCOY, T. J. **Trends in Ship Electric Propulsion**. IEEE, p. 343–346.
- [44] EHSANI M.; RAHMAN, K. M.; TOLIYAT, H. A. **Propulsion Systems Design of Electric and Hybrid Vehicles**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 44, p. 19–27, feb. 1997.
- [45] RUEDA, A. S. **Controle do motor de indução para veículos elétricos mediante o uso de duplo conversor**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Rio de Janeiro Federal – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.
- [46] ELECTRIC VEHICLE NEWS. Ev Technology: Axial Flux Induction Motor For Automotive Applications. Disponível em: <<http://www.electric-vehiclenews.com/2016/11/axial-flux-induction-motor-for.html>>. Acesso em: 29 março 2019.
- [47] FREITAS, J. C. N. **Projeto e análise ao funcionamento de carros elétricos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2012.
- [48] ANDRADA, P.; et. al. **Are SRM drives a real alternative for EV powertrain?** Workshop on SRM drives an alternative for E-traction, p. 55-58, Spain, feb, 2018.

- [49] XUE, X. D.; CHENG, W. E.; CHEUNG, N. C. **Selection of Electric Motor Drives for Electric Vehicles**. IEEE, p. 1-7, jun. 2009.
- [50] MARINE – Over 400 ships are propelled with our technology. Disponível em: <https://www.ingetteam.com/indar/en-us/sectors/marine/s15_68_p/products.aspx>. Acesso em: 5 abril 2019.
- [51] AHMED, A.; BHUTIA, D. D. **Propulsion System Design and Sizing of an Electric Vehicle**. International Journal of Electronics and Electrical Engineering, v. 3, n. 1, p. 14-18, feb. 2015.
- [52] The Brushless DC Motor and Its Use in Electric Cars. Disponível em: <<http://buildipedia.com/aec-pros/design-news/the-brushless-dc-motor-and-its-use-in-electric-cars>>. Acesso em: 28 abril 2019.
- [53] MagniX Reaches Milestone on Path to Electric Propulsion. Disponível em: <<https://www.ainonline.com/aviation-news/business-aviation/2018-09-27/magnix-reaches-milestone-path-electric-propulsion>>. Acesso em: 15 abril 2019.
- [54] HENDERSHOT JUNIOR, J. R.; MILLER, T. J. E. **Design of Brushless Permanent-Magnet Motors**. First Edition. New York: Oxford University Press, 1994.
- [55] SALEQUE, A. M. **Design of a Brushless DC (BLDC) Motor Controller**. International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology. Department of Electrical and Electronic Engineering. American International University-Bangladesh (AIUB), Dhaka, Bangladesh, 2014.
- [56] KIYOUMARSI, A.; et. al. **Application of the Finite Element Method in Design and Analysis of Permanent-Magnet Motors**. World Scientific and Engineering Academy and Society, 2010.
- [57] Brushless DC Motor: Chapter 12, p. 1-14, 2009. Disponível em: <http://educyclopedia.karadimov.info/library/ems_ch12_nt.pdf>. Acesso em: 2 maio 2019.
- [581] RAMBAMBU, S. **Modeling and Control of a Brushless DC Motor**. Master of Technology In Power Control and Drives. Department of Electrical Engineering National Institute of Technology Rourkela, 2007.
- [59] SILVA, D. F. **Análise de um motor BLDC pelo método dos elementos finitos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações) – Universidade Federal Fluminense – UFF, Niterói, 2018.
- [60] NARDINI, M.; PEREIRA, R. A.; SILVA, L. A. **Projeto de um gerador de ímãs permanentes de fluxo axial sem núcleo de ferro com arranjo Halbach**. Engenharia Elétrica. Disponível em: <<http://www.brasilengenharia.com>>. Acesso em: 15 junho 2019.

- [61] LEMOS, G. S. **Simulação e construção de um motor DC Brushless impresso em 3D**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica e de Telecomunicações) – Universidade Federal Fluminense – UFF, Niterói, 2018.
- [62] PRAVEEN, M. H.; et. al. **Optimal Design of a Surface Mounted Permanent-Magnet BLDC Motor for Spacecraft Applications**. IEEE, p. 413-419, 2010.
- [63] MILIMONFARED, J.; MOGHANI, J. S. **Simplified Design, Optimization and Comparative Study of SPM, BLDC and Halbach Machines for Microsatellite Electro-Mechanical Batteries**. IEEE, Amirkabir University of Technology. Tehran, Iran, p. 413-419, 2015.
- [64] LIU, K.; et. al. **Design and Analysis of Halbach Ironless Flywheel BLDC Motor/Generators**. IEEE Transactions on Magnets, V. 54, nov. 2018.
- [65] XUE, K.; et. al. **Analytical Calculation and Analysis of Eletromagnetic Torque for a Skewed Brushless DC Motor with Halbach Array**. IEEE, School of Automation, Northwestern Polytechnical University, 2017.
- [66] RAVI KUMAR, B.V.; SIVA KUMAR, K. **Design of A New Dual Rotor Radial Flux BLDC Motor with Halbach Array Magnets for an Electric Vehicle**. IEEE, Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology Hyderabad (IITH), Hyderabad India, 2016.
- [67] MARCSA, D. **Induction Motors Simulation by Finite Element Method and Different Potential Formulations with Motion Voltage Term**. Department of Automation Laboratory of Electromagnetic Fields Széchenyi István University, Győr, 2008.
- [68] PEREIRA, L. A. **Método dos elementos finitos aplicado ao eletromagnetismo**. Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- [69] SALLES, F. P. **Aplicação do método de elementos finitos para aprimoramento da análise de motores de indução trifásicos acionado por inversores**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Rio de Janeiro Federal – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.
- [70] DIAS, F. A. **Estudo do comportamento térmico do rotor do motor de indução utilizando o método de elementos finitos**. Aplicação do Método de Elementos Finitos para Aprimoramento da Análise de Motores de Indução Trifásicos Acionado por Inversores. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Rio de Janeiro Federal – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2019.
- [71] DUSANE. P. M.; BUHR, I. K. **Simulation of a Brushless DC Motor in ANSYS – Maxwell 3D**. Master Thesis. Czech Technical University in Prague Faculty of Electrical Engineering, 2013.