

Desenvolvimento de uma Metodologia para o Cálculo do Mapa de Eficiência de Máquinas Elétricas: Uma Alternativa em Código Aberto*

1st Oséias de Paula Ferreira
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, Brasil
oseiaspaulafer@gmail.com

2nd Gabriel Alves Mendonça
Departamento ITS/YBEC
AVL List GmbH
Graz, Áustria
gforti@gmail.com

3rd Thales Alexandre Carvalho Maia
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, Brasil
thalesmaiaufmg@gmail.com

Resumo—Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta de código aberto para estimar o desempenho de máquinas elétricas por meio de mapas de eficiência. A metodologia proposta utiliza simulações magnetostáticas por elementos finitos para determinar a distribuição de fluxo magnético, mapeamento de perdas, torque e desempenho em função do vetor de corrente nos eixos direto e quadratura $d-q$. O modelo utilizado para a validação da ferramenta é uma máquina síncrona de ímãs permanentes. Para estimação do mapa de eficiência, são consideradas as perdas no núcleo ferromagnético, que incluem histerese, correntes parasitas e perdas por anomalias, além das perdas no cobre, devidas ao efeito Joule e efeito de proximidade, e as perdas nos ímãs permanentes. Os resultados deste estudos são validados por meio de comparações com o software comercial Motor-CAD.

Index Terms—Máquinas Elétricas, Mapa de Eficiência, Perdas, Elementos Finitos.

I. INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas desempenham um papel fundamental no desenvolvimento e operação da sociedade, sendo utilizadas em aplicações industriais, agrícolas, de transporte, além de ambientes residenciais. Atualmente, os motores elétricos são responsáveis por aproximadamente metade do consumo global de energia. Estima-se que esses motores consumam aproximadamente a metade da energia mundial por ano, o que representa 53% do consumo global de eletricidade [1]. Contudo, parte dessa energia é dissipada na forma de perdas, visto que, em média, os motores apresentam uma eficiência entre 70 e 96% [2].

Com os avanços tecnológicos, o desenvolvimento de máquinas com maior eficiência tornou-se viável, promovendo a sustentabilidade no setor energético [3]. Para otimizar o desempenho dessas máquinas, a utilização de ferramentas de modelagem precisas e computacionalmente eficientes é altamente desejável, especialmente na análise do comportamento eletromagnético e otimização da eficiência.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

Uma abordagem amplamente utilizada para avaliar o desempenho de máquinas elétricas em diferentes condições operacionais é o mapa de eficiência (ME) [4, 5]. O ME é construído com base nas perdas estimadas em função do torque e da frequência de operação. Diversos métodos para a construção de mapas de eficiência são descritos na literatura. Os estudos apresentados em [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11] propõem diferentes abordagens para a construção desses mapas. Em [4], desenvolve-se um método em elementos finitos baseado em tabelas rápidas, em que o principal objetivo é reduzir o custo computacional. Modelos magnetostáticos utilizando o método de elementos finitos podem ser encontrados em [3, 11], esse método proporciona uma redução no esforço computacional em relação a métodos transientes em elementos finitos. Além disso, outras pesquisas investigam o uso de inteligência artificial [8], modelos analíticos [10], técnicas em elementos finitos baseada em modelos estável saturado [9], e métodos de números inteiros para a estimativa de perdas [6].

Tradicionalmente, a construção de mapas de eficiência é feita através de processos experimentais, que são demorados e ocorrem apenas após a fabricação do protótipo físico, restringindo as oportunidades de otimização na fase de projeto [4]. Para mitigar essa limitação, o uso do método de elementos finitos (MEF) surge como uma ferramenta eficaz no suporte ao desenvolvimento do projeto [4, 10].

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem se consolidado como uma técnica robusta para a modelagem de máquinas elétricas, sendo amplamente utilizado em diversas pesquisas [4, 5, 6]. Estudos como os de [6, 10] demonstram que as técnicas baseadas em elementos finitos fornecem resultados satisfatórios. No entanto, o MEF impõe um elevado custo computacional, especialmente em modelos transientes e de análise no domínio do tempo harmônico [4]. Uma alternativa para mitigar esse custo é o uso de modelos magnetostáticos, que oferecem a vantagem de reduzir o tempo de processamento ao desconsiderar os efeitos dinâmicos dos campos eletromagnéticos [10].

Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de código aberto para avaliação do desempenho

de máquinas elétricas por meio de mapas de eficiência. A complexidade está relacionada na precisão dos modelos empregados e na adoção adequada da metodologia. Uma abordagem baseada em simulações magnetostáticas de elementos finitos foi utilizada e validada através de um software comercial, aplicando-se o modelo de uma máquina síncrona de ímãs permanentes. O desempenho da máquina é avaliado com base nas perdas eletromagnéticas. Nesse contexto, são discutidos os cálculos das perdas no aço, no cobre e nos ímãs permanentes.

O trabalho apresentado está organizado da seguinte maneira: A Seção II fornece uma visão geral do estado da arte referente à estimativa de mapas de eficiência. A Seção III descreve metodologia proposta para a obtenção do mapa. Na Seção IV, são apresentados e validados os resultados obtidos. Por fim, a Seção V apresenta as conclusões do estudo.

II. MAPA DE EFICIÊNCIA

Os mapas de eficiência ilustram o desempenho das máquinas elétricas em relação ao torque (T) e à velocidade (ω). A eficiência (η) é determinada com base nas perdas totais (P_t), as quais variam conforme o torque e a velocidade.

$$\eta = \frac{T\omega}{T\omega + P_t(T, \omega)}, \quad (1)$$

Aqui está a frase reescrita de forma mais formal:

”A literatura apresenta diversos métodos para estimar mapas de eficiência. De acordo com [5], aproximadamente 30% dos trabalhos utilizam métodos experimentais, pouco mais de 25% empregam técnicas baseadas em elementos finitos [4], e cerca de 20% aplicam métodos analíticos [10].”

A. Método Experimental

A construção de mapas de eficiência por meio de métodos experimentais requer o acionamento de uma máquina elétrica em cada ponto operacional desejado de torque e velocidade. Para isso, tanto a máquina de teste quanto as máquinas de carga devem ser controladas por inversores. Normalmente, um inversor opera no modo de controle de velocidade, enquanto o outro controla o torque [5, 6].

Nesse processo, um analisador de energia elétrica é utilizado para avaliar o desempenho da máquina, medindo dados de tensão, corrente e potência. Para a medição do torque, é empregado um transdutor, enquanto a frequência do estator pode ser utilizada para determinar a velocidade em máquinas síncronas [5].

O método experimental é frequentemente utilizado para validar os modelos computacionais apresentados na literatura. No entanto, uma grande desvantagem é que ele só pode ser aplicado após a construção física da máquina.

B. Método de Elementos Finitos

Na literatura, encontra-se métodos de estimação de mapas de eficiência baseados em elementos finitos [3, 4, 6, 12]. Entre as metodologias empregadas, destacam-se:

- **Método Direto:** Para estimar o mapa de eficiência por meio do método direto, define-se inicialmente um vetor

de corrente conforme as condições de operação desejadas. Dessa forma, o torque, a tensão e as perdas são estimados diretamente a partir de um modelo computacional em elementos finitos, o que permite avaliar o desempenho do modelo proposto [4]. Segundo [5], os resultados obtidos apresentam uma precisão satisfatória, no entanto, o processo exige um grande esforço computacional devido ao elevado número de cálculos realizados durante a simulação.

- **Método Indireto:** A obtenção do desempenho de uma máquina por meio do método indireto em elementos finitos é dividida em duas etapas. A primeira, de forma semelhante ao método direto, consiste em definir o vetor de corrente para o modelo proposto em função das condições de operação desejadas. Assim, por meio da execução de simulações em elementos finitos, obtêm-se os parâmetros de interesse, como a distribuição de fluxo, potencial magnético, tensão e torque. Em seguida, modelos matemáticos são aplicados para calcular as perdas e o desempenho da máquina com base na frequência de operação e nos parâmetros previamente estimados [5, 6]. Segundo [5], essa técnica se destaca por oferecer um custo computacional reduzido em comparação ao método direto.
- **Look-up tables:** Nesse método, são elaboradas tabelas de consulta que fornecem informações sobre as perdas e o torque em função do vetor de corrente e velocidade. Esses dados são computados através do método de elementos finitos [4, 8]. O sistema utiliza os parâmetros de entrada, como corrente e velocidade, para acessar a tabela, evitando o recálculo em elementos finitos do torque e das perdas a cada iteração. Essa estratégia reduz significativamente o número de cálculos realizados em elementos finitos.

C. Método Analítico

Os modelos analíticos baseiam-se na utilização de circuitos equivalentes que representam as propriedades elétricas e mecânicas das máquinas, permitindo a análise do desempenho sob diversas condições operacionais.

Os parâmetros fundamentais da máquina elétrica, como resistências, indutâncias e reatâncias, são representadas por um circuito equivalente. Esses circuitos são modelados para simular o comportamento da máquina em um determinado ponto de operação, facilitando a análise das perdas e a determinação do desempenho da máquina [10].

III. METODOLOGIA

Esta seção apresenta o processo de cálculo do mapa de eficiência de uma máquina síncrona de ímãs permanentes, utilizando um modelo magnetostático em elementos finitos.

A. Processo para Extração do Mapa de Eficiência

Conforme ilustrado na Figura 1, o procedimento inicia-se com a definição da topologia da máquina e o levantamento dos parâmetros nominais do modelo em estudo. Em seguida,

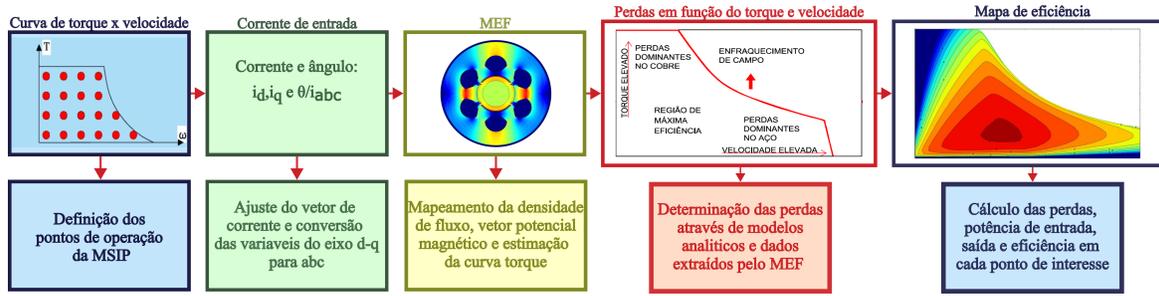


Figura 1: Fluxograma do processo para estimação do mapa de eficiência utilizando o método de elementos finitos.

as magnitudes das correntes i_d e i_q , assim como o ângulo de elétrico θ_e , são selecionadas a partir da curva de torque e velocidade, sendo posteriormente transformadas para o sistema abc por meio da transformada de Park. O próximo passo consiste em implementar um modelo geométrico em um software de elementos finitos para executar uma análise magnetostática. A partir dessa simulação, são obtidas a distribuição de fluxo, o vetor de potencial magnético e o torque da máquina em função de diferentes condições. Na quarta etapa, as perdas no aço, no cobre e nos ímãs permanentes são estimadas com base nos parâmetros extraídos da simulação magnetostática e na frequência de operação da máquina. Por fim, o desempenho da máquina é computado, resultando na geração do mapa de eficiência.

B. Modelo da Máquina

Neste estudo, são utilizados modelos computacionais de máquinas síncronas de ímãs permanentes (MSIP). O modelo matemático associado a essa máquina é bastante difundido na literatura, como demonstrado em [13, 14]. O modelo matemático baseado no referencial síncrono, discutido em [13], é apresentado da seguinte maneira:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \psi_m i_s \cos(\theta_e) \quad (2)$$

onde ψ_m representa o fluxo magnético dos ímãs, i_s denota a corrente do estator da máquina, θ_e é o ângulo elétrico, θ_m é o ângulo mecânico e p corresponde à quantidade de polos da máquina.

As correntes do eixo d - q são definidas de acordo com o ângulo elétrico θ_e . Esse ângulo é estimado através da relação entre ângulo elétrico e posição do rotor θ_m .

$$\theta_e = \frac{p}{2} (\theta_m) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} i_s &= \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \\ i_d &= i_s \cos(\theta_e) \\ i_q &= i_s \sin(\theta_e) \end{aligned} \quad (4)$$

C. Estimação dos Parâmetros Aplicando o MEF

O método de elementos finitos envolve várias etapas, que vão desde a construção do modelo geométrico até a determinação de parâmetros de interesse, assegurando que

todos os aspectos relevantes sejam considerados durante a simulação. O método aplica técnicas numéricas para calcular a distribuição do campo magnético nos nós de cada elemento da malha [15].

A abordagem proposta neste estudo utiliza um método indireto fundamentado em análises magnetostáticas por meio de elementos finitos para gerar o mapa de eficiência. Inicialmente, a densidade de fluxo, o vetor potencial magnético e o torque EM são calculados considerando diversas magnitudes de corrente e posições do rotor. O fluxo e o potencial magnéticos são estimados para cada elemento da malha, permitindo o cálculo das perdas distribuídas para o modelo proposto.

A análise de múltiplas posições do rotor resulta em um torque eletromagnético oscilatório, decorrente da interação entre os ímãs permanentes do rotor e as ranhuras do estator [16]. Assim, o torque médio é calculado e armazenado em uma matriz, sendo posteriormente utilizado na avaliação de desempenho e na construção do mapa de eficiência do sistema.

IV. CÁLCULOS DAS PERDAS

Esta seção discute a metodologia de cálculo das perdas no núcleo, no cobre e nos ímãs permanentes. Essas perdas são estimadas durante o pós-processamento, com base nos parâmetros extraídos do campo magnetostático via MEF, em conjunto com a frequência de operação da máquina em estudo.

A. Perdas no Núcleo

Steinmetz propôs uma teoria para determinar as perdas no ferro, as quais podem ser quantificadas por unidade de volume (W/m^3) ou massa (W/kg). As equações descrevem essas perdas com base nas características específicas do material em função de campos magnéticos e frequências aplicadas [17]. A Equação 5 representa o modelo clássico de Steinmetz:

$$P_{Fe} = k_h f_s B_m^2 + k_{cp} (f_s B_m)^2 \quad (5)$$

onde B_m representa a densidade de fluxo, f_s é a frequência, P_{Fe} é a perda total no aço, k_h refere-se ao coeficiente de perdas por histerese e k_{cp} corresponde ao coeficiente de perdas por correntes parasitas.

Bertotti propõe a classificação das perdas no núcleo em três categorias: perdas por histerese, perdas por correntes parasitas e perdas por excesso (anômalas) [18].

$$P_{Fe} = P_h + P_{cp} + P_{ex} \quad (6)$$

onde P_h representa as perdas por histerese, P_{cp} corresponde às perdas por correntes parasitas e P_{ex} refere-se às perdas por excesso.

Em [12, 17, 19], são abordados vários métodos para estimar as perdas no núcleo, destacando-se as limitações e as aplicações de cada um. Neste estudo, pode-se utilizar o modelo clássico de Steinmetz ou Bertotti para determinar as perdas no material ferromagnético. A equação clássica de Bertotti pode ser expressa da seguinte maneira:

$$P_{Fe} = k_h f_s B_m^2 + k_{cp} (f_s B_m)^2 + k_{ex} (f_s B_m)^{1.5} \quad (7)$$

onde k_{ex} é o coeficiente de perdas por excesso.

A determinação das perdas a partir de uma solução magnetostática em elementos finitos envolve a estimativa da densidade de fluxo magnético B_m para cada elemento da malha, em função da magnitude da corrente e da posição do rotor ($B_m = f(i_d, i_q, \theta_e)$). Como o modelo é bidimensional (2D), o valor de B_m é dado por $B_m = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$, e esse valor se comporta como um sinal periódico em função do ângulo elétrico.

Entretanto, a densidade de fluxo B_m não apresenta comportamento senoidal devido às características geométricas da máquina, o que gera diferentes valores de B_m em múltiplas frequências [20]. Dessa forma, é necessário estimar o sinal de B_m para cada uma dessas frequências [21]. Uma técnica eficiente para realizar essa decomposição é a aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*), que separa o sinal de B_m em suas componentes harmônicas [15, 20, 21].

As perdas são, então, calculadas com base na densidade de fluxo, na frequência e no volume de cada elemento, sendo que, o volume de cada elemento é determinado multiplicando-se sua área pelo comprimento do modelo no plano. A Figura 2 representa o processo de cálculo das perdas no núcleo.

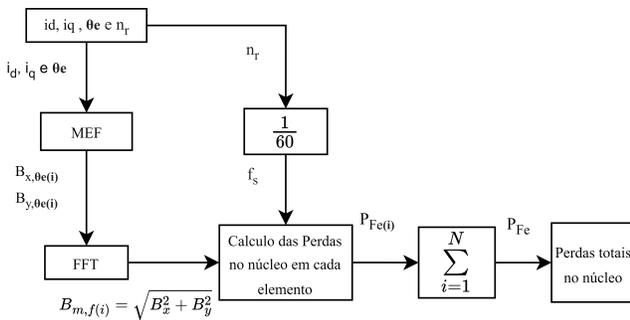


Figura 2: Representação do cálculo das perdas no núcleo ferromagnético em cada elemento da malha de uma máquina elétrica, considerando um único ponto de operação.

B. Perdas no Cobre

As perdas no cobre ocorrem devido a distribuição de corrente no condutor [22]. Essas perdas são proporcionais a resistência e ao quadrado corrente elétrica ($P_c = I^2 R$) [23]. No método proposto, as perdas no cobre são calculadas com base no efeito Joule. A equação analítica utiliza a temperatura real (T_{real}) da máquina, a fim de ajustar a resistência inicialmente estimada (R_{cc}^{ref}) para determinar as perdas no cobre [22].

$$R_{cc} = [1 + \alpha(T_{real} - 20^\circ)] R_{cc}^{ref} \quad (8)$$

Onde α é o coeficiente de temperatura de resistividade a 20°C .

C. Efeito de Proximidade

O efeito de proximidade é causado por correntes parasitas induzidas em condutores adjacentes, resultando em uma distribuição não uniforme de corrente dentro do condutor [24]. Em certas máquinas, as perdas associadas ao efeito de proximidade podem aumentar consideravelmente as perdas de cobre [20]. A perda por proximidade por unidade de volume, P_{prox} , é expressa por:

$$P_{prox} = C_{prox} f^2 B_m^2 \quad (7)$$

onde C_{prox} é um coeficiente de perda que pode ser obtido da seguinte forma:

$$C_{prox} = k \left(\frac{\pi^2}{8} \right) \sigma_c D_c^2 \quad (8)$$

onde k é o fator de preenchimento da ranhura, σ_c representa a condutividade elétrica e D_c denota o diâmetro dos fios condutores.

D. Perdas Magnéticas

As perdas dos ímãs permanentes são estimadas através densidade de corrente J_m na seção transversal do ímã é expressa pela equação [20]:

$$J_m = -\sigma_m \frac{dA}{dt} + J_c \quad (9)$$

em que J_c é uma densidade de corrente de restrição escolhida para que a corrente total na seção transversal de cada ímã resulte em zero, σ_m representa a condutividade elétrica do material do ímã permanente, e A é o vetor potencial magnético computado pela simulação em elementos finitos.

De forma análoga às perdas que ocorrem no núcleo, é mais conveniente no decompor A em várias harmônicas. Assim, para cada harmônica, a densidade de corrente é dada por:

$$J_m = -\sigma_m j\omega A + J_c \quad (10)$$

Dessa maneira, as perdas magnéticas (P_m) são calculadas da seguinte forma:

$$P_m = \frac{1}{2} [\sigma_m (2\pi f)^2 J_m^2] \quad (9)$$

O processo de cálculo das perdas nos ímãs é semelhante ao processo utilizado para as perdas no núcleo. Dessa forma, as perdas nos ímãs são definidas em função da densidade de corrente J_m , frequência de operação e volume de cada elemento.

E. Algoritmo Implementado para Construção do Mapa

Para a construção do mapa de eficiência, foi desenvolvido um algoritmo utilizando a ferramenta PyFEMM, na qual o Python é empregado como interface para o software de Análise por Elementos Finitos (FEMM). O algoritmo é dividido em duas etapas. No Algoritmo 1, o torque, a densidade de fluxo B_m e o potencial magnético A são computados para cada magnitude de corrente e posição do rotor (i_d, i_q e θ_m), sendo B_m e A estimados para cada elemento da malha (N_{malha}).

Algoritmo 1: Computar Parâmetros

```

Entrada:  $i_d, i_q, \theta_m, N_{malha}$ 
Saída :  $T_{em}, B_m, A$ 
Dados :  $i_s = 0 : \Delta i_s : i_{s,max}, \theta_m = 0 : \Delta \theta_m : 2\pi$ 
for  $i_s = 0$  to  $i_{s,max}$  do
  for  $\theta_e = \frac{p}{2} \times \theta_m$  do
    Análise Magnetostática;
    Calcular  $T_{em}(i_s, \theta_m)$ ;
    for  $n = 0$  to  $N_{malha}$  do
      Computar e armazenar fluxo e potencial magnético:
       $B_m(i_s, \theta_e, n)$  e  $A(i_s, \theta_e, n)$ ;
  
```

No Algoritmo 2, a frequência de operação é estimada de acordo com as variações de velocidade de rotação do rotor em rpm (n_r) do modelo proposto. Em seguida, o fluxo B_m e a densidade de corrente do ímã permanente J_m são calculados para cada harmônico usando a transformada rápida de Fourier, conforme descrito nas seções IV-A e IV-D. Depois, as perdas totais da máquina e a eficiência são determinadas, resultando no mapa de eficiência em função da variação de torque e velocidade.

Algoritmo 2: Estimar Mapa de Eficiência

```

Entrada:  $T_{em}, B_m, A, n_r, N_{malha}$ 
Saída :  $\eta, P_t, P_{Fe}, P_m, P_c, P_{prox}$ 
Dados :  $n_r = 0 : \Delta n_r : n_{r,max}, f_s = \frac{n_r}{60}$ 
for  $i_s = 0$  to  $i_{s,max}$  do
  Determina  $B_m$  e  $J_m$  para cada harmônico;
   $B_{m,fft} = \text{FFT}(B_m)$ ;
   $J_{m,fft} = \text{FFT}(A)$ ;
  for  $f_s = 0$  to  $f_{s,max}$  do
    Calcular as perdas e eficiência;
     $\eta, P_t, P_{Fe}, P_c, P_{prox}, P_m$ ;
  
```

V. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos por meio de simulação utilizando o MEF, baseado no modelo magnetostático desenvolvido no FEMM. Para fins de comparação, os resultados da ferramenta proposta neste trabalho são confrontados com os dados gerados pela simulação no software Motor-CAD.

A. Modelo da Máquina para Simulação

Para a avaliação da ferramenta desenvolvida, duas máquinas com características distintas foram selecionadas.

A Figura 3a apresenta a topologia de uma máquina síncrona de ímãs permanentes internos (IPI). Esta máquina possui dois polos e enrolamentos distribuídos com passo pleno. Cada enrolamento é constituído por 16 espiras de fio calibre 28 AWG. O rotor é equipado com uma luva externa, que assegura a integridade mecânica dos ímãs contra a carga inercial centrífuga. Essa máquina foi projetada para aplicação em um sistema de propulsão com armazenamento de energia por ar comprimido em pequena escala, conforme descrito em [16].

A Figura 3b ilustra uma máquina síncrona de ímã permanente superficial (IPS) com enrolamento concentrado. Essa máquina possui um enrolamento com passo 3/8 utilizando fio de calibre 25 AWG. O motor IPS foi empregado em [20] para a análise de perdas eletromagnéticas por meio do software FEMM.

Os dados de ambas as máquinas podem ser observados na Tabela I.

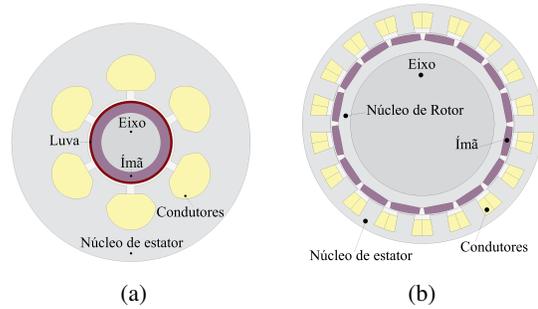


Figura 3: (a) Geometria da máquina IPI e (b) Geometria da máquina IPS.

Tabela I: Dados das máquinas IPI e IPS.

Parâmetro/Materiais	IPI	IPS
Nº de ranhuras	6	18
Nº de polos	2	16
Diâmetro externo do estator	60,0 mm	60,0 mm
Diâmetro interno do estator	22,0 mm	46,0 mm
Comprimento	100,0 mm	7,62 mm
Largura do ímã	2,4 mm	1,9 mm
Entreferro	0,5 mm	0,7 mm
Corrente (rms)	13,8 A	1,41 A
Velocidade nominal	70.000 rpm	4.000 rpm
Núcleo de estator/rotor	M235-35A (0,35 mm)	M19-24 (0,35 mm)
Ímã	N48H (1,39 T)	N42H (1,3 T)
Luva	Aço inox AISI310	-
Eixo	ABNT 4340	Stainless Steel 316

As perdas no ferro foram estimadas em ambas as ferramentas utilizando o modelo clássico de Steinmetz, com os seguintes coeficientes:

Tabela II: Coeficientes do material ferromagnético.

Coeficiente	IPI	IPS	Unidade
k_h	0,0253	0,0241	$W s T^2 m^{-3}$
k_{cp}	4,34e-5	4,93e-5	$W (T s^{-1})^{-3/2} m$

B. Extração do Mapa de Eficiência

Para a obtenção do mapa de eficiência, considera-se uma ampla faixa de operação, com a imposição de correntes no estator para gerar um campo magnético de amplitude constante, perpendicular ao eixo magnético do ímã permanente. Assim, o mapa é extrapolado apenas para região de torque constante das máquinas.

A amplitude da corrente aplicada na máquina de IPI varia entre 1,952 e 19,52 A_{pico} , enquanto a frequência de operação oscila entre 83,33 e 1167,67 Hz. A corrente da máquina IPS varia entre 0,2 e 2,0 A_{pico} , com a frequência de operação variando de 66,67 até 533,33 Hz.

O mapa de eficiência obtido pelo modelo do IPI é apresentado na Figura 4a, enquanto a Figura 4b exibe o mapa gerado pelo Motor-CAD. Observa-se uma diferença significativa entre os resultados.

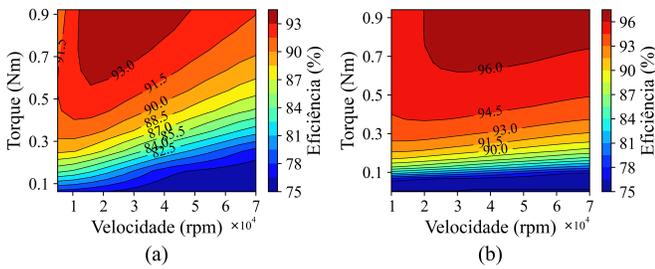


Figura 4: Mapas de eficiências. (a) Gerado pelo modelo proposto. (b) Elaborado através do software motor-CAD.

A eficiência do modelo proposto é aproximadamente 93%, enquanto o mapa gerado pelo Motor-CAD indica uma eficiência máxima de 96%. Esses resultados demonstram que as perdas estimadas pelo Motor-CAD são significativamente inferiores às perdas calculadas pela ferramenta desenvolvida neste estudo.

A Figura 5a apresenta o mapa de eficiência da máquina IPS estimado pelo modelo proposto, enquanto a Figura 5b ilustra o mapa estimado pelo Motor-CAD.

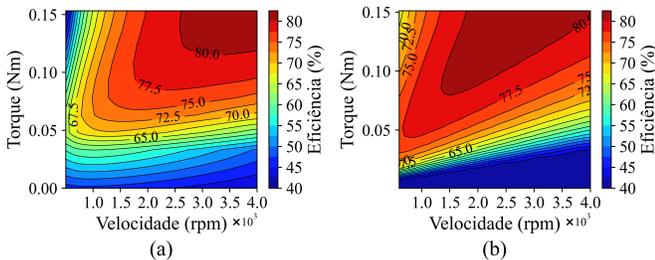


Figura 5: Mapas de eficiências. (a) Gerado pelo modelo proposto. (b) Elaborado através do software motor-CAD.

As perdas estimadas pelo modelo proposto e pelo Motor-CAD demonstram uma maior concordância para a máquina IPS. A máxima eficiência de ambos modelos foi de 80%.

Observa-se uma diferença no perfil de ambos os mapas de eficiência, a qual se deve principalmente à divergência nas perdas em cada ponto de operação.

C. Análise das Perdas

A Figura 6 apresenta as perdas no núcleo, no enrolamento de cobre e nos ímãs permanentes para o IPI. Observa-se uma divergência significativa nas perdas no material ferromagnético. Na velocidade nominal de 70.000 rpm, o modelo proposto estima perdas no aço de 494 W, enquanto o Motor-CAD indica 188 W.

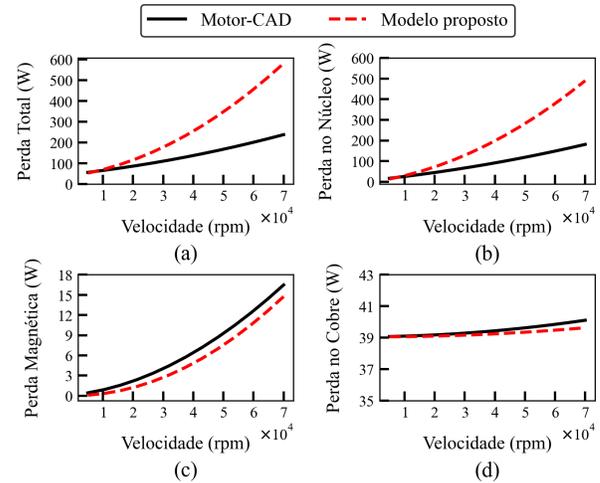


Figura 6: Comparação das perdas eletromagnéticas da máquina IPI, estimadas pelo modelo proposto e pelo Motor-CAD: (a) Perda total, (b) Perda no núcleo, (c) Perda magnética, e (d) Perda no cobre.

A Figura 7 apresenta as perdas eletromagnéticas estimadas para a máquina IPS. As perdas no núcleo mostram melhor concordância, enquanto as perdas magnéticas e no cobre apresentam maiores divergências. No entanto, como essas perdas são significativamente menores que as do núcleo, as perdas totais exibem uma concordância muito maior em relação ao modelo IPI.

Há uma divergência significativa nas perdas do núcleo do estator da máquina IPI entre o Motor-CAD e o modelo proposto, impactando as perdas totais. A discrepância, em investigação, pode ser atribuída às diferenças nos cálculos das perdas por histerese, correntes parasitas e suposições sobre a saturação do núcleo.

Para a máquina IPS, a discrepância nas perdas no ferro foi menor. Ao comparar as perdas estimadas pelo modelo proposto com as obtidas no FEMM, os resultados foram idênticos, utilizando os mesmos parâmetros de simulação descritos em [20].

Divergências nas demais perdas foram observadas em ambas as máquinas. A discrepância nas perdas magnéticas é significativa, principalmente em razão da aplicação de diferentes métodos de cálculo, assim como as perdas no cobre, que são influenciadas pelo efeito de proximidade. O Motor-CAD

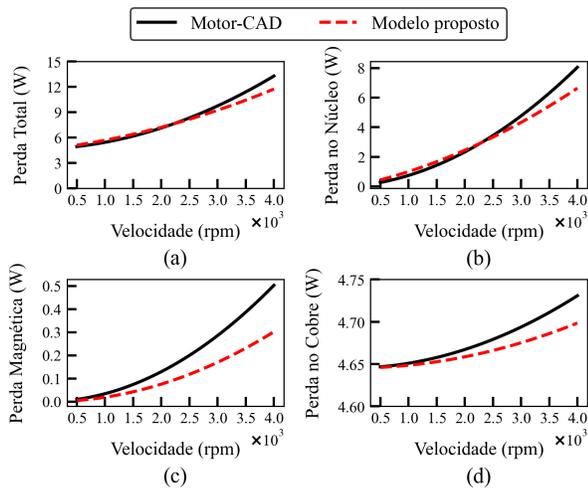


Figura 7: Comparação das perdas eletromagnéticas da máquina IPS, estimadas pelo modelo proposto e pelo software Motor-CAD. (a) Perda total. (b) Perda no núcleo. (c) Perda magnética. (d) Perda no cobre.

estima essas perdas diretamente por meio de elementos finitos, enquanto o modelo proposto as calcula via pós-processamento. Em contrapartida, as perdas no cobre, resultantes do efeito Joule, foram idênticas em ambos os métodos para as duas máquinas.

VI. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta para obtenção de mapas de eficiência de máquinas elétricas utilizando o método de elementos finitos para estimar a distribuição do campo magnético e o torque eletromagnético. O mapa é construído de acordo com as perdas calculadas em diversas condições de operação. Essa abordagem pode ser implementada por meio de softwares de código aberto, permitindo maior flexibilidade e personalização no estudo e otimização do desempenho de máquinas elétricas. Além disso, o uso de ferramentas acessíveis reduz custos e possibilita a reprodução dos resultados por outros pesquisadores ou engenheiros da área.

Uma análise comparativa entre o modelo proposto e o software Motor-CAD foi realizada para dois tipos de motores: um com ímãs no interior e outro com ímãs na superfície do rotor. O modelo mostrou boa concordância com o Motor-CAD para a máquina IPS, com pequenas diferenças nas perdas em altas velocidades. No entanto, para a máquina IPI, houve maior divergência nas perdas do núcleo de aço, atribuída aos ajustes de coeficientes no modelo de Steinmetz, além das diferentes abordagens utilizadas por cada ferramenta.

Apesar dessas divergências, o modelo proposto demonstrou potencial para ser uma ferramenta alternativa para a análise de perdas e eficiência de máquinas elétricas. A implementação proposta estima o desempenho da máquina sob diversas condições operacionais, considerando o cálculo das perdas para um sinal não senoidal. Futuras pesquisas devem

concentrar-se no aprimoramento da modelagem das perdas no ferro e na geração de mapas de eficiência para diferentes topologias de máquinas. Além disso, uma comparação com métodos experimentais é essencial para a validação dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- [1] International Energy Agency. Report on round robin of converter losses. Technical report, International Energy Agency, 2022. Prepared under the IEA Technology Collaboration Programme on Energy Efficient End-Use Equipment (4E) – Electric Motor Systems Annex (EMSA) program. Accessed: 2024-09-06.
- [2] Aldona Kluczek and Paweł Olszewski. Energy audits in industrial processes. *Journal of Cleaner Production*, 142:3437–3453, 2017.
- [3] Thanh Anh Huynh and Min-Fu Hsieh. Performance analysis of permanent magnet motors for electric vehicles (ev) traction considering driving cycles. *Energies*, 11(6):1385, 2018.
- [4] H Sano, K Semba, Y Suzuki, and T Yamada. Investigation in the accuracy of fea based efficiency maps for pmsm traction machines. In *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pages 2061–2066. IEEE, 2022.
- [5] Emad Roshandel, Amin Mahmoudi, Solmaz Kahourzade, Amirmehdi Yazdani, and GM Shafiullah. Losses in efficiency maps of electric vehicles: An overview. *Energies*, 14(22):7805, 2021.
- [6] Amin Mahmoudi, Wen L Soong, Gianmario Pellegrino, and Eric Armando. Loss function modeling of efficiency maps of electrical machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(5):4221–4231, 2017.
- [7] Sung-Bae Jun, Chan-Ho Kim, JuKyung Cha, Jin Hwan Lee, Yong-Jae Kim, and Sang-Yong Jung. A novel method for establishing an efficiency map of ipmsms for ev propulsion based on the finite-element method and a neural network. *Electronics*, 10(9):1049, 2021.
- [8] Stjepan Stipetic, James Goss, Damir Zarko, and Mircea Popescu. Calculation of efficiency maps using a scalable saturated model of synchronous permanent magnet machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(5):4257–4267, 2018.
- [9] Ornella Stiscia, Sandro Rubino, Silvio Vaschetto, Andrea Cavagnino, and Alberto Tenconi. Accurate induction machines efficiency mapping computed by standard test parameters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(3):3522–3532, 2022.
- [10] Kan Zhou, Andrej Ivanco, Zoran Filipi, and Heath Hofmann. Finite-element-based computationally efficient scalable electric machine model suitable for electrified powertrain simulation and optimization. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(6):4435–4445, 2015.
- [11] Carlos Candelo-Zuluaga, Antonio Garcia Espinosa, Jordi-Roger Riba, and Pere Tubert Blanch. Pmsm design for achieving a target torque-speed-efficiency map. *IEEE*

- Transactions on Vehicular Technology*, 69(12):14448–14457, 2020.
- [12] Daniela Rodriguez-Sotelo, Martin A Rodriguez-Licea, Ismael Araujo-Vargas, Juan Prado-Olivarez, Alejandro-Israel Barranco-Gutiérrez, and Francisco Perez-Pinal. Power losses models for magnetic cores: A review. *Micromachines*, 13(3):418, 2022.
 - [13] John G Hayes and G Abas Goodarzi. *Electric power-train: energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles*. John Wiley & Sons, 2018.
 - [14] Donald W Novotny and Thomas A Lipo. *Vector control and dynamics of AC drives*, volume 41. Oxford University Press, 1996.
 - [15] Nicola Bianchi. *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*. CRC Press, 2017.
 - [16] Thales Alexandre Carvalho Maia. Desenvolvimento de um gerador síncrono a ímãs permanentes de alta rotação acionado por uma microturbina. 2016.
 - [17] Andreas Krings and Juliette Soulard. Overview and comparison of iron loss models for electrical machines. *Journal of Electrical Engineering*, 10(3):8–8, 2010.
 - [18] Giorgio Bertotti. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetism*, 24(1):621–630, 1988.
 - [19] Fernando José Gomes Landgraf et al. Propriedades magnéticas de aços para fins elétricos. *Aços: perspectivas para os próximos*, 10:109–128, 2002.
 - [20] David Meeker. Finite element method magnetics: Spm-loss.
 - [21] Sondre Hamarheim Westad. Loss analysis in laminated iron cores using comsol multiphysics and livelink for matlab. Master’s thesis, NTNU, 2018.
 - [22] Ali Emadi. *Advanced electric drive vehicles*. CRC Press, 2014.
 - [23] J Pyrhonen. *Design of Rotating Electrical Machines*, volume 1. Wiley-VCH, 2013.
 - [24] Guanghui Du, Weilin Ye, Yufeng Zhang, Lu Wang, and Tao Pu. Comprehensive analysis of influencing factors of ac copper loss for high-speed permanent magnet machine with round copper wire windings. *Machines*, 10(9):731, 2022.