



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIAS ELÉTRICA E BIOMÉDICA

Análise Eletromagnética de Motores de Indução via Método dos Elementos Finitos

LUCAS MAXWEL FERNANDES SALES MEDEIROS

UFPA / ITEC / FEEB
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIAS ELÉTRICA E BIOMÉDICA

LUCAS MAXWEL FERNANDES SALES MEDEIROS

**Análise Eletromagnética de Motores de Indução via Método dos
Elementos Finitos**

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

Orientador: Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca

UFPA / ITEC / FEEB
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

M488a Medeiros, Lucas.
Análise Eletromagnética de Motores de Indução via Método
dos Elementos Finitos / Lucas Medeiros. — 2025.
40 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Wellington Fonseca
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do
Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Elétrica,
Belém, 2025.

1. Eletromagnetismo. 2. Motores de Indução. 3. Método de
Bertotti. 4. MEF. 5. FEMM. I. Título.

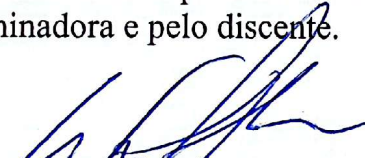
CDD 620.00151825




UFPA
SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO (TC)


Ata de defesa de Trabalho de Curso (TC) intitulado: “ANÁLISE ELETROMAGNÉTICA DE MOTORES DE INDUÇÃO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS”, apresentado durante 35 minutos pelo discente *Lucas Maxwel Fernandes Sales Medeiros*, matrícula nº 202007140018, realizada às 15h do dia 28 de Outubro de 2025, no Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON), em Belém/PA, sob orientação do(a) Professor Dr. Wellington da Silva Fonseca. Após a apresentação, o discente foi submetido à arguição oral pelos membros da banca examinadora. Em seguida, a banca se reuniu, em caráter sigiloso, para decidir o resultado do exame, ato que deliberou pela Aprovação do trabalho com o conceito EXC. Para serem efetuadas as modificações sugeridas pela banca para desenvolver a versão final do Trabalho de Curso, se for o caso, o discente recebeu o prazo máximo de 08 (oito) dias, a contar da data desta defesa. Nada mais havendo a tratar, a sessão foi encerrada, lavrando-se dela a presente Ata que, uma vez aprovada, foi assinada pelos membros da banca examinadora e pelo discente.



Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca
(Orientador – UFPA/FEEB)



Prof. Dr. Edson Ortiz de Matos
(Membro Interno – UFPA/FEEB)



Eng. Me. Marcos Aurélio Melo Júnior
(Membro Externo – Estaleiro Rio Maguari)



Lucas Maxwel Fernandes Sales Medeiros
Discente

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço ao SENHOR DEUS por sempre usar de bondade e misericórdia comigo, e pela Sua mão poderosa e amiga estar continuamente guiando-me. Que a minha vida seja para honrar e glorificar, o grandioso e maravilhoso, nome do SENHOR JESUS.

Dirijo agradecimento aos meus pais, Adelson e Adenilde, que são fonte de inspiração e força, e auxiliam-me a seguir adiante, e digo que palavras não são suficientes para descrever o quão importantes vocês são para mim, sou grato pelo amor e apoio incondicional que vocês proporcionam-me.

Estendo minha gratidão ao meu amigo de longas jornadas José Estevão, aos meus irmãos Renan e Renato, a minha querida madrinha Vanessa, e aos meus tios: Aldrin (Astronauta), Hélder, Antônio, Waldemar, João, Chico, Ivaneide, Lúcia, Léa, e primos (Elvina, Vanilson, Beatriz, Brenda, Gabriel..). Ademais, agradeço a minha tia Raimunda por ter compartilhado um pouco da sua alegria comigo, e cuja memória está sempre vívida em minha mente.

Somado a isso, agradeço ao Prof. Dr. Wellington Fonseca por acreditar em mim, e auxiliar-me ao longo da minha trajetória acadêmica. Outrossim, agradeço a companhia dos colegas que participaram de forma direta ou indireta para o sucesso dessa trajetória.

“Disse-lhe Jesus: Eu sou o caminho, a verdade, e a vida; ninguém vem ao Pai, senão por mim”

João 14:6

Resumo

O presente trabalho é uma coletânea constituída de três artigos que propõem o desenvolvimento de análises de caráter eletromagnético em motores elétricos de indução via método dos elementos finitos, com o propósito de descrever propriedades fundamentais dessas máquinas elétricas e avaliar o nível de perdas ferromagnéticas. Nesse contexto, utilizou-se o *software* FEMM que possui como base o método dos elementos finitos para a realização das simulações propostas, e por meio do *script Triangle* promove de forma automática a geração de malhas com alta qualidade via método de Delaunay. Nesse cenário, foi investigado em determinado motor de indução, a magnitude do torque e as perdas totais resultantes da escolha entre alumínio ou cobre para as barras rotóricas, em decorrência disso, os resultados indicaram aproximadamente que o torque e o nível de perdas proveniente do modelo com alumínio foram, respectivamente, 30% e 25% superiores em comparação com o modelo composto de cobre. Em outro artigo, analisou-se os reflexos gerados em termos de indução magnética e níveis de perdas ocasionados pela seleção entre os materiais ferromagnéticos 10JNEX900 (6,5%Si) e M235-35A (3,5%Si) para o núcleo do rotor e estator, os resultados indicaram que para o contorno analisado, a configuração com M235-35A obteve máximo valor de indução magnética aproximadamente 0,1 T superior em comparação com o maior valor apresentado dessa grandeza pelo 10JNEX900, e o nível de perdas ferromagnéticas deste modelo foi em torno de 17% menor em comparação com o composto por M235-35A de acordo com os coeficientes de Bertotti utilizados. No último artigo, estabeleceu-se um modelo matemático para calcular os coeficientes de Bertotti visando a estimação das perdas ferromagnéticas para os modelos de motor de indução com 10JNEX900 e M235-35A, os resultados indicaram que para as condições propostas, o motor com M235-35A apresentou que o nível de perdas no ferro foi aproximadamente 80% superior em comparação com o obtido para o 10JNEX900.

Palavras-chave: eletromagnetismo; motores de indução; método de Bertotti; MEF; FEMM; M235-35A, 10JNEX900.

Abstract

The present work, composed of three articles, proposes the development of electromagnetic analyses of induction motors using the finite element method, with the purpose of describing fundamental properties of these machines, such as the evaluation of ferromagnetic loss levels. In this context, the FEMM software was employed, which is based on the finite element method to perform the proposed simulations, and through the Triangle script, it automatically generates high-quality meshes using the Delaunay method. In this scenario, the torque magnitude and total losses resulting from the choice between aluminum or copper for the rotor bars of a given induction motor were investigated. Consequently, the results indicated that the torque and loss levels from the aluminum-based model were approximately 30% and 25% higher, respectively, compared to the copper-based model. In another article, the effects on magnetic induction and loss levels caused by the selection between the ferromagnetic materials 10JNEX900 (6.5% Si) and M235-35A (3.5% Si) for the rotor and stator cores were analyzed. The results showed that, for the analyzed case, the configuration with M235-35A achieved a maximum magnetic induction approximately 0.1 T higher compared to the maximum value obtained with 10JNEX900, while the ferromagnetic loss level of the 10JNEX900 model was around 17% lower than that of M235-35A, according to the Bertotti coefficients employed. In the final article, a mathematical model was established to calculate the Bertotti coefficients in order to estimate the ferromagnetic losses for the induction motor models using 10JNEX900 and M235-35A. The results indicated that, under the proposed conditions, the motor using M235-35A presented iron losses approximately 80% higher compared to those obtained with 10JNEX900.

Key-words: electromagnetics; induction motor; Bertotti's method; FEM; FEMM; M235-35A; 10JNEX900

Lista de Figuras

Figura 1 – Comprovante de aceite do artigo no SBSE 2023	25
Figura 2 – Comprovante de apresentação do artigo no SBSE 2023	26
Figura 3 – Comprovante de aceite do artigo no SBSE 2025	26
Figura 4 – Comprovante de apresentação do artigo no SBSE 2025	27
Figura 5 – Comprovante de aceite do artigo no INDUSCON 2025	27
Figura 6 – Comprovante de apresentação do artigo no INDUSCON 2025	28

Lista de abreviaturas e siglas

FEEB	Faculdade de Engenharias Elétrica e Biomédica
FEMM	Finite Element Method Magnetics
INDUSCON	International Conference on Industrial Applications of Electrical Engineering
MEF	Método dos Elementos Finitos
SBSE	Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos
UFPA	Universidade Federal do Pará

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Visão Geral	1
1.2	Estrutura do Trabalho	3
2	ARTIGOS DESENVOLVIDOS	4
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	24
3.1	Síntese do Trabalho	24
3.2	Trabalhos Futuros	24
4	ANEXOS	25
4.1	SBSE 2023	25
4.2	SBSE 2025	26
4.3	INDUSCON 2025	27
	Referências	29

1 INTRODUÇÃO

1.1 Visão Geral

Os motores elétricos de indução representam grande relevância na sociedade moderna, pois devido as suas características intrínsecas como robustez, relativa simplicidade estrutural e acessibilidade, essas máquinas encontram aplicações nos mais diversos cenários tais como: içamento de cargas, compressores, trens (GLOWACZ et al., 2025). Nesse contexto de importância, o presente trabalho encontra-se estruturado em três artigos, os quais visam desenvolver análises de caráter eletromagnético de motores de indução, haja vista que essa classe de investigação fornece informações valiosas no âmbito descritivo de propriedades como nível de perdas e torque.

A metodologia utilizada nos três artigos baseia-se no método dos elementos finitos (MEF) que é amplamente empregada para a descrição e *design* de máquinas elétricas, o qual consiste em aproximações mais simples de variáveis desconhecidas com o propósito de transformar equações diferenciais parciais em equações algébricas, esse método encontra-se largamente aplicado por exemplo para promover a descrição de sistemas em regime estacionário ou transientes em meios lineares ou não lineares, seja em regiões bidimensionais ou tridimensionais (DHATT; LEFRANÇOIS; TOUZOT, 2012).

Nos artigos produzidos, a análise via MEF foi desenvolvida por meio do *software* gratuito chamado *Finite Element Method Magnetics* (FEMM), o qual pode ser empregado em domínios axissimétricos ou de caráter planar bidimensional para a resolução de problemas de caráter eletrostático, fluxo de calor, magnetostático, e também é aplicável em análises eletromagnéticas de baixa frequência em meios lineares ou não lineares (MEEKER, 2010). Ademais, o *software* FEMM possui a opção de geração automática de malha por meio do *script Triangle*, que é um executável capaz de gerar malhas triangulares via método de Delauney, promovendo a criação de malhas com alto nível de qualidade. Nesse âmbito, as malhas utilizadas nos três artigos que estruturam o presente trabalho foram obtidas por meio do uso desse *script*.

Mediante a conjuntura supracitada, o artigo intitulado "Comparação entre cobre e alumínio na gaiola de motores trifásicos de indução pelo método de elementos finitos" (MEDEIROS et al., 2023), o qual foi apresentado no XVI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE - 2023) possui como propósito a investigação via simulação baseada no MEF acerca de propriedades como torque e perdas totais em determinado motor de indução com rotor do tipo gaiola de esquilo, quando as suas barras rotóricas são compostas de alumínio ou cobre.

Outrossim, as especificações geométricas do motor de indução utilizado possuem como base o artigo "Modeling and design analysis of the Tesla Model S induction motor" (THOMAS

et al., 2020). Somado a isso, após o estabelecimento da geometria do motor em questão no *software* FEMM, foi obtido por meio da utilização do *script SmartMesh* uma malha com 359.266 elementos e 180.007 nós.

Em vista disso, analisou-se comparativamente os dois cenários propostos, e foi obtido que o modelo com as barras de alumínio apresentou torque de 454,338 N.m e perdas na ordem de 105,71 kW, ao passo que, para o cobre o torque foi igual a 345,219 N.m e as perdas foram de 84,66 kW. Ademais, os resultados obtidos encontram-se diretamente ligados as características de cada material, em vista disso, as dissipações via efeito Joule no cobre apresentam-se menos intensas em comparação com o modelo de feito de alumínio, pois a resistividade elétrica deste material é superior em comparação com o cobre, ocasionando perdas de caráter ôhmico mais significativas, sendo que tal cenário pode ser agravado pelo processo de oxidação das barras rotóricas, devido a formação de óxido de alumínio.

Ademais, o artigo em intitulado de "Análise Computacional da Densidade de Fluxo Magnético Utilizando MEF em Motores de Indução" foi apresentado no XVII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE - 2025), e possui como propósito a investigação via simulação, baseada no MEF, acerca da densidade de fluxo magnético em determinado motor de indução com rotor do tipo gaiola de esquilo, quando utilizam-se os materiais ferromagnéticos 10JNEX900 e M235-35A no núcleo do estator e rotor. Acrescido a isso, foi estimado para cada uma das duas configurações o nível de perdas ferromagnéticas via método de Bertotti utilizando os coeficientes propostos no artigo "Influences of iron loss coefficients estimation on the prediction of iron losses for variable speed motors" (JUERGENS; WOLFSCHLEGER; FRICASSÉ, 2015).

Nesse contexto, realizou-se um estudo comparativo foi realizado utilizando os materiais ferromagnéticos supracitados, para isso verificou-se os perfis da indução magnética desde o raio interno do rotor até o raio externo do estator para cada configuração. Ademais, a geometria do motor foi baseada no modelo disponível na base de dados do *software* FEMM, o qual fornece apenas $\frac{1}{4}$ da geometria. Nesse contexto, como os materiais utilizados (10JNEX900 e M235-35A) são não-lineares, apresentou-se como necessário completar o modelo proposto.

Por conseguinte, verifica-se nos perfis obtidos de densidade de fluxo magnético para o 10JNEX900 e o M235-35A, que há uma disparidade das intensidades máximas de aproximadamente 0.15 T. Esse cenário é corroborado pelo fato de que o M235-35A atinge níveis de indução no intervalo de 0 até 1.5 T para valores menores de campo magnético em comparação com o 10JNEX900, isso pode ser investigado pelas curvas B-H dos materiais. Ademais, foi estimado via método de Bertotti que a densidade volumétrica de perdas no estator para a configuração com o M235-35A foi aproximadamente 17% maior em comparação ao arranjo com o 10JNEX900.

O artigo denominado "Estimation of Ferromagnetic Losses in the Core of an Induction Motor via Bertotti's Method" foi apresentado no XVI International Conference on Industrial Applications of Electrical Engineering (INDUSCON - 2025), e possui o objetivo de analisar comparativamente o nível de perdas em determinado motor de indução quando utiliza-se os

materiais 10JNEX900 e M235-35A. Para isso, desenvolveu-se um modelo matemático para calcular os coeficientes (K_h , K_c , K_e) relativos ao modelo de Bertotti.

Nesse contexto, utilizou-se informações pertencentes a base de dados do *software* Ansys Motor-CAD versão 14.1.5, e posteriormente, foi verificado o nível de precisão que os coeficientes obtidos conferem para o cálculo das perdas ferromagnéticas, objetivando averiguar o nível de precisão conferido, realizou-se a investigação do erro relativo destas estimativas em comparação com a base de dados da versão do Ansys Motor-Cad utilizado. Em vista disso, nota-se pelos gráficos obtidos que os coeficientes obtidos para cada material oferecem grau satisfatório para estimar as perdas ferromagnéticas em cada configuração.

Após o estabelecimento de tais coeficientes, realizou-se a comparação dos níveis de perdas obtidos ajuste dos coeficientes para a frequência de 60 Hz, que é a frequência operacional do motor de indução investigado. Em meio a isso, objetivando esse propósito, utilizou-se o modelo matemático proposto no artigo "An improved approach to power losses in magnetic laminations under nonsinusoidal induction waveform" (FIORILLO; NOVIKOV, 1990).

Ademais, utilizou-se simulação via MEF para estimar o nível máximo de indução magnética em cada configuração do motor, pois o valor máximo é necessário para o cálculo de perdas utilizando o modelo de Bertotti. Somado a isso, por meio do *script Triangle* foi possível obter a discretização da geometria do motor em estudo por meio de uma malha com 57.778 elementos e 28.963 nós. Por conseguinte, foi obtido que as perdas ferromagnéticas da configuração com o M235-35A foi aproximadamente 80% maior que o modelo com 10JNEX900.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em sete capítulos:

- **CAPÍTULO 2 – ARTIGOS DESENVOLVIDOS:** Apresenta os três artigos que compõem o presente trabalho.
- **CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS:** Ilustra a síntese do trabalho e apresenta propostas futuras.
- **CAPÍTULO 4 – ANEXOS:** Apresenta os documentos comprobatórios relativos aos artigos.

2 ARTIGOS DESENVOLVIDOS

Comparação entre cobre e alumínio na gaiola de motores trifásicos de indução pelo método de elementos finitos ^{*}

Lucas Maxwel Fernandes Sales Medeiros ^{*}
 André Oliveira Carvalho da Silva ^{**} Erik Chagas Rozal ^{***}
 Iago Ranieri Miranda Rodrigues Morais ^{****}
 Wellington da Silva Fonseca [†]

^{*} Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, Universidade Federal do Pará, PA, (e-mail: lucas.medeiros@itec.ufpa.br).

^{**} Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, Universidade do Federal do Pará, PA, (e-mail: andre.carvalho.silva@itec.ufpa.br)

^{***} Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, Universidade Federal do Pará, PA, (e-mail: erik.rozal@itec.ufpa.br)

^{****} Amazon Energy Efficiency Excellence Center (CEAMAZON) (e-mail: iago.morais@itec.ufpa.br)

[†] Amazon Energy Efficiency Excellence Center (CEAMAZON) (e-mail: fonseca@ufpa.br)

Abstract: The present work's goal is to develop the analysis of the behaviour of properties as: torque, total losses, magnetic density flux, in the three-phase induction motor with squirrel cage rotor when the material which compound the cage is changed. Aiming this goal, we used simulations of finite elements through the use of software FEMM, and for analysis' purpose a performance comparison was made between copper and aluminum. Hence, it was noted that the aluminum configuration showed a torque of 454,338 N.m and total power losses equal to 105,71 kW, for cooper was obtained, respectively, the values of 345,219 N.m and 84,66 kW.

Resumo: O presente trabalho tem por objetivo analisar em um motor trifásico de indução com rotor do tipo gaiola de esquilo o comportamento de propriedades como: torque, total de perdas e densidade de fluxo magnético, quando modifica-se o material que constitui as barras da gaiola. Para isso, utilizou-se simulação pelo método de elementos finitos por meio do uso do software FEMM, e para fins de análise, foi realizada a comparação de desempenho entre o cobre e alumínio como materiais constituintes das barras do rotor. Por conseguinte, verificou-se que a configuração com o alumínio apresentou torque de 454,338 N.m e perda total de potência igual a 105,71 kW, para o cobre foi obtido, respectivamente, os valores de 345,219 N.m e 84,66 kW.

Keywords: Software FEMM; three-phased motor; induction; copper; aluminum.

Palavras-chaves: Software FEMM; motor trifásico; indução; cobre; alumínio.

1. INTRODUÇÃO

O advento da globalização agravado nas últimas décadas do século XX proporcionou a sociedade uma realidade inovadora, a qual é baseada na expansiva dinamicidade. Em decorrência disso, a crescente busca pela otimização energética vem tornando-se cada vez mais intensa, e nesse contexto, situa-se os motores de indução trifásica.

Essa máquina elétrica é de fundamental importância devido a sua simplicidade, constituição robusta, confiabilidade e baixo custo de manutenção (Ahmed et al., 2022). Outrossim, caracteriza-se pela sua distinta capacidade de adaptar-se a cenários com cargas diferentes, apresenta uma pequena faixa de variação da velocidade de operação de-

vido a carga aplicada ao eixo SA (2015). Somado a isso, um fator atrativo dessa família de motores é o seu baixo custo de produção devido, dentre outros aspectos, ao fato de não haver necessidade de utilizar “terras raras”, que são materiais caracterizados por apresentarem elevada densidade de fluxo magnético, mas que possuem como contraste o alto valor de mercado e baixa disponibilidade (Melo, 2019). À vista de suas características e em conjunto com os avanços tecnológicos no âmbito das técnicas de construção de motores, a classe de indução torna-se conveniente para a utilização em veículos elétricos (Aktas et al., 2020).

Em termos estruturais o motor de indução trifásico apresenta dois componentes fundamentais que são: rotor e estator. Este consiste em uma região fixa do motor, e apresenta-se como sendo o responsável por promover a geração de um campo magnético girante com uma determinada taxa de rotação denominada de velocidade síncrona,

^{*} Agradecimento ao Programa de Educação Tutorial - Engenharia Elétrica (PET-EE), da Universidade Federal do Pará (UFPA), pelo apoio e financiamento.

que atua e promove via efeito de indução a geração de corrente elétrica no rotor, o qual é caracterizado por ser uma estrutura móvel alocada internamente em relação ao estator, e que gira a uma frequência inferior ao campo magnético deste, caracterizando o fenômeno de escorregamento (Umans, 2014).

No domínio dos motores de indução trifásico, encontram-se presentes os seguintes tipos de rotores: gaiola de esquilo e o anel deslizante. A classe anel deslizante é constituída por enrolamento bobinado cuja geometria é semelhante a do estator, por sua vez, necessitam de maior atenção no âmbito da manutenção, haja vista, que apresentam escovas de carvão promovendo curto-circuito nos enrolamentos, portanto, é necessário que ocorra o acompanhamento do nível de desgaste promovido pelo contínuo funcionamento (Pinheiro et al., 2021).

O outro tipo de rotor denominado de gaiola de esquilo, consiste em um arranjo de barras metálicas, as quais podem ser confeccionadas por meio da utilização de materiais como: alumínio, cobre, e que estão dispostas em formato cilíndrico, ademais, encontram-se conectadas por meio de anéis de curto-circuito e tais barras localizam-se nas ranhuras do rotor (de Paula et al., 2020). Somado a isso, em termos comparativos, os motores que possuem rotor gaiola embora apresentam menor torque de partida em comparação com os que são constituídos por enrolamentos bobinados, ajudam a promover a redução do custo de fabricação. (Malagoli et al., 2014).

Outro fator que influencia diretamente para que o valor de mercado dos motores de indução seja, em geral, de baixo custo em termos de manutenção e fabricação reside na seleção de materiais como por exemplo: alumínio e cobre, que vão compor a estrutura destas máquinas.

O alumínio tem alta relevância pois apresenta-se como um material que possui elevado grau de funcionalidade, como por exemplo na confecção de ligas metálicas, esse cenário é impulsionado pelo seu conjunto de propriedades como: densidade e condutividade térmica (Diehl, 2020). É importante ressaltar que outras características referentes ao alumínio reside no fato de apresentar alto grau de ductibilidade e exímia resistência à corrosão (Hatayama et al., 2009). Outrossim, o potencial de reciclagem juntamente com a extensa gama de possibilidades para sua utilização, destaca-o como sendo um dos metais mais utilizados no mundo.

Em meio a isso, é notório que na construção de máquinas e equipamentos, tais parâmetros credencia-o para a utilização em componentes de equipamentos trocadores de calor, como por exemplo: as aletas de um motor elétrico.

O cobre é um metal singular que apresenta excelente capacidade tanto de condução de eletricidade quanto de calor e, ao mesmo tempo, e durabilidade. Consequentemente, são amplamente utilizados na construção de motores elétricos. Ademais, esse material apresenta distinto potencial de reciclagem contribuindo dessa forma por exemplo para a redução da emissão de dióxido de enxofre para o meio ambiente (Ferreira et al., 2019).

Por conseguinte, devido ao grande emprego dos motores trifásicos de indução com rotor gaiola de esquilo nos mais

variados setores da economia, torna-se necessário obter informações acerca da resposta que essa máquina fornece perante um cenário de alteração estrutural como, por exemplo, a modificação do material que constitui as barras do rotor gaiola. Nesse contexto, no presente trabalho realizou-se a análise do comportamento de parâmetros como: torque, densidade de fluxo magnético e perdas relativas, para essa configuração de motor e rotor, quando este apresenta barras ora de alumínio ora de cobre. Consequentemente, objetivou-se descrever de forma comparativa como esses diferentes materiais influenciam nos parâmetros supracitados.

Ademais, o torque adequado é necessário para garantir que o motor possa fornecer potência suficiente para realização das tarefas desejadas. Tendo em vista uma análise detalhada dessa grandeza, torna-se possível determinar a capacidade que o motor possui em adequar-se a diferentes cargas, por meio da previsão de sua capacidade de aceleração e desaceleração. Além disso, tal estudo ajuda a identificar possíveis problemas de desequilíbrio de carga, desgaste excessivo de componentes e eficiência energética prejudicada.

A densidade de fluxo magnético é um campo vetorial que representa a quantidade de fluxo magnético que atravessa uma determinada área perpendicular à direção do fluxo magnético (Jiles, 2015). A análise da disposição da densidade do fluxo magnético no motor é fundamental para compreender e otimizar o desempenho dessa máquina, pois tal grandeza permite identificar regiões em que o nível de perdas energéticas são mais intensas, as quais podem ser promovidas por histerese magnética e correntes parasitas. Por conseguinte, torna-se possível aplicar alternativas que visem aumentar a eficiência do motor, como por exemplo a utilização de materiais magnéticos mais eficazes.

No presente trabalho fez-se uso do método dos elementos finitos (MEF), objetivando a simulação das propriedades eletromagnéticas do motor de indução. O MEF é uma importante ferramenta numérica utilizada em análise de problemas em meios contínuos, os quais podem apresentar caráter eletromagnético, mecânico, e devido a natureza da física dos problemas em estudo, geralmente estes são delineados matematicamente por meio de equações diferenciais parciais (EDP's) em conjunto com imposição de condições de contorno (Sousa et al., 2021).

Inicialmente, o método promove a divisão do domínio original do estudo em questão, a qual pode ser uma geometria complexa, em uma coleção de pequenos subdomínios denominados de elementos finitos (Sousa et al., 2021).

Os subdomínios podem apresentar geometrias em diferentes formatos como: triangular, quadrangular, os quais são obtidos por meio da utilização de uma malha que tem por objetivo a discretização do domínio em análise para obter informações mais precisas acerca das propriedades em estudo, consequentemente, quando deseja-se realizar uma verificação mais acurada em uma determinada região de estudo, é conveniente que a malha seja mais discreta em tais localidades, tornando-a mais densa em nesses pontos.

Ademais, as equações que foram obtidas para cada elemento constituinte da coleção de subdomínios são posteriormente solucionadas por meio de métodos relativos

à matemática computacional. Por conseguinte, ocorre a verificação dos resultados do teste.

Na seção de metodologia foi abordado o processo de construção do modelo de motor a ser utilizado, descrição de aspectos relativos aos materiais simulados nos rotores gaiola de esquilo, geração da malha e exposição das propriedades estudadas. Na seção resultados e discussões foi exposta a relação entre as propriedades dos materiais com as respostas obtidas. Na seção de conclusão promoveu-se a síntese dos resultados alcançados.

2. METODOLOGIA

2.1 Software FEMM

Com o propósito de relizar análise via MEF, foi utilizado para esse objetivo o FEMM, que consiste em um *software* desenvolvido por David Meeker, o qual baseia-se no método dos elementos finitos e possui a capacidade de investigar problemas de caráter eletromagnético de baixas frequências em configurações axissimétricas ou em domínios planares bidimensionais, possui também a capacidade de investigar problemas magnetostáticos tanto de caráter linear quanto não linear. Ademais, o FEMM apresenta nítida importância no contexto de investigação de propriedades físicas como densidade de fluxo magnético e intensidade de campo elétrico (Meeker et al., 2010).

O alto grau de relevância da ferramenta é justificado especialmente quando a região em estudo é caracterizada por geometrias complexas, e por meio da discretização desse domínio em pequenos elementos torna-se possível obter resultados precisos para as propriedades estudadas, pois estes constituintes de dimensão finita vão apresentar em sua estruturação formas locais (aproximações) mais simples das EDP's que regem o problema. Somado a isso, os elementos são conectados por meio de nós.

Além disso, para as simulações realizadas foi utilizado o solver *Biconjugate Gradient Solver* e a frequência de operação foi estabelecida em 60Hz (Meeker et al., 2010).

2.2 Equações Utilizadas

Para o problema de caráter eletromagnético em estudo no presente trabalho, fez-se uso das equações de Maxwell, as quais são as relações fundamentais que regem o eletromagnetismo (Spitz, 2019).

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (4)$$

\mathbf{D} representa o vetor densidade de fluxo elétrico, \mathbf{B} simboliza o vetor densidade de fluxo magnético, \mathbf{E} denota o vetor campo elétrico, \mathbf{J} caracteriza o vetor densidade de corrente e ρ_v consiste na densidade volumétrica de carga.

A equação (1) denota a lei de Gauss para campos elétricos, (2) consiste na lei de Gauss para campos magnéticos, (3) representa a lei de Faraday, (4) descreve a lei de Ampère-Maxwell. Outrossim, a lei de Ohm desempenha papel importante na análise

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (5)$$

σ é a condutividade elétrica do material

2.3 Geometria do motor

As especificações geométricas do motor analisado e seus respectivos dados foram obtidos utilizando-se como base as medidas presentes em (Thomas et al., 2020), os dados das aferições utilizadas no artigo supracitado foram retiradas da patente do motor de indução do Tesla Model S (tabelas 1 e 2). Posteriormente, de posse das dimensões do motor iniciou-se o processo de construção de sua geometria em um ambiente de simulação de máquinas elétricas.

No ambiente de desenvolvimento em questão é possível encontrar um modelo já existente para o motor de indução trifásico. De posse disso, realizou-se o dimensionamento desejado para os componentes como rotor e estator.

Após a construção do modelo, 1/4 da estrutura foi exportada para um software CAD, objetivando assim completar a estrutura e a realização de alguns ajustes no desenho do motor com o propósito de otimizar o processo computacional por meio da exploração da simetria presente na geometria do motor em análise.

Por conseguinte, a estrutura completa da geometria do motor foi, posteriormente, exportada para o FEMM, o qual gerou a malha mais conveniente para o problema em análise, que no caso foi gerada uma constituída de elementos triangulares. De posse disso, utilizou-se o método dos elementos finitos para realizar um estudo mais preciso acerca do comportamento do motor em diferentes situações, como a variação dos materiais que constituem as barras do rotor do tipo gaiola.

Tabela 1. Parâmetros do rotor e do estator.

Parâmetro	Estator	Rotor
Diâmetro externo	254,00 mm	155,80 mm
Diâmetro interno	156,80 mm	50,00 mm
Profundidade da ranhura	19,00 mm	19,60 mm
Largura de abertura da ranhura	2,90 mm	- - -
Profundidade da ponta do dente	1,00 mm	- - -
Ponto de ranhura	- - -	0,55 mm
Largura do dente	4,50 mm	4,50 mm

Tabela 2. Dados da geometria utilizados.

Parâmetro	Valor utilizado
Comprimento de pilha de laminação	152,00 mm
Espaço do ar	0,50 mm

2.4 Materiais utilizados e suas propriedades

Foi determinado que o material constituinte tanto do estator quanto do rotor é o aço M22, e as bobinas do estator são feitas de fio 18 AWG de cobre. Somado a isso, realizou-se a seleção dos materiais, cobre e alumínio, que vão compor os rotores do tipo gaiola de esquilo nas

simulações de elementos finitos, para estes foi feito um levantamento acerca de propriedades como: resistividade elétrica, densidade, módulo de elasticidade, objetivando descrever como esses fatores indicados nas tabelas 3 e 4 influenciam nos resultados obtidos pelas simulações.

Tabela 3. Características do alumínio.

Propriedade	Descrição
Resistividade elétrica	$2,82 \times 10^{-8} \Omega.m$
Densidade	2,7 g/cm ³
Ponto de fusão	660°C
Módulo de elasticidade	70.000 MPa
Condutibilidade térmica a 25°C	0,53 Cal/cm/°C
Condutividade elétrica (%IACS)	61%

Tabela 4. Características do cobre.

Propriedade	Descrição
Resistividade elétrica	$1,72 \times 10^{-8} \Omega.m$
Densidade	8,96 g/cm ³
Ponto de fusão	1083°C
Módulo de elasticidade	100.000 MPa
Condutibilidade térmica a 25°C	0,94 Cal/cm/°C
Condutividade elétrica (%IACS)	100%

2.5 Malha

Após a exportação da geometria para o FEMM e determinação dos materiais, realizou-se a obtenção da malha por meio da utilização do script "Smart Mesh" que está presente no software e por padrão encontra-se ativada, além disso, tem por objetivo gerar uma malha com densidade de elementos suficiente de tal forma que seja sustentada a precisão dos cálculos desenvolvidos (Meeker et al., 2010).

Somado a isso, a malha gerada para análise foi obtida de maneira em que as regiões de estudo apresentassem uma densidade elevada de elementos. Por conseguinte, foi promovido a geração de 359.266 elementos triangulares e 180.007 nós, tal configuração está exibida na figura 1.

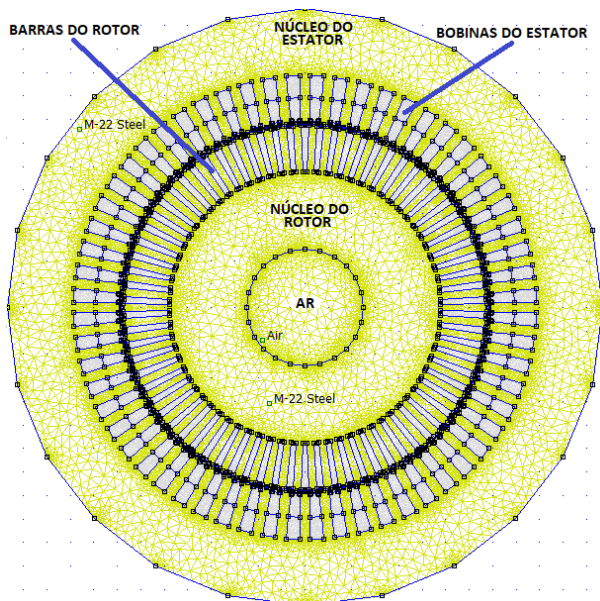


Figura 1. Malha triangular utilizada.

2.6 Tópicos avaliados

O estudo acerca das perdas totais em motores de indução trifásicos desempenha um papel de grande relevância na eficiência energética e no desempenho geral do motor. A análise dessas perdas fornece bases para identificar e promover a quantização acerca das distintas fontes de perdas e, conseqüentemente, auxilia no projeto e otimização do motor. As perdas elétricas ocorrem pelo aquecimento dos materiais presentes no rotor e estator em virtude do efeito Joule. (Freitas, 2022).

As perdas no núcleo incluem a histerese magnética, correntes de Foucault e em excesso, são provocadas por meio das características magnéticas dos materiais utilizados no motor. Portanto, essa classe de efeito dissipativo pode ser atenuado por meio da seleção de materiais que possuam baixa histerese magnética e resistência elétrica conveniente. Por histerese magnética, a perda ocorre devido ao movimento dos domínios magnéticos durante o processo de magnetização. Como consequência das correntes induzidas, as perdas por corrente de Foucault se dão pela variação de fluxo magnético no tempo. Por último, as perdas em excesso se relacionam com o deslocamento das paredes dos domínios magnéticos (Freitas, 2022).

As perdas mecânicas podem ocorrer de duas maneiras: atrito ou ventilação. Por atrito, ocorrem devido ao movimento do rotor, o qual gera fricção das partes mecânicas. Por ventilação, causadas devido ao atrito entre as partes móveis e o ar, tais perdas variam com o cubo da velocidade do motor (Freitas, 2022).

Por último, as perdas suplementares são causadas pela corrente de carga e seus harmônicos nos enrolamentos, laminações e carcaça (Freitas, 2022).

A região analisada para calcular as perdas totais e o torque é exibida na figura 2.

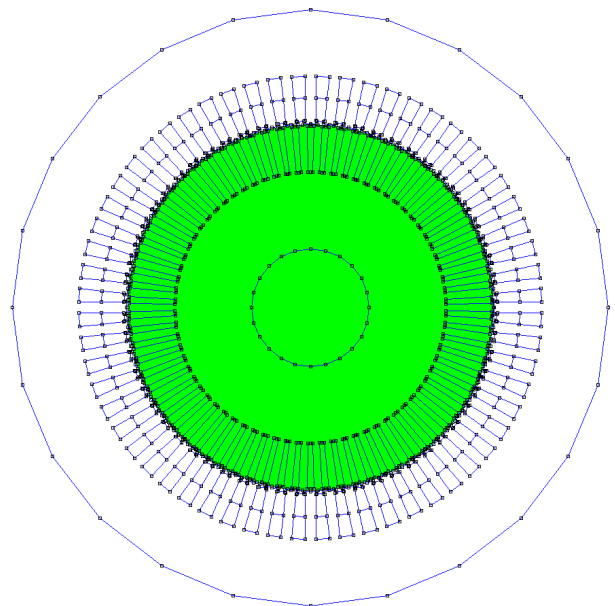


Figura 2. Região analisada (em verde) para o torque e obtenção de perdas totais no rotor.

O torque (τ) é uma grandeza de caráter vetorial, que consiste na capacidade de uma determinada força (\mathbf{F}) em promover o movimento rotacional de um corpo em torno de um dado eixo. Por conseguinte, em termos matemáticos temos que:

$$\tau = \mathbf{r} \times \mathbf{F} \quad (6)$$

onde \mathbf{r} denota o vetor posição, cuja origem consiste no ponto de rotação e término no ponto de aplicação da força (Halliday et al., 2008). Esse parâmetro no contexto de motores de indução trifásicos desempenha um papel fundamental para que ocorra operação eficiente e no desempenho geral do motor. Essa grandeza, no contexto de motores de indução trifásico, é responsável por promover a força de rotação necessária para impulsionar o eixo do motor, resultando no movimento mecânico desejado. Por conseguinte, análise do torque caracteriza-se como sendo aspecto essencial para compreender como a performance do motor é alterada em condições distintas de carga e na busca pela otimização de sua eficiência.

No FEMM o torque em relação ao centro do motor (0,0) foi obtido por meio do tensor de tensão ponderada, o qual consiste em uma versão do tensor de tensão de Maxwell, e por sua vez essa versão auxilia no cálculo de forças e torques (Meeker et al., 2010).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Comparativo entre o alumínio e o cobre

O alumínio e o cobre são materiais de grande importância para o desenvolvimento tecnológico, especialmente no âmbito da busca por melhor rendimento. Em meio a esse contexto, é necessário a realização de comparativos de suas respectivas propriedades objetivando a otimização do processo em questão. Fatores como: densidade, condutividade térmica, desempenham notável importância na construção do motor em análise, pois afetam diretamente na inércia de rotação e na condução do calor (tabela 5).

Tabela 5. Características dos metais.

Metal	Densidade	Condutividade térmica
Cobre	8,96g/cm ³	372W/mK
Alumínio	2,7g/cm ³	204W/mk

3.2 Análise dos resultados obtidos

O alumínio possui uma densidade inferior ao do cobre (figuras 3 e 4), baseado nisso, ocorre que o rotor do tipo gaiola de esquilo constituído de alumínio possui inércia de rotação menor que a respectiva estrutura feita com cobre. As perdas totais estão estritamente relacionadas a termos como a dissipação por efeito Joule. O alumínio, devido ao fato de possuir maior resistência elétrica que o cobre, consequentemente, ocasiona que a estrutura constituída desse material apresenta potência dissipativa superior à estrutura feita de cobre (tabela 6).

O entreferro demanda a produção de um campo magnético mais intenso para a ocorrência de uma determinada potência no rotor. As simulações via FEMM mostram que o campo magnético no entreferro quando se utiliza cobre é inferior em relação ao uso do alumínio (ver figuras 5 e 6).

As simulações mostram que o rotor do tipo gaiola de esquilo, constituído de alumínio, apresenta valores ligeiramente superiores de indução magnética do que a estrutura constituída de cobre, pois o alumínio possui a permeabilidade magnética relativa ligeiramente superior a 1, enquanto que para o cobre é ligeiramente menor que 1, pois esses materiais são classificados, respectivamente, como diamagnético e paramagnético.

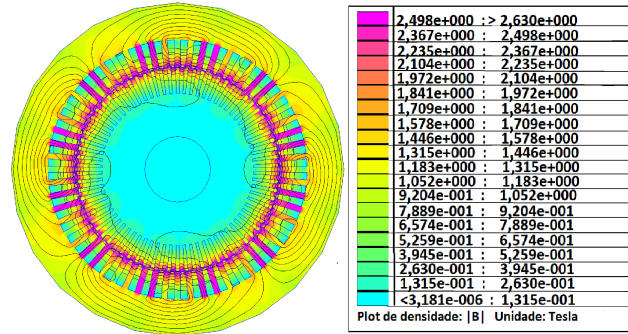


Figura 3. Densidade de fluxo magnético utilizando cobre.

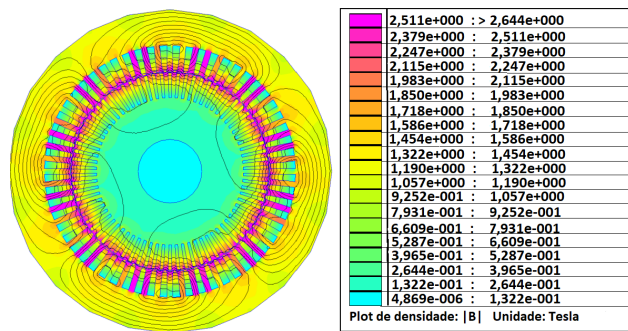


Figura 4. Densidade de fluxo magnético utilizando alumínio.

Portanto, verifica-se que as configurações propostas respondem de forma semelhante em termos de densidade de fluxo magnético.

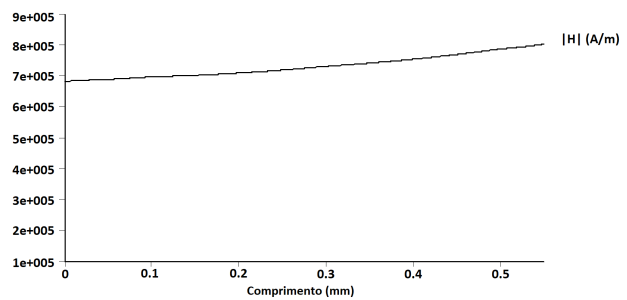


Figura 5. Gráfico do campo magnético no entreferro quando utilizado cobre.

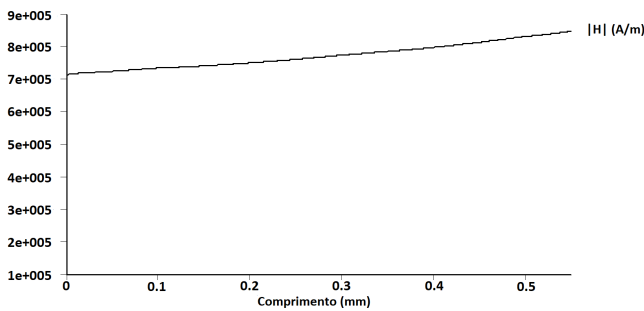


Figura 6. Gráfico do campo magnético no entreferro quando utilizado alumínio

Verifica-se que ambas as configurações apresentam semelhança no módulo do campo magnético no entreferro.

Tabela 6. Dados obtidos.

Material	Perdas resistivas	Perdas totais	Torque
Cobre	84,65 kW	84,66 kW	345,219 N.m
Alumínio	105,70 kW	105,71 kW	454,338 N.m

Portanto, verifica-se que as perdas totais na região analisada em ambas simulações, é majoritariamente de caráter resistivo, conseqüentemente, a pequena diferença no parâmetro de resistividade elétrica implica em uma diferença elevada de, aproximadamente, 21 kW para as configurações de alumínio e cobre em termos de perdas resistivas. Acrescido a isso, a configuração que utilizou alumínio superou a feita com cobre, em termos de torque, em 109,119 N.m. Os gráficos do módulo do campo magnético no entreferro indicam um comportamento semelhante dessa grandeza para ambas configurações.

4. CONCLUSÃO

Por conseguinte, verifica-se que a escolha do alumínio gera um total de perdas superior, pois esse material apresenta resistência elétrica maior e, conseqüentemente, as dissipações via efeito Joule são especialmente mais intensas. Tal efeito dissipativo pode ser agravado à medida que o processo de oxidação do alumínio avance sobre a superfície das barras do rotor ocasionando a formação de óxido de alumínio. Ademais, os resultados das simulações mostram que o torque é inferior para a configuração constituída de cobre, esse cenário é promovido pela diferença existente entre as resistividades dos materiais. Somado a isso, as configurações apresentam perfil semelhante para o módulo do campo magnético no entreferro, esse caráter é impulsionado pela proximidade dos valores de permeabilidade magnética dos materiais em análise.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Educação Tutorial - Engenharia Elétrica (PET-EE), da Universidade Federal do Pará (UFPA), pelo apoio.

REFERÊNCIAS

Ahmed, F.S., Hussain, Z.S., and Salih, T.K.M. (2022). Enhancing performance for three-phase induction motor

by changing the magnetic flux density and core material using consol. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 12(1), 62–72.

Aktas, M., Awaili, K., Ehsani, M., and Arisoy, A. (2020). Direct torque control versus indirect field-oriented control of induction motors for electric vehicle applications. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(5), 1134–1143.

de Paula, D.D., Ferreira, A.S.R., de Oliveira Evald, P.J.D., and Azzolin, R.Z. (2020). Validação experimental e modelagem matemática de um motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão (ISSN: 2525-4782)*, 5(5).

Diehl, D. (2020). Controle de tratamento térmico através da condutividade elétrica para ligas de alumínio endurecíveis por precipitação.

Ferreira, G.K., Reis, E.P., and Castro, D.E. (2019). A importância da reciclagem na sustentabilidade de carros elétricos.

Freitas, A.A.d. (2022). Estudo de técnicas de predição de rendimento em um motor de indução trifásico variando o enrolamento estatórico.

Halliday, D., Resnick, R., and Walker, J. (2008). Fundamentos de física, volume 1: mecânica. *Tradução Ronaldo Sérgio de Biasi*, 10.

Hatayama, H., Daigo, I., Matsuno, Y., and Adachi, Y. (2009). Assessment of the recycling potential of aluminum in japan, the united states, europe and china. *Materials transactions*, 50(3), 650–656.

Jiles, D. (2015). *Introduction to magnetism and magnetic materials*. CRC press.

Malagoli, J.A., Camacho, J.R., and da Luz, M.V.F. (2014). Projeto de rotor de máquina de indução trifásica usando o algoritmo de evolução diferencial. *empírica*, 1, 4.

Meeker, D. et al. (2010). Finite element method magnetics. *FEMM*, 4(32), 162.

Melo, P.M.A.d.S. (2019). Motores de propulsão em veículos elétricos: tipos, características e perspectivas de evolução. *Neutro à Terra*.

Pinheiro, V.M., de Oliveira, C.A., and Gomes, L.C. (2021). Contribuição à análise do gerador de indução trifásico com rotor bobinado: estudos experimentais e teóricos em condições normais de operação e diante de desequilíbrios de tensão. *Research, Society and Development*, 10(16), e93101623490–e93101623490.

SA, W.E.E. (2015). Dt-6 motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão—especificação, características e manutenção. *Catálogo técnico*.

Sousa, A.R.M.d., Nunes, M.V.A., Fonseca, W.d.S., Araujo, R.C.F., and Lima, D.d.S. (2021). Magneto-thermostructural analysis of power transformers under inrush and short circuit conditions. *Energies*, 14(11), 3266.

Spitz, M. (2019). Local wellposedness of nonlinear maxwell equations with perfectly conducting boundary conditions. *Journal of Differential Equations*, 266(8), 5012–5063.

Thomas, R., Garbuio, L., Gerbaud, L., and Chazal, H. (2020). Modeling and design analysis of the tesla model s induction motor. In *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, volume 1, 495–501. IEEE.

Umans, S.D. (2014). *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7*. AMGH Editora.

Análise Computacional da Densidade de Fluxo Magnético Utilizando MEF em Motores de Indução ^{*}

Lucas Maxwel F.S. Medeiros ^{*} Matheus L. Campos ^{**}
 Marcos A.M. Jr ^{***} Iago R.M.R. Miranda ^{****}
 Wellington da Silva Fonseca [†]

^{*} Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, Universidade Federal do Pará, PA, (e-mail: lucas.medeiros@itec.ufpa.br).

^{**} Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, Universidade Federal do Pará, PA (e-mail: matheus.campos@itec.ufpa.br)

^{***} Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, Universidade Federal do Pará, PA (e-mail: marcos.aurelio.melo@itec.ufpa.br).

^{****} Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON) (iago.morais@itec.ufpa.br)

[†] Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON) (fonseca@ufpa.br)

Abstract: The present work aims to analyze, via computer simulation based on the finite element method (FEM), the magnetic induction's behaviour in a 2.58 HP induction motor with an operating frequency of 60 Hz, when the ferromagnetic materials 10JNEX900 and M235-35A are used. Furthermore, to compare the behavior of the motor in the two configurations, the magnetic induction profiles were verified from the internal radius of the rotor to the external radius of the stator. Therefore, the results showed that for the same contour analyzed, the M235-35A obtained its maximum magnetic induction value about 0.1 T higher compared to the 10JNEX900.

Resumo: O presente trabalho tem por objetivo analisar via simulação computacional baseada no método dos elementos finitos (MEF), o comportamento da indução magnética em um motor de indução de 2.58 HP com frequência operacional igual a 60 Hz, quando os materiais ferromagnéticos 10JNEX900 e M235-35A são utilizados. Ademais, para realizar a comparação acerca do comportamento do motor nas duas configurações, verificou-se os perfis da indução magnética desde o raio interno do rotor até o raio externo do estator. Por conseguinte, os resultados mostraram que para o mesmo contorno analisado, o M235-35A obteve que seu maior valor de indução magnética foi aproximadamente 0.1 T superior ao máximo aferido em comparação com o 10JNEX900.

Keywords: Magnetic induction; Induction motor; 10JNEX900; M235-35A; Finite elements; FEMM.

Palavras-chaves: Indução magnética, Motor de indução; 10JNEX900; M235-35A; Elementos finitos; FEMM.

1. INTRODUÇÃO

Nota-se que devido ao progressivo avanço tecnológico atual, o desenvolvimento e o aprimoramento de materiais que sejam mais eficientes para utilização em máquinas elétricas tal como o motor de indução, possuem nítida relevância nas mais diversas aplicações industriais (Santhosh et al., 2022). Adicionalmente, materiais que apresentam alto desempenho ocasionam influência direta em aspectos como a densidade de fluxo magnético na máquina e redução de perdas elétricas. Nesse contexto, pode-se citar o uso dos materiais ferromagnéticos 10JNEX900 e M235-35A em motores de indução.

O motor de indução é uma máquina que possui notória robustez, motivado pelo fato não possuir sistema de excitação, o que reduz a sua complexidade operacional. Acrescido a isso, apresenta a vantagem de ser caracterizado também pelo baixo custo de fabricação, pois não tem a necessidade de utilizar materiais de terras raras em sua estrutura, consequentemente, esse tipo de motor encontra-se largamente empregado em diversas aplicações, como por exemplo em veículos elétricos de tração (Takemura et al., 2022). Outrossim, o seu desempenho está diretamente ligado a escolha dos materiais que constituem a máquina, as perdas de caráter eletromagnético as quais dividem-se em dissipação via efeito Joule nos enrolamentos e perdas no núcleo (Hu et al., 2023).

^{*} Os autores agradecem ao grupo PET-EE UFPa

Como a eficiência da máquina encontra-se fortemente relacionada a seleção dos materiais para o rotor e estator, então a utilização do M235-35A e 10JNEX900 apresentam-se como alternativas interessantes devido as suas respectivas características estruturais. O material ferromagnético M235-35A possui em sua constituição 3.5% de silício e, destaca-se por sua larga aplicação em engenharia tal como a confecção de circuitos magnéticos para máquinas elétricas (Petrun and Steentjes, 2020).

Em termos estruturais, o 10JNEX900 é um material ferromagnético com alto percentual de silício em sua estrutura e que apresenta baixo índice de perdas. Verificou-se que para determinadas condições e para nível de indução magnética igual 1T e frequência de 400Hz, o 10JNEX900 apresentou uma resistência a deformação de 600 MPa e perda no núcleo na faixa de 15W/kg, ao passo que para o M235-35A foi aferida uma resistência de aproximadamente 400 MPa e perdas ao em torno de 5W/kg (Gerada et al., 2014). Acrescido a isso, investigou-se a viabilidade de desenvolver um rotor com imãs permanentes internos utilizando o 10JNEX900 ao invés de empregar o material amorfo 2605SA1, pois a resistência mecânica deste é facilmente degradada devido ao processo mecânico, o que pode ocasionar falhas no rotor (Ou et al., 2021). E segundo o trabalho de Ma et al. (2022b), verificou-se que para um conjunto de condições especificadas e na frequência de 50 Hz, o 10JNEX900 apresentou perdas no ferro de apenas 25% em relação ao M235-35A.

Encontra-se proposto na literatura, que a estrutura interna do rotor de um motor síncrono de alta velocidade com imãs permanentes fosse constituída pelo material 10JNEX900, os resultados indicaram que este apresentou propriedades magnéticas superiores em comparação com o aço 20SW1200H (Ma et al., 2022a). E, constata-se proposto um *design* inovador de rotor para contornar os efeitos adversos oriundos da elevada força centrífuga devido ao processo de funcionamento do rotor em elevada velocidade, para isso, utilizou-se o M235-35A ao invés de empregar laminações com alta resistência a tração, para verificar essa solução, utilizou-se o método dos elementos finitos (Mathew et al., 2021).

Portanto, devido as características intrínsecas dos materiais 10JNEX900 e M235-35A juntamente com suas largas aplicações no contexto de máquinas elétricas, realizou-se os seus empregos para analisar o parâmetro de densidade de fluxo magnético de um motor de indução trifásico com rotor gaiola em regime estático. Na seção II abordar-se-á a metodologia baseada em elementos finitos usada para a análise, geometria do motor, estabelecimento das equações, e malha e materiais utilizados, na seção III encontra-se os resultados obtidos e, na seção IV está a discussão dos resultados.

2. METODOLOGIA

2.1 Software FEMM

O *software* empregado para a realização das simulações computacionais foi o *Finite Element Method Magnetics* (FEMM), o qual é um *software* que emprega o método dos elementos finitos (MEF) que promove a aproximação de equações diferenciais parciais por meio de formulações

de caráter algébrico para analisar regiões com geometrias planares bidimensionais e domínios axissimétricos tridimensionais (Sousa et al., 2021). Acrescido a isso, o presente *software* pode ser utilizado para o estudo de problemas em regime estacionário de fluxo de calor, e também é aplicável em análises eletromagnéticas de baixa frequência seja de caráter linear ou não linear (Meeker et al., 2010). Ademais, o FEMM é estruturado em três partes que são: interface interativa, *script Triangle* e *solvers*.

A interface interativa do FEMM fornece ao usuário a possibilidade de desenhar ou realizar a importação da geometria do domínio a ser analisado, e facilita a determinação dos materiais a serem utilizados juntamente com estabelecimento das condições de contorno. Outrossim, o *script Triangle* que é utilizado no FEMM para geração da malha triangular, consiste em um programa desenvolvido por Jonathan Schewchuk o qual promove a discretização automática do domínio analisado em elementos finitos triangulares, esse executável tem como base a triangulação de Delauney e resulta na geração de malhas de alta qualidade (Elshakhs et al., 2024).

2.2 Equações Utilizadas

No presente estudo, utilizou-se as equações de Maxwell que são as relações fundamentais do eletromagnetismo, juntamente com as equações que relacionam o campo magnético (\mathbf{H}), indução magnética (\mathbf{B}) e potencial vetor magnético (\mathbf{A}) (Spitz, 2019).

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4)$$

Fazendo uso de (4) em (3), obtém-se:

$$\mathbf{H} = \frac{\nabla \times \mathbf{A}}{\mu} \quad (5)$$

Para materiais não lineares $\mu = \mu(\mathbf{B})$ Substituindo (5) em (2), e observando a não linearidade do meio, resulta em:

$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times \mathbf{A}}{\mu(\mathbf{B})} \right) = -\sigma(\nabla V + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}) + \mathbf{J}_{\text{fonte}} \quad (6)$$

Ademais, \mathbf{E} denota o campo elétrico, \mathbf{J} designa a densidade de corrente de condução, $\mathbf{J}_{\text{fonte}}$ consiste em fontes de correntes aplicadas, μ denota a permeabilidade magnética do meio, σ consiste na condutividade elétrica. A equação 1 representa a relação constitucional entre \mathbf{J} e \mathbf{E} , a equação 2 denota a relação entre campo elétrico, potencial elétrico e potencial vetor magnético (\mathbf{A}). A equação 3 consiste na relação entre indução e campo magnético, a equação 4 representa a formulação da indução magnética por meio do potencial vetor magnético. Somado a isso, o FEMM utiliza a relação 6 que consiste em uma equação diferencial parcial para obter o vetor \mathbf{A} , pois obtendo o potencial vetor magnético as demais grandezas \mathbf{B} e \mathbf{H}

são encontradas. Somado a isso, para investigar as perdas eletromagnéticas, utilizou-se a equação de Bertotti (7) e os coeficientes propostos em Juergens and Fricassè (2015). P_{fe} representa a potência por unidade de volume, B_{max} é a máxima intensidade de indução magnética na região, f representa a frequência, k_h é o coeficiente de perda por histerese, k_c representa o coeficiente de perdas clássicas e k_e consiste no coeficiente de perdas por excesso.

$$P_{fe} = k_h f B_{max}^2 + k_c (f B_{max})^2 + k_e (f B_{max})^{1.5} \quad (7)$$

2.3 Parâmetros geométricos do motor

A geometria utilizada baseou-se no modelo disponível na base de dados do FEMM, o qual fornece para o usuário 1/4 do motor. Após a adoção do modelo disponibilizado, exportou-se a geometria para um software CAD com o objetivo de completar o desenho do motor, pois dessa forma juntamente com o estabelecimento de condições de contorno desejáveis, poder-se-ia utilizar materiais não lineares. O modelo disponibilizado nessa base possui a limitação de utilizar somente materiais lineares, pois dessa forma assume-se que a impedância não depende da amplitude da corrente. Ademais, utilizou a condição de contorno $A = 0$, isso foi estabelecido para confinar as linhas de fluxo magnético no domínio analisado. E, a excitação no estator foi realizada via corrente.

Ademais, as tabelas abaixo sintetizam os parâmetros utilizados para a construção do motor de indução em estudo. Na Tabela 1 encontram-se os parâmetros geométricos relativos ao rotor e ao estator da máquina.

Tabela 1. Parâmetros do rotor e estator.

Parâmetros	Rotor	Estator
Raio Interno	12,50 mm	40,37 mm
Raio Externo	40,00 mm	65,00 mm
Altura do Slot	14,50 mm	13,00 mm
Largura do Dente	4,40 mm	3,80 mm
Área do Slot	39,25 mm ²	57,47 mm ²

A Tabela 2 apresenta os parâmetros gerais do motor e também os relativos ao *layout* do enrolamento da máquina

Tabela 2. Configuração do rotor e estator.

Parâmetros	Especificação
Número de Slots do Estator	36
Número de Slots do Rotor	28
Tensão de Fase	220 V
Passo da Bobina	6
Número de voltas por fase	75
Potência	2,58 HP
Espessura de Airgap	0,37 mm
Raio do Eixo	12,50 mm
Comprimento	100 mm
Número de polos	4

Somado a isso, definiu-se que as barras do rotor são constituídas de alumínio. Ademais, os materiais ferromagnéticos 10JNEX900 e M235-35A foram considerados nas simulações como laminados para atenuar os efeitos de corrente de Foucault, haja vista que quanto mais espesso for o material magnético, mais intenso é tal efeito promovido por essa classe de correntes, para isso considerou-se lâminas de 0.1 mm e fator de empilhamento igual a 0.98.

2.4 Geometria obtida

De posse dos parâmetros obtidos nas Tabelas 1 e 2, foi possível obter a modelagem geométrica para o motor de indução em análise conforme indicado na Figura 1.

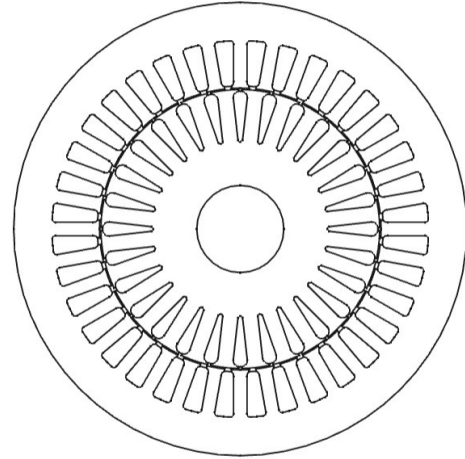


Figura 1. Geometria utilizada para o motor de indução.

2.5 Malha gerada

Após a obtenção da geometria do motor, realizou-se a imposição dos materiais selecionados para o rotor, estator, barras rotóricas e enrolamentos. Por conseguinte, utilizando o *script Smart Mesh*, gerou-se uma malha com elementos triangulares que possui 47633 nós e 94828 elementos conforme apresenta a Figura 2.

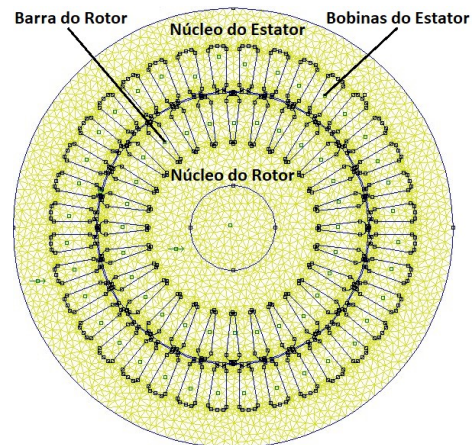


Figura 2. Modelo de malha utilizada para o motor de indução.

2.6 Materiais Utilizados

Utilizou-se para as barras rotóricas alumínio, empregou-se cobre para a confecção das bobinas e os materiais 10JNEX900 e M235-35A no estator e rotor. Os materiais ferromagnéticos utilizados encontram-se ausentes no FEMM e, também por serem materiais magnéticos não lineares, tiveram os dados das suas respectivas curvas B-H

retiradas da base de dados do software ANSYS MotorCAD. Somado a isso, foram obtidas as curvas B-H para os materiais em estudo, haja vista que tal curva fornece indicativos sobre a região em que ocorre a saturação. Abaixo, a Figura 3 apresenta a curva B-H para o material 10JNEX900 e M235-35A.

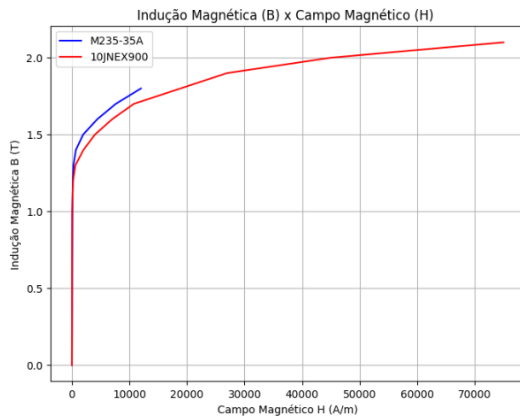


Figura 3. Curvas B-H para o 10JNEX900 e M235-35A.

De posse das curvas B-H para os materiais ferromagnéticos 10JNEX900 e M235-35A, verifica-se que o M235-35A fornece níveis de indução magnética superiores em comparação com o 10JNEX900 para pequenas intensidades de campo magnético. Em contrapartida, para campos magnéticos mais intensos, o 10JNEX900 fornece níveis de indução magnética maiores que o outro material pode proporcionar.

Portanto, para aplicações com campos magnéticos menos intensos e que deseja-se níveis de indução magnética consideráveis, o M235-35A apresenta-se como uma alternativa mais viável.

3. RESULTADOS

Por conseguinte, após a geração da malha foi aplicado o *Biconjugate Gradient Solver (BiCG)*, que consiste em um método iterativo pertencente a matemática computacional que é utilizado para resolver sistemas lineares grandes e esparsos comumente presentes em problemas de engenharia, adicionalmente, esta metodologia é uma variação do método clássico do gradiente conjugado (Iakymchuk et al., 2024)

O BiCG foi aplicado com precisão de 10^{-8} para resolução das equações lineares oriundas da aplicação do método dos elementos finitos. Após essa etapa, foi obtido o comportamento da densidade de fluxo magnético no motor para as configurações com o 10JNEX900 e M235-35A.

Adicionalmente, a Figura 4 indica os perfis da densidade de fluxo magnético no motor de indução trifásico analisado, para o arranjo com 10JNEX900 e a outra configuração com o material ferromagnético M235-35A.

De posse dos perfis de densidade de fluxo magnético para as duas configurações, verifica-se que os arranjos apresentam similaridades na disposição espacial da propriedade supracitada, porque os níveis de indução magnética em

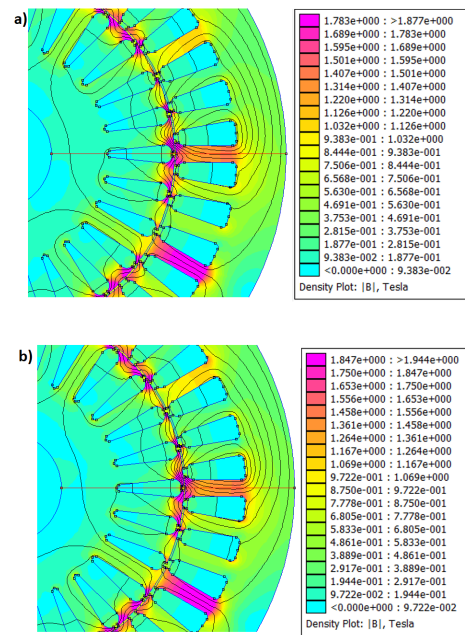


Figura 4. Densidade de fluxo magnético para o motor com o (a) 10JNEX900 e (b) M235-35A.

ambas simulações são mais intensas próximas das extremidades dos dentes e *slots*, pois há um maior confinamento das linhas de campo magnético nessas regiões. Adicionalmente, o nível de indução magnética dentro dos *slots* é diminuta, pois a relutância dessa região é muito superior em comparação com a vizinhança.

Esses perfis obtidos possuem influência direta na análise do torque da máquina, pois quanto mais elevada for a densidade de fluxo magnético no estator maior será a força eletromotriz induzida no rotor e, conseqüentemente, maior será o torque do motor. Acrescido a isso, foi obtido para o M235-35A o valor de $B_{\max - \text{estator}} = 3,25 \text{ T}$. Outrossim, para o 10JNEX900 foi obtido que $B_{\max - \text{estator}} = 2,94 \text{ T}$.

Objetivando analisar de forma mais precisa a influência das características intrínsecas de cada material no comportamento da densidade de fluxo magnético, realizou-se a inspeção dessa grandeza no comprimento indicado pela linha vermelha na Figura 5.

Além disso, os gráficos indicados na Figura 6 denotam o aspecto da densidade de fluxo magnético com a distância para o 10JNEX900 e M235-35A.

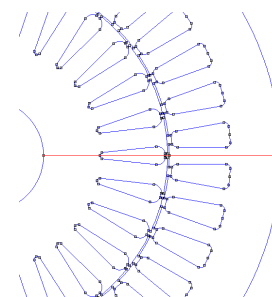


Figura 5. Contorno analisado para $|B|$ (linha vermelha).

Após a definição do comprimento a ser analisado, foram obtidos os seguintes gráficos de indução magnética por comprimento para os dois modelos de motor.

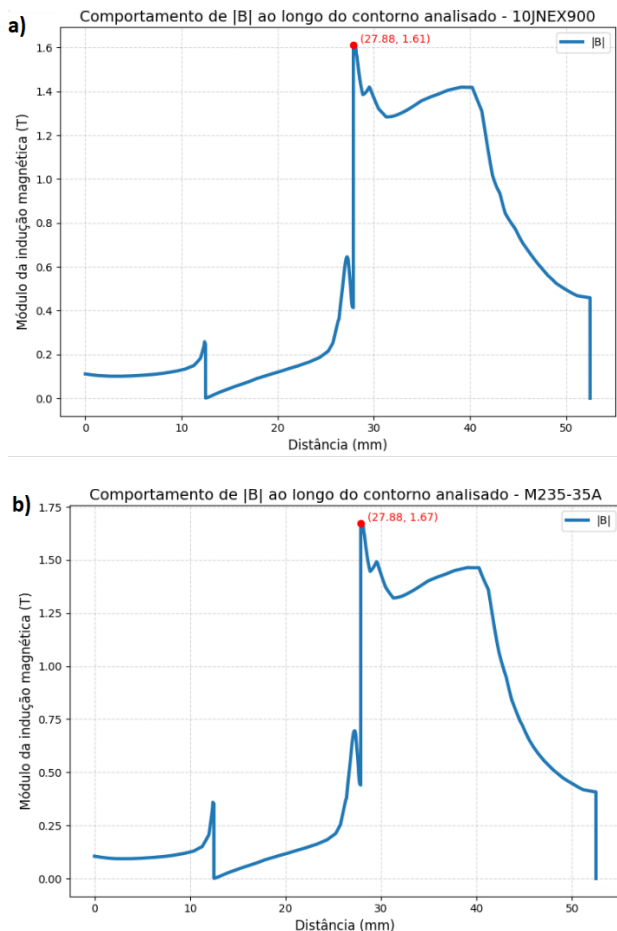


Figura 6. Gráfico indução magnética x comprimento para o a) 10JNEX900, b) M235-35A.

Portanto, verificam-se nos gráficos que para um comprimento de 12,50 mm, a qual corresponde a distância do ponto inicial de análise até a extremidade inicial do slot do rotor, a densidade de fluxo magnético apresenta seu valor mínimo, esse cenário ocorre devido a transição do material ferromagnético para a região não magnética indicada pela barra rotórica.

A faixa que apresenta os menores níveis de densidade de fluxo magnético corresponde a região preenchida pelas barras de alumínio do rotor, indicada no intervalo de 12,50 mm até 27,00 mm, haja vista que esse material é não magnético. Somado a isso, a análise gráfica indica um ponto cuja abscissa é de aproximadamente 27 mm que possui uma tendência de crescimento de indução magnética, esse ponto representa o início da região de entreferro, a qual apresenta variações abruptas da densidade de fluxo magnético. Outrossim, verificou-se que as perdas no estator via equação de Bertotti foram iguais a $506,29 \frac{W}{m^3}$ para o M235-35A e para o 10JNEX900 foi igual a $431,56 \frac{W}{m^3}$, indicando que que o uso do 10JNEX900 mediante as condições propostas resulta em menor nível de perdas energéticas.

Verifica-se nos gráficos para o 10JNEX900 e o M235-35A que há uma disparidade das intensidades máximas no perfil analisado de aproximadamente 0,15 T. Esse cenário é verificado pelo fato de que o M235-35A atinge níveis de indução no intervalo de 0 até 1,5 T para valores menores de campo magnético em comparação com o 10JNEX900, isso pode ser investigado pelas curvas **B-H** dos materiais. Ademais, no âmbito de campos magnéticos intensos o 10JNEX900 apresenta níveis de densidade de fluxo magnético superiores em comparação com o M235-35A, o que corrobora a sua importância em aplicações em motores de alta frequência.

4. CONCLUSÕES

Por conseguinte, no presente trabalho desenvolveu-se uma análise acerca do comportamento da densidade de fluxo magnético em um motor de indução de 2,56 HP, o qual é largamente empregado em aplicações como bombas de água, quando este possui ora o aço elétrico M235-35A ora o material 10JNEX900. Verificou-se que para as condições estabelecidas, a configuração com o 10JNEX900 apresentou uma intensidade máxima de densidade de fluxo magnético inferior ao arranjo com o M235-35A, realidade essa devido ao perfil das curvas **B-H** dos materiais supracitados. Somado a isso, a densidade volumétrica de perdas no estator para a configuração com o M235-35A foi aproximadamente 17% maior em comparação ao arranjo com o 10JNEX900. Em meio a isso, com base no estudo realizado, os resultados das simulações foram satisfatórios, visto que utilizar o método dos elementos finitos possibilita a verificação de forma precisa de características essenciais da máquina, como por exemplo a densidade de fluxo magnético, o qual é um critério fundamental para boa performance de um motor de indução.

REFERÊNCIAS

- Elshakhs, Y.S., Deliparaschos, K.M., Charalambous, T., Oliva, G., and Zolotas, A. (2024). A comprehensive survey on delaunay triangulation: Applications, algorithms, and implementations over cpus, gpus, and fpgas. *IEEE Access*, 12, 12562–12585. doi:10.1109/ACCESS.2024.3354709.
- Gerada, D., Mebarki, A., Brown, N.L., Gerada, C., Cavagnino, A., and Boglietti, A. (2014). High-speed electrical machines: Technologies, trends, and developments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(6), 2946–2959. doi:10.1109/TIE.2013.2286777.
- Hu, H., Zhang, W., and Zhao, C. (2023). Research on the combination of ie3-ie5 series energy-efficient three-phase induction motor. In *2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 640–645. doi:10.1109/ICEMS59686.2023.10345026.
- Iakymchuk, R., Graillat, S., and Aliaga, J.I. (2024). General framework for re-assuring numerical reliability in parallel krylov solvers: A case of bi-conjugate gradient stabilized methods. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 38(1), 17–33. doi:10.1177/10943420231207642.
- Juergens, Jonathan, P.B.W.O. and Fricassè, A. (2015). Influences of iron loss coefficients estimation on the prediction of iron losses for variable speed motors. *2015 IEEE International Electric Machines & Drives*

- Conference (IEMDC)*, 1254–1259. doi:10.1109/IEMDC.2015.7409222.
- Ma, D., Tian, B., Zheng, X., Li, Y., Xu, S., and Pei, R. (2022a). Study of high-silicon steel as interior rotor for high-speed motor considering the influence of multi-physical field coupling and slotting process. *Materials*, 15(23). doi:10.3390/ma15238502. URL <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/23/8502>.
- Ma, X.Y., Soulard, J., Slater, C., and Davis, C. (2022b). Influence of electrical steel grade on different types of traction motors. In *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 544–550. doi:10.1109/ICEM51905.2022.9910933.
- Mathew, S., Kumar, R.M.R., Endla, N.K., Vundru, C., Singh, R., and Fernandes, B.G. (2021). Development of a hybrid rotor structure for high-speed laminated rotor induction motor. In *2021 IEEE International Electric Machines Drives Conference (IEMDC)*, 1–7. doi:10.1109/IEMDC47953.2021.9449519.
- Meeker, D. et al. (2010). Finite element method magnetics. *FEMM*, 4(32), 162.
- Ou, J., Liu, Y., Breining, P., Gietzelt, T., Wunsch, T., and Doppelbauer, M. (2021). Experimental characterization and feasibility study on high mechanical strength electrical steels for high-speed motors application. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(1), 284–293. doi:10.1109/TIA.2020.3033262.
- Petrun, M. and Steentjes, S. (2020). Iron-loss and magnetization dynamics in non-oriented electrical steel: 1-d excitations up to high frequencies. *IEEE Access*, 8, 4568–4593. doi:10.1109/ACCESS.2019.2963482.
- Santhosh, R., M, V.S., Sailakshmi, and Yadav, S. (2022). Hardware design of network model of protection and controller module for three-phase induction motors in industrial plants with remote monitoring system on a centralized system. In *2022 International Conference on Innovations in Science and Technology for Sustainable Development (ICISTSD)*, 93–98. doi:10.1109/ICISTSD55159.2022.10010403.
- Sousa, A.R.M.d., Nunes, M.V.A., Fonseca, W.d.S., Araujo, R.C.F., and Lima, D.d.S. (2021). Magneto-thermo-structural analysis of power transformers under inrush and short circuit conditions. *Energies*, 14(11). doi:10.3390/en14113266. URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/11/3266>.
- Spitz, M. (2019). Local wellposedness of nonlinear maxwell equations with perfectly conducting boundary conditions. *Journal of Differential Equations*, 266(8), 5012–5063. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jde.2018.10.019>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022039618306077>.
- Takemura, N., Hirata, K., Niguchi, N., and Suzuki, H. (2022). Development of a 12/10 hex connection srm for electric vehicle traction motors. In *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 239–245. doi:10.1109/ICEM51905.2022.9910775.

Estimation of Ferromagnetic Losses in the Core of an Induction Motor via Bertotti's Method

Lucas Maxwel Fernandes Sales Medeiros
Institute of Technology
Federal University of Pará (UFPA)
 Belém, Brasil
 lucas.medeiros@itec.ufpa.br

Marcos Aurélio Melo Junior
Institute of Technology
Federal University of Pará (UFPA)
 Belém, Brasil
 marcos.melo.junior@itec.ufpa.br

Iago Ranieri Miranda Rodrigues Morais
Institute of Technology
Federal University of Pará (UFPA)
 Belém, Brasil
 iago.morais@itec.ufpa.br

Wellington da Silva Fonseca
Institute of Technology
Federal University of Pará (UFPA)
 Belém, Brasil
 fonseca@ufpa.br

Abstract—The aim of this work is to comparatively analyze the iron losses in a three-phase induction motor (1 HP, 60 Hz, 127 V) when using the ferromagnetic materials 10JNEX900 (6.5% Si) and M235-35A (3.5% Si). To this end, an electromagnetic simulation based on the finite element method was developed to estimate the levels of magnetic induction in the machine under investigation. Once these induction profiles were available, the losses for each motor configuration were estimated using the Bertotti method, whose hysteresis and eddy current coefficients were estimated by fitting the loss density \times magnetic induction curves, in such a way that the information was extracted from the Ansys Maxwell database, for the M235-35A the data is for a frequency of 50 Hz and for the 10JNEX900 the information is for 100 Hz. In addition, the accuracy of the approximations via the Bertotti method was checked by constructing the relative error curves, after which the Bertotti coefficients were adjusted for the 60 Hz frequency. Therefore, the iron losses using M235-35A were approximately 80% higher compared to the arrangement with 10JNEX900.

Index Terms—Iron loss, Bertotti method, 10JNEX900, M235-35A, Finite element method

I. INTRODUCTION

In the contemporary context, growing concern about current climate conditions together with technological advances makes the progressive replacement of combustion vehicles by electric vehicles a viable alternative for reducing greenhouse gas emissions, and in this way the decarbonization process is strengthened. In this context, one of the main focuses of research into electric vehicles is investigating the electrical losses caused by the ferromagnetic materials chosen to make up the core of the induction motor, since this type of loss is a key factor in the energy efficiency of the machine [2]. In order to carry out this analysis, a number of mathematical models have been developed over time with the aim of describing the phenomenon of electrical losses in ferromagnetic material, including those proposed by Steinmetz, Jordan and Bertotti [3]. The approach presented by Steinmetz in 1892 indicated that iron losses are promoted solely by hysteresis. In 1924, Jordan proposed that the iron losses come from dissipation via hysteresis and eddy currents [4]. In 1988, Bertotti developed an even more accurate model

for calculating the aforementioned losses, decomposing the dissipation in iron into three loss specifications: hysteresis, eddy currents, and excess [5].

Therefore, due to the greater accuracy of Bertotti's model compared to the Steinmetz and Jordan approaches, it is possible to develop fast yet accurate estimates of motor core losses, thereby enabling quick comparative analyses of materials, which are vital in engineering practice.

Moreover, because the energy efficiency of an electric motor is directly correlated with the selection of materials for the rotor and stator, the use of materials such as M235-35A and 10JNEX900 is a relevant option for use in motor design due to their respective structural characteristics. In this context, the ferromagnetic material M235-35A is characterized by its 3.5% silicon content and stands out for its wide application in engineering, such as the manufacture of magnetic circuits for electrical machines. Within this framework, an innovative rotor design was proposed in the literature to overcome the adverse effects of the high centrifugal force due to the rotor running at high speed, using the M235-35A instead of high tensile strength laminations, and to validate this model, a finite element analysis (FEA) was conducted [7].

Furthermore, from a structural perspective, 10JNEX900 is a ferromagnetic material with a high silicon content, and exhibits low core losses, especially in high-speed applications. This feature played a pivotal role in the design of a proposed High Speed Switched Reluctance Motor, since increasing rotational speed leads to a substantial rise in ferromagnetic material losses [8]. In addition, it was also reported in the literature that, under certain conditions and for a magnetic induction of 1T and a frequency of 400Hz, 10JNEX900 exhibited a resistance to deformation of 600 MPa and core losses in the range of 15 W/kg, while the M235-35A had a resistance of approximately 400 MPa and losses of around 5 W/kg [9]. Moreover, the feasibility of developing a rotor with internal permanent magnets using 10JNEX900 instead of the amorphous 2605SA1 material was investigated, since the latter's mechanical strength is easily degraded during processing, which can lead to rotor failures [10]. Furthermore, according to [11], under specified conditions at a frequency

of 50 Hz, the iron losses of 10JNEX900 were only 25% of those of M235-35A. Additionally, an investigation into the iron losses of a certain type of a PMSM using 10JNEX900 and conventional ST100 steel (3.0% Si) was performed, and then, a loss estimation model was subsequently developed for this motor using 10JNEX900 under multiphysics coupling conditions [12].

Hence, due to the inherent specificities of the 10JNEX900 and M235-35A materials, together with their wide applicability in electric motors, the present work initially investigated the magnetic flux density of a three-phase squirrel cage induction motor using the aforementioned materials, and then it was investigated the losses for each configuration using the Bertotti's method. Section II contains the methodology based on finite elements used to describe the geometry and electromagnetic analysis of the induction motor under investigation. Section III also contains the mathematical model developed to estimate the Bertotti's coefficients based on a database. Section IV summarizes the work.

II. METHODOLOGY

A. Finite Element Method

The finite element method (FEM) is a computational technique that initially discretizes the domain under analysis into finite-dimensional elements, which can have various geometries, such as triangular and are connected by nodes. Moreover, it is well known that a wide range of natural phenomena are governed by partial differential equations (PDEs), including electromagnetic and thermal process. With this in mind, after the discretization process and the establishment of boundary conditions, FEM enables local approximations of the PDEs involved in each element obtained. In view of this, FEM is extensively applied to the development of Digital Twin (DT) applications for induction motors in the regard of thermal and electromagnetic analyses [13]. Coupled with this, a recent application of FEM consists of the so-called mixed finite element method, which has recently been used to solve the PDEs that describe the phenomenon of flexoelectricity. Flexoelectricity is a property of dielectric materials that links the gradient of mechanical deformation to the electric field and also describes the connection between the electric field gradient and mechanical deformation [14].

B. Geometry Design

The structural parameters related to the rotor and stator of the three-phase induction motor investigated are summarized in Table I, as shown below:

TABLE I
GEOMETRIC PARAMETERS OF ROTOR AND STATOR

Parameter	Rotor	Stator
Inner radius	12.50 mm	40.37 mm
Outer radius	40.00 mm	65.00 mm
Slot height	14.50 mm	13.00 mm
Tooth width	4.40 mm	3.80 mm
Slot area	39.25 mm ²	57.47 mm ²

In addition, Table II contains the general parameters of the motor together with the specifics relating to the layout of the machine's windings. The lamination thickness found commercially has been defined for each material.

TABLE II
GENERAL SPECIFICATIONS OF THE STUDIED MOTOR

Parameters	Specification
Number of stator slots	36
Number of rotor slots	28
Number of turns per phase	44
Air gap thickness	0.37 mm
Axial length	100 mm
Number of poles	4
Operating frequency	60 Hz
Power	1 HP
Phase voltage	127 V
Stacking factor	0.98 (dimensionless)
Laminate thickness (10JNEX900)	0.10 mm
Laminate thickness (M235-35A)	0.35 mm
Rotor bars material	Aluminum
Density (10JNEX900)	7490 kg/m ³
Density (M235-35A)	7650 kg/m ³

After the structural specifications were established, it was possible to obtain the following geometric model shown in Fig. 1, which was used to carry out the proposed analyses. Furthermore, the regions designated in green (stator core and rotor core) are made of ferromagnetic material and are responsible for guiding the magnetic flux within the machine. Added to that, the rotor and stator slots, represented in white, indicate the areas where the windings are placed, providing the necessary current paths for electromagnetic excitation. The machine shaft, shown in blue, represents the mechanical connection that transmits torque from the rotor to the load.

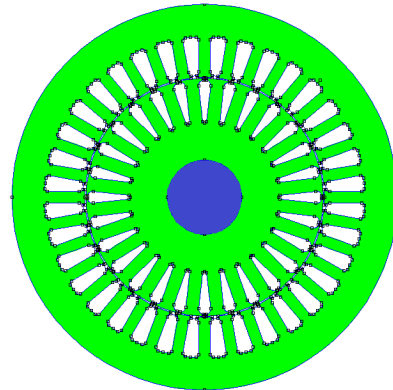


Fig. 1. Geometry used for the induction motor.

C. Generated Mesh

Therefore, after establishing the geometric model for the engine under study, the triangular mesh used was developed using *script* Triangle, which is an executable belonging to the *software* FEMM that automatically generates triangular meshes using the Delauney triangularization method, thus making it possible to obtain meshes with a high level of quality, and then making it possible to carry out more precise analyses. In this context, in structural terms, the mesh generated has 28,963 nodes and 57,778 elements.

D. Used Equations For Simulation

In the present study, Maxwell's equations were used, which are the fundamental relations of electromagnetism,

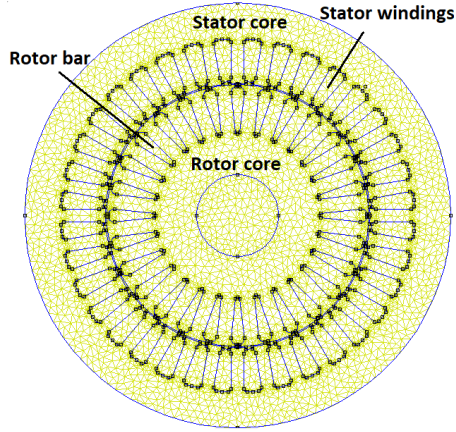


Fig. 2. Generated mesh for the investigated induction motor.

together with the equations that relate the magnetic field (\mathbf{H}), magnetic induction (\mathbf{B}) and magnetic vector potential (\mathbf{A}).

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4)$$

Using (4) in (3), it is obtained:

$$\mathbf{H} = \frac{\nabla \times \mathbf{A}}{\mu} \quad (5)$$

For non-linear materials $\mu = \mu(\mathbf{B})$. Using (5) in (2), and analysing the medium non-linearity, results the following:

$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times \mathbf{A}}{\mu(\mathbf{B})} \right) = -\sigma \left(\nabla V + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) + \mathbf{J}_{\text{source}} \quad (6)$$

Furthermore, \mathbf{E} denotes the electric field, \mathbf{J} designates the conduction current density, $\mathbf{J}_{\text{source}}$ consists of applied current sources, μ denotes the magnetic permeability of the medium, σ consists of the electrical conductivity. Equation (1) is the constitutional relationship between \mathbf{J} and \mathbf{E} , (2) denotes the relationship between electric field, electric potential and magnetic vector potential (\mathbf{A}). Equation (3) is the relationship between induction and magnetic field. Equation (4) represents the formulation of magnetic induction through the magnetic vector potential. In addition, FEMM uses (6) which is a PDE to obtain the vector \mathbf{A} , since by obtaining the magnetic vector potential the other quantities are found.

E. Mathematical model for obtaining Bertotti's coefficients

The Bertotti's equation for estimating losses in ferromagnetic material is given by:

$$Pot = K_h \cdot f \cdot B_{\text{max}}^2 + K_c \cdot (f \cdot B_{\text{max}})^2 + K_e \cdot (f \cdot B_{\text{max}})^{1.5} \quad (7)$$

where Pot represents the volumetric density of losses in the iron in (W/m^3), f is the operating frequency, B_{max} denotes

the modulus of the maximum value of magnetic induction in the material, K_h , K_c and K_e are the coefficients related to hysteresis losses, eddy currents and excess losses, respectively. In addition, in order to obtain the coefficients (K_h , K_c) for the 10JNEX900 and M235-35A materials, the curve-fitting procedure (Volumetric density of losses x Magnetic induction) was carried out for each material investigated based on the database in Ansys MotorCAD. To do this, the following mathematical model was developed:

$$\begin{cases} K_h f B_1^2 + K_c (f B_1)^2 + K_e (f B_1)^{1.5} = Pot_1 \\ K_h f B_2^2 + K_c (f B_2)^2 + K_e (f B_2)^{1.5} = Pot_2 \\ \vdots \\ K_h f B_n^2 + K_c (f B_n)^2 + K_e (f B_n)^{1.5} = Pot_n \end{cases} \quad (8)$$

Add to that, the coefficient K_c can be described as follows:

$$K_c = \frac{\pi^2 \cdot \sigma \cdot d^2}{6} \quad (9)$$

where d represents lamination thickness. Furthermore, writing Pot'_k as being:

$$Pot'_k = Pot_k - K_c \cdot (f \cdot B_k)^2 \quad (10)$$

Results the following matricial system $\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{B}$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} f B_1^2 & (f^{1.5} \cdot B_1^{1.5}) \\ \vdots & \vdots \\ f B_n^2 & (f^{1.5} \cdot B_n^{1.5}) \end{bmatrix}}_{\mathbf{A} (n \times 2)} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} K_h \\ K_e \end{bmatrix}}_{\mathbf{X} (2 \times 1)} = \underbrace{\begin{bmatrix} Pot'_1 \\ \vdots \\ Pot'_n \end{bmatrix}}_{\mathbf{B} (n \times 1)} \quad (11)$$

Hence, it is possible to obtain the following result for \mathbf{X} :

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{B} \quad (12)$$

F. MotorCAD Database (Loss density x Magnetic induction)

MotorCAD is an electromagnetic and thermal study package based on FEM, which is used to model and design motors, and it stands out for presenting a large database that contains relevant information such as the relationship between the loss density as a function of magnetic induction

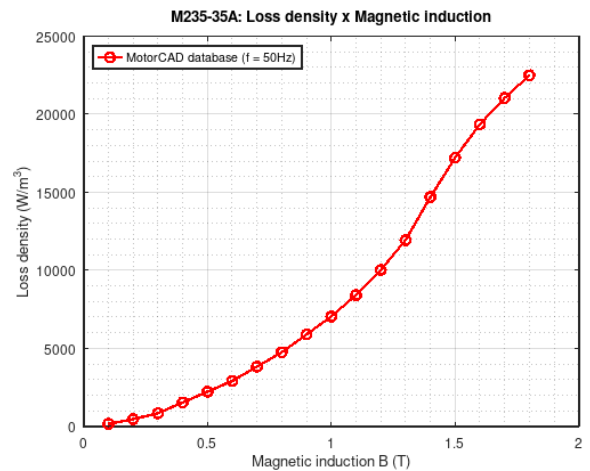


Fig. 3. Curve of Loss density x Magnetic induction (M235-35A, 50 Hz).

The aforementioned relationship is only available for some frequency values. In view of this, for the M235-35A the set of data available for the frequency of 50 Hz was selected. In this context, the following graphs were generated, summarizing the information obtained from the MotorCAD database (version 14.1.5) as can be seen in Fig. 3. Furthermore, the curve obtained for 10JNEX900 is showed in Fig. 4, its information is related to the frequency of 100 Hz.

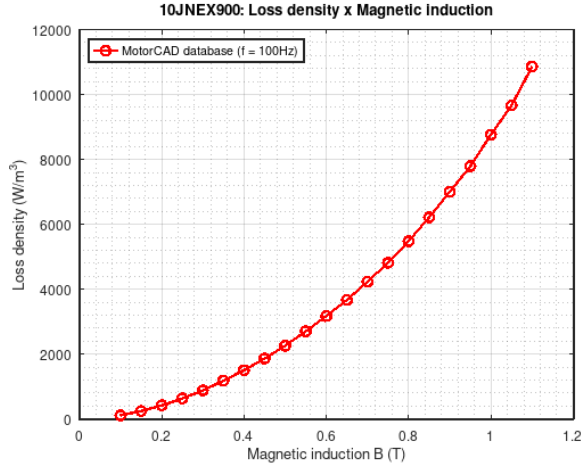


Fig. 4. Curve of Loss density x Magnetic induction (10JNEX900, 100 Hz).

G. Adjustment of coefficients for generic frequency

Since the analyses developed for the M235-35A and 10JNEX900 were carried out for frequencies of 50 Hz and 100 Hz respectively, it is necessary to adjust the Bertotti's coefficients for the motor's operating frequency, which was set at 60 Hz. For this purpose, the Bertotti's formula was adjusted to (J/kg), as described in (13), and the conversion ratios shown in [15] were used.

$$Pot = K_{h|f_0} \cdot B_{max}^2 + K_{c|f_0} \cdot B_{max}^2 + K_{e|f_0} \cdot B_{max}^{1.5} \quad (13)$$

$$K_{h|f} = K_{h|f_0} \quad (14)$$

$$K_{c|f} = K_{c|f_0} \cdot \frac{f}{f_0} \quad (15)$$

$$K_{e|f} = K_{e|f_0} \cdot \sqrt{\frac{f}{f_0}} \quad (16)$$

The parameters $K_{h|f}$, $K_{c|f}$, $K_{e|f}$, are respectively the coefficients relating to the phenomenon of hysteresis, eddy currents and excess losses, the subscript f_0 indicates these parameters obtained for a given initial frequency, and the coefficients with subscript f are obtained for a generic frequency.

III. RESULTS

Therefore, after establishing the conditions proposed in this work, the magnetic induction profiles were obtained for each motor configuration, and through this it was possible to extract the maximum magnetic flux density values for the rotor and stator. Consequently, based on this information

and the Bertotti's coefficients adjusted for 60 Hz, it is possible to estimate the losses in the iron of the motor under investigation for each ferromagnetic material used.

A. Magnetic induction profile obtained for M235-35A

After carrying out the electromagnetic simulation using the finite element method, the following magnetic induction profile was obtained for the motor using the M235-35A, as shown in Fig. 5.

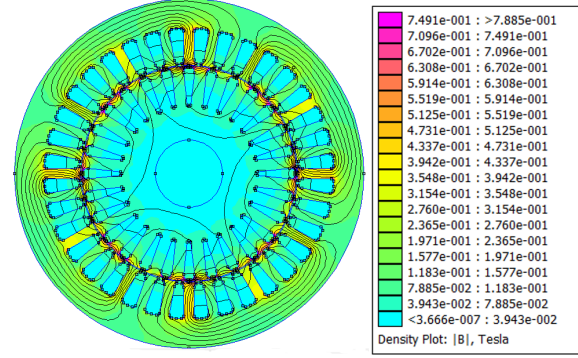


Fig. 5. Motor's magnetic induction profile with M235-35A.

The rotor was found to have a maximum magnetic induction value ($B_{max} - rotor$) of 1.687 T. In addition, the machine's stator was found to have a maximum magnetic induction value ($B_{max} - stator$) of 1.236 T.

B. Magnetic induction profile obtained for 10JNEX900

Thus, after establishing 10JNEX900 as the material that makes up the motor's core, the magnetic induction profile obtained is illustrated in Fig. 6.

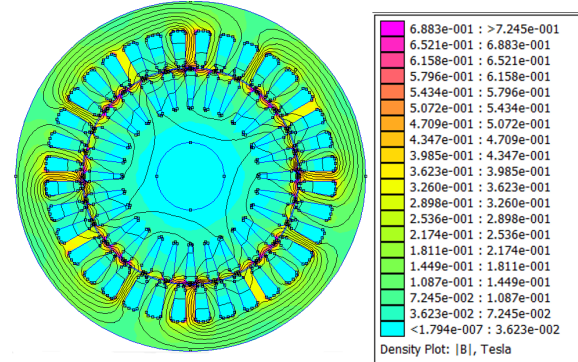


Fig. 6. Motor's magnetic induction profile with 10JNEX900.

It was therefore found that the maximum magnetic induction values for the rotor ($B_{max} - rotor$) and stator ($B_{max} - stator$) are 1.682 T and 1.195 T respectively.

C. Obtaining the Bertotti coefficients for the M235-35A

Hence, after initially applying relation (9) to calculate K_c , and then using (12), the following sets of values for Bertotti's coefficients were obtained for the M235-35A at a frequency of 50 Hz:

$$K_h = 116.336 \quad K_c = 0.3415 \quad K_e = 2.062 \quad (17)$$

Therefore, after obtaining the values of K_h , K_c , K_e for the M235-35A, indicated in (17), the graphical construction illustrated in Fig. 7 was carried out.

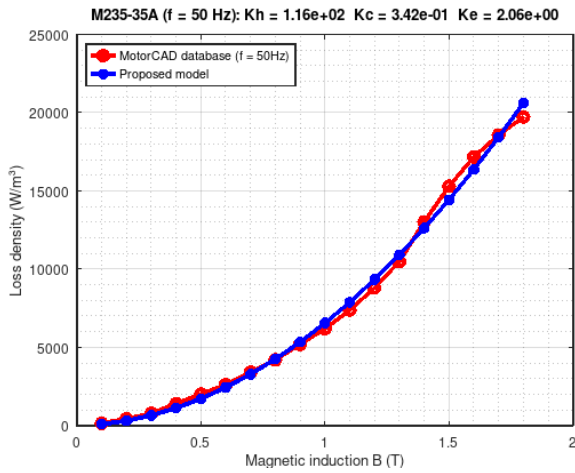


Fig. 7. Proposed model for M235-35A.

This construction includes a comparison between the curve designated by the proposed model based on Bertotti's method and the curve generated by the MotorCAD data. Therefore, in order to ascertain the degree of accuracy of the proposed approximation, the relative error was evaluated over the set of values used for the magnetic flux density. In this context, Fig. 8 shows the relative error tracking obtained for M235-35A.

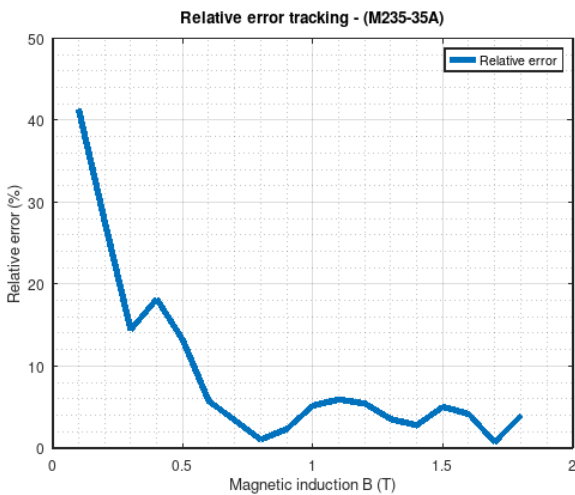


Fig. 8. Relative error curve for M235-35A.

In view of the curve shown in Fig. 8 for the M235-35A, it can be seen that there is a high initial relative error, just over 40%, but there is quickly an abrupt decrease in the error to a range around 15%, and it can be seen that as the magnitude of the magnetic induction rises to values slightly above 0.5 T, the relative error is less than 10%, reaching the minimum error for values approximately equal to 0.8 T and 1.7 T of magnetic flux density.

D. Obtaining the Bertotti's coefficients for the 10JNEX900

Initially, similarly to determining the coefficients for the M235-35A, (9) was used to estimate K_c , and then (12) was used to determine the hysteresis coefficient (K_h) and the coefficient related to excess losses (K_e). The following set of values for the Bertotti's coefficients was obtained for the 10JNEX900 at a frequency of 100 Hz

$$K_h = 84.903 \quad K_c = 0.02 \quad K_e = 0.0642 \quad (18)$$

With the set of values described in (18), it was possible to obtain the graph containing the curves with the points from the MotorCAD database and also the one describing the approximation using Bertotti's method.

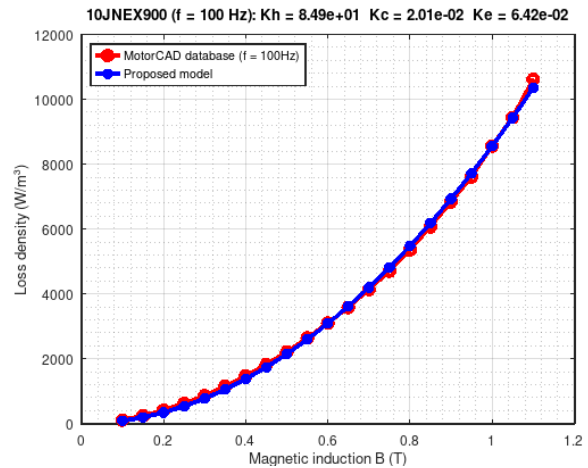


Fig. 9. Proposed model for 10JNEX900.

Besides that, Fig. 9 shows that there is considerable overlap between the curves, indicating a high degree of precision for the proposed Bertotti approximation. Moreover, in order to more concisely assess the degree of precision of the proposed approach, the curve relating the relative error as a function of the set of magnetic induction values evaluated was established, as shown in Fig. 10.

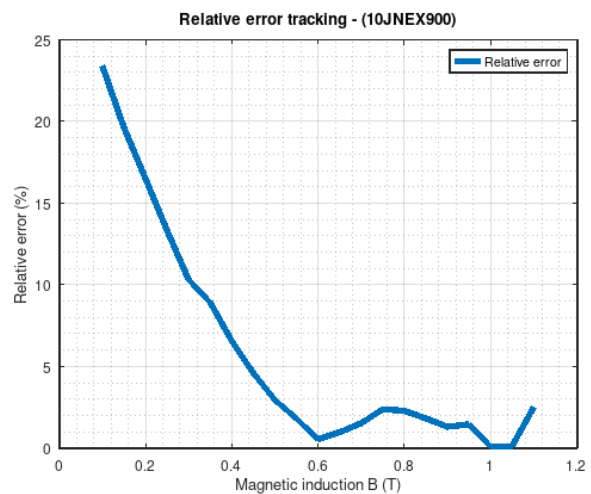


Fig. 10. Relative error curve for 10JNEX900.

Based on the graphical analysis provided by Fig. 10, it can be seen that there is an initial relative error of around 23%, which for magnetic induction values slightly higher than 0.4 T the relative error becomes less than 5% and reaches its minimum value for magnetic induction in the approximate range of 1 T to 1.05 T.

E. Adjustments to the K_e , K_c and K_e coefficients for 60 Hz

After obtaining the Bertotti's coefficients for the M235-35A and 10JNEX900 for frequencies respectively equal to 50 Hz and 100 Hz, it was possible to obtain the following models for 60 Hz based on relations (13) - (16)

- Iron losses for M235 - 35A (60 Hz)

$$Pot = 8209.560B_{max}^2 + 958.260B_{max}^{1.5} \left(\frac{W}{m^3}\right) \quad (19)$$

- Iron losses for 10JNEX900 (60 Hz)

$$Pot = 5166.180B_{max}^2 + 29.820B_{max}^{1.5} \left(\frac{W}{m^3}\right) \quad (20)$$

F. Iron losses at 60 Hz

In view of the loss analysis, it can be written that the loss in the ferromagnetic material (Pot) is described as the sum of the losses in the rotor core (Pot_{rotor}) and the stator (Pot_{stator}), thus obtaining:

$$Pot = Pot_{rotor} + Pot_{estator} \quad (21)$$

Therefore, using the relation (19) and the fact that the volumes of the rotor core ($V_{n-rotor}$) and the stator ($V_{n-stator}$) are respectively equal to 0.000341996 m³ and 0.000602356 m³, the following powers (W) are obtained for the materials:

- M235 - 35A

$$Pot_{rotor} = 8.708 \quad Pot_{stator} = 8.347 \quad Pot = 17.055$$

- 10JNEX900

$$Pot_{rotor} = 5.020 \quad Pot_{stator} = 4.467 \quad Pot = 9.487$$

Therefore, the results indicate that, despite the similarity in the magnetic induction profiles for the analyzed configurations, the iron loss associated with the M235-35A is approximately 80% higher than that obtained with the 10JNEX900. This outcome underscores the superior energy efficiency of the 10JNEX900. In this regard, the practical impact of this iron loss difference can be seen by the levels of heat dissipation. Since a smaller fraction of the input energy is converted into unwanted thermal losses, cooling requirements are alleviated, and the overall operating temperature of the equipment is lowered. This reduction in thermal stress contributes to improved reliability and energy efficiency. Additionally, Table III shows the following estimated parameters (K_h ($\frac{J}{kg.T^2}$), K_c ($\frac{J}{kg.T^2}$), K_e ($\frac{J}{kg.T^{1.5}}$)) for 60 Hz, which were used in (19) - (20).

TABLE III
ESTIMATED PARAMETERS (K_h , K_c , K_e) AND IRON LOSS FOR 60 Hz

Material	K_h	K_c	K_e	Iron loss (W)
10JNEX900	84.903	1.200	0.497	9.487
M235-35A	116.336	20.490	15.971	17.055

IV. CONCLUSION

Hence, the present study investigated the level of iron losses in the ferromagnetic material used in a three-phase induction motor for two silicon materials: 10JNEX900 and M235-35A. This analysis was carried out by initially determining the Bertotti's coefficients and then calculating the losses. The use of the Bertotti's method proved to be highly efficient in modelling the phenomenon under study. This is justified by the stabilization of the relative error at small values, indicating a satisfactory degree of precision. Furthermore, the use of the 10JNEX900 gave the motor a substantial reduction in terms of iron losses compared to the M235-35A arrangement. Moreover, for future work, analyses at other frequencies can be performed to improve accuracy due to the fact the present work used the available dataset for 50 Hz and 100 Hz. In addition, the inclusion of coupled thermal and mechanical analyses can also be done. Additionally, future work should consider a cost-benefit analysis of 10JNEX900 and M235-35A to expand the practical applicability of the results in motor design scenarios.

REFERENCES

- [1] M. Inci, Ö. Çelik, A. Lashab, K. Ç. Bayındır, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Power system integration of electric vehicles: A review on impacts and contributions to the smart grid," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 6, Art. no. 2246, 2024, doi: 10.3390/app14062246.
- [2] E. Roshandel, A. Mahmoudi, S. Kahourzade, A. Yazdani, and G. M. Shafiqullah, "Losses in efficiency maps of electric vehicles: An overview," *Energies*, vol. 14, no. 22, Art. no. 7805, 2021, doi: 10.3390/en14227805.
- [3] S. Müller, M. Keller, M. Maier, and N. Parspour, "Comparison of iron loss calculation methods for soft magnetic composite," in *Proc. 2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pp. 1-6, 2017, IEEE.
- [4] H. Jordan, "Die ferromagnetischen Konstanten für schwache Wechselfelder," *Elektr. Nachr. Techn.*, vol. 1, no. 8, 1924.
- [5] G. Bertotti, "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 24, no. 1, pp. 621-630, 1988, doi: 10.1109/20.43994.
- [6] M. Petrun and S. Steentjes, "Iron-loss and magnetization dynamics in non-oriented electrical steel: 1-D excitations up to high frequencies," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 4568-4593, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2963482.
- [7] S. Mathew, R. M. R. Kumar, N. K. Endla, C. Vundru, R. Singh, and B. G. Fernandes, "Development of a hybrid rotor structure for high-speed laminated rotor induction motor," in *Proc. 2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, pp. 1-7, 2021, doi: 10.1109/IEMDC47953.2021.9449519.
- [8] S. Kocan, P. Rafajdus, and M. Kovacic, "Investigation of rotor parameters of high speed switched reluctance motor for automotive application," *Transportation Research Procedia*, vol. 55, pp. 1003-1010, 2021, doi: 10.1016/j.trpro.2021.07.071.
- [9] D. Gerada, A. Mebarki, N. L. Brown, C. Gerada, A. Cavagnino, and A. Boglietti, "High-speed electrical machines: Technologies, trends, and developments," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 6, pp. 2946-2959, 2013, doi: 10.1109/TIE.2013.2286777.
- [10] J. Ou, Y. Liu, P. Breining, T. Gietzelt, T. Wunsch, and M. Doppelbauer, "Experimental characterization and feasibility study on high mechanical strength electrical steels for high-speed motors application," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 57, no. 1, pp. 284-293, 2021, doi: 10.1109/TIA.2020.3033262.
- [11] X. Y. Ma, J. Soulard, C. Slater, and C. Davis, "Influence of electrical steel grade on different types of traction motors," in *Proc. 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 544-550, 2022, doi: 10.1109/ICEM51905.2022.9910933.
- [12] D. Ma, B. Tian, Y. Li, Z. Li, J. Li, L. Zeng, and R. Pei, "Analysis and calculation of iron loss in electrical motors with high silicon steel considering multi-physics coupling," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 40, no. 3, pp. 1946-1958, 2025, doi: 10.1109/TEC.2025.3552424.

-
- [13] J. F. dos Santos, B. K. Tshoombe, L. H. B. Santos, R. C. F. Araújo, A. R. A. Manito, W. S. Fonseca, and M. O. Silva, "Digital twin-based monitoring system of induction motors using IoT sensors and thermo-magnetic finite element analysis," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 1682–1693, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3232063.
- [14] K. Tannhäuser, P. H. Serrao, and S. Kozinov, "A three-dimensional collocation finite element method for higher-order electromechanical coupling," *Computers & Structures*, vol. 291, Art. no. 107219, 2024, doi: 10.1016/j.compstruc.2023.107219.
- [15] F. Fiorillo and A. Novikov, "An improved approach to power losses in magnetic laminations under nonsinusoidal induction waveform," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 26, no. 5, pp. 2904–2910, 1990, doi: 10.1109/20.104905.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

3.1 Síntese do Trabalho

Por conseguinte, verifica-se por meio dos artigos que a análise eletromagnética de motores de indução via MEF apresenta-se como uma ferramenta necessária para promover a descrição de propriedades fundamentais dessas máquinas como perdas ferromagnéticas, conseqüentemente, fornecendo subsídios robustos para o desenvolvimento do *design* de motores mais eficientes em termos energéticos, e promovendo a investigação do comportamento ocasionado pela adoção de materiais avançados tal como o 10JNEX900, sendo que a etapa de seleção dos materiais constituintes do motor de indução desempenha papel fundamental na busca pelo aumento da eficiência.

Ademais, o cálculo de perdas ferromagnéticas via método de Bertotti apresentou-se como uma metodologia consistente e rápida para estimar o nível das perdas supracitadas, haja vista que de posse dos valores dos coeficientes (K_h , K_c , K_e) frequência operacional, e o valor máximo de indução magnética, é possível indicar o nível de tais perdas. Essa praticidade e funcionalidade ofertado pelo método de Bertotti é fundamental no contexto de engenharia.

3.2 Trabalhos Futuros

Em vista de trabalhos futuros, apresenta-se como possível a utilização de banco de dados mais robustos em comparação com o que foi utilizado, com o objetivo de obter coeficientes mais precisos para serem utilizados no método de Bertotti, e assim gerar estimativas mais acuradas. Somado a isso, pode ser realizado uma investigação acerca do custo-benefício da utilização dos materiais 10JNEX900 e M235-35A em motores de indução, promovendo assim maior aplicabilidade desses materiais em termos práticos.

4 ANEXOS

Nesta seção encontram-se os comprovantes (aceite e apresentação) relativos aos três artigos utilizados no presente trabalho.

4.1 SBSE 2023

Figura 1 – Comprovante de aceite do artigo no SBSE 2023

SBAI-SBSE-2023 - Resultado da avaliação do trabalho 7703 Externa Ca

SBAI-SBSE-2022 <sbaisbse2022@easychair.org>
para mim

Prezados autores,

É com prazer que informamos que o seu trabalho foi ACEITO para apresentação no evento conjunto XVI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBAI-SBSE 2023) que ocorrerá na bela cidade de Manaus, Amazonas, em

Os comentários fornecidos pelos revisores e pelo comitê de programa podem ser acessados na sua área de congresso para consideração na redação da versão final do artigo, que deverá ser enviada até 28/08/2023 por meio do sistema de

Além disso, a versão final deve, obrigatoriamente, estar de acordo com os templates disponíveis em: <https://sbse2023.com.br/informacao-aos-autores/>.

Observe que os artigos aceitos para publicação são limitados a 6 páginas na versão final. As páginas excedentes (máximo de 6) mediante o pagamento de taxa extra por página, conforme descrito no site do evento.

A definição da forma de apresentação de seu trabalho (oral ou pôster) será realizada em breve e publicada no site do evento para conferir as atualizações.

Parabéns pelo trabalho! Estamos esperando você em Manaus!

Fonte: Autor.

Figura 2 – Comprovante de apresentação do artigo no SBSE 2023



Fonte: Autor.

4.2 SBSE 2025

Figura 3 – Comprovante de aceite do artigo no SBSE 2025



Fonte: Autor.

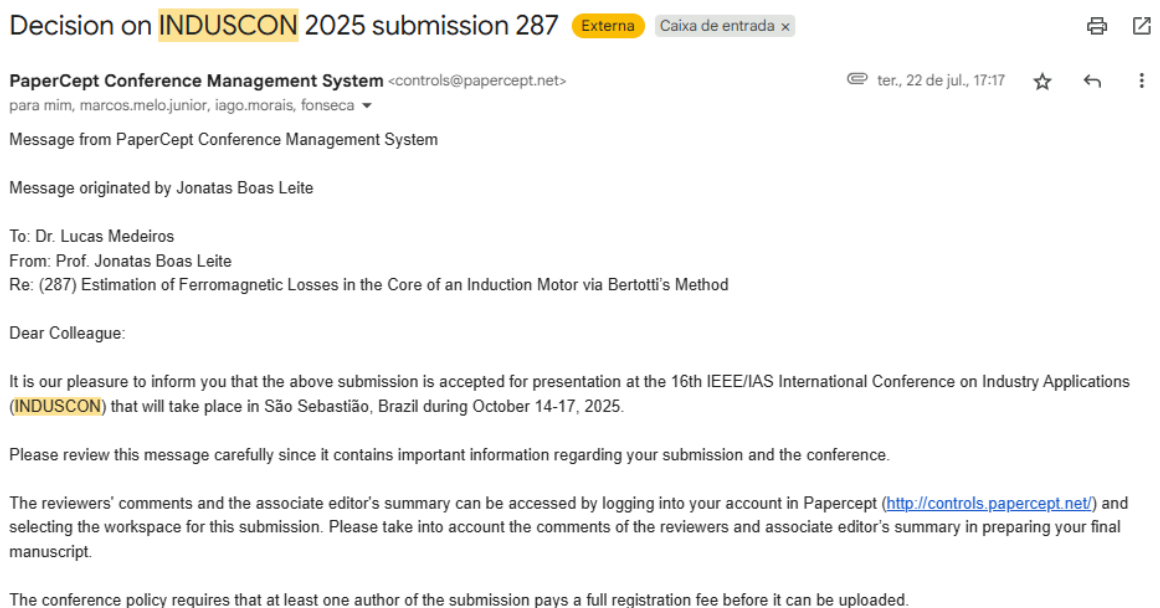
Figura 4 – Comprovante de apresentação do artigo no SBSE 2025



Fonte: Autor.

4.3 INDUSCON 2025

Figura 5 – Comprovante de aceite do artigo no INDUSCON 2025



Fonte: Autor.

Figura 6 – Comprovante de apresentação do artigo no INDUSCON 2025



São Sebastião, October 17th, 2025

Certificate of Presentation

The INDUSCON 2025 Organizing Committee, hereby certify that:

Lucas Medeiros

presented the article titled '**Estimation of Ferromagnetic Losses in the Core of an Induction Motor Via Bertotti' s Method**' 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 white background.

Prof. Dr. Jorge Muniz Junior
Conference General Chair

UNESP & IEEE South Brazil Section - BRAZIL
www.induscon.org - e-mail: contact-2025@induscon.org

Fonte: Autor.

Referências

DHATT, Gouri; LEFRANÇOIS, Emmanuel; TOUZOT, Gilbert. *Finite element method*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. Citado na página 1.

FIORILLO, F.; NOVIKOV, A. *An improved approach to power losses in magnetic laminations under nonsinusoidal induction waveform*. 1990. 2904-2910 p. Citado na página 3.

GLOWACZ, Adam; SULOWICZ, Maciej; ZIELONKA, Jakub; LI, Zhixiong; GLOWACZ, Witold; KUMAR, Anil. *Acoustic fault diagnosis of three-phase induction motors using smartphone and deep learning*. 2025. 125633 p. Citado na página 1.

JUERGENS, Jonathan; WOLFSCHLEGER, Peter B.; FRICASSÉ, A. Influences of iron loss coefficients estimation on the prediction of iron losses for variable speed motors. In: *2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*. [S.l.]: IEEE, 2015. p. 1254–1259. Citado na página 2.

MEDEIROS, Lucas Maxwel Fernandes Sales; SILVA, André Oliveira Carvalho da; ROZAL, Erik Chagas; MORAIS, Iago Ranieri Miranda Rodrigues; FONSECA, Wellington da Silva. Comparação entre cobre e alumínio na gaiola de motores trifásicos de indução pelo método de elementos finitos. In: *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)*. [S.l.: s.n.], 2023. Citado na página 1.

MEEKER, David et al. *Finite Element Method Magnetics*. [S.l.], 2010. 162 p. Versão 4.32. Citado na página 1.

THOMAS, R.; GARBUJO, L.; GERBAUD, L.; CHAZAL, H. *Modeling and design analysis of the Tesla Model S induction motor*. [S.l.]: IEEE, 2020. 495-501 p. Citado na página 2.