

# Comparação entre cobre e alumínio na gaiola de motores trifásicos de indução pelo método de elementos finitos<sup>★</sup>

Lucas Maxwel Fernandes Sales Medeiros<sup>\*</sup>  
André Oliveira Carvalho da Silva<sup>\*\*</sup> Erik Chagas Rozal<sup>\*\*\*</sup>  
Iago Ranieri Miranda Rodrigues Morais<sup>\*\*\*\*</sup>  
Wellington da Silva Fonseca<sup>†</sup>

<sup>\*</sup> Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, Universidade Federal do Pará, PA, (e-mail: lucas.medeiros@itec.ufpa.br).

<sup>\*\*</sup> Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, Universidade Federal do Pará, PA, (e-mail: andre.carvalho.silva@itec.ufpa.br)

<sup>\*\*\*</sup> Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, Universidade Federal do Pará, PA, (e-mail: erik.rozal@itec.ufpa.br)

<sup>\*\*\*\*</sup> Amazon Energy Efficiency Excellence Center (CEAMAZON) (e-mail: iago.morais@itec.ufpa.br)

<sup>†</sup> 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,

---

<sup>\*</sup> 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 exposto 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  $\rho_v$  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

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

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

Tabela 4. Características do cobre.

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

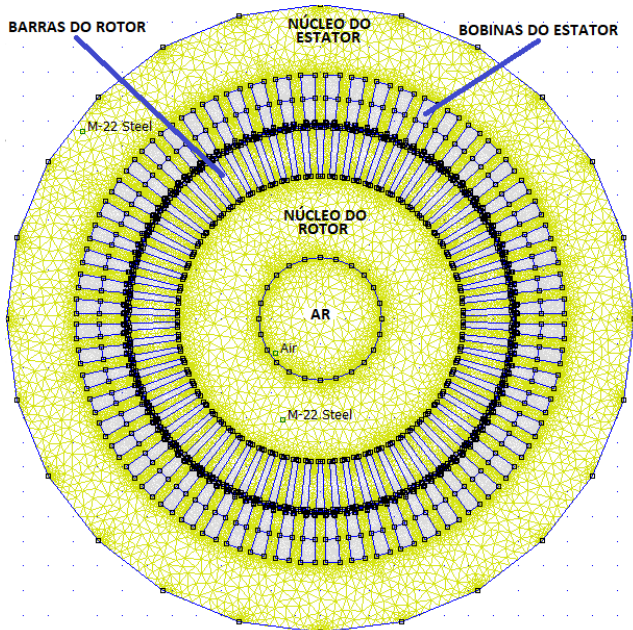


Figura 1. Malha triangular utilizada.

## 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.

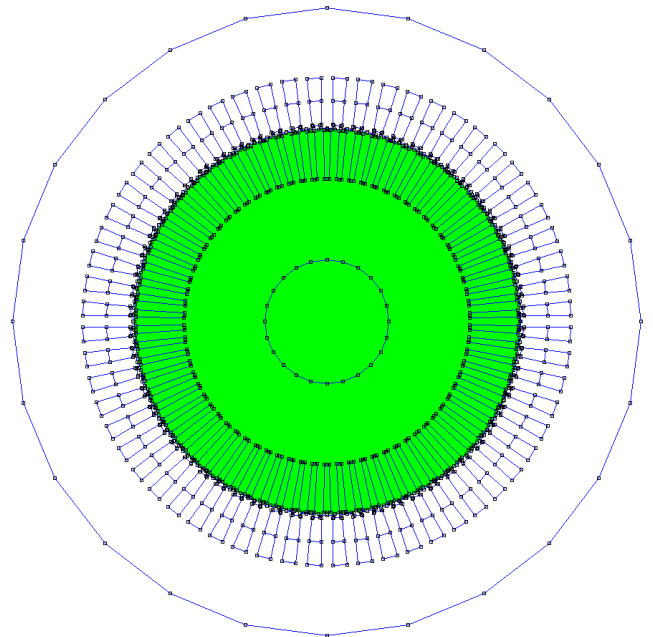


Figura 2. Região analisada (em verde) para o torque e obtenção de perdas totais no rotor.

O torque ( $\tau$ ) 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 <sup>3</sup>	372W/mK
Alumínio	2,7g/cm <sup>3</sup>	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, conseqüentemente, 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.

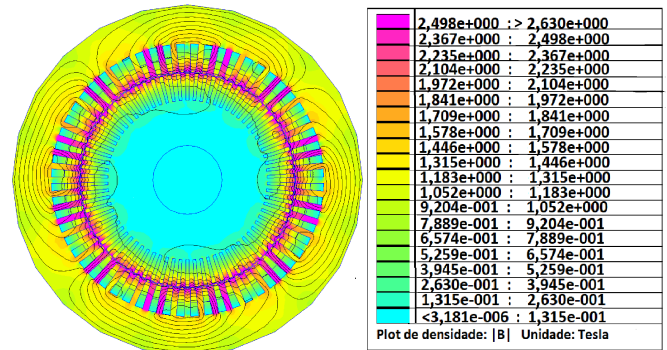


Figura 3. Densidade de fluxo magnético utilizando cobre.

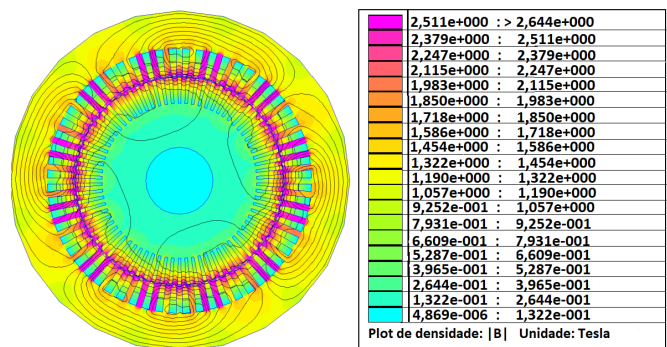


Figura 4. Densidade de fluxo magnético utilizando alumínio.

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

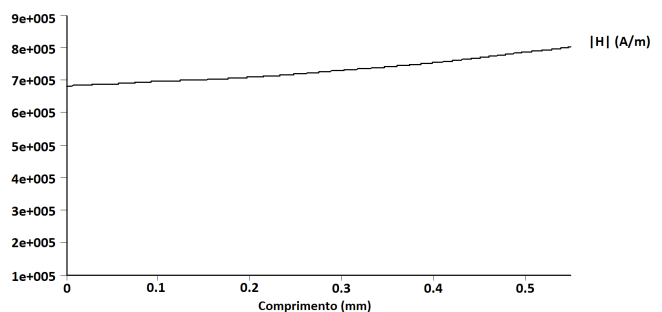


Figura 5. Gráfico do campo magnético no entreferro quando utilizado cobre.



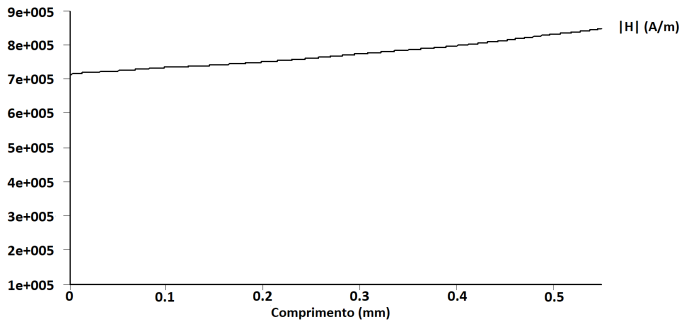


Figura 6. Gráfico do campo magnético no entreferro quando utilizado alumínio

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 comsol. *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 estatístico.
- 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.