

Avaliação de uma Máquina Elétrica de Fluxo Comutado In-Wheel para Aplicação em Veículos Micro-Híbridos

Diogo Pereira Vilela Galo* Gabriel Alves Mendonça**
Thales Alexandre Carvalho Maia* Braz de Jesus Cardoso Filho*

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade
Federal de Minas Gerais, MG, (e-mail: diogogalo@ufmg.br,
thales@ufmg.br, braz.cardoso@ieee.org)

** Aperam South America, MG (e-mail:
gabriel.mendonca@aperam.com)

Abstract: Even with the exponential increase in the number of electric and hybrid vehicles in Brazil and in the world, it is expected that the propulsion technology based on internal combustion engines will still prevail until the year 2050. The current automobile scenario is facing ambitious goals of reducing emissions and improving energy efficiency. Several technologies have been applied to increase the efficiency and reduce polluting gases of internal combustion engines. The advantages of using these technologies are even more attractive in Brazil with the presence of sugarcane ethanol, which has a practically neutral carbon balance. However, technologies to make internal combustion engines more efficient and increased electronic content in modern vehicles make it necessary to have greater electrical energy availability in vehicles. The main objective of this work is the construction of a switched-flow *in-wheel* electric machine to increase the availability of electric energy in a light passenger vehicle and, consequently, improve the overall efficiency of the system.

Resumo: Mesmo com o aumento exponencial do número de veículos elétricos e híbridos no Brasil e no mundo, espera-se que os veículos com motores de combustão interna ainda sejam predominantes até o ano de 2050. O cenário automobilístico atual é caracterizado pelo cumprimento de metas ambiciosas para diminuição emissões de gases poluentes e aumento de eficiência energética. Diversas tecnologias têm sido aplicadas para o aumento da eficiência e diminuição de emissões dos motores de combustão interna. As vantagens do uso dessas tecnologias são ainda mais atrativas no cenário nacional com a presença do etanol, que possui um balanço de carbono praticamente neutro. Contudo, o emprego dessas tecnologias aliado ao aumento do conteúdo eletroeletrônico nos veículos modernos faz com que seja necessária uma maior disponibilidade de energia elétrica nos veículos. Este trabalho tem como principal objetivo a construção de uma máquina elétrica *in-wheel* de fluxo comutado para o aumento da disponibilidade de energia elétrica em um veículo de passageiros leve e, conseqüentemente, melhoria da eficiência global do sistema.

Keywords: Flux-Switching Machine; Hybrid Vehicles; In-Wheel Electric Machines; Regenerative Braking, Electric Drives.

Palavras-chaves: Máquina de Fluxo Comutado; Veículos Híbridos; Máquinas Elétricas In-Wheel; Frenagem regenerativa; Acionamentos Elétricos.

1. INTRODUÇÃO

A indústria automobilística atual é marcada por uma crescente busca por veículos mais eficientes e menos poluentes a fim torná-los compatíveis com as novas demandas da sociedade, com menores danos ao meio ambiente, diminuição da poluição urbana, maior conforto, conectividade e desempenho (Barassa, 2019). No contexto de eficiência energética e emissões, essa busca é orientada por metas

audaciosas estabelecidas por iniciativas reguladoras como Euro, US Tier e Proconve (Dallmann and Façanha, 2017).

As regulamentações referentes a emissão de gases poluentes por veículos automotores se tornaram mais restritivas nos últimos anos. No entanto, a severidade dessas restrições é independente para cada país, o que exige um desenvolvimento tecnológico singular (Mulholland et al., 2021).

Diversas tecnologias tem sido aplicadas para o aumento da eficiência e diminuição de emissões dos motores de combustão interna para tração veicular. As vantagens dessas tecnologias são ainda mais atrativas no cenário

* Os autores agradecem o suporte financeiro da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia elétrica da UFMG.

nacional com a presença do etanol de cana de açúcar, que possui um balanço de carbono praticamente neutro (Malaquias et al., 2019). As soluções para tornarem os motores de combustão interna mais eficientes e aumento do conteúdo eletroeletrônico nos veículos modernos fazem com que seja necessária uma maior disponibilidade de energia elétrica nos veículos.

O aumento da disponibilidade de energia pode ser alcançado por meio do conceito de *Energy Harvesting*, que consiste no aproveitamento da energia que seria dissipada no veículo de diferentes formas. Destacam-se as técnicas de recuperação da energia absorvida pela suspensão do veículo (Xie et al., 2019), acumuladores hidropneumáticos (Barbosa et al., 2021), microturbina eólica e painel fotovoltaico (Aliakbari and Vahidinasab, 2020) e o aproveitamento da energia cinética por frenagem regenerativa (Zhu et al., 2020).

A energia armazenada na inércia do veículo é aproximadamente 6% da energia total consumida, podendo ser recuperada por meio da frenagem regenerativa. Em veículos micro e meio híbridos essa energia é recuperada por uma máquina elétrica acoplada por correia, conhecida como BSG (*Belt-driven Starter Generator*) (Cardoso et al., 2020).

Uma alternativa viável para a recuperação dessa energia se dá pela instalação de máquinas elétricas no interior das rodas, tecnologia conhecida como *in-wheel*. Uma das vantagens dessa aplicação é o aumento da disponibilidade de espaço na plataforma do veículo (Fraser, 2011). Os motores *in-wheel* se mostram atrativos devido a conveniência no processo de conversão de energia, perdas mecânicas reduzidas e estrutura simples e compacta (Li et al., 2020). Em veículos com máquinas elétricas nas quatro rodas percebe-se, ainda, o aumento da estabilidade do veículo (Yang et al., 2021).

Nesse contexto, este trabalho tem como principal objetivo a avaliação de um sistema microhíbrido baseado no projeto de máquina elétrica apresentada em (Mendonça et al., 2022) para o aumento da disponibilidade de energia elétrica em um veículo e melhoria da eficiência global do sistema. O enfoque será dado na fabricação da máquina elétrica, buscando uma boa relação de custo-benefício e facilidade de implementação em veículos comercialmente aceitos no mercado.

2. ESCOLHA DA MÁQUINA ELÉTRICA

De acordo com os dados fornecidos pelo Departamento de Energia dos EUA, os ímãs de terras raras representam entre 20% e 30% do custo total dos motores elétricos (Poudel et al., 2021). Esse custo está predominantemente relacionado aos altos preços de elementos de terras raras, como samário-cobalto (SmCo), neodímio (Nd) e disprósio (Dy), necessários para fornecer uma alta densidade de fluxo remanescente, alta força coercitiva e evitar a desmagnetização em altas temperaturas. Topologias de motores elétricos alternativas que reduzem ou eliminam a necessidade de utilização desses materiais críticos podem desempenhar um papel importante na transição de veículos convencionais para veículos eletrificados avançados.

Para a aplicação proposta nesse trabalho é imprescindível características como robustez, capacidade de tolerar

falhas, operação em altas temperaturas, baixo custo e facilidade de fabricação. A máquina deve apresentar uma boa relação peso/potência, alta densidade de torque, boa eficiência e ampla faixa de velocidade de operação.

A máquina elétrica de fluxo comutado herda características da máquina de relutância variável, como a estrutura robusta e sem enrolamentos no rotor, habilidade de tolerar falhas, operação em altas temperaturas e altas velocidades. Essa máquina pode ser projetada considerando uma excitação por enrolamentos de campo, ímãs permanentes ou híbrida.

Eliminando os ímãs permanentes, as máquinas de fluxo comutado com enrolamento de campo apresentam fluxo controlável com baixo custo. Os componentes ativos da máquina são, então, formado apenas por enrolamentos posicionados no estator, o que possibilita um melhor gerenciamento térmico da máquina e capacidade de operação em altas temperaturas (Tang et al., 2014).

Ahmad et al. (2019) investigou diferentes configurações de polos no rotor para uma máquina de fluxo comutado com enrolamento de campo. A máquina proposta apresenta como novidade a configuração de rotor externo, enrolamentos sem sobreposição, estrutura de rotor robusta para redução das perdas no cobre da máquina, baixo custo, alta eficiência e capacidade de operação em altas velocidades.

Em (Sulaiman et al., 2016), o projeto de uma máquina trifásica de fluxo comutado com excitação de campo de alta rotação é apresentado com o objetivo de alcançar características de desempenho de uma máquina síncrona de ímãs permanentes. A máquina proposta se apresenta como boa candidata para aplicação em veículos elétricos híbridos, com um resultado otimizado atingindo uma densidade de potência de 4.8 kW/kg e torque máximo de 210 N.m .

A máquina elétrica escolhida para coleta de energia (*Energy Harvesting*) é a de fluxo comutado com excitação por enrolamentos de campo. A topologia base da máquina proposta contém 5 polos no rotor e estator com bobinas de campo e armadura intercaladas distribuídas ao longo de 12 ranhuras, conforme apresentado na Figura 1.

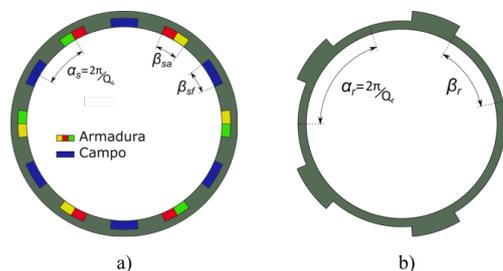


Figura 1. Seção transversal da geometria base adotada nesse trabalho: (a) estator contendo enrolamentos de armadura e de campo (b) rotor de polos salientes (Mendonça, 2021).

3. FABRICAÇÃO

3.1 Avaliação do espaço disponível

O projeto da máquina elétrica *in-wheel* tem como objetivo o mínimo impacto possível para instalação em um veículo comercial leve. Sua instalação apropriada se dará nas rodas do eixo traseiro, utilizando o espaço disponível entre o freio a tambor e o raio interno da roda. As restrições geométricas são desafiadoras, restringindo o número de polos da máquina. Outros graus de liberdade são o comprimento axial e o entreferro. O espaço disponível para o projeto foi avaliado com o auxílio de um software de modelagem 3D, conforme apresentado na Figura 2

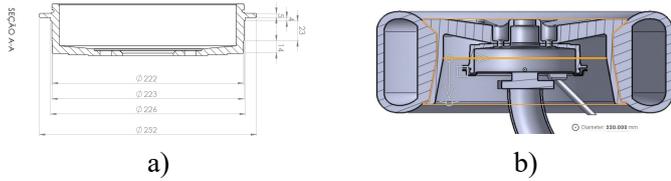


Figura 2. Avaliação da restrição do espaço interno.

Para garantir que a montagem mecânica fosse factível e robusta o suficiente, foi adotado um valor de 0,5 mm para o entreferro. Os valores finais das dimensões consideradas para fabricação da máquina estão apresentados na Tabela 1 e são similares a valores adotados em trabalhos já publicados (Ahmad et al., 2019; Nguyen et al., 2016)

Tabela 1. Limites dimensionais para a fabricação da máquina (em mm)

Parâmetro	Símbolo	Valor
Raio externo	r_{out}	155
Raio interno	r_{in}	111
Comprimento axial	l_a	51
Comprimento do entreferro	l_g	0,5

3.2 Parâmetros construtivos

Foram avaliadas diferentes configurações de ranhuras do estator e polos no rotor baseados na topologia base apresentada na Figura 1. A partir do circuito elétrico equivalente desenvolvido por (Mendonça et al., 2022), foram calculados parâmetros da máquinas para que se pudesse atingir os critérios de desempenho estabelecidos. Optou-se pela configuração 24s-10p (24 slots no estator e 10 polos no rotor) devido a maior capacidade de conversão de energia e número par de polos no rotor, o que evita cargas radiais sobre o eixo. Os parâmetros construtivos da máquina estão apresentados na Tabela 2.

3.3 Definição dos condutores

Em máquinas que empregam condutores circulares com enrolamento aleatório é empregado um valor típico de fator de preenchimento das ranhuras, k_{cu} , variando entre 0,3 and 0,5 (Lipo, 2017). Em máquinas de fluxo comutado, o valor de 0,4 é comumente empregado na literatura (Amara et al., 2005; Zhou and Zhu, 2014). Para estimar as perdas no cobre, a resistência da dos enrolamentos de armadura pode ser calculada utilizando a Equação 1.

Tabela 2. Parâmetros construtivos da máquina de fluxo comutado

Parâmetro	Símbolo	Valor
Comprimento axial	l_{ax}	51 mm
Raio do entreferro	r_{ag}	134 mm
Comprimento do entreferro	r_{ag}	0,5 mm
Abertura angular - ranhuras armadura	β_{sa}	$0,4546 \cdot \alpha_s$
Raio externo - ranhuras armadura	r_{sa}	148,85 mm
Abertura angular - ranhuras campo	β_{sf}	$0,8 \cdot \alpha_s$
Raio externo - ranhuras campo	r_{sf}	148,85 mm
Abertura angular - dentes rotor	β_r	$0,65 \cdot \alpha_r$
Raio interno - ranhuras rotor	r_{ri}	119,15 mm
Raio interno das ranhuras armadura	r_{st}	136,35 mm
Número de espiras - armadura	N_s	15
Número de espiras - campo	N_f	840

$$R_{coil} = l_{turn} \frac{\rho_{cu}}{k_{cu} (A_{slot}/2)} N_{coil}^2 \quad (1)$$

onde,

$$l_{turn} = 2l_s + 2l_{end} \quad (2)$$

$$l_{end} = l_{circ} + 2l_{axis} \quad (3)$$

em que l_{circ} é o comprimento médio da circunferência e l_{axis} é o comprimento axial da cabeça de bobina, dados pelas Equações 4 and 5.

$$l_{circ} = \frac{1}{2} \left[2 \frac{2\pi}{Q_s} + \left(2 \frac{2\pi}{Q_s} r_{wind} - \beta_{sa} \right) \right] r_{wind} \quad (4)$$

$$l_{axis} = \frac{\beta_{sa}}{2} r_{wind} \quad (5)$$

Para calcular a resistência do enrolamento de campo, deve-se utilizar o valor apropriado de abertura angular da ranhura de campo substituindo β_{sa} for β_{sf} nas Equações 4 and 5. A configuração considerada nesse trabalho apresenta enrolamentos sobrepostos, o que aumenta as perdas no cobre e a necessidade de uma estimativa mais detalhada dos parâmetros que contribuem para essas perdas.

É possível encontrar máquinas de fluxo comutado na literatura utilizando densidades de corrente de até $20A/mm^2$ (Sulaiman et al., 2016). De acordo com Amara et al. (2005), métodos de arrefecimento devem ser empregados para densidades de corrente maiores que $10A/mm^2$. Sendo assim, nesse trabalho será adotada uma densidade de corrente máxima de $10A/mm^2$.

A partir das considerações a respeito da topologia, valor máximo considerado para densidade de corrente e simulações utilizado elementos finitos, foram definidos as seguintes bitolas de fios para os enrolamentos de armadura e de campo.

- Campo: Condutor único, AWG 27;
- Armadura: Cinco condutores em paralelo, sendo dois deles AWG 18 e três AWG 21.

3.4 Definição comprimento máximo das cabeças de bobina

Para garantir que as cabeças de bobina não desrespeitassem os limites impostos pelo raio interno da roda, foram

fabricados protótipos do estator utilizando impressão 3D para testar o enrolamento da máquina, conforme ilustrado na Figura 3. Os resultados apontaram um comprimento estimado para as cabeças de bobina, além de ajudarem a definir a bitola adequada para as bobinas de armadura e campo, geometria dos dentes do estator e procedimento de fixação das bobinas. Conforme apresentado na 3, as cabeças de bobina apresentaram um valor máximo estimado de 30 mm.



Figura 3. Avaliação das cabeças de bobina utilizando protótipos em impressão 3D.

3.5 Escolha do aço elétrico

Dentre as características mais importantes de aço elétrico, destacam-se as perdas no aço em todo o ciclo de direção, alta capacidade de polarização e permeabilidade, resistência mecânica e condutividade térmica.

As perdas no ferro são compostas por três componentes, sendo a primeira as perdas por histerese, a segunda perdas por correntes parasitas e a última, perdas complementares. Esse modelo de perdas é conhecido como modelo de Bertontti (Pyrhonen, 2013; Yang et al., 2014). O modelo considera as parcelas de perdas sob a influência da magnetização unidirecional e senoidal como função do pico de polarização J_p e a frequência f , como descrito na Equação 6.

$$\begin{aligned} P_{fe}(J_p, f) = & k_{hyst}(1/\gamma) \cdot J_p^\alpha f + \\ & + k_{eddy}(\tau^2, 1/\rho) \cdot J_p^2 f^2 + \\ & + k_{exc}(\tau, \gamma, 1/\rho) \cdot J_p^{1.5} f^{1.5} \end{aligned} \quad (6)$$

Da Equação 6, observa-se que para diminuir as perdas no ferro é necessário: 1) aumentar a resistividade elétrica ρ e diminuir a espessura das chapas τ ; 2) otimizar a microestrutura do material, como por exemplo o tamanho dos grãos γ ; 3) melhorar a textura do aço.

As chapas de aço laminado são encontradas em espessuras que variam de 0,2 a 1 mm (Ramesh and Lenin, 2019). Chapas mais finas são mais comumente utilizadas na fabricação de máquinas elétricas operando em altas frequências, como no caso da tração veicular. Diante das opções comercialmente disponíveis, foram adotadas chapas de aço-silício de 0.3 mm de espessura, contendo as propriedades apresentadas na Tabela 3. As chapas utilizadas na

fabricação do protótipo estão apresentadas na Figura 4, contendo a sua direção de laminação apontada.

Tabela 3. Propriedades do aço elétrico utilizado

Espessura (mm)	W 1T/400Hz (W/kg)	W 1T/800Hz (W/kg)	B50 (T)	YS (MPa)	TS (MPa)
0,30	14,49	41,29	1,67	425	545



Figura 4. Aço elétrico utilizado na fabricação do protótipo.

3.6 Métodos de corte das chapas para montagem do rotor e do estator

O processo de fabricação tem forte influência nas propriedades magnéticas do estator e rotor, podendo resultar em redução da eficiência de da densidade de potência da máquina. Dentre os processos de corte empregados na fabricação de máquinas elétricas, pode-se destacar: corte a laser, perfuração (ou *punching*) (Ossart et al., 2000), corte por guilhotina (Baudouin et al., 2003), eletroerosão (Gumbleton-Wood et al., 2017), jato de água abrasivo (Schoppa et al., 2003) e fotocorrosão (Emura et al., 2003). Cada um dos métodos é adequado para situações específicas.

Os cortes mecânicos (*punching* e guilhotina), utilizados na produção em larga escala, deterioram as propriedades do material magnético próximo as linhas de corte devido ao stress residual induzido. O corte a laser implica em stress térmico, devido ao rápido aquecimento e resfriamento do material durante o processo de corte. Entretanto, é uma técnica muito utilizada para prototipagem ou baixa escala de produção devido a facilidade de se alterar a geometria de corte com baixo custo (Bali and Muetze, 2018).

Os cortes por eletroerosão e jato de água abrasivo são conhecidos na literatura por terem o menor impacto na qualidade magnética do material e, assim como o corte a laser, essas técnicas são adequadas apenas para pequenas quantidades devido a sua baixa velocidade de corte (Hofmann et al., 2015). O método de fotocorrosão não apresenta deformação mecânica e apresenta menor deterioração das propriedades magnéticas do material se comparado aos cortes mecânicos e a laser (Emura et al., 2003; Bali and Muetze, 2018).

Dentre as alternativas estudadas, a disponibilidade de empresas especializadas e dado o contexto experimental da máquina elétrica em estudo, concluiu-se que os métodos de corte por eletroerosão e a laser são os que mais se

adéquam para fabricação do protótipo. Optou-se pelo corte utilizando o procedimento de eletroerosão. O processo está ilustrado na Figura 5.



Figura 5. Fabricação do estator da máquina utilizando o método de eletroerosão.

Como grande vantagem desse processo, pode-se destacar a viabilidade de se cortar todas as chapas em um único pacote. Para isso, foi necessário o empilhamento e compactação das chapas utilizando duas chapas de material mais grosso, como em um sanduíche. Outro ponto positivo se deve ao fato das chapas permanecerem empilhadas após o término do processo, garantindo uma montagem mais prática e ágil.

3.7 Fabricação do rotor e montagem no eixo

A montagem do rotor é concluída ao se unir o núcleo ferromagnético com o eixo da máquina. No caso específico desse trabalho, o eixo da máquina é o próprio tambor do sistema de freios. O processo de junção das duas peças é extremamente importante para uma operação confiável da máquina e transmissão segura de conjugado a carga. Os principais elementos de transferência de torque são encontrados em (Budynas and Nisbeth, 2016).

Segundo (Tong, 2014), a maneira mais econômica e confiável para unir o núcleo do rotor com o eixo é por meio de interferência mecânica (ou pressão e contração). Como consequência, o processo de "expansão e contração" é utilizado na fabricação de grande parte das máquinas elétricas. A expansão do rotor é realizada por meio de aquecimento indutivo enquanto o eixo é mantido em temperatura ambiente ou resfriado.

O rotor do protótipo é composto pelo empilhamento das chapas de aço e o eixo, que nesse caso é o próprio tambor do freio do veículo. O primeiro desafio encontrado foi na centralização do eixo com o estator. Para garantir alguma flexibilidade no processo de montagem, foram utilizados pinos com fixação por parafuso em furos oblongos. Essa configuração permite uma movimentação do estator em relação ao centro do eixo, facilitando o processo de montagem. O suporte de fixação do estator e o processo de centralização do eixo do rotor estão ilustrados nas Figuras 6-a e 6-b.

Um dos desafios foi garantir a montagem das chapas de forma a estabelecerem um único pacote para posterior

montagem no rotor. Foi aplicada uma resina adesiva em cada uma das chapas durante o processo de empilhamento. Além de fixar uma chapa na outra a resina aplicada garante uma camada extra de isolamento elétrico, especialmente nas regiões impactadas pelo processo de corte por eletroerosão.

Foram aplicados cordões de solda contínuos em um dos lados de cada dente do rotor para garantir a rigidez mecânica da máquina e uma fixação uniforme. Um dos cordões de solda está apresentado na Figura 6-c. Como lição aprendida recomenda-se considerar entalhes ao longo do comprimento axial do núcleo para aplicação do cordão de solda.



Figura 6. Fabricação do rotor: a) Estrutura de fixação do estator; b) Ajuste da concentricidade do rotor; c) Cordão de solda no núcleo do rotor; d) Fixação do rotor pelo método de aquecimento/contração.

Por fim, foi realizada a montagem do núcleo do rotor no eixo da máquina, que nesse caso é o próprio tambor do sistema de freios das rodas traseiras do veículo. O método utilizado nesse processo foi aquecimento e contração, tendo o núcleo sido expandido por meio de aquecimento indutivo. O único detalhe nesse processo foi garantir que o comprimento do núcleo do rotor estivesse alinhado com o estator. A montagem do rotor no tambor de freio está apresentada na 6-d.

3.8 Fabricação do estator

A Figura 7-a apresenta a aferição do comprimento axial da máquina de 51 mm. Optou-se por empregar furos ao longo de todo o perímetro das chapas para garantir a devida fixação no suporte projetado. Em um primeiro momento, as chapas foram empilhadas e apenas fixadas utilizando a mesma resina empregada no rotor. Os protótipos fabricados em impressora 3D para avaliação das dimensões das cabeças de bobina também foram utilizados para definir o processo de fabricação e acomodação dos enrolamentos.

Foram instalados papéis de material isolante nas ranhuras do estator. O isolamento das ranhuras do estator é de grande importância na fabricação de máquinas elétricas, uma vez que é o elemento que está mais suscetível a influências de temperatura, campos elétricos e esforços termomecânicos (Azizov et al., 2007; Zhao et al., 2018). Além de oferecer isolamento elétrico, os papéis isolantes

protegem o esmalte isolante dos fios de cobre durante a acomodação das bobinas.

Foi realizada a medição das cabeças de bobina para garantir as dimensões especificadas em projeto. O comprimento das cabeças de bobina também se mostraram de acordo com o especificado em projeto, estando abaixo dos 30 mm como pode-se observar na Figura 7-b.

Na sequência, realizou-se a impregnação e encapsulamento do estator com as bobinas. Esse processo tem como objetivo fortalecer o isolamento elétrico do enrolamento, fornecer proteção confiável para produtos químicos e ambientes agressivos, melhorar a dissipação térmica temperatura e promover a integração da estrutura do estator com as bobinas para garantir boa robustez em condições de vibração (Tong, 2014).

Dentre as opções disponíveis, a impregnação por imersão no verniz é conhecida por ser uma maneira efetiva de se fixar os enrolamentos no estator (Tong, 2014). O custo final da utilização desse método é mais baixo se comparado a outras alternativas, como as resinas epóxi. Além disso, a impregnação por verniz isolante é considerada mais robusta em condições de sobrecargas térmicas transitórias (Liu et al., 2019).



Figura 7. Fabricação do estator: a) Medição do pacote de chapas do estator;b) Conferência dos limites dimensionais das cabeças de bobina;c) Detalhe do verniz isolante aplicado nas bobinas do estator;d) Protótipo finalizado.

O estator da máquina, após verificadas todas as características construtivas e de isolamento elétrico, foi então submetido ao processo de impregnação por imersão em verniz. Detalhes do acabamento do estator impregnado podem ser vistos na Figura 7-c. Antes da impregnação, porém, foram instalados sensores do tipo PT-100 para aferição de temperatura nos enrolamentos, espaçados de 120 graus mecânicos entre si.

Por fim, a montagem da máquina foi finalizada ao se fixar a estrutura do estator no suporte projetado já contendo o eixo do rotor. Foram empregados instrumentos de precisão para garantir a uniformidade do entreferro e a concentricidade do rotor e estator. O resultado final do protótipo da máquina está apresentado na Figura 7-d.

Durante o ajuste de concentricidade, percebeu-se que alguns dos dentes do estator encostavam na estrutura do

estator, sendo necessário um ajuste. Após o ajuste, o entreferro da máquina elétrica ficou com 0,7 mm, apresentando um erro de 40% na medida especificada. O fluxo estabelecido no entreferro é significativamente menor, impactando no desempenho da máquina elétrica. A seguir, são apresentados os resultados de validação experimental. Para isso, as simulações do modelo da máquina foram realizadas considerando o modelo eletromagnético com um entreferro de 0,7 mm.

4. VALIDAÇÃO DO MODELO ELETROMAGNÉTICO E MEDIÇÃO EXPERIMENTAL

Para a realização dos testes de validação do modelo eletromagnético foi desenvolvida uma bancada de testes dinâmométrica. Os resultados apresentados consideram a máquina operando no modo gerador. A transmissão de potência é feita por meio de uma roda com 1/3 do raio externo da roda. A bancada também conta com um medidor de torque com transdutor de velocidade embutido, osciloscópios para aquisição de sinais de corrente e tensão e uma interface para aferição de temperatura. A estrutura da banca de testes está disposta na Figura 8.



Figura 8. Bancada de testes desenvolvida para validação experimental.

A máquina foi acionada a uma velocidade angular de 500 rpm, equivalente a 35 km/h em um veículo de passeio leve utilizando uma roda de liga leve aro 15" e pneu com especificações 185/60/15. As formas de onda da tensão induzida para uma corrente de campo total de 4,8 A (400 mA por bobina) estão apresentadas na Figura 9. Os resultados apresentados mostram uma boa correlação entre o projeto da máquina e a sua fabricação.

As bobinas de campo podem ser conectadas em série ou em paralelo. Entretanto, em nenhum dos trabalhos estudados durante a revisão bibliográfica foi realizada uma comparação do efeito de cada uma das conexões no desempenho da máquina elétrica (Naderi et al., 2020; Zhang et al., 2020; Jiang et al., 2020; Omar et al., 2017; Khan et al., 2017; Sulaiman et al., 2016). Sendo assim, a utilização da conexão série para as bobinas do enrolamento de campo também foi investigada. A tensão induzida para as configurações série e paralelo foram comparadas por

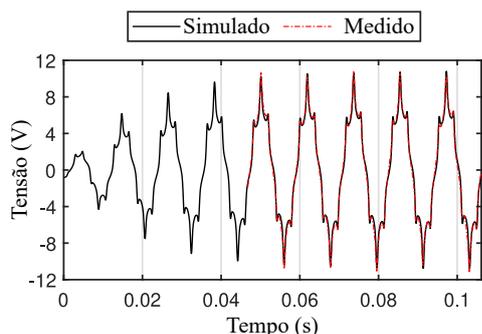


Figura 9. Tensão de fase induzida para corrente de campo $i_f = 4.8 A$ e conexão em paralelo das bobinas.

meio de simulação e os resultados estão apresentados na Figura 10.

A componente fundamental da tensão induzida com o circuito de campo alimentado em série apresentou uma amplitude 82,5% maior se comparado a conexão em paralelo, o que resulta em um aumento de potência de saída em 3,3 vezes.

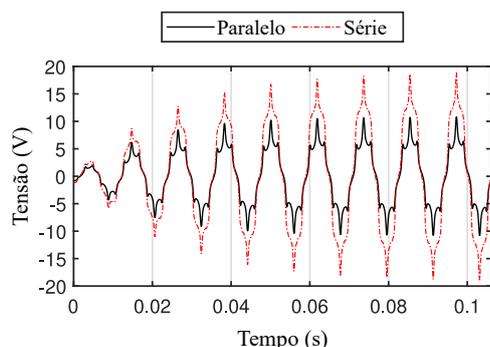


Figura 10. Comparação da tensão induzida para conexões em paralelo e em série das bobinas do circuito de campo.

5. CONCLUSÃO

Os motores de combustão interna continuarão a ser a tecnologia de propulsão predominante nos próximos anos, especialmente no cenário nacional. O aumento da disponibilidade de energia elétrica pode ser realizados por meios alternativos aos encontrados em veículos convencionais.

Foram apresentados os passos executados durante o processo de fabricação de uma máquina elétrica de fluxo comutado para aplicação *in-wheel* e implementação do conceito de *energy harvesting*. A prototipagem da máquina foi baseada nas melhores práticas encontradas durante a revisão bibliográfica.

Os protótipos em impressão 3D se mostraram efetivos para a definição dos processos de fabricação, acelerando o processo de prototipagem de novas configurações a um custo reduzido. Recomenda-se o emprego das técnicas de corte a laser ou eletroerosão para as chapas devido a sua versatilidade e possibilidade de alterações no projeto com custo reduzido. A realização do circuito de campo da máquina proposta, em paralelo ou série, tem forte

influência em seu desempenho deve ser avaliada com maior critério.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia elétrica da UFMG.

REFERÊNCIAS

- Ahmad, N., Khan, F., Ali, H., Ishaq, S., and Sulaiman, E. (2019). Outer rotor wound field flux switching machine for in-wheel direct drive application. *IET Electric Power Applications*, 13(6), 757–765. doi:10.1049/iet-epa.2018.5355.
- Aliakbari, A. and Vahidinasab, V. (2020). Optimal charging scheduling of solar plugin hybrid electric vehicles considering on-the-road solar energy harvesting. In *2020 10th Smart Grid Conference (SGC)*, 1–6. IEEE.
- Amara, Y., Hoang, E., Gabsi, M., Lécrivain, M., and Allano, S. (2005). Design and comparison of different flux-switch synchronous machines for an aircraft oil breather application. *European transactions on electrical power*, 15(6), 497–511.
- Azizov, A.S., Andreev, A., Kostel'ov, A., and Polonskii, Y.A. (2007). The improvement of the electrical insulation of high voltage electrical machines. *Russian Electrical Engineering*, 78(3), 109–112.
- Bali, M. and Muetze, A. (2018). The degradation depth of non-grain oriented electrical steel sheets of electric machines due to mechanical and laser cutting: A state-of-the-art review. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(1), 366–375.
- Barassa, E. (2019). *A construção de uma agenda para a eletromobilidade no Brasil: competências tecnológicas e governança*. Ph.D. thesis, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.
- Barbosa, T.P., Eckert, J.J., Roso, V.R., Pujatti, F.J.P., da Silva, L.A.R., and Gutiérrez, J.C.H. (2021). Fuel saving and lower pollutants emissions using an ethanol-fueled engine in a hydraulic hybrid passengers vehicle. *Energy*, 235, 121361.
- Baudouin, P., De Wulf, M., Kestens, L., and Houbaert, Y. (2003). The effect of the guillotine clearance on the magnetic properties of electrical steels. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 256(1-3), 32–40.
- Budynas, R.G. and Nisbeth, J.K. (2016). *Elementos de Máquinas de Shigley-10ª Edição*. McGraw Hill Brasil.
- Cardoso, D.S., Fael, P.O., and Espírito-Santo, A. (2020). A review of micro and mild hybrid systems. *Energy Reports*, 6, 385–390. doi:10.1016/j.egy.2019.08.077.
- Dallmann, T. and Façanha, C. (2017). International comparison of brazilian regulatory standards for light-duty vehicle emissions. *White Paper; International Council on Clean Transportation (ICCT): Washington, DC, USA*.
- Emura, M., Landgraf, F., Ross, W., and Barreta, J. (2003). The influence of cutting technique on the magnetic properties of electrical steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254, 358–360.
- Fraser, A. (2011). In-wheel electric motors. In *10th international CTI symposium*, 12–23.

- Gumbleton-Wood, D., Atkinson, G., Washington, J., and Sjöberg, L. (2017). The influence of production methods on the magnetic performance of electrical steels and soft magnetic composites. In *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 1–7. IEEE.
- Hofmann, M., Naumoski, H., Herr, U., and Herzog, H.G. (2015). Magnetic properties of electrical steel sheets in respect of cutting: Micromagnetic analysis and macro-magnetic modeling. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(2), 1–14.
- Jiang, W., Huang, W., Lin, X., Zhao, Y., and Zhu, S. (2020). Analysis of rotor poles and armature winding configurations combinations of wound field flux switching machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(9), 7838–7849.
- Khan, F., Sulaiman, E., and Ahmad, M.Z. (2017). Review of switched flux wound-field machines technology. *IETE Technical Review*, 34(4), 343–352.
- Li, T., Zhang, Y., Liang, Y., Ai, Q., and Dou, H. (2020). Multiphysics analysis of an axial-flux in-wheel motor with an amorphous alloy stator. *IEEE Access*, 8, 27414–27425.
- Lipo, T.A. (2017). *Introduction to AC machine design*. John Wiley & Sons.
- Liu, H., Ayat, S., Wrobel, R., and Zhang, C. (2019). Comparative study of thermal properties of electrical windings impregnated with alternative varnish materials. *The Journal of Engineering*, 2019(17), 3736–3741.
- Malaquias, A.C.T., Netto, N.A.D., Rodrigues Filho, F.A., da Costa, R.B.R., Langeani, M., and Baêta, J.G.C. (2019). The misleading total replacement of internal combustion engines by electric motors and a study of the brazilian ethanol importance for the sustainable future of mobility: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(12), 1–23.
- Mendonça, G.A., Galo, D.P., Sales, L.C.M., Cardoso Filho, B.J., and Maia, T.A. (2022). Design and experimental evaluation of an in-wheel flux-switching machine for light vehicle application. *Machines*, 10(8), 671.
- Mendonça, G.A. (2021). *Desenvolvimento de Nova Metodologia Para Análise de Desempenho de Máquinas Elétricas: Uma Contribuição Ao Método Maxwell-fourier*. Ph.D. thesis, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Mulholland, E., Miller, J., Braun, C., Jin, L., and Rodríguez, F. (2021). Quantifying the long-term air quality and health benefits from Euro 7/VII standards in Europe. Briefing paper, The International Council on Clean Transportation - ICCT.
- Naderi, P., Sharouni, S., and Heidary, M. (2020). A novel analysis on a new dc-excited flux-switching machine using modified mec method for ground power unit application. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(4), 1907–1915.
- Nguyen, H.Q., Jiang, J.Y., and Yang, S.M. (2016). Design of a 12-slot 7-pole wound-field flux switching motor for traction applications. In *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. IEEE. doi: 10.1109/icit.2016.7474938.
- Omar, M.F., Sulaiman, E., Jenal, M., Kumar, R., and Firdaus, R.N. (2017). Magnetic flux analysis of a new field-excitation flux switching motor using segmental rotor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(11), 1–4. doi:10.1109/tmag.2017.2703831.
- Ossart, F., Hug, E., Hubert, O., Buvat, C., and Billardon, R. (2000). Effect of punching on electrical steels: Experimental and numerical coupled analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36(5), 3137–3140.
- Poudel, B., Amiri, E., Rastgoufard, P., and Mirafzal, B. (2021). Toward less rare-earth permanent magnet in electric machines: A review. *IEEE Transactions on Magnetics*.
- Pyrhonen, Tapani Jokinen, V.H. (2013). *Design Rotating Electrical Mac*. John Wiley & Sons, 2nd edition.
- Ramesh, P. and Lenin, N. (2019). High power density electrical machines for electric vehicles—comprehensive review based on material technology. *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(11), 1–21.
- Schoppa, A., Louis, H., Pude, F., and Von Rad, C. (2003). Influence of abrasive waterjet cutting on the magnetic properties of non-oriented electrical steels. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 254, 370–372.
- Sulaiman, E.B., Khan, F., and Kosaka, T. (2016). Field-Excited Flux Switching Motor Design, Optimization and Analyses for Future Hybrid Electric Vehicles Using Finite Element Analyses. *Progress In Electromagnetics Research B*, 71, 153–166. doi:10.2528/pierb16092502.
- Tang, Y., Paulides, J.J., and Lomonova, E.A. (2014). Energy conversion in dc excited flux-switching machines. *IEEE Transactions on magnetics*, 50(11), 1–4.
- Tong, W. (2014). *Mechanical design of electric motors*. CRC press.
- Xie, L., Cai, S., Huang, G., Huang, L., Li, J., and Li, X. (2019). On energy harvesting from a vehicle damper. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25(1), 108–117.
- Yang, G., Cui, Z., and Song, L. (2014). Analysis of iron losses in induction motor with an improved iron-loss model. In *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 1–4. IEEE.
- Yang, K., Dong, D., Ma, C., Tian, Z., Chang, Y., and Wang, G. (2021). Stability control for electric vehicles with four in-wheel-motors based on sideslip angle. *World Electric Vehicle Journal*, 12(1), 42.
- Zhang, W., Wu, Z., Hua, W., and Zhu, Z.Q. (2020). Reduction of open-circuit dc winding induced voltage and torque pulsation in the wound field switched flux machine by stator axial pairing of tooth-tips. In *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, volume 1, 522–528. IEEE.
- Zhao, Y., Dang, W., Lu, Z., Wang, L., Si, L., and Zhang, M. (2018). A novel mica-based composite with hybrid aramid fibers for electrical insulating applications: largely improved mechanical properties and moisture resistance. *Polymer International*, 67(2), 204–211.
- Zhou, Y. and Zhu, Z. (2014). Comparison of wound-field switched-flux machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(5), 3314–3324.
- Zhu, Y., Wu, H., and Zhang, J. (2020). Regenerative braking control strategy for electric vehicles based on optimization of switched reluctance generator drive system. *IEEE Access*, 8, 76671–76682.