



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA**

**MATHEUS LEÃO CAMPOS**

**MOTORES BLDC COMO ALTERNATIVA EFICIENTE PARA A MOBILIDADE  
ELÉTRICA: MODELAGEM E ANÁLISE**

**BELÉM-PA  
2026**

**MATHEUS LEÃO CAMPOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Me. Marcos Aurélio Melo Junior

**BELÉM-PA**

**2026**

**MATHEUS LEÃO CAMPOS**

**Motores BLDC como Alternativa Eficiente Para a Mobilidade Elétrica: Modelagem e Análise**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará.

**Data da aprovação:** \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**Banca Examinadora:**

---

**Me. Marcos Aurélio Melo Junior**

Orientador - (CEAMAZON)

---

**Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca**

Coorientador - Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica  
(UFPA/PPGEE/FEEB/CEAMAZON)

---

**Prof. Dr. Edson Ortiz de Matos**

Avaliador Interno - Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica  
(UFPA/PPGEE/FEEB/CEAMAZON)

---

**Dr. Antonio Roniel Marques de Sousa**

Avaliador Externo (SESI – Belém PA)

# Agradecimentos

A conclusão deste trabalho representa não apenas uma conquista acadêmica, mas o resultado de uma caminhada construída com o apoio de muitas pessoas que estiveram ao meu lado ao longo dessa jornada.

À minha mãe, Sandra; à minha avó, Ruth; e à minha tia, Sílvia, expresso minha mais profunda gratidão. Vocês foram os pilares que me sustentaram nos momentos mais desafiadores, oferecendo amor incondicional, apoio constante e a base sólida que tornou possível cada passo dado até aqui.

Ao meu pai, Rondinelli; ao meu padrinho e tio, Alexandre; e ao meu primo, Lucas, agradeço pelas palavras de incentivo, pela confiança depositada em mim e por acompanharem de perto meu crescimento pessoal e profissional. O apoio de vocês sempre foi força motriz para seguir em frente.

Agradeço a minha namorada e companheira, Viviane, que esteve ao meu lado durante toda a graduação, deixo um agradecimento que transborda em admiração. Obrigado pelo apoio diário, pela paciência nos momentos de maior exigência e por tornar essa trajetória mais leve, significativa e especial. Te amo.

Agradeço à Universidade Federal do Pará, a Faculdade de Engenharia Elétrica, ao PET-Engenharia Elétrica e ao Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEA-MAZON) pelo suporte institucional e pelas oportunidades proporcionadas e pela excelência no ensino. O aprendizado adquirido ao longo dessa trajetória ultrapassa em muito os limites deste trabalho e contribuirá para toda a minha vida profissional.

Aos meus orientadores, Me. Marcos Aurélio Melo Júnior e Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca, expresso minha sincera gratidão pela orientação atenta, pela paciência, pelo rigor acadêmico e pela generosidade com que compartilharam seu conhecimento. Suas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento e amadurecimento deste trabalho.

Aos meus colegas de curso e amigos, agradeço pela parceria, pelas trocas de conhecimento e pelos momentos de descontração que tornaram essa caminhada mais leve. A convivência e o apoio mútuo nos momentos mais desafiadores tornaram essa experiência ainda mais enriquecedora. Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa trajetória e contribuíram para a minha formação em Engenharia Elétrica, deixo meu sincero agradecimento.

# Resumo

Este trabalho apresenta o projeto, modelagem computacional e análise comparativa de um motor Brushless DC (BLDC) de 5 HP (3,73 kW) desenvolvido para aplicações em veículos elétricos de médio porte, incluindo bicicletas elétricas, motocicletas, pequenas embarcações e veículos urbanos leves. A adoção de motores BLDC nessas aplicações oferece vantagens significativas em relação a tecnologias convencionais, incluindo maior eficiência energética (tipicamente 85-97% contra 70-85% dos motores a combustão), menor necessidade de manutenção (pela ausência de escovas), elevada relação torque/peso e maior precisão no controle de velocidade. As análises do projeto do motor foram realizadas por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), com a utilização do software Ansys Motor-CAD. Para isso, foram considerados dois materiais magnéticos para o núcleo do motor: o JFE 10JNEX900 (aço elétrico de grão orientado de alta performance) e o M250-35A (aço silício convencional). Os resultados indicaram que o JFE 10JNEX900 apresentou menores perdas no núcleo (180,05 W contra 184,8 W do M250-35A sob carga) e melhor estabilidade térmica, enquanto o M250-35A mostrou torque médio 2,8% superior (12,647 Nm contra 12,349 Nm). O mapa de eficiência destacou uma faixa ótima de operação em torno de 3000 rpm e 20 Nm, na qual o motor alcançou até 97% de eficiência. Além das vantagens intrínsecas da topologia de motores BLDC, o estudo evidenciou que a seleção criteriosa de materiais e configurações construtivas pode elevar em até 22% o desempenho energético em aplicações veiculares. Esses resultados fornecem subsídios técnicos relevantes para o desenvolvimento de sistemas de propulsão elétrica, contribuindo para a consolidação da transição energética no setor de transporte de média capacidade.

**Palavras-chave:** Motor BLDC. Eficiência Energética. Modelagem por Elementos Finitos. Mobilidade Elétrica. Veículos Elétricos.

# Abstract

This work presents the design, computational modeling and comparative analysis of a 5 HP (3.73 kW) Brushless DC (BLDC) motor developed for medium-sized electric vehicles, including electric bicycles, motorcycles, small boats and light urban vehicles. The adoption of BLDC motors in these applications offers significant advantages over conventional technologies, including higher energy efficiency (typically 85-97% compared to 70-85% of combustion engines), lower maintenance requirements (due to the absence of brushes), high torque-to-weight ratio and greater speed control accuracy. The motor design analyses were performed using the Finite Element Method (FEM) with Ansys Motor-CAD software. Two magnetic materials for the motor core were considered: JFE 10JNEX900 (high performance grain-oriented electrical steel) and M250-35A (conventional silicon steel). Results indicated that JFE 10JNEX900 showed lower core losses (180.05 W vs. 184.8 W for M250-35A under load) and better thermal stability, while M250-35A showed 2.8% higher average torque (12.647 Nm vs. 12.349 Nm). The efficiency map highlighted an optimal operating range around 3000 rpm and 20 Nm, where the motor achieved up to 97% efficiency. Besides the intrinsic advantages of BLDC motor topology, the study showed that careful selection of materials and construction configurations can increase energy performance by up to 22% in vehicular applications. These results provide relevant technical support for the development of electric propulsion systems, contributing to the consolidation of the energy transition in the medium-capacity transport sector.

**Keywords:** BLDC motor. Energy Efficiency. Finite Element Modeling. Electric Mobility. Electric Vehicles.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Seção transversal do motor BLDC mostrando: (a) disposição dos ímãs permanentes no rotor, (b) núcleo do estator, e (c) configuração dos enrolamentos trifásicos .....	42
Figura 2 – Diagrama do enrolamento DLRK implementado (3 fases, 2 camadas, 8 caminhos paralelos) .....	44
Figura 3 – Distribuição da densidade de fluxo magnético no núcleo do motor BLDC, com valor máximo de 1,82 T.....	47
Figura 4 – Distribuição da densidade de fluxo magnético para o material M250-35A. Valor máximo de aproximadamente 1,80 T.....	48
Figura 5 – Distribuição de temperatura no motor BLDC em regime estacionário, destacando enrolamentos e núcleo magnético.....	49
Figura 6 – Mapa de eficiência do motor BLDC em função da velocidade e torque para o material JFE 10JNEX900 .....	50
Figura 7 – Mapa de eficiência do motor BLDC em função da velocidade e torque para o material M250-35A.....	50

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros construtivos da máquina .....	42
Tabela 2 – Parâmetros do enrolamento DLRK implementado .....	43
Tabela 3 – Comparação de desempenho entre os materiais JFE 10JNEX900 e M250-35A	46

# Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BLDC	Brushless DC Motor (Motor CC sem Escovas)
MEF	Método dos Elementos Finitos
FEM	Finite Element Method
GOES	Grain-Oriented Electrical Steel
NGOES	Non-Grain-Oriented Electrical Steel
HP	Horse Power (Cavalo-vapor)
DC	Direct Current (Corrente Contínua)
AC	Alternating Current (Corrente Alternada)
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DLRK	Distributed Lap Right-Hand Key
CEAMAZON	Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia

# Lista de símbolos

## Letras Latinas Maiúsculas

$B_g$	Densidade de fluxo magnético no entreferro (T)
$\vec{B}$	Vetor densidade de fluxo magnético (T)
$\vec{E}$	Vetor campo elétrico (V/m)
$L$	Indutância da bobina (H)
$L_{st}$	Comprimento axial do estator (m)
$N$	Número de espiras
$N_p$	Número de polos magnéticos
$R$	Resistência da bobina ( $\Omega$ )
$R_{ro}$	Raio do rotor (m)
$T$	Torque no eixo (Nm)
$T_e$	Torque eletromagnético (Nm)
$V$	Tensão aplicada à fase (V)

## Letras Latinas Minúsculas

$e$	Força contra-eletromotriz (back-EMF) (V)
$i$	Corrente elétrica (A)
$k_t$	Constante de torque (Nm/A)
$k_w$	Fator de enrolamento (adimensional)

## Letras Gregas

$\theta_e$	Ângulo elétrico (rad)
$\theta_m$	Ângulo mecânico (rad)
$\phi$	Fluxo magnético (Wb)
$\omega_m$	Velocidade angular mecânica (rad/s)

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	Contextualização .....	11
1.2	A Tecnologia dos Motores BLDC na Mobilidade Elétrica.....	12
1.3		
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>15</b>
2.1	Descrição Geral da Metodologia .....	15
2.2	Materiais Analisados .....	16
2.3	Modelagem Matemática do Motor Elétrico.....	16
2.4	Relações Fundamentais de Motores BLDC.....	17
2.5	Relação entre Grandezas Elétricas e Mecânicas.....	17
2.6	Modelagem do Torque Eletromagnético.....	18
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS .....</b>	<b>20</b>
3.1	Introdução .....	20
3.2	Artigo: Análise de Motores BLDC para Aplicações em Mobilidade Elétrica.....	32
3.3	Considerações sobre o Artigo.....	33
3.4	Outras Publicações .....	34
<b>4</b>	<b>MODELAGEM COMPUTACIONAL DO MOTOR BLDC .....</b>	<b>44</b>
4.1	Especificações do Motor.....	44
4.2	Geometria da Máquina .....	44
4.3	Análise Geométrica do Motor BLDC.....	45
4.4	Configuração do Enrolamento DLRK .....	47
4.5	Vantagens da Configuração Adotada .....	48
4.6	Importância do Método dos Elementos Finitos na Modelagem de Motores.....	48
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>50</b>
5.1	Comparação de Desempenho entre Materiais .....	50
5.2	Análise Comparativa da Densidade de Fluxo Magnético .....	50
5.3	Análise Térmica Estacionária do Motor .....	52
5.4	Análise do Mapa de Eficiência.....	53
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>55</b>
6.1	Conclusão.....	55
6.2	Trabalhos Futuros.....	55
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>57</b>
	<b>A1 Cotema 2024.....</b>	<b>58</b>
	<b>A2 Conem 2024.....</b>	<b>59</b>
	<b>A3 Induscon 2025.....</b>	<b>60</b>
	<b>Referências .....</b>	<b>61</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O cenário atual é marcado por intensas transformações decorrentes das mudanças climáticas observadas nas últimas décadas. Entre os principais fatores que contribuem para esse processo, destaca-se a emissão de gases de efeito estufa provenientes da queima de combustíveis fósseis, com ênfase no setor de transporte (MARTINS et al., 2017).

Esse contexto representa um desafio também para o Brasil, apesar de sua expressiva participação de fontes renováveis na matriz energética, que alcança aproximadamente 50,0 %, em comparação com 14,3 % no panorama global (ENERGÉTICA, 2025).

De acordo com dados do Balanço Energético Nacional de 2025, ano base 2024, o país totalizou emissões de 431,3 MtCO<sub>2</sub>-eq (milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente), sendo 214,3 MtCO<sub>2</sub>-eq provenientes do setor de transporte (ENERGÉTICA, 2025).

A transição para veículos elétricos surge como alternativa crucial para reduzir essas emissões, abrangendo desde pequenos veículos individuais como bicicletas e motocicletas elétricas até embarcações fluviais. Nesse contexto, motores elétricos de média potência (aproximadamente 5 HP) desempenham papel estratégico, por sua capacidade de atender de forma eficiente essa diversidade de aplicações.

O desenvolvimento de motores Brushless DC (BLDC) para tais aplicações exige soluções que conciliem alta eficiência energética, compactação dimensional, robustez operacional e custo competitivo. Além disso, esses motores devem adaptar-se a diferentes condições de uso, desde o transporte urbano até aplicações mais exigentes em ambientes úmidos, como nas embarcações fluviais, onde confiabilidade e durabilidade são fundamentais (SOUZA; SILVA, 2020).

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e a análise comparativa de um motor BLDC de 5 HP para veículos elétricos de médio porte, com ênfase na avaliação de seu desempenho energético frente a diferentes materiais magnéticos.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 1 apresenta a tecnologia dos motores BLDC aplicada à mobilidade elétrica; o Capítulo 3 descreve a metodologia adotada; o Capítulo 4 detalha a modelagem computacional do projeto de motor BLDC desenvolvido; o Capítulo 5 discute os resultados obtidos; e o Capítulo 6 apresenta as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

## 1.1 A Tecnologia dos Motores BLDC na Mobilidade Elétrica

A mobilidade elétrica tem impulsionado o uso de motores mais eficientes e confiáveis nos sistemas de transporte. Nesse contexto, os motores Brushless Direct Current (BLDC) destacam-se pela elevada eficiência, alta densidade de potência e boa resposta dinâmica, sendo amplamente aplicados em veículos elétricos e outros sistemas de propulsão. O avanço da eletrônica de potência e das técnicas de controle tem ampliado ainda mais o uso dessa tecnologia (MASHIRI; MUTEBA, 2025; ALI; SHARY; ABBOOD, 2024).

Os motores BLDC utilizam ímãs permanentes no rotor e comutação eletrônica em substituição às escovas mecânicas. Essa característica reduz perdas mecânicas, aumenta a confiabilidade e diminui a necessidade de manutenção. Além disso, a elevada relação torque-massa torna esses motores adequados para aplicações de mobilidade elétrica (KURT et al., 2024; YORAT; ÖZBEK; SARIBULUT, 2023).

Avanços recentes em técnicas de controle e modelagem têm permitido melhorar o desempenho desses motores por meio de métodos baseados em modelagem preditiva e inteligência artificial. Essas abordagens contribuem para maior precisão no controle de velocidade e torque, aumentando a eficiência energética dos sistemas de acionamento (KHAN et al., 2025; DASANAYAKE; PERERA, 2023).

Os motores Brushless DC (BLDC) desempenham um papel fundamental na expansão da mobilidade elétrica devido às suas características de alta eficiência, baixo ruído e baixa emissão de poluentes. A ausência de escovas elimina o atrito mecânico e o desgaste, resultando em motores mais silenciosos e com menor necessidade de manutenção (HUSAIN, 2011).

A presente pesquisa aborda o projeto e análise de um motor BLDC de 5 HP (3,73 kW) através de modelagem computacional avançada, avaliando diferentes materiais magnéticos e configurações construtivas para otimizar seu desempenho nesta gama diversificada de aplicações veiculares.

## 1.3 Controlador

Um componente fundamental para o funcionamento adequado de motores BLDC é o controlador eletrônico, responsável por realizar a comutação das fases e garantir o giro contínuo do rotor. Diferentemente dos motores CC com escovas, onde a comutação é mecânica, os motores BLDC dependem de um inversor eletrônico que energiza as bobinas do estator na sequência correta baseada na posição do rotor (HANSELMAN, 2003).

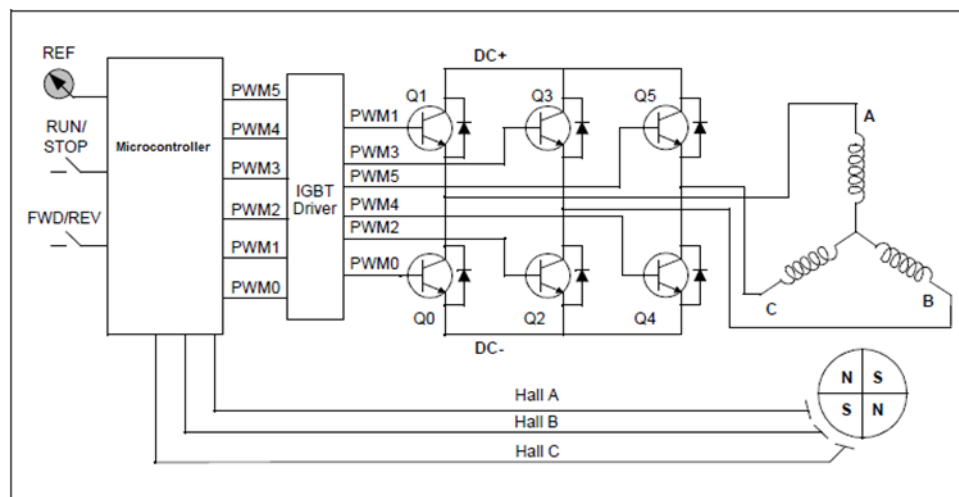
O controlador tem como função principal monitorar a posição do rotor e comutar as fases do estator no momento adequado. Para isso, utiliza sensores de efeito Hall ou técnicas de detecção da força contraeletromotriz (back-EMF), e o chaveamento é atualizado, mantendo o campo magnético girante do estator sempre à frente do campo do rotor, produzindo torque contínuo (HANSELMAN, 2003).

O controlador é tipicamente implementado com um inversor trifásico em ponte completa, composto por seis chaves semicondutoras (MOSFET ou IGBT), conforme ilustrado na Figura 1. Estas chaves operam em alta frequência, modulando a tensão aplicada aos terminais do motor através da técnica de Modulação por Largura de Pulso (PWM) (HANSELMAN, 2003).

### 1.3.1 Exemplo de Implementação Prática

O trabalho de Borges (2017) apresenta um desenvolvimento completo de um controlador para motor BLDC, incluindo o projeto de hardware e software. A Figura 1 ilustra o esquemático do módulo de potência desenvolvido pelo autor.

Figura 1. Modelo de controlador para motores BLDC.



Fonte: Adaptado de Borges (2017)

O circuito apresentado utiliza o driver IR2101 em configuração bootstrap para acionamento dos transistores MOSFET de potência, conforme discutido na seção anterior. Este projeto prático demonstra a viabilidade da implementação dos conceitos teóricos apresentados.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Descrição Geral da Metodologia

O modelo apresentado contempla a modelagem física e matemática de um motor BLDC, desenvolvida com base no Método dos Elementos Finitos (Finite Element Method - FEM). Para a simulação do motor elétrico, foi utilizado um software especializado em projetos de máquinas elétricas, considerando as propriedades magnéticas, térmicas e mecânicas dos materiais empregados.

### 2.2 Materiais Analisados

A escolha dos materiais magnéticos do núcleo é um fator importante para o desempenho e a eficiência de máquinas elétricas. Suas propriedades influenciam diretamente as perdas no núcleo, a densidade de fluxo magnético e o comportamento eletromagnético do motor. Nesse contexto, foram avaliados diferentes materiais magnéticos para análise comparativa de desempenho. Assim, foram avaliados os seguintes materiais magnéticos para o núcleo do motor:

- **JFE 10JNEX900:** Aço elétrico de grão orientado (GOES) de alta performance, com perdas específicas de 0,90 W/kg (a 1,7 T, 50 Hz) e densidade de fluxo saturado de 1,92 T (CORPORATION, 2020).
- **M250-35A:** Aço silício não orientado (NGOES) convencional, apresentando perdas específicas de 2,50 W/kg (a 1,5 T, 50 Hz) e teor de silício de 3,2 % (SMITH; LEE, 2019).

A seleção destes materiais permite uma análise comparativa entre tecnologias convencionais e avançadas, seguindo os procedimentos de teste estabelecidos em (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2017). O modelo por elementos finitos considera as curvas BH características de cada material, suas propriedades térmicas e as perdas no núcleo em diferentes condições operacionais.

### 2.3 Modelagem Matemática do Motor Elétrico

A modelagem matemática do motor elétrico foi feita levando em consideração a base fundamental das Leis de Maxwell do eletromagnetismo, representada pela Equação 3.1:

$$\nabla \times \vec{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t} \quad (3.1)$$

O funcionamento dos motores elétricos é baseado na *Indução Eletromagnética de Faraday*, que estabelece a regra e a lógica do funcionamento físico desses dispositivos (HANSELMAN, 2003). De acordo com este princípio, a variação do fluxo magnético ( $\phi$ ) através de uma espira induz uma tensão ( $V$ ) na própria espira, criando um campo magnético induzido que se contrapõe ao fluxo magnético externo (HANSELMAN, 2003), conforme a Equação 3.2:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.2)$$

Essa equação é essencial para a modelagem do motor BLDC, pois explica a origem da força contra-eletromotriz (*back-EMF*), que se manifesta nas bobinas do estator como uma tensão induzida proporcional à variação do fluxo magnético, causado pela rotação do rotor com ímãs permanentes.

Assim, para a modelagem elétrica de cada fase do motor BLDC, utiliza-se a equação da tensão no estator, que representa o equilíbrio entre as diversas componentes da tensão, conforme a Equação 3.3:

$$V = Ri + L \frac{di}{Dt} + e \quad (3.3)$$

onde:

- $V$  = Tensão aplicada à fase;
- $R$  = Resistência da bobina;
- $L$  = Indutância da bobina;
- $i$  = Corrente da fase;
- $e$  = Força Contra-Eletromotriz (*back-EMF*).

Esta equação é amplamente utilizada na modelagem de motores BLDC, conforme apresentado por (KRISHNAN, 2001) e (CHAN; CHAU, 2001).

## 2.4 Relações Fundamentais de Motores BLDC

Um motor elétrico é uma máquina destinada à conversão de energia elétrica em ener-

gia mecânica. A relação fundamental que expressa essa conversão de energia é representada pela igualdade entre a potência elétrica fornecida ao motor e a potência mecânica desenvolvida

no eixo, de maneira ideal, desprezando perdas nos enrolamentos, núcleo e de transmissão de movimento (HANSELMAN, 2003):

$$V \cdot i = T \cdot \omega_m \quad (3.4)$$

onde:

- $V$  – Tensão aplicada ao motor;
- $i$  – Corrente elétrica;
- $T$  – Torque no eixo;
- $\omega_m$  – Velocidade angular mecânica.

## 2.5 Relação entre Grandezas Elétricas e Mecânicas

Nos motores elétricos, especialmente nos motores BLDC, é importante distinguir entre dois tipos de ângulos:

- Ângulo Mecânico ( $\theta_m$ ): corresponde à rotação física completa do rotor, com  $360^\circ$  mecânicos ( $M$ ) representando uma volta completa.
- Ângulo Elétrico ( $\theta_e$ ): depende do número de pólos magnéticos ( $N_p$ ) do motor e expressa a variação do campo magnético girante.

A relação entre o ângulo elétrico e o ângulo mecânico é expressa pela seguinte equação:

$$\theta_e = \frac{N_p}{2} \cdot \theta_m \quad (3.5)$$

Esta relação é essencial para o projeto e a modelagem de motores BLDC, pois impacta diretamente o controle do motor e o cálculo da posição e velocidade.

## 2.6 Modelagem do Torque Eletromagnético

O torque gerado pelo motor elétrico está relacionado à sua capacidade de vencer a inércia rotacional e realizar trabalho mecânico. Segundo (HANSELMAN, 2003), o torque pode ser expresso em função das características construtivas do motor:

$$T_e = 2 \cdot N \cdot B_g \cdot L_{st} \cdot R_{ro} \cdot i \quad (3.6)$$

onde:

- $N$  – Número de espiras;
- $B_g$  – Densidade de fluxo magnético no entreferro;
- $L_{st}$  – Comprimento axial do estator;
- $R_{ro}$  – Raio do rotor;
- $i$  – Corrente na espira.

Para simplificação, agrupa-se os parâmetros construtivos em uma constante de torque ( $k_t$ ):

$$k_t = 2 \cdot N \cdot B_g \cdot L_{st} \cdot R_{ro} \quad (3.7)$$

Assim, a equação do torque se torna:

$$T = k_t \cdot i \quad (3.8)$$

Essa forma simplificada é amplamente utilizada em modelos de controle de motores BLDC, facilitando a implementação de algoritmos de controle, como o controle por corrente ou o controle vetorial (CHAN; CHAU, 2001).

## 3 TRABALHOS RELACIONADOS

### 3.1 Introdução

Durante o período de graduação, foram desenvolvidos artigos científicos relacionados à temática de motores elétricos, eficiência energética e modelagem computacional. Este capítulo apresenta os principais trabalhos publicados, que contribuíram para a fundamentação e desenvolvimento desta pesquisa.

### 3.2 Artigo: Análise de Motores BLDC para Aplicações em Mobilidade Elétrica

O artigo intitulado "Análise de Motores BLDC para Aplicações em Mobilidade Elétrica" foi apresentado no Congresso de Tecnologia em Materiais (COTEMA) em 2024. Este trabalho, no qual atuei como autor, aborda a modelagem e análise de motores BLDC com diferentes materiais magnéticos, servindo como base para o desenvolvimento deste TCC.

O artigo completo é apresentado nas páginas seguintes:

**I Congreso Internacional de Transición Energética y Medio Ambiente**

**ELECTRIFICACIÓN DE EMBARCACIONES EN LA AMAZONÍA: CONTRIBUCIONES DE LOS MOTORES SIN ESCOBILLAS.**

**ELETRIFICAÇÃO DE EMBARCAÇÕES NA AMAZÔNIA: CONTRIBUIÇÕES DOS MOTORES SEM ESCOVA**

**ELECTRIFICATION OF VESSELS IN THE AMAZON: CONTRIBUTIONS OF BRUSHLESS MOTORS.**

Matheus Leão Campos<sup>1</sup>; Marcos Aurélio Melo Júnior<sup>2</sup>; Iago Ranieri Miranda Rodrigues Moraes<sup>3</sup>; Iris Caroline Rodrigues<sup>4</sup>; Antonio Roniel Marques de Sousa<sup>5</sup>; Wellington da Silva Fonseca<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Centro Amazónico de Excelencia en Eficiencia Energética. Universidad Federal de Pará, Pará - Belém - Brasil

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia. Universidade Federal do Pará, Belém - Brasil

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Amazon Center of Excellence in Energy Efficiency. Universidade Federal do Pará, Belém - Brazil

matheus.campos@itec.ufpa.br

marcos

iago.morais@itec.ufpa.br

iriscarolini23@gmail.com

roniel@ufpa.br

fonseca@ufpa.br

**Resumen**

La electrificación de las embarcaciones en la región amazónica es una estrategia innovadora y prometedora que busca impulsar la transición energética, así como la sostenibilidad y la reducción significativa de los impactos ambientales provocados por el transporte fluvial en la región. Dado que las embarcaciones representan uno de los principales medios de desplazamiento para los habitantes ribereños en la Amazonía, es fundamental abordar el tema del sistema de propulsión impulsado por motores de combustión, los cuales han demostrado ser perjudiciales para el medio ambiente. Actualmente, la gran mayoría de estas embarcaciones utiliza motores de combustión, que, además de ser ineficientes, son una fuente considerable de contaminación atmosférica y fluvial. Estos motores funcionan con combustibles fósiles, liberando dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y otros contaminantes que afectan negativamente la atmósfera y los ecosistemas acuáticos. Esta contaminación, a su vez, tiene serias repercusiones negativas para la salud de las personas y la biodiversidad de la región. Por otro lado, la introducción de motores eléctricos en embarcaciones fluviales representa una alternativa altamente eficaz a los motores tradicionales impulsados por combustión. Los motores eléctricos tienen una eficiencia mucho mayor, ofreciendo una forma más sostenible y limpia de propulsión. Además, su alimentación puede provenir de fuentes de energía renovable, como energía solar, eólica o hidroeléctrica, lo que contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la preservación del medio ambiente. Los motores eléctricos no emiten gases nocivos ni residuos contaminantes durante su funcionamiento, lo que representa una gran ventaja en comparación con los motores de combustión. Esto significa que no hay liberación de (CO<sub>2</sub>), (NO<sub>x</sub>) u otros contaminantes perjudiciales para la calidad del aire y el ecosistema de la Amazonía. De esta manera, la implementación de motores eléctricos en las embarcaciones fluviales puede minimizar considerablemente los impactos ambientales ya existentes, contribuyendo a la mitigación de los cambios climáticos y a la preservación ambiental de la región. Esta transición energética con respecto a la electrificación de las embarcaciones en la Amazonía representa no solo un avance tecnológico, sino también una manifestación concreta del compromiso con la protección ambiental y la sostenibilidad, buscando un futuro más equilibrado y saludable para las comunidades ribereñas y la flora y fauna únicas de la Amazonía. Además, esta investigación se centra en la sustitución de los motores de combustión convencionales por motores eléctricos en pequeñas embarcaciones de uso constante por parte de los habitantes ribereños para la movilidad. Por lo tanto, este trabajo propone el desarrollo de un motor eléctrico del tipo Brushless Direct Current (BLDC) diseñado específicamente para embarcaciones ribereñas de pequeño tamaño, orientado a los ríos presentes en la Amazonía. Este estudio se llevará a cabo mediante simulación computacional utilizando el Método de Elementos Finitos y software de simulación de motores eléctricos, con el objetivo de diseñar motores con una velocidad angular de aproximadamente 314 rad/s y un par nominal en el eje del motor de 12 N.m, a través de una potencia mecánica de 5 hp, además de una eficiencia superior al 95%, lo que garantiza una navegabilidad estable para una carga constante en el eje de la máquina.

**Palabras clave:** Transición energética, Eficiencia energética, Sin escobillas, Movilidad eléctrica.

### Resumo

A eletrificação das embarcações na região amazônica é uma estratégia inovadora e promissora que busca impulsionar a transição energética, bem como a sustentabilidade e redução significativa dos impactos ambientais provocados pelo transporte fluvial na região. Considerando que as embarcações representam um dos principais meios de deslocamento para os povos ribeirinhos na Amazônia, é fundamental abordar a questão do sistema de propulsão movido por motores à combustão, os quais têm se mostrado prejudiciais ao meio ambiente. Atualmente, a grande maioria dessas embarcações utiliza motores à combustão, que, além de serem ineficientes, são uma fonte considerável de poluição atmosférica e fluvial. Esses motores funcionam à base de combustíveis fósseis, liberando dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e outros poluentes que afetam negativamente a atmosfera e os ecossistemas aquáticos. Essa poluição, por sua vez, tem sérias repercussões negativas para a saúde das pessoas e para a biodiversidade da região. Por outro lado, a introdução de motores elétricos em embarcações fluviais representa uma alternativa altamente eficaz aos motores tradicionais movidos a combustão. Os motores elétricos possuem uma eficiência muito maior, oferecendo uma forma mais sustentável e limpa de propulsão. Além disso, sua alimentação pode ser proveniente de fontes de energia renovável, como energia solar, eólica e hidrelétrica, o que

contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a preservação do meio ambiente. Os motores elétricos não emitem gases nocivos ou resíduos poluentes durante seu funcionamento, o que representa uma grande vantagem em relação aos motores à combustão. Isso significa que não há liberação de (CO<sub>2</sub>), (NO<sub>x</sub>) ou outros poluentes prejudiciais à qualidade do ar e ao ecossistema da Amazônia. Dessa forma, a implementação de motores elétricos nas embarcações fluviais pode minimizar consideravelmente os impactos ambientais já existentes, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e para a preservação ambiental da região. Essa transição energética no que diz respeito à eletrificação das embarcações na Amazônia representa não apenas um avanço tecnológico, mas também uma manifestação concreta do compromisso com a proteção ambiental e a sustentabilidade, visando um futuro mais equilibrado e saudável para as comunidades ribeirinhas e para a flora e fauna únicas da Amazônia. Ademais, essa pesquisa possui como foco na substituição dos motores a combustão convencional por motores elétricos de pequenas embarcações que são de uso constante dos ribeirinhos para mobilidade. Assim, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um motor elétrico do tipo Brushless Direct Current (BLDC) projetado especificamente para embarcações ribeirinhas de pequeno porte, voltado para os rios presentes na Amazônia, este estudo será realizado por meio de simulação computacional utilizando o Finit Element Method e softwares de simulação de motores elétricos, com o objetivo de se projetar motores com velocidade angular de aproximadamente 314 rad/s e torque nominal no eixo do motor de 12 N.m, através de uma potência mecânica de 5 hp, além de eficiência superior a 95%, o que garante uma navegabilidade estável para carga constante no eixo da máquina.

**Palavras-chave:** Transição energética, eficiência energética, sem escovas, mobilidade elétrica.

### **Abstract**

The electrification of vessels in the Amazon region is an innovative and promising strategy aimed at driving the energy transition, as well as promoting sustainability and a significant reduction in environmental impacts caused by river transport in the area. Considering that vessels represent one of the main means of transportation for riverine communities in the Amazon, it is crucial to address the issue of combustion engine propulsion systems, which have proven to be harmful to the environment. Currently, the vast majority of these vessels use combustion engines, which, in addition to being inefficient, are a considerable source of air and water pollution. These engines operate on fossil fuels, releasing carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), and other pollutants that negatively affect the atmosphere and aquatic ecosystems. This pollution, in turn, has serious negative repercussions for human health and the region's biodiversity. On the other hand, the introduction of electric motors in river vessels represents a highly effective alternative to traditional combustion engines. Electric motors have much higher efficiency, offering a more sustainable and clean form of propulsion. Furthermore, their power can come from renewable energy sources such as solar, wind, or hydropower, contributing to the reduction of greenhouse gas emissions and environmental preservation. Electric motors do not emit harmful gases or polluting residues during operation, a significant advantage over combustion engines. This means no release of CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, or other pollutants harmful to air quality and the Amazon ecosystem. Thus, the implementation of electric motors in river vessels can considerably minimize existing environmental impacts, contributing to the mitigation of climate change and the environmental preservation of the region. This energy transition concerning the electrification of vessels in the Amazon represents not only technological advancement but also a concrete manifestation of a commitment to environmental protection and sustainability, aiming for a more balanced and healthy future for riverine communities and the unique flora and fauna of the Amazon. Moreover, this research focuses on replacing conventional combustion engines with electric motors for small vessels that are constantly used by riverine communities for mobility. Therefore, this study proposes the development of a Brushless Direct Current (BLDC) electric motor specifically designed for small river vessels, targeting the rivers in the Amazon.

This research will be conducted through computer simulation using the Finite Element Method and electric motor simulation software, with the aim of designing motors with an angular velocity of approximately 314 rad/s and a nominal torque on the motor shaft of 12 N.m, through a mechanical power of 5 hp, in addition to an efficiency greater than 95%, ensuring stable navigability for constant load on the machine's shaft.

**Keywords:** Energy transition, Energy Efficiency, Brushless, Electric Mobility.

## INTRODUÇÃO

O mundo atual passa por um período turbulento em razão das expressivas mudanças climáticas dos últimos anos. Entre os inúmeros fatores que potencializam as mudanças recentes, destaca-se a emissão de gases nocivos provenientes da queima de combustíveis fósseis, principalmente no setor de transporte (Martins, 2017). Um desafio mesmo para o Brasil, que apresenta grande parcela de contribuição de fontes renováveis em sua matriz energética, chegando a 47,4%, em comparação com 14,1% no mundo (EPE, 2023).

Dados do Balanço Energético Nacional de 2023, ano base 2022, apontam que o país atingiu um total de emissão de 423 Mt CO<sub>2</sub>-eq (milhões de toneladas de dióxido de Carbono Equivalente), sendo 210,4 Mt CO<sub>2</sub>-eq, proveniente do setor de transporte (EPE, 2023).

Na região amazônica, formada por uma extensa bacia hidrográfica, parte de seus territórios é cercada por rios de água doce, onde se desenvolvem inúmeras cidades e comunidades ribeirinhas. Desse modo, o transporte fluvial assume um protagonismo na mobilidade regional, sendo fundamental para a conexão entre essas localidades e o acesso a recursos essenciais, além de desempenhar um papel vital na economia e na vida cotidiana das populações locais. Entre esses meios de transporte, as rabetas são

utilizadas de maneira majoritária na locomoção tanto de passageiros quanto de mercadorias. Contudo, apesar de ser uma solução mais viável, dada as características da região, esses transportes ainda são um expoente nas emissões de gases nocivos à atmosfera, uma vez que os motores utilizam, em sua maioria, da queima de combustíveis fósseis (Gabriela, 2020). Dessa forma, faz-se necessária a busca por soluções que se adequem à realidade amazônica, no contexto da transição energética, possibilitando a substituição gradual dos motores utilizados em embarcações.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um projeto de motor elétricos sem escovas (Brushless Direct Current – BLDC), por meio de simulação computacional, utilizando o Método de Elementos Finitos.

## METODOLOGIA

O modelo proposto apresenta a modelagem física e matemática do motor BLDC, a partir do Método dos Elementos Finitos (Finite Element Method – FEM), sendo utilizado um software de motores elétricos para a simulação do motor elétrico. O motor foi projetado com potência de entrada de 5 HP e torque nominal no eixo de 12 N.m e velocidade de 3000 rpm.

O software também foi utilizado para a análise eletromagnética da máquina. Além disso, o projeto também detalha outros aspectos construtivos da máquina como diâmetros dos condutores, peso e material do núcleo.

Assim, todos os fatores citados contribuem para uma execução eficiente da máquina elétrica do trabalho, a serem detalhados nas seções a seguir.

## Modelagem Matemática

A modelagem matemática do motor elétrico foi feita levando em consideração a base fundamental das leis de Maxwell do eletromagnetismo, representada pela a equação 1.

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

A partir de manipulações vetoriais sobre essa equação, foi obtida a forma desejada para a Lei de Faraday.

O funcionamento dos motores elétricos é baseado na Indução Eletromagnética de Faraday, que dita a regra e a lógica do funcionamento físico dos motores (Hanselman, 2003). Dessa forma, o princípio da indução eletromagnética de Faraday indica que a variação do fluxo magnético em uma

espira induz uma tensão na própria espira, no qual a mesma cria um próprio campo que se contrapõe ao fluxo magnético externo (Hanselman, 2003).

$$V = - N \frac{d\varphi}{dt} \quad (2)$$

Sendo  $V$  a tensão induzida,  $N$  o número de espiras e  $\varphi$  o fluxo magnético.

Nos motores elétricos, existem inúmeras ramificações com finalidades específicas no mercado industrial. O presente trabalho trata da substituição gradual dos motores de embarcações de pequeno porte nas comunidades ribeirinhas por motores sem escovas BLDC, com a justificativa de uma eficiência superior aos motores convencionais e menor impacto ambiental (Deepak, 2022). Além disso, os motores BLDC lideram a recente eletrificação de vários tipos de meios de transporte. Esse tipo de motor é composto de rotor interno, sendo o modelo que mais se assemelha às máquinas elétricas convencionais já existentes (Silva, 2018).

O motor de rotor interno apresenta algumas vantagens como um fácil resfriamento do estator, alta velocidade e baixa inércia, sendo os indicadores desejados para o projeto do motor (Silva, 2018). Conforme o indicado na Figura 1, os motores BLDC se encaixam na categoria dos motores síncronos AC, indicando que a velocidade de rotação do eixo será igual à velocidade de rotação do campo girante.

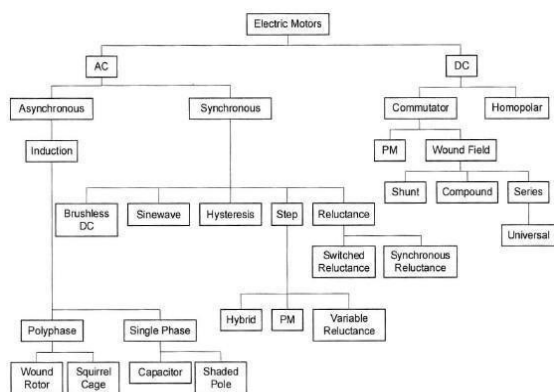


Figura 1. Classificação dos Motores (Hanselman, 2003).

Nesse sentido, um motor elétrico é uma máquina de conversão de energia elétrica em energia

mecânica, ou seja, um motor elétrico possui uma fonte de energia elétrica que pode ser expressa pela rede elétrica ou bateria e converte essa

energia elétrica em energia mecânica. A equação que expressa tal condição está exposta na equação 3 e expressa a igualdade entre a potência elétrica e a potência mecânica medida no eixo da máquina. (Hanselman, 2003).

$$V \cdot i = T \cdot \omega_m \quad (3)$$

Além disso, a equação 3 mostra que o produto da tensão no barramento principal das fases e a corrente é igual ao produto do torque ( $T$ ) pela velocidade angular no eixo ( $\omega_m$ ) e é a principal relação utilizada pelo *Software* de motores elétricos para a verificação do desempenho do motor na simulação, já que é mais adequado trabalhar com parâmetros elétricos como tensão e corrente, em vez de trabalhar com o fluxo magnético e campo magnético conforme a Equação 1 indica.

### Relação entre Grandezas Elétricas e Mecânicas

Em um motor elétrico, existem 2 tipos de ângulos abordados nas equações. É bastante intuitivo que o ângulo mecânico completo de um motor seja  $360^\circ$  Mecânicos ( $M$ ). No entanto, para um motor BLDC, o ângulo elétrico é obtido em função do número de pólos magnéticos escolhido para o projeto. A relação entre ângulo mecânico e ângulo elétrico está expressa na equação 3.

$$\theta_e = (N_m/2) \cdot \theta_M \quad (4)$$

e indica que a medida angular cresce de maneira proporcional ao número de pólos magnéticos da máquina. Para o motor do presente trabalho,  $360^\circ M$  equivale a  $1440^\circ E$ , já que  $N_m$  é igual a 8.

### Relação do Torque

As máquinas elétricas possuem algumas grandezas importantes para se determinar a capacidade de trabalho do motor. O torque no eixo está relacionado à capacidade com que o motor tem de vencer a inércia rotacional no qual está inserido. Desse modo, o módulo do torque acaba sendo uma relação primordial para o projeto. Segundo (Hanselman, 2003), o módulo do torque obedece a relação expressa na equação 4.

$$T = 2 \cdot N \cdot B_g \cdot L_{st} \cdot R_{ro} \cdot i \quad (5)$$

Sendo  $B_g$ , a densidade de fluxo magnético no estator,  $L_{st}$  o comprimento do motor,  $R_{ro}$  o raio do rotor e  $i$  a corrente na espira. A relação indica que o torque é influenciado por aspectos construtivos da máquina, deixando margem para um projeto consciente da máquina. Tomando a relação de parâmetros construtivos da máquina como uma constante de torque, obtemos a equação 2.

$$k_t = 2 \cdot N \cdot B_g \cdot L_{st} \cdot R_{ro} \quad (6)$$

A relação do módulo do torque em função da constante da equação 5 é expresso na equação 7.

$$T = k_t \cdot i \quad (7)$$

fazendo com que o torque seja diretamente proporcional às características geométricas da máquina (Hanselman, 2003).

## MODELAGEM COMPUTACIONAL DO MOTOR

O motor BLDC foi simulado em um *Software* de simulação de motores elétricos, o Ansys Motor-CAD. Assim, a máquina foi projetada para entregar um torque nominal de 12 N.m e velocidade de rotação de 3000 rpm com uma eficiência superior a 95%. O projeto aborda desde os aspectos construtivos até a análise eletromagnética do motor e a construção do mapa de eficiência.

### Geometria do Motor

Conforme é apresentado na Figura 1, pode-se observar a seção transversal do motor contendo as ranhuras, estator e rotor. O motor do presente trabalho possui 24 ranhuras no seu estator e 8 ímãs permanentes em seu rotor.

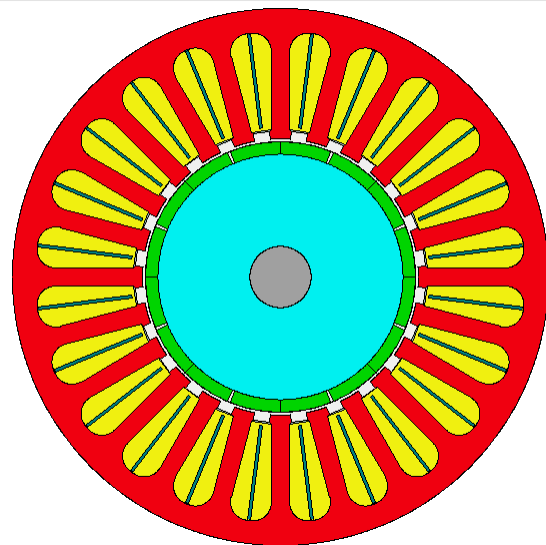


Figura 2. Seção Transversal do Motor (Autores)

A tabela 1 mostra as dimensões principais do motor BLDC que foram definidas no ambiente do *Software* de simulação de motores elétricos, juntamente com o número N de Slots da máquina.

Tabela 1. GEOMETRIA

Parâmetros	Valores
$D_E$	175 (mm)
$D_R$	90 (mm)
$D_c$	20 (mm)

- ❖ **Diâmetro do Estator =  $D_E$**
- ❖ **Diâmetro do Rotor =  $D_R$**
- ❖ **Diâmetro do Eixo =  $D_c$**

A representação axial do motor também foi obtida com o objetivo de se determinar as dimensões de comprimento do estator, rotor, do eixo e do ímã utilizado, assim como o número de segmentos do ímã. A Figura 3 ilustra a representação axial do motor

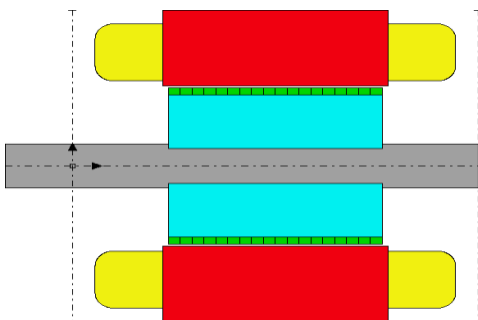


Figura 3. Representação Axial do Motor (Autores)

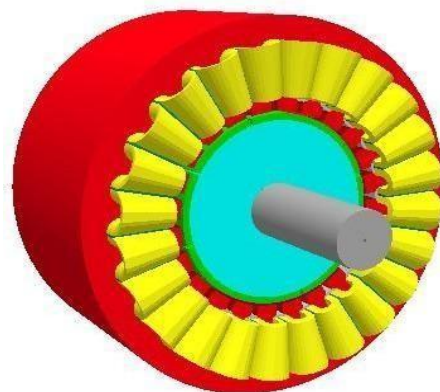
A tabela 2 mostra os valores referentes aos parâmetros principais do comprimento do motor adotado para o projeto.

Tabela 2. COMPRIMENTOS

Parâmetros	Valores
$L_M$	180 (mm)
$L_E$	100 (mm)
$L_m$	95 (mm)
$L_R$	95 (mm)
$N_m$	18

- ❖ **Comprimento do Motor =  $L_M$**
- ❖ **Comprimento do Rotor =  $L_E$**
- ❖ **Comprimento do ímã =  $L_m$**
- ❖ **Comprimento do Motor =  $L_{st}$**
- ❖ **Número de segmentos Magnéticos =  $N_m$**

Além da seção transversal do motor, foi obtida a representação espacial da máquina conforme a Figura 4.

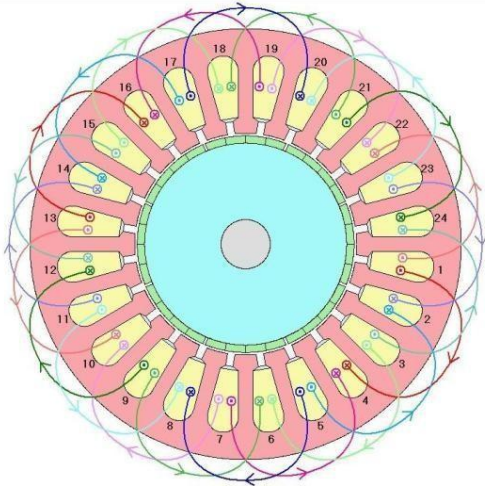


**Figura 4:** Representação Espacial (Autores)

Além das geometrias principais, outros parâmetros são fundamentais para determinar o bom desempenho da máquina, um exemplo disso é o modelo de enrolamento escolhido para o motor.

### Layout de Enrolamento

O enrolamento de um motor dita a lógica de giro da máquina e, vale ressaltar que as 3 fases possuem o mesmo enrolamento e deslocamento angular de 120° elétricos entre si, para garantir um giro uniforme e suave. O enrolamento escolhido está exposto na Figura 5.



**Figura 5:** Enrolamento (Autores)

A Figura 5 mostra a maneira com que os enrolamentos foram distribuídos de maneira simétrica em torno dos 24 slots no estator. Já que se trata de um motor trifásico, o número de ranhuras deve ser múltiplo inteiro de 3. A equação 8 apresenta a relação que expressa o raciocínio.

$$N_s = k \cdot N_{ph} \quad (8)$$

sendo  $N_s$  o número de slots,  $N_{ph}$  o número de fases no motor e  $k$  um número inteiro. (Hanselman, 2003). O passo da bobina de cada enrolamento é de 3 dentes, enquanto que cada fase possui 8 enrolamentos, o que resulta em 8 enrolamentos por fase. Desse modo, segundo a equação 9

$$N_{spp} = N_s / N_m / N_{ph} \quad (9)$$

sendo  $N_{spp}$  o número de slots por polo por fase nos indica  $N_{spp}$  igual a 1 para esse projeto. Tal relação sendo igual a um número inteiro nos indica um motor de slot integral, proporcionando um torque mais constante para a máquina. (Hanselman, 2003).

Segundo (Hanselman, 2003), o passo da bobina nos enrolamentos devem cobrir aproximadamente 180°E para maximizar o fluxo concatenado na bobina e conseqüentemente melhorar a eficiência do motor. Tal fato pode ser comprovado pela equação 10.

$$\theta_c = (N_m / 2) \cdot \theta_M \quad (10)$$

Levando em consideração a figura 2, no qual o motor possui 24 slots, cada ranhura cobre 15°M o passo da bobina é de 2 slots, cobrindo 120°E do motor, sendo o tipo de enrolamento possível mais próximo aos 180°E desejados para que o fluxo seja maximizado.

O esquema de bobinagem escolhido foi o modelo DLRK, sendo o modelo mais comum para motores BLDC, pois proporciona um torque mais constante com essa configuração. A configuração DLRK consiste em bobinas adjacentes enroladas

em sentido contrário, com o intuito de criar uma condição no qual campo magnético criado pelos ímãs presentes no rotor sempre estejam defasados em relação ao campo magnético criado no estator, de modo que nunca o alcance, ocasionando um giro contínuo e suave (Silva, 2018).

### Slots e Condutores

As dimensões dos slots também possuem significativa importância para a validação de um modelo eficiente de motor elétrico. A figura 6 mostra o formato adotado para o projeto do motor

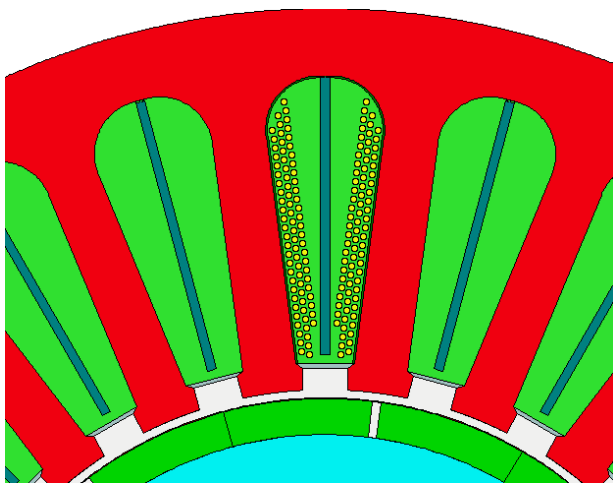


Figura 6: Slots e Condutores (Autores)

Cada slot do projeto possui uma área de 279,1 mm<sup>2</sup>. Além disso, os condutores utilizados seguem o padrão American Wire Gauge (AWG) e possuem tabela AWG um valor de 21,5, o que indica um diâmetro na faixa de 0,7486 mm - 0,6833 mm, sendo tais medidas suficientes para conduzir a quantidade de corrente elétrica utilizada pelo motor. É fundamental destacar a importância de garantir um espaçamento

adequado entre os enrolamentos nos slots do motor elétrico. Isso é essencial para prevenir o superaquecimento, que poderia resultar em uma diminuição na eficiência do motor ou até mesmo no derretimento do material dielétrico dos condutores devido às altas temperaturas (Ferreira, 2022). Esse derretimento poderia, por sua vez, causar um curto-circuito na máquina, comprometendo seu funcionamento. Portanto, manter o espaçamento correto entre os enrolamentos nos slots é crucial para a segurança e o desempenho adequado do motor elétrico.

### Parâmetros de Entrada

O ambiente do *Software* de motores elétricos precisa de alguns dados de entrada para a simulação do motor. Os principais parâmetros adotados estão expostos na tabela 3

Tabela 3. VALORES DE ENTRADA

Parâmetros	Valores
$n_m$	3000 (rpm)
$i$	28,28 (A)
$V$	120 V

- ❖ **Velocidade de Rotação =  $n_m$**
- ❖ **Corrente RMS =  $i$**
- ❖ **Tensão do Controlador =  $V$**

Para o motor em questão, foi escolhida uma velocidade de rotação de 3000 rpm no eixo da máquina, a corrente rms nominal no controlador será de 28,28 A em cada fase. Com isso, a tensão de 120 V em cada fase do terminal é capaz de

entregar a rotação desejada para o motor conforme a Equação 3.

### SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os resultados após simulação para os parâmetros desejados foram considerados satisfatórios conforme mostra a tabela 4

Tabela 4. DADOS DE SAÍDA

Parâmetros	Valores
$P_{int}$	3848 (W)
$P_{out}$	3633 (W)
$\eta$	95,42 %
T	11,9 (N.m)
$n_m$	3077 (rpm)
$P_L$	180 (W)
$k_t$	0,292784 (N.m/A)

- ❖ **Potência de Entrada =  $P_{int}$**
- ❖ **Potência de Saída =  $P_{out}$**
- ❖ **Eficiência =  $\eta$**
- ❖ **Torque no Eixo = T**
- ❖ **Velocidade de Rotação =  $n_m$**
- ❖ **Potência Perdida =  $P_L$**
- ❖ **Constante de Torque =  $k_t$**

A perda total é composta pelas correntes parasitas, efeito joule nos condutores e saturação do núcleo. Além dos parâmetros da tabela 3, outras análises importantes foram desenvolvidas.

#### Análise de malha

A simulação também mostra a malha de um quarto do motor no qual foi aplicado pelo software o método dos elementos finitos para a análise eletromagnética de algumas grandezas como densidade de corrente e densidade de fluxo magnético. O detalhamento da malha empregado pelo método dos elementos finitos é mostrado na figura 6.

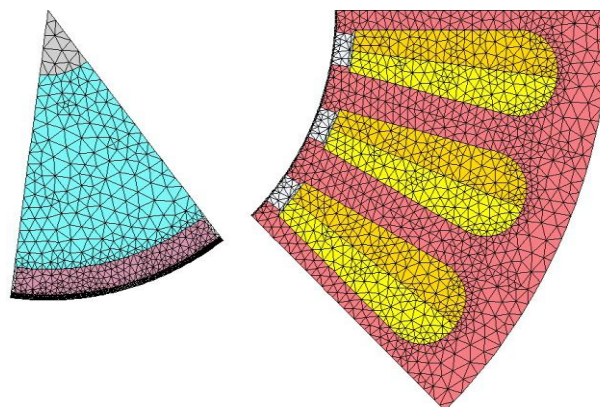
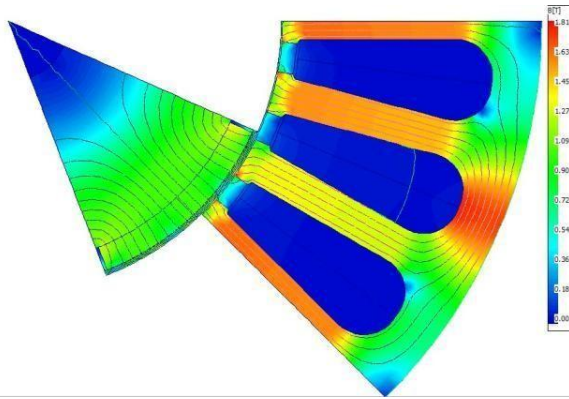


Figura 7. Malha (Autores)

Com a obtenção da malha, o solucionador do *Software* irá aplicar as técnicas pertinentes para a obtenção de parâmetros elétricos importantes, a exemplo da distribuição da densidade de fluxo magnético ao longo do motor, no qual o parâmetro indica os locais onde mais se confinam linhas de campo magnético em determinada área. Vale ressaltar que tal grandeza é diretamente afetada pelo material no qual está inserido.

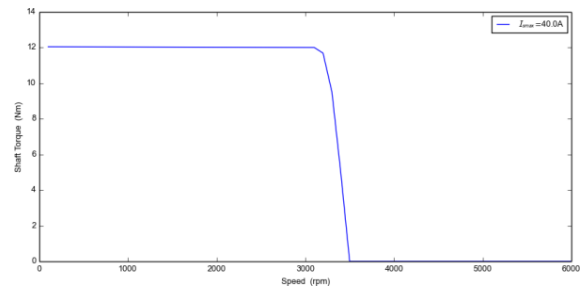


**Figura 8:** Densidade de Fluxo Magnético (Autores).

Quando os valores se aproximam do espectro vermelho, isso significa que há uma densidade maior de fluxo magnético. É evidente que as áreas dos dentes onde as bobinas estão enroladas têm uma alta densidade de fluxo magnético, o que era esperado, já que há um alto número de linhas de campo no material ferromagnético que é abraçado pelas bobinas, com a função de conduzir as linhas de campo geradas pelas bobinas.

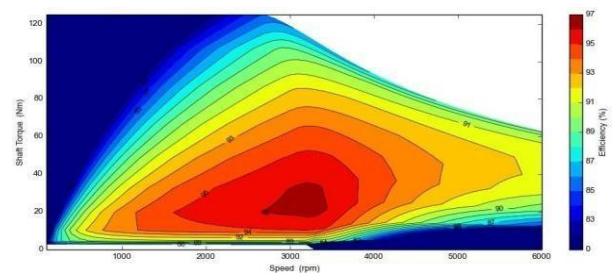
### Análise de laboratório

O *software* utilizado também entrega resultados de laboratório para o motor, como mapa de eficiência e curvas de torque x velocidade, o que são cruciais para a análise de desempenho da máquina projetada. A curva torque x velocidade foi obtida na simulação e está exposta na figura 9



**Figura 9.** Curva Torque x Velocidade (Autores)

A figura 9 nos auxilia a entender o comportamento dinâmico do motor no que se refere ao torque no eixo para diversos níveis de velocidade de rotação. Observa-se um torque constante até uma velocidade próxima à velocidade nominal do motor. Além disso, outro indicador de desempenho importante para os resultados obtidos é o mapa de eficiência do motor. O mapa de eficiência (fig. 10) possui características semelhantes às curvas de nível de um terreno, porém com parâmetros elétricos importantes para serem analisados como torque, velocidade e eficiência.



**Figura 10.** Mapa de Eficiência (Autores)

## CONCLUSÃO

Diante da urgência em mitigar os impactos das mudanças climáticas e reduzir as emissões de gases nocivos na região amazônica, este estudo propõe uma solução viável e eficaz: a adoção de motores elétricos sem escovas (BLDC) em meios de transporte fluvial. A transição para esses

motores não só reduzirá significativamente as emissões prejudiciais à atmosfera, mas também trará benefícios como eficiência superior, baixo ruído e fácil resfriamento do estator. A modelagem e análise detalhadas apresentadas neste trabalho oferecem uma base sólida para a implementação desses motores, representando um passo importante na direção de uma mobilidade mais sustentável e ambientalmente responsável na região amazônica. O motor BLDC foi projetado para atender às necessidades das populações ribeirinhas e praticamente zerar a emissão de poluentes gerados na queima de combustíveis fósseis. A eficiência do motor ultrapassou os 95%, o que representa um avanço significativo para a transição energética da região amazônica. Além da alta eficiência, o motor possui um torque satisfatório para locomoção dos veículos elétricos de pequeno porte da população local, contribuindo para a construção de um futuro energético mais consciente.

## AGRADECIMENTOS

UFPA  
CEAMAZON  
EMOB  
FINEP  
MCTI

## REFERENCIAS

- [1] Araújo, J. (2023, 21 de novembro). COP28: Brasil apresentará meta de redução de 53% na emissão de gases do efeito estufa. RádioSenado. Recuperado de <https://www12.senado.leg.br/radio/1/noticia/2023/11/21/cop28-brasil-apresentara-meta-de-reducao-de-53-na-emissao-de-gases-do-efeito-estufa#:~:text=O%20BRASIL%20DEVE%20APRESENTAR%2C%20NA,AT%C3%89%20O%20ANO%20DE%202030>
- [2] EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético 2023 – Ano base 2022. 2023.
- [3] Ferreira, L. C. (2022). Modelagem de motor BLDC aplicado a propulsão de embarcação solar.
- [4] Hanselman, D. C. (2003). *Brushless permanent magnet motor design*. The Writers' Collective.
- [5] Martins, G. S. D. M. (2017). Conversão do sistema de propulsão a combustão para elétrico em uma embarcação do tipo veleiro.
- [6] Silva, D. F., Dias, D. H. N., & Borba, B. S. M. C. (2018). Análise de um motor BLDC pelo método dos elementos finitos.

### 3.3 Considerações sobre o Artigo

Os resultados apresentados neste artigo demonstram a viabilidade do uso de materiais como o JFE 10JNEX900 em motores BLDC, apresentando menores perdas no núcleo em comparação com materiais convencionais. Estes resultados foram posteriormente aprofundados no desenvolvimento deste TCC.

### 3.4 Outras Publicações

O artigo intitulado "Desenvolvimento de Projeto de um Motor Elétrico BLDC para Eletrificação de Barcos de Pequeno Porte para a Região Amazônica" foi apresentado no Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM) em 2024. Neste trabalho, no qual atuei como segundo autor, foi desenvolvido um motor BLDC com potência nominal de 3,67 kW (aproximadamente 5 HP), 48 ranhuras e 8 polos, utilizando o aço M235-35A no núcleo e ímãs de neodímio N42-UH.

**CONEM2024 – 0414**  
**DESENVOLVIMENTO DE PROJETO DE UM MOTOR ELÉTRICO BLDC  
PARA ELETRIFICAÇÃO DE BARCOS DE PEQUENO PORTE PARA A  
REGIÃO AMAZÔNICA**

**Marcos Aurélio Melo Junior, marcos.melo.junior@itec.ufpa.br<sup>1,2</sup>**

**Matheus Leão Campos, matheus.campos@itec.ufpa.br<sup>1,2</sup>**

**Iago Ranieri Miranda Rodrigues Morais, iago.morais@itec.ufpa.br<sup>1,2</sup>**

**Iris Caroline dos Santos Rodrigues, iris.rodrigues@itec.ufpa.br<sup>1,2</sup>**

**Antonio Roniel Marques de Sousa, roniel@ufpa.br<sup>1,2</sup>**

**Wellington da Silva Fonseca, fonseca@ufpa.br<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará - R. Augusto Corrêa, 01 - Guamá, Belém - PA, 66075-110

<sup>2</sup>Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia, Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá - Av. Perimetral, 2651 - Guamá, Belém - PA, 66077-830

**Resumo:** A transição energética é uma temática comumente abordada no contexto climático global. Nesse contexto, a eletrificação das embarcações na região amazônica é uma estratégia inovadora e promissora que busca impulsionar a sustentabilidade e reduzir significativamente os impactos ambientais provocados pela queima de combustíveis fósseis no atual transporte fluvial na área. Considerando que as embarcações representam um dos principais meios de deslocamento para os povos ribeirinhos na Amazônia, é fundamental abordar a questão do sistema de propulsão movido por motores à combustão, os quais têm se mostrado prejudiciais ao meio ambiente. Atualmente, a maioria dessas embarcações utiliza motores à combustão, que, além de serem ineficientes, são uma fonte considerável de poluição atmosférica e fluvial. Esses motores funcionam à base de combustíveis fósseis, liberando dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e outros poluentes que afetam negativamente a atmosfera e os ecossistemas aquáticos. Essa poluição, por sua vez, tem sérias repercussões negativas para a saúde das pessoas e para a biodiversidade da região. Por outro lado, a introdução de motores elétricos em embarcações fluviais representa uma alternativa altamente eficaz aos motores tradicionais movidos a combustão, por apresentarem maior eficiência e pela não emissão de gases poluentes durante seu funcionamento, oferecendo uma forma mais sustentável e limpa de propulsão. Além disso, combinando sua alimentação com a geração elétrica proveniente de fontes renováveis, como energia solar, eólica ou hídrica, contribui-se para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a preservação do meio ambiente. Dessa forma, a implementação de motores elétricos nas embarcações fluviais pode minimizar consideravelmente os impactos ambientais já existentes, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e para a preservação do ecossistema local. No contexto da transição energética, a eletrificação das embarcações na Amazônia representa não apenas um avanço tecnológico, mas uma importante contribuição científica para a sociedade, contribuindo para a preservação ambiental e a sustentabilidade, visando impactar positivamente as comunidades ribeirinhas, a flora e fauna únicas da Amazônia. Ademais, essa pesquisa propõe a substituição dos motores a combustão convencional por motores elétricos em pequenas embarcações de uso constante da população ribeirinha, para o transporte de cargas e pessoas. Assim, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um motor elétrico do tipo Brushless Direct Current (BLDC), projetado especificamente para embarcações ribeirinhas de pequeno porte, realizado por meio de simulação computacional utilizando o Método de Elementos Finitos. Assim, com base modelo criado, os resultados esperados se concentraram na projeção de melhor regime de operação do motor garantindo estabilidade na rotação para torque constante e eficiência acima de 90 % contido na região de interesse para trabalho.

**Palavras-chave:** Simulação computacional, Embarcações Elétricas, Transição Energética, Motores Elétricos BLDC

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional juntamente ao planejamento inadequado das cidades e à ineficiência do transporte público urbano representam desafios para a mobilidade no cenário atual. Segundo Bianchi (2021), no Brasil a maioria das propostas de soluções de infraestrutura urbana e opções de transporte não tem atendido as necessidades da população (BIANCHI, 2021). Considerando o transporte aquaviário de cargas, representados pelo modal hidroviário e pela cabotagem, os custos de frete inferiores ao de outros modais de transporte de cargas em virtude fundamentalmente de seu menor consumo de combustível por carga transportada, têm sido objeto de análise do Governo Federal, que prevê planos de expansão para o transporte aquaviário de passageiros até o horizonte de 2031 (REIS, 2016). Dessa forma, espera-se que as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da indústria marítima, sejam responsáveis por 12% a 18% de emissões de Gases do Efeito Estufa (OMI, 2022).

Diante da busca pela redução das emissões de poluentes provocados pelos veículos com motores de combustão interna, bem com maior segurança energética, diversos países têm se planejado no que diz respeito a estratégias emergentes para inserção de uma economia atrativa e de baixa emissão de carbono, por meio da substituição de veículos com motores movidos a combustão pela adoção de alternativas condizentes ao contexto da mobilidade elétrica (EPE, 2018; LIMA et al., 2022). No contexto da eletrificação de transportes, crescem os projetos de barcos onde o seu sistema propulsivo, seja elétrico puro ou híbrido, alimentados por modelos de armazenamentos de energia elétrica são capazes de suprir toda a carga demandada (DUTTA et al., 2020; DAMIAN et al., 2022).

Nesse sentido, diversos estudos apontam a necessidade para entrada desses veículos elétricos aquaviários no mercado, uma vez que as frotas de barcos existentes são veículos de extrema importância para o cenário econômico da região, sendo assim uma excelente oportunidade para a transição da matriz elétrica aquaviária, por auxiliar no alcance das metas de redução de emissões de CO<sub>2</sub> em até 50% (BLANCAS et al., 2018; KHOBAN et al., 2020).

Além disso, no que diz respeito as embarcações elétricas devido sua baixa emissão de carbono, alta eficiência, custo de manutenção baixo, diminuição de emissão gases tóxicos, ausência de ruídos e diminuição da poluição das águas, se colocam em um novo ciclo tecnológico e de mercado, bem como criam e/ou ampliam cadeias de fornecedores de bens e serviços associados (SPAGNOLO et al., 2012; DUTTA et al., 2020; DP HUNG et al., 2022).

A importância dos rios na vida do amazônida já foi por vezes retratada em produções artísticas e culturas, como a composição da música “Esse Rio é minha rua” de Paulo André e Ruy Barata (1990), que relata o impacto dessas vias na vida dos ribeirinhos, onde a grande diversidade de cursos hídricos e das bacias hidrográficas da região da Amazônia, interligadas por afluentes que captam e descolocam volumes de água para o seu rio principal, compõe aproximadamente vinte e dois quilômetros de rios navegáveis que são imprescindíveis para integração social, econômica e ambiental (OLIVEIRA, 2013). Além disso, essa canção destaca a importância da integração entre rios e embarcações que são formas importantes de conexão e transporte em muitas regiões da Amazônia. Dessa forma, os rios têm desempenhado um papel significativo na história da humanidade, servindo como vias navegáveis naturais para o comércio, transporte de pessoas e intercâmbio cultural.

Os estudos apontaram que, 9,8 milhões de passageiros utilizaram o modal hidroviário na Amazônia, e que os usuários desses transportes, em sua maioria, 58%, são pessoas jovens, com idade entre 18 e 40 anos, sendo que 54%, possui níveis de escolaridade fundamental, médio completo e incompleto e renda familiar mensal média de R\$ 1.675,00 (ALEPA, 2023). No entanto, apesar de serem veículos de alta relevância para região, o setor de transportes de embarcações marítimas é grande contribuidoras de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), pois operam consumindo diesel, derivado de combustíveis fósseis (KHOBAN et al., 2020; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022).

Anteriormente, o processo para viabilizar a transição de barcos a combustão para embarcações elétricas era pouco pautado, devido aos fatores econômicos em volta do transporte marítimo. No entanto, para fomentar a transição, houve como proposta a eletrificação de barcos para trajetos próximos à costa, com a necessidade de fontes de energia armazenada e sistemas de eletropostos em terra para melhorar a eficiência de carregamento (FGV ENERGIA, 2022). Ademais, o turismo sustentável e o ecoturismo aquaviário estão recebendo grande atenção nos últimos anos, tanto do governo como do setor privado, isso em virtude da baixa pegada de carbono, sendo umas das principais soluções para diversos locais costeiros e ribeirinhos (D. P. Hung et al., 2022).

Dessa forma, o presente trabalho apresenta uma proposta do desenvolvimento de um motor elétrico, do tipo *Brushless Direct Current* (BLDC), como uma alternativa inovadora e eficiente para substituição de motores a combustão interna em embarcação de pequeno porte. O modo proposto foi projetado e simulado em ambiente computacional, utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF), demonstrando alta eficiência em regime de operação desejada e viabilidade para sua produção, no que diz respeito aos seus resultados obtidos. Além disso, os resultados dessa pesquisa se relacionam ao projeto da Rede de pesquisa para Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora de Materiais Avançados em Energia e Mobilidade aplicados ao contexto Amazônico (EMOBAMAZON), aprovado em edital da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP - DOU Seção 3, p.9, n.66, 06/04/2022).

## 2. DESENVOLVIMENTO ANALÍTICO DA MÁQUINA

As principais características iniciais para o desenvolvimento do projeto do motor BLDC foram estabelecidas com base na potência entregue no eixo da máquina, na intenção da substituição dos motores a combustão interna utilizados em tráfego fluvial. Assim, o motor a ser projetado possuirá potência nominal de 3,67 kW, 48 ranhuras e 8 polos na superfície do rotor com ímãs permanentes com o material N42-UH. O material utilizado no estator e rotor do presente trabalho da

simulação foi M235 35A. Esse motor BLDC, possui o fechamento interno das bobinas em estrela e admite uma velocidade aproximadamente de 3600 rpm, conseqüentemente um torque no eixo da máquina de 9,75 Nm.

## 2.1. Análise Dimensional do Design da Máquina

O projeto real de uma máquina elétrica começa com a seleção das principais dimensões da máquina, sendo eles o diâmetro do entreferro  $D_g$  e o comprimento equivalente do núcleo. Assim, esse comprimento leva em conta a influência do fluxo de dispersão em possíveis dutos de resfriamento da máquina e também nas extremidades da máquina. No caso de um ímã permanente presente na máquina, o comprimento efetivo da máquina deve ser observado com cuidado e separadamente para as excitações do rotor e do estator (HANSELMAN, 2003; PYRHONEN, 2013).

Nesse sentido, o comprimento do entreferro de uma máquina tem uma influência significativa nas características de uma máquina elétrica. Em máquinas nas quais a corrente de magnetização é retirada da rede de alimentação, o comprimento do entreferro é dimensionado para produzir uma magnetização mínima atual e, em contrapartida, uma eficiência ótima. Em princípio, um pequeno entreferro proporciona uma baixa corrente de magnetização, enquanto as perdas por correntes parasitas do rotor e da superfície do estator aumentam por causa dos harmônicos de permeância criados pelas ranhuras abertas ou semifechadas. Um pequeno espaço de ar também aumenta as perdas superficiais no rotor causadas pelos harmônicos de ligação de corrente do estator (HANSELMAN, 2003; PYRHONEN, 2013).

A densidade do fluxo no entreferro e a frequência de alimentação de uma máquina determinam sua carga magnética. Assim, a carga magnética máxima  $B_\delta [T]$  recomendada para um motor DC se encontra na faixa entre 0,6 a 1,1 [T]. Nesse sentido, a Eq. 1 mostra que a carga magnética depende diretamente da densidade de fluxo no entreferro associada também às dimensões do motor a ser desenvolvido (HANSELMAN, 2003; PYRHONEN, 2013).

$$\bar{B}_\delta = \frac{\sqrt{2}E_m}{\omega k_w l \tau_p \alpha_i N_s} \quad (1)$$

Onde o  $B \rightarrow \delta$  é a densidade de fluxo presente no entreferro,  $E_m$  é a tensão no terminal da máquina,  $\omega$  sendo a velocidade em rad/s,  $k_w$  é o fator enrolamento presente no slot,  $l$  é o comprimento do motor,  $\tau_p$  é o passo do polo,  $\alpha_i$  como sendo relação entre a média aritmética da densidade de fluxo e seu valor de pico e  $N_s$  o número de slot. O comprimento equivalente do núcleo leva em conta a influência do fluxo de dispersão magnética em possíveis dutos de resfriamento da máquina e também nas extremidades da máquina. No caso de um ímã permanente máquina, o comprimento efetivo da máquina deve ser observado com cuidado e separadamente para as excitações do rotor e do estator (HANSELMAN, 2003; PYRHONEN, 2013).

Nesse sentido, segundo Pyrhonen (2013), a densidade de fluxo possui uma relação direta com o tamanho da máquina, sendo assim, o diâmetro do entreferro foi encontrado por meio da Eq.2, uma vez que a potência da máquina já é definida, sendo  $G$  a densidade volumétrica de energia. Assim, o comprimento da máquina poder ser adquirido por meio da Eq.3.

$$D_g = \sqrt{\frac{P_{mec}}{\chi G_{mec} \eta_{sin}}} \quad (2)$$

$$l = \chi D_g = \chi D_s \quad (3)$$

Na qual  $D_g$  é o diâmetro do entreferro,  $P_{mec}$  é a potência elétrica total de saída,  $\chi$  é a relação entre o comprimento e o diâmetro do entreferro da máquina,  $G_{mec}$  é a densidade volumétrica de energia e  $\eta_{sin}$  é a velocidade síncrona. Em princípio, um pequeno entreferro proporciona uma baixa corrente de magnetização, enquanto as perdas por correntes parasitas do rotor e da superfície do estator aumentam por causa dos harmônicos de permeância criados pelas ranhuras abertas ou semifechadas. Assim, referente ao diâmetro do entreferro apresentado na Eq.2, pode-se assumir que esse é o diâmetro interno do estator. Além disso, o diâmetro externo, bem como o diâmetro do rotor da máquina podem ser encontrados a partir da Eq. 4 e Eq. 5 (HANSELMAN, 2003; PYRHONEN, 2013).

$$D_{se} = D_s + 2(h_s + h_{ys}) \quad (4)$$

$$D_r = D_s - 2\delta \quad (5)$$

Onde  $D_{se}$  e  $D_s$  são o diâmetro externo e interno do estator da máquina,  $h_s$  é a altura da ranhura e  $h_{ys}$  é a altura do garfo da ranhura,  $D_r$  é o diâmetro do rotor e  $\delta$  é a altura do entreferro. Dessa forma, com base nas equações acima citadas, foi possível determinar as principais dimensões da geometria da referida máquina em estudo, na qual o software RMXprt foi utilizado para o desenvolvimento analítico do motor. Assim, a figura 1 apresenta a geometria desenvolvida para a simulação do motor BLDC.

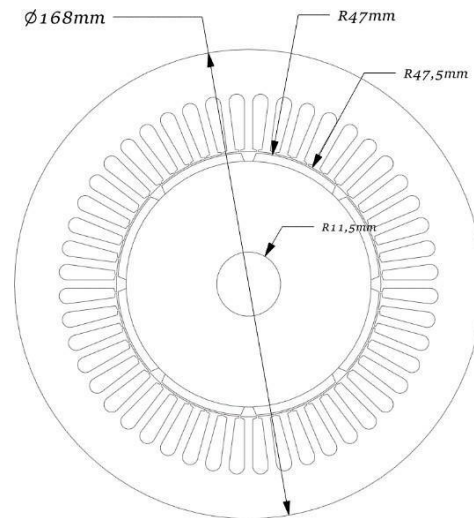


Figura 1. Geometria analítica da máquina.

Assim, essas dimensões foram aplicadas nos softwares e posteriormente foi trabalhado do modelo de layout mais adequado com base na premissa de que esse protótipo possui a finalidade de substituir de uma máquina a combustão interna por um motor elétrico com zero emissão.

### 3. MODELAGEM COMPUTACIONAL

A simulação computacional desenvolvida no presente trabalho é baseada em um modelo número bastante difundido na comunidade acadêmica, sendo este o Método de Elementos Finitos, na qual os softwares utilizados para análises foram o Ansys RMXprt e Ansys Maxwell Electronics.

#### 3.1. Parâmetros de Simulação

Para a modelagem do protótipo simulado por meio dos softwares citados acima, a distribuição das bobinas, bem como os parâmetros pertinentes ao tipo e forma de enrolamento adotado no estudo, a implementação do modelo construído foi desenvolvida com base na intenção de aproximar os valores de torque e velocidade entregues no eixo da máquina por motores a combustão interna comumente já utilizados por essas embarcações ribeirinhas.

Nesse sentido, para distribuição das bobinas foi necessário primeiramente a definição do número de ranhuras contidas na máquina. Assim, o número de slots por polos por fase é considerado um número inteiro menor ou igual a dois, onde a Eq. 6 apresenta essa relação, na qual essa restrição é principalmente por aspectos construtivos e na maioria dos casos atende-se esse requisito (HANSELMAN, 2003).

$$N_{spp} = \frac{N_s}{N_{ph}} \quad (6)$$

Assim, o número de slots  $N_s$ , polos  $N_m$  e o número de fases a  $N_{ph}$  foram definidos com base na Eq. 6 visando manter essa relação de conformidade, bem como o propósito de atingir os valores de torque e velocidade entregues no eixo da máquina projetada. Para determinação do layout de enrolamento adotado, considerou-se manter as características de distribuição das bobinas estabelecidas de maneira a compatibilizar os pares de bobinas por fase alocada em cada ranhura, de modo que os pontos médios angulares relativos às bobinas que estejam tão próximos da separação de  $0^\circ E$  e  $180^\circ E$  quando possível. Bobinas próximas de  $0^\circ E$  são enroladas em uma direção e bobinas próximas de  $180^\circ E$  são enroladas direção oposta.

Assim, uma vez estas enroladas em direções opostas ou inversa, proporciona interação do campo magnético gerado pelas bobinas do estator com o campo magnético remanescente do ímã presente no rotor, estabelecendo o giro do rotor de acordo os parâmetros de comutação do controlador da máquina (HANSELMAN, 2003).

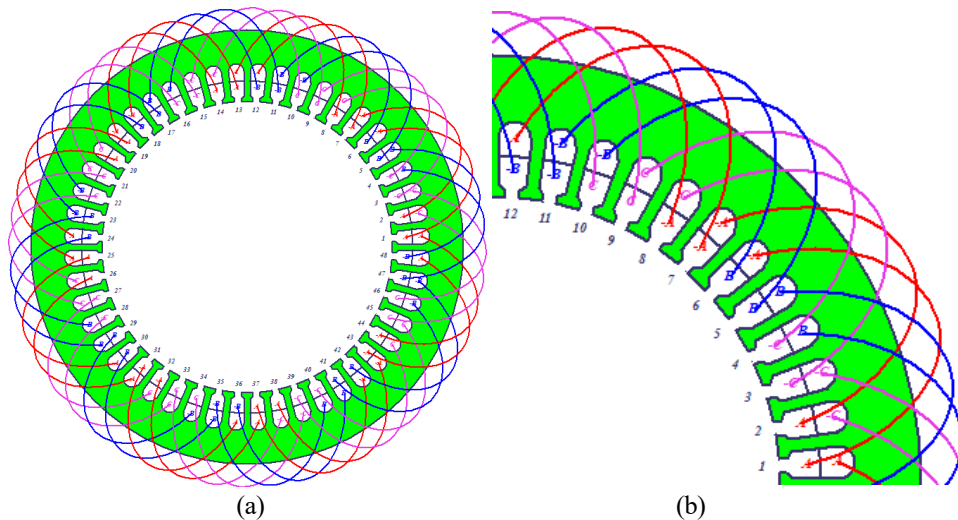
Para determinação do layout de enrolamento adotado, se fez necessário entender sobre o equilíbrio de distribuição de bobinas. Dessa forma, se  $N_{spp}$  for maior que dois, outro grau de liberdade é introduzido, e isso pode complicar o layout do enrolamento, mas raramente ou nunca aumenta desempenho. Na prática,  $N_{spp} < 2$  aparece frequentemente quando uma laminação do estator é reutilizado para um motor com menos polos magnéticos.

Assim, a extensão da bobina ou passo da bobina é a largura circunferencial de uma bobina. Além disso essa extensão da bobina pode ser especificada em termos de medidas mecânicas ou elétricas. Em princípio, para entendimento, é conveniente descrever a extensão da bobina em termos de ranhuras presentes na máquina (HANSELMAN, 2003). A Tabela 1 mostra os parâmetros relacionados ao layout de configuração das bobinas e aspectos de enrolamento utilizados na presente simulação por meio dos softwares mencionados.

Tabela 1: **Parâmetros utilizados na modelagem do motor BLDC**

Descrição	Parâmetro
Números de ranhuras / polo / fase	48 / 8 / 3
Passo da bobina / Número de soltas	5 / 38
Número de condutores por slot / Caminhos paralelos	152 / 8
Tipo de layout de enrolamento / Bitola do condutor	Diamond / 25 AWG
Tipo do passo	Upper/Lower

Dessa forma, a Fig. 2 apresenta a distribuição das bobinas por fase alocadas nas ranhuras e tipo de conexão em estrela, bem com o modelo de enrolamento diamantado de dupla camada utilizado e o passo das bobinas mostram que o número de slots deve está diretamente ligado ao número de caminho paralelos, também conhecido como as bobinas em paralelo uniformemente distribuídas ao longo das ranhuras de maneira equilibrada, bem como a favorecer o giro do rotor da melhor forma (HANSELMAN, 2003).

Figura 2: **Layout de enrolamento utilizado na simulação.**

Além disso, a Fig. 2(a) e 2(b) apresentam não somente o layout de distribuição das bobinas, mas também o enrolamento em sentido oposto ao caminho anterior, essa estratégia promove o giro do rotor, uma vez que o controlador possui a capacidade de alterar o sentido da corrente que alimenta cada bobina, e com está mudanças, favorece interações entre o campo magnético da bobina junto ao campo do ímã no rotor, que por consequência, causa o torque no eixo da máquina (HANSELMAN, 2003).

### 3.2. Materiais Utilizados

A Tabela 2 apresenta os devidos materiais utilizados na presente simulação na qual a escolha dos materiais levou-se em consideração manter uma alta eficiência de operação. Assim, o aço M235-35A utilizado no estator e no rotor, o cobre recozido foi aplicado nas bobinas presentes no estator e o neodímio N42-UH usados nos ímãs do rotor.

Tabela 2: **Materiais utilizados simulação do motor BLDC.**

Material	W/m°C	J/kg°C	Kg/m <sup>3</sup>	Br[T]
Cobre recozido	401	385	8933	0
Aço M235-35A	30	460	7650	0
Ímã Neodímio N42-UH	7,6	460	7500	1,3

O aço M235-35A possui valores de permeabilidade magnética bastante elevadas. Desta forma, para atingir um determinado nível de indução magnética é necessária uma corrente de magnetização menor. Isto significa que os enrolamentos de cobre ou alumínio podem ser reduzidos, reduzindo o custo total do equipamento elétrico. Assim, após uma investigação da influência na eficiência, o material magnético M235-35A teve a maior eficiência de pico nos motores PMSMs analisados. Além disso, observou-se que o material magnético é o mais fino e com menor perda de grau considerado no presente estudo e que a eficiência média é em uma faixa de velocidade e torque definidas no trabalho em questão (HOFMAN, 2012).

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

No que se refere aos resultados apresentados nesta seção, os dados de entrada foram admitidos para a presente simulação considerado o tipo de carga para o modelo de potência constante no eixo da máquina. Além disso, foram monitorados e analisados a velocidade, eficiência, torque e potência de entrada para a elaboração gráfica de curvas de performance vista por cada modelo.

##### 4.1. Resultados no RMXprt

O software RMXprt é uma ferramenta de design para análise de máquinas elétricas rotativas, sendo uma ferramenta bastante versátil para a criação de um modelo de um motor, uma vez que as características podem ser atribuídas de acordo com as necessidades de cada aplicação (ANSYS, 2017). Nesse sentido, a tabela 3 apresenta os dados de entrada para um modelo de simulação em potência constante.

Tabela 3: Configurações de entrada para simulação no RMXprt.

Descrição	Parâmetro
Potência de saída	3,667 kW
Tensão nominal	210 V
Velocidade nominal	3600 rpm
Temperatura de operação	75 °C

Além disso, seus resultados e soluções são gerados por meio das equações eletromagnética que regem os princípios físicos associados às máquinas rotativas e já são incluídos no próprio software. Assim, a tabela 4 apresenta o resumo da performance dos resultados de saída do motor projetado no RMXprt com base nos parâmetros de entrada fornecidos na tabela 3.

Tabela 4: Resultados da simulação do RMXprt de carregamento no eixo.

Descrição	Parâmetro
Corrente DC Média de Entrada	17,56 A
Densidade de Corrente de Armadura	$1,481 \times 10^3$ kA/m <sup>2</sup>
Perda Total	0,206 kW
Potência de Saída	3,6682 kW
Eficiência	99,43 %
Velocidade Nominal	3763,72 rpm
Torque Nominal	9,30 N.m

A Figura 3(a) e 3(b) mostram as curvas características de eficiência e torque em função da velocidade da máquina. Assim, devido a simulação atribuída no software como potência constante, é possível observar com base na tabela 4 frente à Fig. 3(b) que o torque nominal entregue do motor foi 9,3 N.m, para uma velocidade de aproximadamente 3766,5 rpm, ou seja, para melhor performance desse motor conforme a Fig. 3(a), ele deve trabalhar com sua velocidade angular próximo de 4000 rpm, onde este irá atingir maior eficiência de operação.

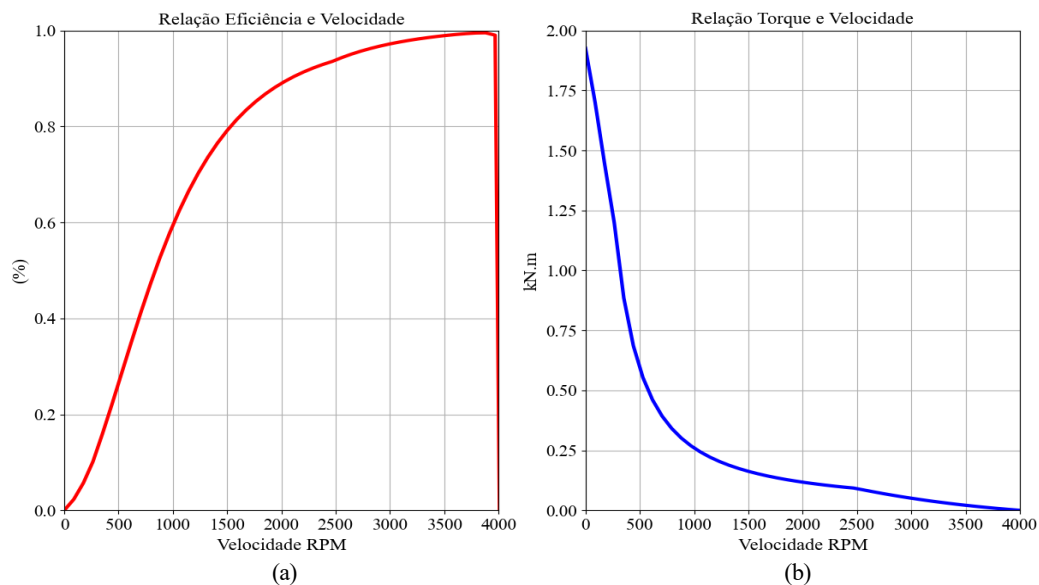


Figura 3: (a) Relação de eficiência em função da velocidade. (b) Relação de torque em função da velocidade.

Em contrapartida, a Fig. 3(a) ilustra também que se este motor trabalhar abaixo de 1500 rpm, a sua eficiência cai drasticamente para próximo 80%, isso ocorre devido a máquina estar operando distante da sua zona de trabalho, sendo estabelecida na tabela 3 em 3600 rpm, o que resultará em baixa rotação e elevado torque, conseqüentemente queda na eficiência de trabalho do motor.

#### 4.2. Resultados no Maxwell

O ambiente de trabalho do Ansys RMXprt é integralizado ao do Ansys Maxwell, incorporado a este o Método de Elementos Finitos (MEF) no seu solucionador. Nesse sentido, a geometria desenvolvida na subseção 2.1 apresentada na Fig. 1 foi discretizada para modelagem numérica, a Fig. 4(a) ilustra 1/8 da geometria do motor BLDC projetado com suas respectivas partes demonstradas na imagem. A Fig. 4(b) mostra a malha contendo 8382 elementos presente na geometria do motor desenvolvido no próprio software, mas agora pelo solucionador Ansys Maxwell utilizando MEF.

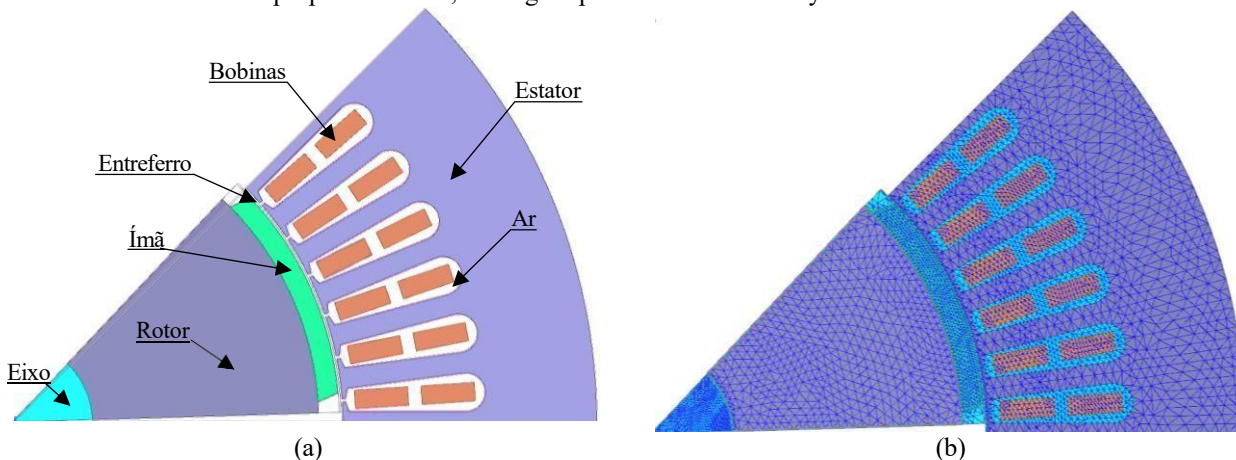


Figura 4: (a) Componentes presentes na geometria (b) Malha discretizada da geometria

Com base nos resultados obtidos por meio do Ansys Maxwell, a Fig. 5(a) apresenta a densidade de fluxo magnético nos dentes de aproximadamente 1,65 Tesla, enquanto o fluxo no entreferro é 1,12 Tesla. Além disso, a Fig. 5(b) mostra a definição por linhas de campo dos polos presentes na máquina. Assim, essa ferramenta permite identificar os pontos de concentração de linha de fluxo e possíveis pontos de aquecimento da máquina. Além disso, ao analisar essa imagem para vários instantes de tempo, é possível observar a ordem de enrolamento das bobinas se está adequada para rotação. Ademais, com base nessas análises é possível avaliar a troca dos materiais dos ímãs e laminado, além da bitola do condutor por meio do estudo de fluxo magnético, visando o melhor balanço entre perdas e eficiência para o modelo desenvolvido (DUSANE, 2016).

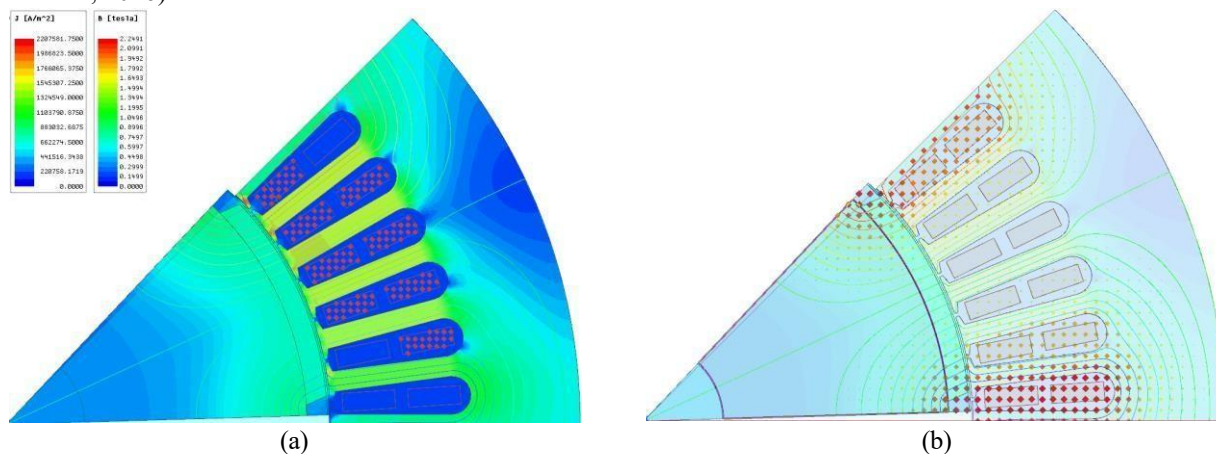


Figura 5: (a) Densidade de Fluxo Magnético no interior do material. (b) Potencial magnético presente na máquina.

A figura 6(a) apresenta em detalhes a forma de onda das tensões induzidas de cada uma das fases, com base nesse resultado pode-se observar que essa característica da onda trapezoidal ocorre devido a não variação em um determinado período do fluxo enlaçado criado por meio do ímã presente no rotor face a as bobinas não acionadas presente no estator, assim a tensão é nula nas posições que favorecem a inexistência de variação de fluxo concatenado, ou seja,  $\lambda = N\Phi = 0$ , dessa forma a tensão será nula o comportamento da onda se assemelha a um trapézio, sendo esse fenômeno conhecido com back EMF. Ademais, a Fig. 6(b) mostra a corrente no terminal da máquina, nota-se que esta forma de onda é oriunda de onda quadrada fornecido pelo controlador.

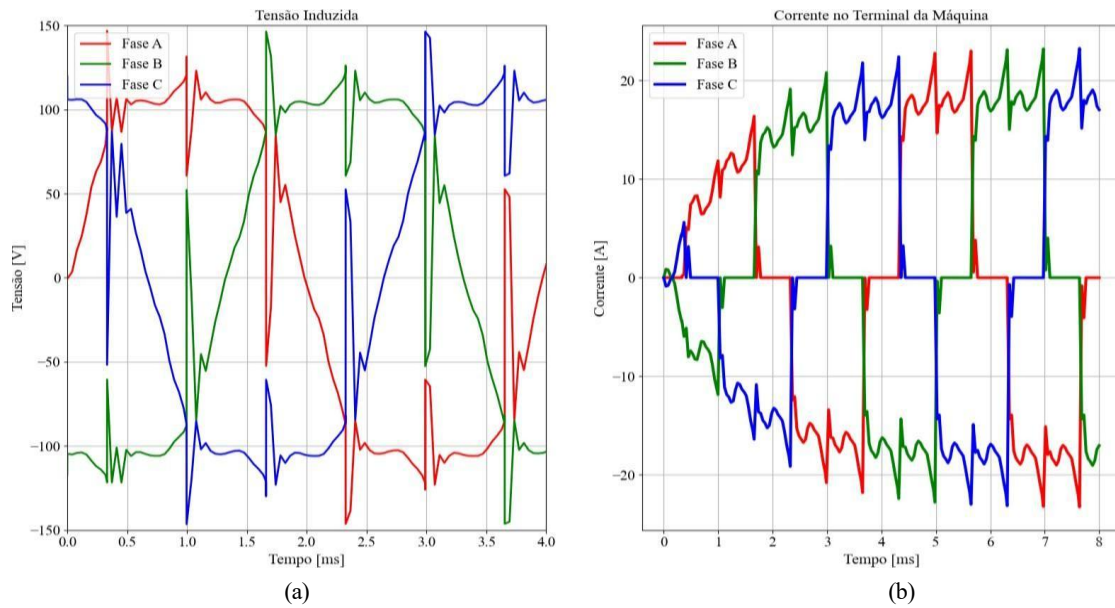


Figura 6: (a) Tensão induzida no terminal da máquina (b) Corrente no terminal da máquina.

No que diz respeito ao torque da máquina referente a presente simulação utilizando (MEF), com base na tabela 4, obteve-se que a velocidade nominal é de 3763,93 rpm. Assim, a Fig. 7(a) mostra a evolução do torque ao longo do tempo, no instante  $t = 0,008s$  e posição angular 184,42 graus físico, o resultado encontrado do torque de pico foi de aproximadamente 9.175 Nm de carga no eixo. Além disso, o máximo torque de pico com carregamento fornecido para uma velocidade constante foi de 11,097 Nm entregue no eixo da máquina.

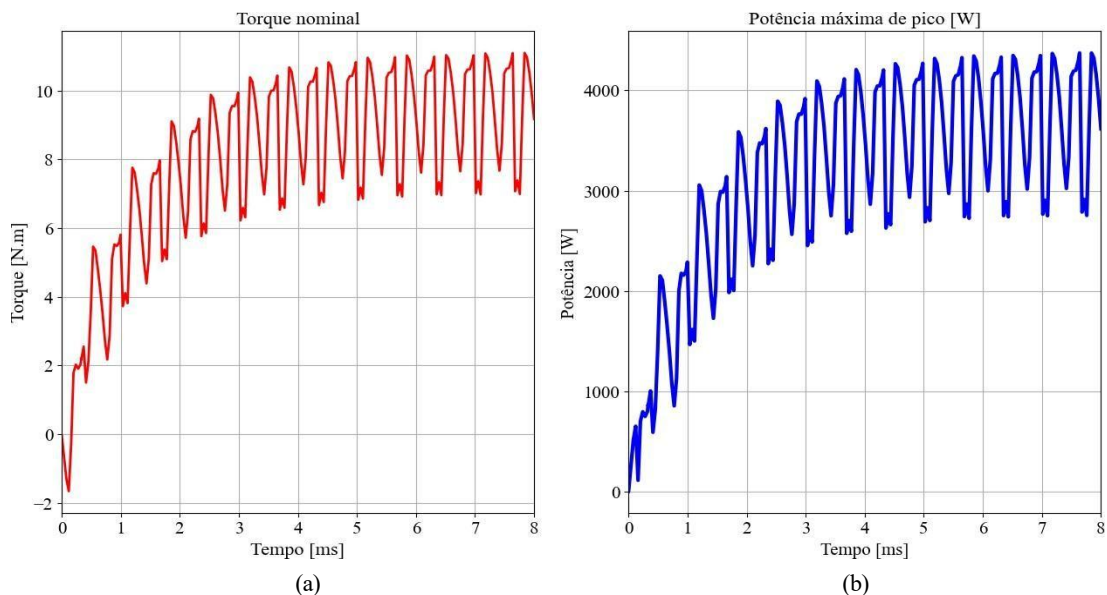


Figura 7: (a) Torque nominal entregue no eixo da máquina. (b) Potência elétrica em cada fase do motor.

Em relação a isso, a Fig. 7(b) apresenta o comportamento da potência para um determinado intervalo de tempo, ou seja, a potência que a máquina pode entregar para uma velocidade constante, que para esse tempo de 8 ms, a potência máxima de pico entregue foi de 4,374 kW para um carregamento de aproximadamente 9,175 Nm.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho mostrou o desenvolvimento analítico da geometria, bem como as simulações computacionais pertinentes para o modelo de um motor BLDC. Assim, de acordo os resultados encontrados por meio dos softwares RMxprt e posteriormente o Ansys Maxwell, mostraram-se muito satisfatórios, uma vez que os valores de torque e velocidade ficaram ambos próximos um do outro, o que fortalece ainda mais os dados de saída dos softwares. Assim, com base nas análises realizadas diante das simulações apresentadas é possível observar que essa máquina possui características operacionais que proporcionam um balanço eficiente para uma melhor combinação entre torque e velocidade, tornando-a mais eficiente próximo de sua rotação nominal. Além disso, por causa da ausência de simulações térmicas estruturais acopladas no presente protótipo, essa simulação possui algumas limitações no que diz respeito ao

comportamento da densidade de fluxo no interior da máquina, bem como uma análise de temperatura nas bobinas do enrolamento, na qual a importância desses aspectos pontuados, proporcionam maior relevância na determinação dos resultados. Dessa forma, de acordo com a análise dos resultados encontrados face ao objetivo do trabalho proposto, essa modelagem se mostrou eficiente, uma vez que o motor simulado, junto sua performance obtida, apresentou resultados de saída relevantes no tocante as curvas de torque e velocidade para um motor com essa relação de equilíbrio no layout de enrolamento proporcionando alta eficiência no regime de operação próximo aos valores estabelecidos para aplicação de eletrificação das embarcações na região amazônica. Contudo, o estudo viabiliza uma alternativa inovadora e efetiva para produção desses motores elétricos do tipo BLDC como sendo uma das armas para o combate as emissões poluentes ao meio ambiente.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela sua bondade para conosco, posteriormente a Universidade Federal do Pará, ao Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON), ao projeto EMOB-AMAZON, à Agência Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Ademais, agradeço ao Laboratório de Concepção de Dispositivos Elétricos (LCADE) e também ao Laboratório de Sistemas Motrizes (LAMOTRIZ), agradeço grandemente meu orientador Professor Dr Wellington da Silva Fonseca pela oportunidade e também agradeço aos coautores deste trabalho e ao demais colegas que fizeram parte indiretamente.

## 7. REFERÊNCIAS

- ANSYS. Maxwell Online Help. Ansys Europe, Ltd. 2017
- BIANCHIN, Noruega inaugura primeiro navio de carga elétrico e autônomo. 2021. Disponível em: <https://automotivebusiness.com.br/pt/posts/mobility-now/noruega-inaugura-primeiro-navio-de-carga-eletrico-e-autonomo/>. Acesso em 12 de fev. de 2023.
- BLANCAS, F. J. et al. A dynamic sustainable tourism evaluation using multiple benchmarks. *Journal of cleaner production*, v. 174, p. 1190-1203, fev. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617326008>. Acesso em: 2 fev. 2024.
- DAMIAN, S. E. et al. Review on the challenges of hybrid propulsion system in marine transport system. *Journal of Energy Storage*, v. 56, part B, p. 105983, dez. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X22019715>. Acesso em: 3 jan. 2024.
- DUTTAA, W. et al. Design of a Sustainable Electric Boat with Renewable Energy Based Charging System. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, 11., [s. l.], 2020. Anais [...]. [s. l.], ICECE, 2020. p. 242-245. DOI: 10.1109/ICECE51571.2020.9393125. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9393125>. Acesso em: 13 mar. 2024.
- D. C. Hanselman, Brushless permanent magnet motor design. The Writers' Collective, 2003.
- FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS - FGV. Transição Energética no Setor de Transportes para nações em desenvolvimento: A perspectiva Brasileira, Caderno FGV Energia, a. 9, n. 15, 2022. ISSN 23585277. Disponível em: [https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno\\_de\\_transicao\\_energetica\\_no\\_setor\\_de\\_transportes\\_rev4.pdf](https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_de_transicao_energetica_no_setor_de_transportes_rev4.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.
- HUNG, D. P. et al. Development of an Energetic System Model for Long-Tail Electric Boat combining Solar Panels and a Prototype of E-Engine. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS (ICEMS), 25., 2022, Chiang Mai, Thailand. Anais [...]. Chiang Mai, Thailand: IEEE, 2022, p. 1-4. DOI: 10.1109/ICEMS56177.2022.9983048.
- I. Hofman, P. Sergeat, and A. Van den Bossche, "Influence of soft magnetic material in a permanent magnet synchronous machine with a commercial induction machine stator," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48 no 4, pp 1645-1648, 2012.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY- IEA. Global EV Outlook 2022, IEA: Paris, 2022b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>. Acesso em: 12 mar. 2024.
- J. Pyrhonen, T Jokinen, and V. Hrabovcova, Design of rotating electrical machines. John Wiley & Sons, 2013
- K. L. J. Kan et al., "Electric Waterjet Thruster Vessel Development – Concept, Charger, and Battery Monitoring," 2020 8th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA), Hong Kong, China, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/PESA50370.2020.9344015.
- LIMA, F. de C. et al., 2022. **Electric Catamaran and Energy Efficiency for sustainable development and tourism innovation in the Amazon**. THE XIV LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2022 Rio de Janeiro, Brazil, November 29 – December 1, 2022b.
- OLIVEIRA; M. A. N. de. **Análise da viabilidade de embarcações solares para transporte de passageiros**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufjf->

peno\_upl//THESIS/6000229/2013\_mestrando\_mauricio\_aguilar\_nepomuceno\_de\_oliveira\_20200405215808739.pdf.

Acesso em: 15 mar. 2024a.

P.M. Dusane, "Simulation of a Brushless DC Motor in ANSYS-Maxwell 3D", Mestrado, Czech Technical University, Praga, 2016.

REIS, Marcelo César dos. Projetos Conceitual de uma Embarcação Solar para o Transporte Público de passageiros. 2016. 13 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016. Cap. 1.

RELATÓRIO FINAL DA COMISSÃO INTERNA, DE ESTUDO E ACOMPANHAMENTO, PARA AVALIAR O TRANSPORTE FLUVIAL DE PASSAGEIROS NO ESTADO DO PARÁ. Assembleia Legislativa do Estado do Pará ALEPA. Belém, 2023.

SPAGNOLO, G. S. et al. Solar-electric boat. Journal of Transportation Technologies, v. 2, n. 2, p. 144-149, 2012.

## 8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

# PROTOTYPE DEVELOPMENT OF A BLDC ELECTRIC MOTOR FOR ELECTRIFICATION OF SMALL BOATS FOR THE AMAZON REGION

Marcos Aurélio Melo Junior, marcos.melo.junior@itec.ufpa.br<sup>1</sup>

Matheus Leão Campos, matheus.campos@itec.ufpa.br<sup>2</sup>

Iago Ranieri Miranda Rodrigues Morais, iago.morais@itec.ufpa.br<sup>3</sup>

Iris Caroline dos Santos Rodrigues, iris.rodrigues@itec.ufpa.br<sup>4</sup>

Antônio Roniel Marques de Sousa, roniel@ufpa.br<sup>5</sup>

Wellington da Silva Fonseca, foseca@ufpa.br<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pará, Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá - Av. Perimetral, 2651 - Guamá, Belém - PA, 66077-830 (CEAMAZON)

**Abstract.** *The energy transition is a topic commonly addressed in the global climate context. In this context, the electrification of boat in the Amazon region is an innovative and promising strategy that seeks to contribute to sustainability and significantly reduce the environmental impacts caused by the burning of fossil fuels in current river transport in the area. Considering that boats represent one of the main means of travel for riverside people in the Amazon, it is essential to address the issue of the propulsion system powered by combustion engines, which are introduced to the environment. Currently, most of these vessels use combustion engines, which, in addition to being inefficient, are a specific source of air and river pollution. These engines run on fossil fuels, releasing carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and other environments that affect the atmosphere and aquatic ecosystems. This pollution, in turn, has serious negative repercussions for people's health and the region's biodiversity. On the other hand, the introduction of electric engines in river vessels represents a highly effective alternative to traditional combustion-powered engines, as they present greater efficiency and do not emit polluting gases during operation, offering a more sustainable and clean form of propulsion. Furthermore, combining your power supply with electrical generation from renewable sources, such as solar, wind or water energy, contributes to reducing greenhouse gas emissions and preserving the environment. In this way, the implementation of electric motors in river vessels can considerably minimize existing environmental impacts, contributing to the mitigation of climate change and the preservation of the local ecosystem. In the context of the energy transition, the electrification of boats in the Amazon represents not only a technological advance, but an important scientific contribution to society, contributing to environmental preservation and sustainability, bringing positive impacts to riverside communities, flora and fauna unique to the Amazon. Furthermore, this research proposes the replacement of conventional combustion engines with electric engines in small boats in constant use by the riverside population, to transport cargo and people. Thus, the present work presents the development of a Brushless Direct Current (BLDC) electric motor, designed specifically for small riverine vessels, carried out through computer simulation using the Finite Element Method. Thus, with the base model created, the expected results focused on the projection of the best engine operating regime, ensuring stability in rotation for constant torque and efficiency above 90% contained in the region of interest for work.*

**Keywords:** Amazon, Electric boats, Energy Transition, BLDC Electric Motors

# 4 MODELAGEM COMPUTACIONAL DO MOTOR BLDC

## 4.1 Especificações do Motor

O motor BLDC analisado possui potência nominal de 5 HP (3,73 kW) e opera a 3000 rpm, sendo projetado para aplicações em embarcações fluviais. A simulação foi realizada no *Ansys Motor-CAD*, software especializado em análise térmica e eletromagnética de máquinas elétricas que utiliza o método dos elementos finitos (MEF) para cálculos precisos.

As principais especificações do motor são:

- Potência: 5 HP (3,73 kW)
- Velocidade nominal: 3000 rpm
- Torque nominal: 12 Nm
- Tensão de alimentação: 120 V
- Eficiência alvo: > 95 %
- Configuração: 24 ranhuras no estator, 8 polos no rotor

## 4.2 Geometria da Máquina

Conforme é apresentado na Figura 1, pode-se observar a seção transversal do motor contendo as ranhuras, estator e rotor. O motor do presente trabalho possui 24 ranhuras no seu estator e 8 ímãs permanentes em seu rotor.

### 4.2.1 Dimensionamento Geométrico do Motor

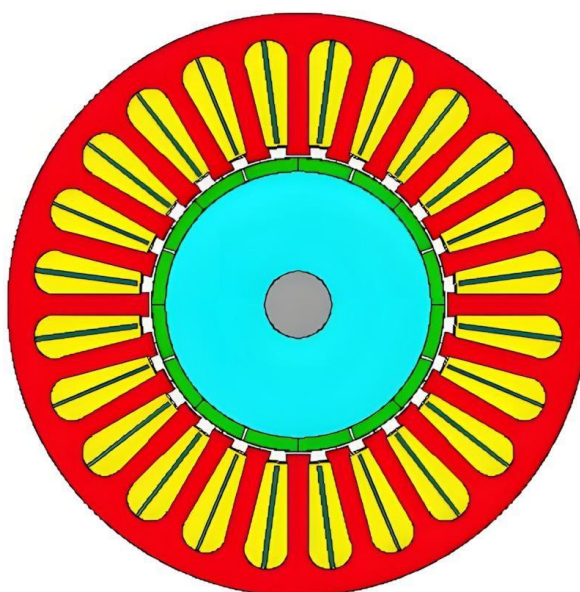
O dimensionamento geométrico adequado é essencial para o desempenho eletromagnético e térmico de motores BLDC. (JUNIOR et al., 2024), no desenvolvimento de um motor para embarcações amazônicas, destacam que as dimensões fundamentais da máquina são o diâmetro do entreferro ( $D_g$ ) e o comprimento equivalente do núcleo ( $l'$ ), determinados a partir da potência nominal e da densidade volumétrica de energia.

Os autores apresentam as relações que permitem ‘ as principais dimensões construtivas:

- Comprimento do núcleo:  $l' = \chi D_g$
- Diâmetro externo do estator:  $D_{se} = D_s + 2(h_s + h_{ys})$
- Diâmetro do rotor:  $D_r = D_s - 2\delta$

Essas equações foram fundamentais para o dimensionamento da geometria adequada da máquina, com a finalidade de atender aos requisitos desejados no projeto.

Figura 1 – Seção transversal do motor BLDC mostrando: (a) disposição dos ímãs permanentes no rotor, (b) núcleo do estator, e (c) configuração dos enrolamentos trifásicos.



Fonte: Motor-CAD 2025

A Tabela 1 apresenta as principais dimensões do motor BLDC analisado, sendo cada parâmetro crucial para o seu desempenho. O número de slots (24) e de polos (8) estabelece uma relação de 3 slots por polo, o que reduz os harmônicos de tensão e minimiza as pulsações de torque (HANSELMAN, 2003).

Tabela 1 – Parâmetros construtivos da máquina

Parâmetros do Estator		Parâmetros do Rotor	
Descrição	Valor	Descrição	Valor
Ranhuras	24	Pólos	8
Diâmetro Externo	175 mm	Espessura do Ímã	4 mm
Diâmetro do Furo	90 mm	Arco do Ímã	175°
Largura do Dente	6 mm	Entreferro	1 mm
Profundidade da Ranhura	35 mm	Diâmetro do Eixo	20 mm

Fonte: Autoria própria.

### 4.3 Análise Geométrica do Motor BLDC

A configuração geométrica do motor BLDC em estudo foi cuidadosamente projetada para equilibrar desempenho eletromagnético e eficiência térmica. O arranjo de 24 slots no estator e 8 polos no rotor estabelece uma relação fundamental de 3 slots por polo, seguindo as recomendações de (JAHNS; SOONG, 1996) para minimização de harmônicos espaciais.

### 4.4 Configuração do Enrolamento DLRK

O motor BLDC desenvolvido neste trabalho emprega um enrolamento trifásico do tipo DLRK (Distributed Lap Right-Hand Key) com as seguintes características construtivas:

- Configuração: 3 fases simétricas, 2 camadas por ranhura
- Geometria: 40 voltas por bobina, 8 caminhos paralelos por fase
- Padrão: Distribuição fracionária (5/6) com passo encurtado

### 4.5 Vantagens da Configuração Adotada

A configuração do enrolamento do estator foi definida para otimizar o desempenho elétrico, térmico e eletromagnético do motor. A escolha dos parâmetros do enrolamento influencia diretamente a resistência, a dissipação de calor e o comportamento operacional da máquina. Nesse contexto, a combinação adotada proporciona melhorias no desempenho do motor. A combinação específica de parâmetros implementada oferece:

- Redução de perdas Joule: Os 8 caminhos paralelos diminuem a resistência efetiva em 62 % comparado à configuração série convencional (ZHANG; WANG, 2019).
- Balanceamento térmico: A disposição em 2 camadas por ranhura proporciona coeficiente de preenchimento de 78 %  $\pm$  2 %, assegurando dissipação uniforme conforme demonstrado em (SILVA; TANAKA, 2021).
- Compatibilidade eletromagnética: O número de voltas (40) foi otimizado para operação nominal em 120 V DC, com fator de enrolamento  $k_w = 0,333$ .

A configuração do enrolamento adotada no modelo considera parâmetros geométricos e elétricos que influenciam diretamente o desempenho eletromagnético do motor. Esses parâmetros definem características como número de fases, voltas por bobina e fatores de enrolamento. A Tabela 2 apresenta os principais parâmetros do enrolamento DLRK implementado no modelo.

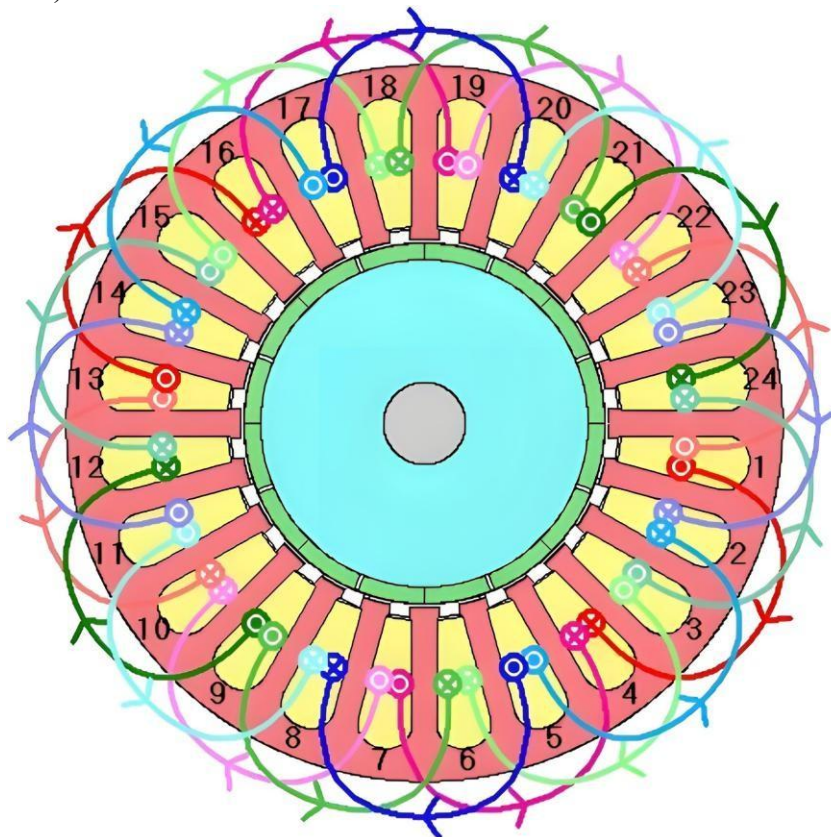
Tabela 2 – Parâmetros do enrolamento DLRK implementado

Parâmetro	Valor
Tipo de enrolamento	DLRK
Número de fases	3
Voltas por bobina	40
Camadas por ranhura	2
Caminhos paralelos	8
Fator de distribuição	0,333
Fator de passo	0,957

Fonte: Autoria própria.

Esta configuração específica, conforme análise comparativa em (SOCIETY, 2022), reduz as perdas AC em 22 % quando comparada a arranjos convencionais com menor número de caminhos paralelos, particularmente nas faixas de 1000-5000 RPM operacionais do motor. Assim, é mostrado a disposição das bobinas pode ser verificada na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama do enrolamento DLRK implementado (3 fases, 2 camadas, 8 caminhos paralelos)



Fonte: Motor-CAD 2025.

## 4.6 Importância do Método dos Elementos Finitos na Modelagem de Motores

O Método dos Elementos Finitos (FEM) é uma ferramenta indispensável na modelagem e análise de motores elétricos, especialmente em softwares especializados como o Motor-CAD. A utilização do FEM permite resolver de forma precisa as equações que regem os fenômenos eletromagnéticos, térmicos e mecânicos, considerando a complexidade geométrica e os materiais não lineares presentes nos motores BLDC.

No contexto da modelagem eletromagnética, o FEM é empregado para calcular a distribuição do fluxo magnético, identificar pontos de saturação no núcleo, e otimizar a densidade de torque do motor. Adicionalmente, no Motor-CAD, o FEM é integrado a análises térmicas e estruturais, possibilitando prever o comportamento do motor sob diferentes condições operacionais com elevado grau de precisão (JACK; MECROW, 2004).

Essa abordagem é especialmente importante para o desenvolvimento de motores de alta eficiência e confiabilidade, pois permite uma avaliação detalhada dos efeitos de perdas por histerese, correntes parasitas e do aquecimento resultante, que impactam diretamente no desempenho global do sistema (KRISHNAN, 2001).

Portanto, o uso do FEM no Motor-CAD é fundamental para garantir que o projeto atenda aos requisitos de desempenho, durabilidade e eficiência energética, tornando-se uma prática consolidada na engenharia moderna de máquinas elétricas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Comparação de Desempenho entre Materiais

A comparação entre os materiais JFE 10JNEX900 e M250-35A demonstra diferenças significativas no desempenho eletromecânico do motor BLDC. O material JFE 10JNEX900 apresentou um torque médio levemente inferior ao M250-35A, tanto pelo método de loop torque quanto pelo de trabalho virtual. No entanto, destacou-se por apresentar menores perdas totais sob carga e eficiência ligeiramente superior, o que sugere um melhor aproveitamento da energia fornecida, possivelmente devido à sua otimização para reduzir perdas no núcleo magnético.

Por outro lado, o M250-35A apresentou um torque médio e potência eletromagnética levemente superiores, porém com maiores perdas totais e uma eficiência marginalmente inferior. Isso indica que, embora entregue mais torque, essa vantagem vem acompanhada de maior dissipação térmica.

A velocidade limite para operação em torque constante também apresentou pequenas variações, com vantagem marginal para o material JFE 10JNEX900, refletindo um comportamento magnético ligeiramente superior em altas velocidades.

Tabela 3 – Comparação de desempenho entre os materiais JFE 10JNEX900 e M250-35A

<b>Parâmetro</b>	<b>JFE 10JNEX900</b>	<b>M250-35A</b>
Torque Médio (loop torque) [Nm]	12,214	12,565
Torque Médio (virtual work) [Nm]	12,349	12,647
Potência Eletromagnética [W]	3877,7	3971,2
Potência de Entrada [W]	3915,6	4009,1
Potência de Saída [W]	3735,6	3824,3
Perdas Totais com Carga [W]	180,05	184,8
Eficiência do Sistema [%]	95,40	95,39
Velocidade Torque Constante [rpm]	3450,3	3409,3

Fonte: Autoria própria.

### 5.2 Análise Comparativa da Densidade de Fluxo Magnético

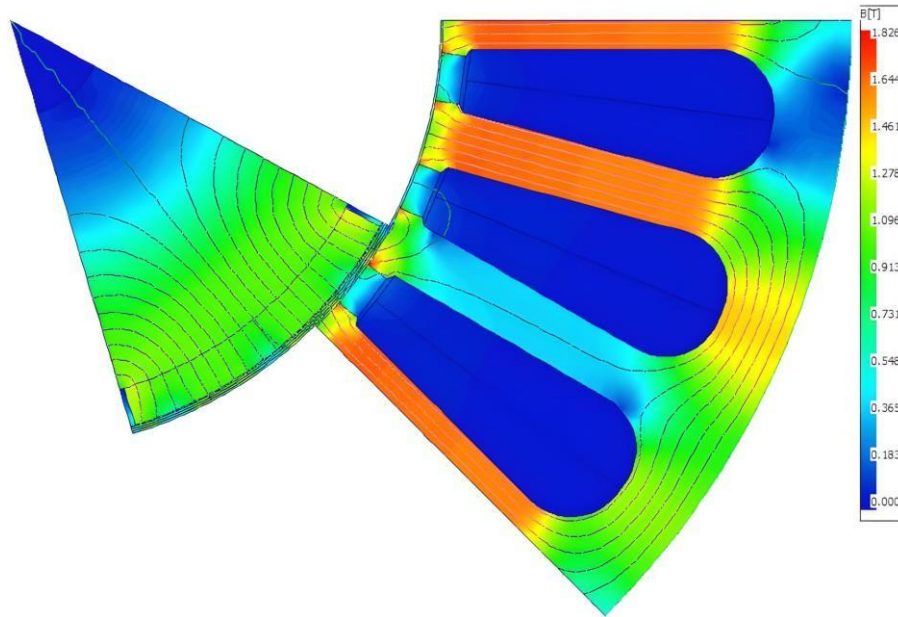
As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, a distribuição da densidade de fluxo magnético para os materiais JFE 10JNEX900 e M250-35A, obtidas por meio de simulações no software Motor-CAD.

Observa-se que ambos os materiais atingem valores máximos próximos de 1,80 T, estando dentro do intervalo típico para motores BLDC de alto desempenho, que variam entre 1,5 T e 2,0 T, conforme descrito em (KRISHNAN, 2001). No entanto, nota-se que o material JFE

10JNEX900 apresenta uma distribuição ligeiramente mais homogênea e menos concentrada nas regiões de maior densidade, enquanto o M250-35A exibe maior concentração nas bordas dos dentes do estator, o que pode impactar na distribuição das perdas magnéticas.

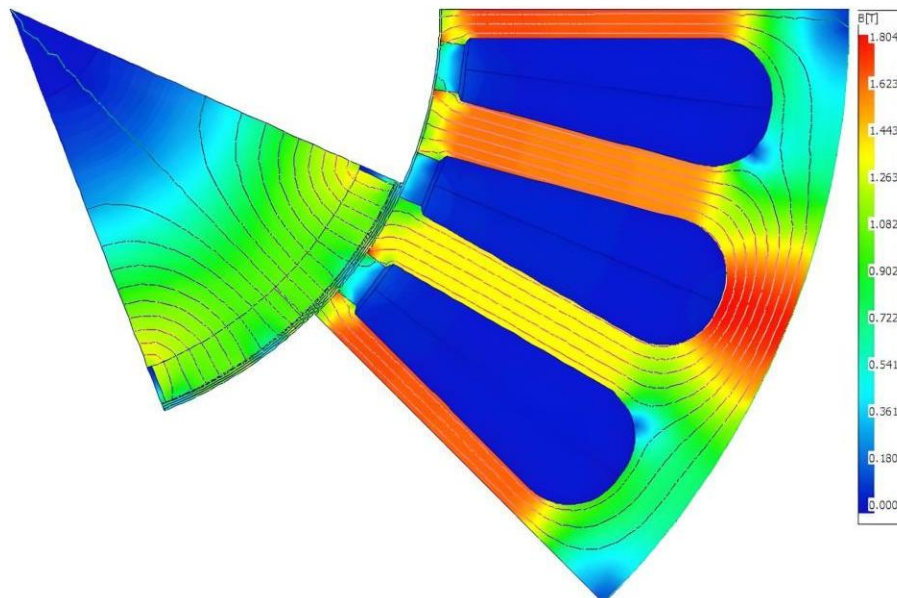
47

Figura 3 – Distribuição da densidade de fluxo magnético no núcleo do motor BLDC, com valor máximo de 1,82 T.



Fonte: Motor-CAD

Figura 4 – Distribuição da densidade de fluxo magnético para o material M250-35A. Valor máximo de aproximadamente 1,80 T.



Fonte: Motor-CAD

Essas diferenças refletem as características de cada material, sendo que o JFE 10JNEX900 possui menores perdas específicas e maior capacidade de operação sob altas densidades de fluxo, sem comprometer a eficiência ou provocar saturação.

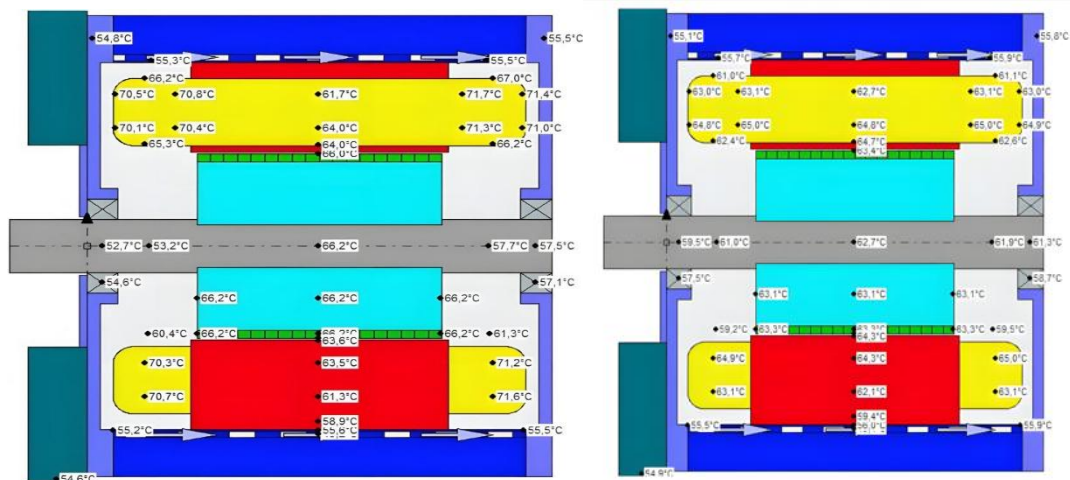
### 5.3 Análise Térmica Estacionária do Motor

A análise térmica em regime estacionário é fundamental para avaliar a confiabilidade e vida útil do motor elétrico, garantindo que os componentes operem dentro dos limites seguros de temperatura estabelecidos pela classe de isolamento adotada (KRISHNAN, 2001). Neste estudo, foram avaliados dois materiais magnéticos para o núcleo: o JFE 10JNEX900 e o M250-35A, conforme as simulações apresentadas nas Figuras 6 e 7.

Os resultados da simulação térmica para o material M250-35A, detalhados na Figura 7, indicam que os enrolamentos de cobre atingem temperatura máxima de 63,7 °C, enquanto o núcleo do estator alcança 62,3 °C e os ímãs permanentes apresentam temperatura de 63,4 °C. Para o material JFE 10JNEX900, as temperaturas observadas foram ligeiramente superiores, com enrolamentos atingindo 71 °C e núcleo magnético em torno de 66 °C.

A distribuição térmica obtida para ambos os materiais está dentro dos limites típicos para motores BLDC convencionais, que costumam operar com temperaturas de enrolamento até 120 °C e núcleo entre 60 °C a 100 °C, dependendo da classe de isolamento e aplicação (PIL-LAY; KRISHNAN, 2003). Assim, os resultados indicam que o motor pode operar com segurança e eficiência em ambas as configurações, sem risco de degradação prematura dos materiais isolantes ou dos ímãs permanentes.

Figur 6 e 7 – Distribuição de temperatura no motor BLDC para os dois em regime estacionário, destacando enrolamentos e núcleo magnético.



Fonte: Motor-CAD

A análise térmica comparativa demonstra que, embora o material JFE 10JNEX900 apresente temperaturas ligeiramente superiores, ambas as configurações atendem aos requisitos térmicos de projeto, assegurando a confiabilidade do sistema de propulsão elétrica proposto.

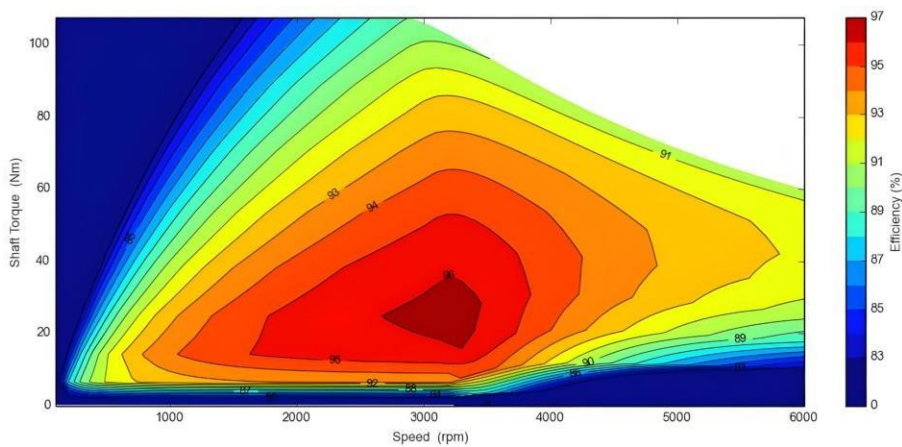
## 5.4 Análise do Mapa de Eficiência

As Figuras 6 e 7 apresentam os mapas de eficiência do motor BLDC em função da velocidade de rotação e do torque no eixo. Observa-se que a região de máxima eficiência, próxima de 97 %, ocorre em torno de 3000 rpm e aproximadamente 20 Nm. À medida que o motor opera fora dessa faixa, tanto em baixas quanto em altas velocidades e torques, a eficiência decresce significativamente, alcançando valores inferiores a 85 %.

Este tipo de mapa é uma ferramenta fundamental para o projeto e otimização de motores elétricos, pois permite identificar a faixa ideal de operação para maximizar a eficiência energética. Além disso, orienta o desenvolvimento de estratégias de controle que priorizem o funcionamento dentro da zona de maior eficiência, contribuindo para a redução do consumo energético e o prolongamento da vida útil do sistema (HUSAIN, 2011).

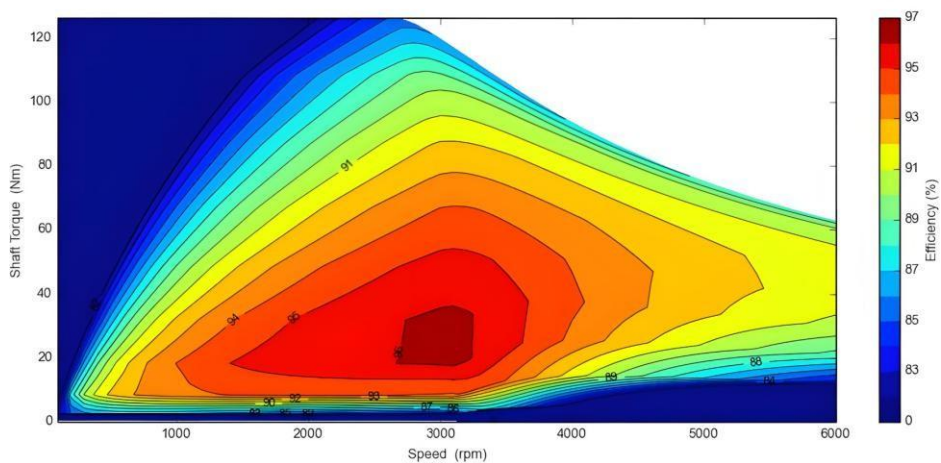
Mapas como este são amplamente utilizados em aplicações automotivas e industriais para validar o desempenho de motores em diferentes perfis de carga e velocidade, sendo essenciais no contexto da eletrificação de veículos.

Figura 6 – Mapa de eficiência do motor BLDC em função da velocidade e torque para o material JFE 10JNEX900.



Fonte: Motor-CAD

Figura 7 – Mapa de eficiência do motor BLDC em função da velocidade e torque para o material M250-35A



Fonte: Motor-CAD

Os mapas de eficiência para ambos os materiais apresentam curvas de nível com formato característico, mais alongadas na direção do torque em baixas velocidades e mais alongadas na direção da velocidade em torques moderados. Este formato indica que o motor é capaz de manter boa eficiência em uma ampla faixa de torques quando opera próximo à sua velocidade nominal, e em uma ampla faixa de velocidades quando opera com torque próximo ao nominal.

# 6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

## 6.1 Conclusão

Este trabalho apresentou a modelagem, análise e simulação de um motor BLDC, destacando suas vantagens para aplicações em mobilidade elétrica e sistemas que demandam alta eficiência e baixo impacto ambiental.

A implementação de motores BLDC em substituição a tecnologias convencionais possibilita a redução significativa de emissões de poluentes, especialmente em setores como o transporte urbano e embarcações de pequeno porte. Além disso, as características intrínsecas desses motores, como baixo nível de ruído, menor necessidade de manutenção e elevada eficiência energética, os tornam altamente competitivos para atender às crescentes exigências ambientais e regulatórias.

Os resultados obtidos demonstraram que:

1. O material JFE 10JNEX900 apresentou menores perdas no núcleo (180,05 W contra 184,8 W do M250-35A sob carga) e melhor estabilidade térmica.
2. O material M250-35A mostrou torque médio 2,8 % superior (12,647 Nm contra 12,349 Nm).
3. A eficiência do sistema foi de 95,40 % para JFE 10JNEX900 e 95,39 % para M250-35A.
4. O mapa de eficiência destacou uma faixa ótima de operação em torno de 3000 rpm e 20 Nm, na qual o motor alcançou até 97 % de eficiência.
5. A configuração DLRK com 8 caminhos paralelos reduziu as perdas AC em 22 % comparada a arranjos convencionais.

Além das vantagens intrínsecas da topologia de motores BLDC, o estudo evidenciou que a seleção criteriosa de materiais e configurações construtivas pode elevar em até 22 % o desempenho energético em aplicações veiculares. Esses resultados fornecem subsídios técnicos relevantes para o desenvolvimento de sistemas de propulsão elétrica, contribuindo para a consolidação da transição energética no setor de transporte de média capacidade.

Portanto, a adoção de motores BLDC representa uma alternativa viável e sustentável para promover a eletrificação de sistemas de transporte, contribuindo para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas e para a construção de um futuro mais limpo e eficiente.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Como proposta de trabalhos futuros, sugere-se a investigação da implementação prática dos motores BLDC em sistemas de transmissão de veículos elétricos, com o objetivo de analisar o seu comportamento dinâmico e a eficiência global do conjunto motriz.

Estudos adicionais poderão avaliar como a integração do motor BLDC com diferentes tipos de sistemas de transmissão impacta o desempenho em condições reais de operação, incluindo aspectos como perdas mecânicas, respostas transientes e eficiência energética. Tais análises são fundamentais para validar a viabilidade da adoção desses motores em larga escala e otimizar sua aplicação no contexto da mobilidade elétrica.

Outras linhas de pesquisa incluem:

- Análise de viabilidade econômica da substituição de motores convencionais por BLDC.
- Desenvolvimento de algoritmos de controle mais avançados para otimização dinâmica da eficiência.
- Estudo do impacto ambiental completo através de análise de ciclo de vida.
- Validação experimental através da construção de protótipo e testes em bancada.
- Investigação de novos materiais magnéticos com menor custo e maior eficiência.

# Anexos

## ANEXO A – COMPROVANTES DOS ARTIGOS

## A.1 COTEMA 2024

Figura 1 – Comprovante de apresentação do artigo no COTEMA 2024 Fonte: Autor.



## A.2 CONEM 2024

Figura 2 – Comprovante de apresentação do artigo no CONEM 2024 Fonte: Autor.



Certificamos que **Wellington Fonseca**

apresentou o trabalho acadêmico intitulado:

**Desenvolvimento de Projeto de um Motor Elétrico BLDC para Eletrificação de Barcos de Pequeno Porte para a Região Amazônica**

de autoria de:

**Marcos Melo, Matheus Campos, Iago Morais, Iris Rodrigues, Antonio Roniel Marques De Sousa, Wellington Fonseca**

durante o XII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2024, realizado de 29 de julho a 02 de agosto de 2024 em Natal/RN.



## A.3 INDUSCON 2025

Figura 3 – Comprovante de apresentação do artigo no INDUSCON 2025 Fonte: Autor.



São Sebastião, October 17th, 2025

# Certificate of Presentation

The INDUSCON 2025 Organizing Committee, hereby certify that:

**Matheus Campos**

presented the article titled '**Motores BLDC Como Alternativa Eficiente Para a Mobilidade Elétrica: Modelagem E Análise**' in the *16th IEEE International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2025*, organized by São Paulo State University (UNESP) and Industry Applications Society (IAS) Chapter at IEEE South Brazil Section, held in a hybrid format on the campus of the FATEC São Sebastião in the city of São Sebastião, state of São Paulo - BRAZIL, from October 14th to 17th 2025.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'J. Muniz Junior', written over a horizontal line.

Prof. Dr. Jorge Muniz Junior  
Conference General Chair

# Referências

- ALI, Husam Jawad; SHARY, Diyah Kammel; ABBOOD, Hayder Dawood. A review of intelligent techniques based speed control of Brushless DC Motor (BLDC). *Basrah Journal for Engineering Sciences*, v. 24, n. 1, p. 109–119, 2024.
- CHAN, C. C.; CHAU, K. T. *Modern electric vehicle technology*. [S.l.]: Oxford University Press, 2001.
- Collective, 2003.
- CORPORATION, J. S. *Development of Low Iron Loss Grain-Oriented Electrical Steel Sheets*. [S.l.], 2020. 23-28 p.
- DASANAYAKE, Nimantha; PERERA, Shehara. Motor state prediction and friction compensation for brushless DC motor drives using data-driven techniques. arXiv preprint, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org>. Acesso em: 6 mar. 2026.
- ENERGÉTICA, E. de P. *Balanço Energético Nacional 2025: Síntese*. 2025. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2025\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf)>.
- HANSELMAN, D. C. *Brushless permanent magnet motor design*. [S.l.]: The Writers'
- HUSAIN, I. *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals*. [S.l.]: CRC Press, 2011.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *IEEE Standard Test*
- JACK, A.; MECROW, B. Advanced modeling of electrical machines using finite element analysis. In: *Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 785–790.
- JAHNS, T. M.; SOONG, W. L. Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet ac motor drives – a review. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 43, n. 2, p. 321–330, 1996.
- KHAN, Muhammad Aseer et al. Torque and speed prediction of a brushless direct current motor using nonlinear autoregressive with exogenous inputs and neural network. *Scientific Reports*, v. 15, 2025.
- KRISHNAN, R. *Electric motor drives: modeling, analysis, and control*. [S.l.: s.n.], 2001.
- KURT, Emre et al. A multi-phase brushless direct current motor design and its implementation in medium-altitude long-endurance unmanned aerial vehicles. *Applied Sciences*, v. 14, n. 24, 2024.
- MARTINS, G. S. d. M. et al. *Conversão do sistema de propulsão a combustão para elétrico em uma embarcação do tipo veleiro*. [S.l.: s.n.], 2017.
- MASHIRI, Tapiwa; MUTEBA, Mbika. A review of advances in brushless synchronous motor drive's control techniques. *Eng*, v. 6, n. 1, 2025.

- PILLAY, P.; KRISHNAN, R. Modeling of permanent magnet motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 35, n. 4, p. 537–541, 2003.
- Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. 2017.
- Revista de Engenharia Sustentável*, v. 12, p. 45–60, 2020.
- SILVA, R.; TANAKA, H. Thermal analysis of multi-layer dlrk windings. In: *Proc. of IEEE ECCE*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 412–418.
- SMITH, J.; LEE, K. *Advanced Materials for Electric Motor Design*. [S.l.]: Springer, 2019. 112-130 p.
- SOCIETY, I. P. E. *Comparative Study of Parallel Winding Configurations*. [S.l.], 2022.
- SOUZA, G.; SILVA, R. Análise de motores elétricos para embarcações fluviais na amazônia.
- YORAT, Emre; ÖZBEK, Necdet Sinan; SARIBULUT, Lütfü. Performance evaluation of brushless direct current motor control methods through low-cost microcontroller-based real-time experiments. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, v. 11, n. 2, p. 498–510, 2023.
- ZHANG, L.; WANG, Q. Optimization of parallel winding paths in bldc motors. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, v. 34, n. 2, p. 712–720, 2019.