

ESTUDO E ANÁLISE DOS COMPONENTES ESSENCIAIS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS COM FOCO NO MOTOR DE TRACÇÃO E NO SISTEMA DE CONTROLE DO MOTOR

**Gabriel Vidotto Neves¹, Igor Walker Smaniotto², João Gabriel Ribeiro Damian³
Vlademir de Jesus Silva Oliveira⁴, Guilherme Braga do Vale⁵, Giovane Maia do Vale⁶**

¹ Universidade do Estado de Mato Grosso, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas, Engenharia Elétrica, Sinop, Brasil (gabriel.vidotto@unemat.br)
^{2,3,4,6} Universidade do Estado de Mato Grosso, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas, Engenharia Elétrica, Sinop, Brasil
⁵ Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, Brasil

Resumo: Neste trabalho se apresenta um estudo dos principais componentes do sistema de propulsão de veículos elétricos (VEs): o motor de tração e seu sistema eletrônico de controle. Foram analisados diferentes tipos de motores, eletrônica de potência baseada em carbeto de silício (SiC) e integração EMS–BMS. Na análise se considerou comparativamente dois modelos reais de karts elétricos e um projeto de protótipo acadêmico de 3 kW. Ao final, a configuração de maior eficiência energética é apresentada.

Palavras-chave: veículo elétrico; motor de tração; controle vetorial; eletrônica de potência; mobilidade sustentável.

INTRODUÇÃO

Imagine ganhar um carro de controle remoto que, ao invés de usar pilhas, possa ser carregado em uma tomada como um celular e que nunca precise de algum combustível derivado do petróleo. Essa, em resumo, é a ideia por detrás de um veículo elétrico (VE): um automóvel que utiliza eletricidade, armazenada em baterias, para se mover, utilizando, para tanto, um motor elétrico. Mas como um motor elétrico consegue mover um carro de grande massa com tanta eficiência e silêncio? É exatamente isso que este trabalho investiga.

Os veículos elétricos emergem como alternativas tecnicamente superiores aos automóveis com motores de combustão interna (MCI), diferenciando-se pela eficiência energética e pela redução do impacto ambiental. Brenna et al. (2020) documentaram que, no setor de transporte, os VEs apresentam os maiores ganhos relativos de eficiência energética quando alimentados por matrizes renováveis. Motores elétricos convertem 75–97% da energia da bateria em movimento, enquanto motores à gasolina atingem apenas 20–30% de eficiência (Bessenbach et al., 2020; Roshandel et al., 2021). Além disso, os VEs reduzem em até 50% as emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida completo, incluindo a geração de eletricidade (Hawkins et al., 2013).

No Brasil, a matriz elétrica conta com mais de 88% de eletricidade de origem renovável (ANEEL, 2024), ampliando os benefícios ambientais dos VEs. Por sua

vez, o mercado brasileiro de VEs cresceu, só em 2023, 87%, com mais de 94 mil unidades comercializadas (ANFAVEA, 2024).

Considerando esta vertente e sua importância, este trabalho, desenvolvido no âmbito do Projeto “Um Protótipo de Carro Elétrico” da UNEMAT/PRPPG, foca na compreensão teórica e prática dos motores de tração e de seus sistemas de controle eletrônico, contribuindo com a geração de *know-how* para o desenvolvimento de protótipos na Engenharia Elétrica.

Em âmbito mais amplo, o projeto contribui para o plano de ação global de proteção do planeta adotado pela ONU em 2015, a Agenda 2030. De modo mais específico o projeto vai ao encontro dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7 (Energia Limpa e Acessível), 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) da Agenda 2030 da ONU (ONU, 2015).

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada na pesquisa foi de natureza bibliográfica, qualitativa e analítica, estando estruturada em quatro etapas:

- Revisão sistemática em periódicos IEEE Transactions on Transportation Electrification, Automotive Innovation, Energies e Journal of Industrial Ecology (recorte 2001–2024), priorizando artigos com dados quantitativos experimentais;

- Coleta e organização de conteúdos técnicos do Projeto UNEMAT/PRPPG, incluindo especificações de componentes como, STM32G4, ACS712 e baterias Li-ion 48 V;
- Análise comparativa de arquiteturas de propulsão elétrica em três estratos: kart de competição FIA e-Karting Sênior (28 kW), kart recreativo Sodi RSX2 (10 kW) e projeto de protótipo acadêmico UNEMAT/PRPPG (3 kW);
- Elaboração de modelos matemáticos e cálculos ilustrativos com rigor técnico e linguagem acessível, por meio de equações fundamentais de eletromagnetismo e mecânica.

A seleção priorizou revisões sistemáticas em, por exemplo, Cai et al. (2021), Thirumalaivasan et al. (2023) e Prajapati et al. (2024), bem como, em relatórios de mercado, como os gerados por Yole (2024) e ANFAVEA (2024), que sintetizam o estado da arte em veículos elétricos e suas tecnologias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados e discutidos os principais resultados advindos da execução da pesquisa.

Motores Elétricos de Tração

Grosso modo, um motor elétrico é como um “ímã giratório”: a corrente elétrica que flui pelas bobinas (enrolamentos) cria um campo magnético que interage com ímãs no rotor, produzindo o torque — força de rotação — que, em última instância, move as rodas de um veículo. Cai et al. (2021) demonstraram em revisão abrangente que a escolha do tipo de motor define a eficiência, o custo e a confiabilidade do sistema de propulsão. Na pesquisa aqui descrita o foco recaiu sobre três tipos de motores: Motor de Indução Trifásico (IM), Motor Síncrono de Ímã Permanente (PMSM) e Motor Brushless DC (BLDC).

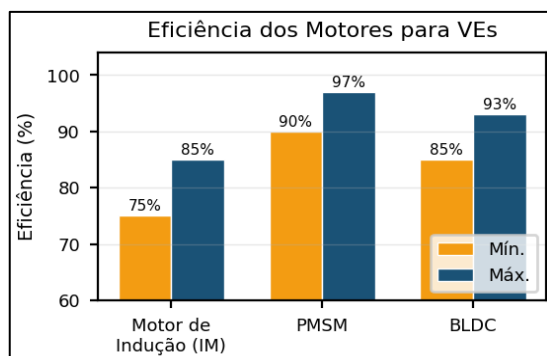


Figura 1. Comparação da eficiência dos motores para VEs. Fonte: Cai et al. (2021).

Uma característica fundamental de motores é a operação em dois regimes: torque constante (abaixo da velocidade base) e potência constante via enfraquecimento de campo (acima da velocidade base), eliminando a necessidade de

transmissão mecânica complexa. Nas Figuras 1 e 2 são apresentadas para fins de comparação, respectivamente, a eficiência e curvas torque×velocidade dos três tipos principais de motores citados anteriormente.

Na Figura 1, destaca-se a eficiência do PMSM e, na Figura 2, pode-se ver a sua superioridade em torque.

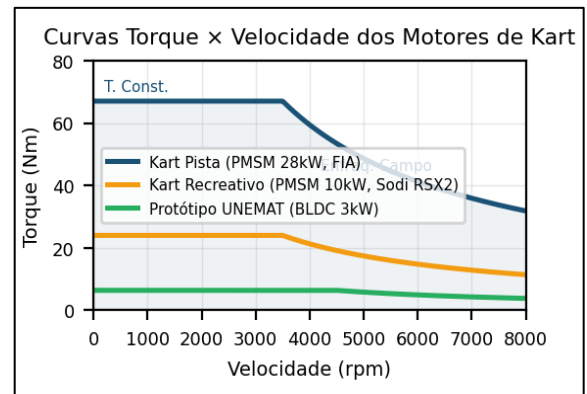


Figura 2. Curvas Torque × Velocidade: PMSM 28kW (Kart de competição FIA), PMSM 10kW (Sodi RSX2) e BLDC 3kW (Prot. UNEMAT). Fonte: elaborado pelos autores com base em Calligaris e Janzen (2021).

Tabela 1. Comparativo técnico entre tipos de motores para VEs.

Característica	IM	PMSM	BLDC
Eficiência (%)	75–85	90–97	85–93
Custo relativo	Baixo	Alto	Médio
Torque (Nm/kg)	4–8	8–25	5–12
Manutenção	Baixa	Mínima	Mínima
Ctrl. Complexidade	Média	Alta	Média
Terras Raras	Não	Alta (NdFeB)	Média
Exemplo em karts	IM (histórico)	Kart Compet. FIA 28kW	Kart Recr. Sodi RSX2

Fonte: Krishnan (2001); Cai et al. (2021); Prajapati et al. (2024); Calligaris e Janzen (2021).

Especifica-se que, karts elétricos de alta performance utilizam predominantemente PMSM ou BLDC com controle vetorial FOC (*Field Oriented Control*).

Na Tabela 1 encontram-se as principais características inerentes a cada um dos tipos de motores em foco. Da comparação dos valores e informações da tabela depreende-se a discrepância entre os tipos de motores



abarcados na pesquisa, com especial destaque para o PMSM.

Motor de Indução Trifásico (IM)

O motor de indução é robusto, de baixo custo e sem ímãs permanentes. Neles as correntes elétricas são induzidas no rotor em gaiola de esquilo por variações do campo magnético do estator, com eficiência de 75–85% (Krishnan, 2001). A velocidade síncrona do campo rotante é:

$$n_s = 120 \times \frac{f}{p} \quad (1)$$

Onde:

- f é a frequência (Hz); e
- p o número de polos.

Para 4 polos a 60 Hz tem-se $n_s = 1.800 \text{ rpm}$. O escorregamento s (slip), considerando a velocidade real/nominal medida no eixo do motor n , é dado por:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100\% \quad (2)$$

e, tipicamente é 1–5%.

Motor Síncrono de Ímã Permanente (PMSM)

O PMSM usa ímãs NdFeB (Neodímio-Ferro-Boro) ou SmCo (Samário-Cobalto) no rotor, eliminando a excitação externa e atingindo 90–97% de eficiência. É adotado em VEs de alto desempenho como o Tesla Model 3, VW ID.4 (Cai et al., 2021; Prajapati et al., 2024), e também em karts elétricos de competição, como o modelo da categoria FIA e-Karting Sênior que opera com 28 kW a 60 V, atingindo torque de pico de aproximadamente 67 Nm (Calligaris e Janzen, 2021). A potência mecânica do motor, dada em watts, é:

$$P = T \times \omega \quad (3)$$

Onde:

- T é o torque dado em Nm; e
- $\omega = 2\pi n/60$ é a velocidade angular (rad/s).

Para o kart de competição padrão FIA o torque e a velocidade angular são, respectivamente, $T_n^{\text{ax}} = 67 \text{ Nm}$ a 4.000 rpm e $\omega = 2\pi \times 4000/60 \approx 418,9 \text{ rad/s}$, chega-se a um valor de potência mecânica $P = 67 \times 418,9 \approx 28,1 \text{ kW}$, consistente com os 28 kW regulamentados (FIA, 2025).

A eficiência total do sistema (η_{total}) é:

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{motor}} \times \eta_{\text{inversor}} \quad (4)$$

Onde:

- η_{motor} é a eficiência do motor;
- η_{inversor} é a eficiência do inversor.

No caso do PMSM, a eficiência do motor é $\eta_{\text{motor}} = 95\%$ e a eficiência do inversor é $\eta_{\text{inversor}} = 97\%$. Logo a eficiência total é de $\eta_{\text{total}} \approx 92\%$. Ou seja, de cada 100 Wh da bateria, 92 Wh chegam ao eixo.

Motor Brushless DC (BLDC)

O BLDC usa sensores de efeito Hall ou algoritmos de estimativa de posição para comutação eletrônica, atingindo 85–93% de eficiência. Thirumalaivasan et al. (2023) revisaram fontes de ondulação de torque (torque ripple) em BLDCs para VEs, demonstrando que o FOC - Field-Oriented Control (em português: Controle Orientado a Campo) de malha fechada reduz o ruído acústico em até 35% vs. controle trapezoidal simples. Em karts recreativos como o Sodi RSX2, BLDCs e PMSMs de 10 kW/48 V representam a solução mais econômica e robusta para operação contínua em kartódromos de lazer (ERKC, 2025).

Eletrônica de Potência e Conversores

A eletrônica de potência é o “cérebro muscular” do VE, pois ela converte a corrente contínua (CC) da bateria em corrente alternada trifásica (CA) para o motor, usando chaves eletrônicas de alta velocidade, como o *Insulated-Gate Bipolar Transistor* - IGBT (em português: Transistor Bipolar de Porta Isolada) ou *Silicon Carbide* – SiC (em português: Carboneto de Silício). Monteiro et al. (2020) destacam a evolução das topologias de inversores para NPC (inversores multiníveis - 3 níveis), que reduzem THD (Distorção Harmônica Total) e perdas de comutação. A técnica SVPWM (*Space Vector Pulse Width Modulation* ou Modulação por Largura de Pulso por Vetor Espacial) oferece até 15% mais aproveitamento do barramento CC vs. SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation* ou Modulação por Largura de Pulso Senoidal) simples. Módulos de carbeto de silício (SiC) vêm substituindo os IGBTs de silício devido às suas propriedades superiores. Com *bandgap* (largura da banda proibida) de 3,26 eV, o SiC suporta campos elétricos de ruptura 10 vezes maiores, permitindo operar em tensões mais elevadas com menor espessura de camada dopada. Sua condutividade térmica é 3 vezes maior que a do silício, o que facilita a dissipação de calor e garante operação estável em temperaturas de até 200°C. Essas características, somadas à capacidade de chavear em frequências entre 16 e 24 kHz, resultam em perdas de comutação drasticamente reduzidas (até 70% menores que os IGBTs equivalentes), o que se traduz diretamente em inversores mais compactos, leves e eficientes — um fator decisivo para aumentar a autonomia dos veículos elétricos. A perda de potência por comutação em função da frequência é dada por:

$$P_{\text{sw}} = (E_{\text{on}} + E_{\text{off}}) \times f_{\text{sw}} \times \frac{V_{\text{DC}}}{V_{\text{ref}}} \quad (5)$$

Onde:

- P_{sw} é a potência dissipada por comutação;
- E_{on} e E_{off} são energias de comutação durante a entrada em condução (ligamento) e o bloqueio (desligamento), obtidas nos gráficos do *datasheet* do semicondutor;
- f_{sw} é a frequência de chaveamento (comutação);
- V_{DC} é a tensão de operação real do circuito (barramento CC)
- V_{ref} é a tensão de referência testada pelo fabricante no *datasheet* (onde E_{on} e E_{off} foram medidos).

O SiC reduz ($E_{on} + E_{off}$) em até 70% vs. IGBT equivalente, aumentando diretamente a autonomia. Roshandel et al. (2021) demonstraram que inversores SiC apresentam zonas de alta eficiência mais amplas nos mapas de eficiência, resultando em maior alcance.

Algoritmos e Arquiteturas de Controle

Os algoritmos de controle ajustam a energia elétrica entregue ao motor dezenas de milhares de vezes por segundo, como um “piloto automático” de alta precisão. Neste trabalho três estratégias de controle são abordadas: Controle Escalar V/f, Controle Vetorial FOC (*Field-Oriented Control*) e Controle Direto de Torque (DTC). A Figura 3 compara as respostas ao degrau de torque das três estratégias, e a Tabela 2 sintetiza seus parâmetros.

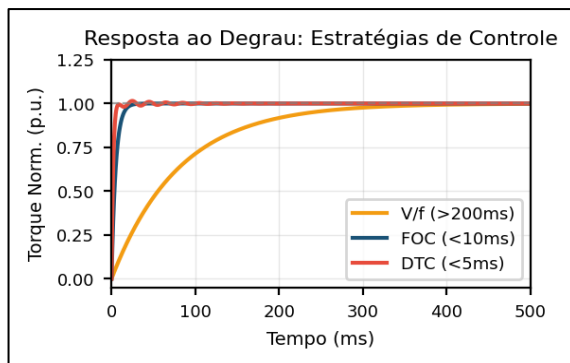


Figura 3. Resposta ao degrau de torque: V/f, FOC e DTC. Fonte: Prajapati et al. (2024); Thirumalaivasan et al. (2023).

Tabela 2. Comparativo: estratégias de controle para VEs.

Parâmetro	V/f	FOC	DTC
Precisão torque	Baixa	Alta	Muito Alt.
Tempo resp.	>200 ms	<10 ms	<5 ms
Complexidade	Simples	Alta	Muito Alta
Custo impl.	Baixo	Médio	Alto
THD	~15%	<2%	Variável
Uso em VEs	Não rec.	Padrão	Alta exig.
Efic. adicional	+0%	+8–12%	+10–14%

Fonte: Krishnan (2001); Boldea e Nasar (2016); Prajapati et al. (2024); Thirumalaivasan et al. (2023).

Conforme o apresentado nos gráficos da Figura 3 e nos parâmetros expressos na Tabela 2, dá-se destaque ao DTC.

Controle Escalar V/f

O V/f mantém constante a razão tensão/frequência. É simples e de baixo custo, mas apresenta resposta lenta ($> 200\text{ ms}$) e baixa precisão de torque. Krishnan (2001) considera-o inadequado para a tração principal em VEs modernos.

Controle Vetorial FOC (*Field-Oriented Control*)

O FOC decompõe matematicamente a corrente do motor em componentes independentes de torque (i_q) e fluxo (i_d) via Transformação de Park (eixos $d - q$), com resposta em menos de 10 ms . A Figura 6 (pág. seguinte) apresenta o diagrama de blocos do FOC. As equações de transformação de Clarke-Park são:

$$i_d = i_a \cdot \cos(\theta) + i_b \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (6)$$

$$i_q = -i_a \cdot \sin(\theta) - i_b \cdot \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) - i_c \cdot \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (7)$$

- i_a, i_b, i_c são correntes instantâneas das fases;
- θ é a posição angular do rotor ou fluxo magnético;
- i_d é a componente de corrente do eixo direto (alinhada ao fluxo);
- i_q é a componente de corrente do eixo em quadratura (ortogonal ao fluxo, gera torque).

O torque eletromagnético em um PMSM é:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \cdot p \cdot [\lambda_f \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q] \quad (8)$$

- T_e é o torque eletromagnético (em Newton-metros, $N \cdot m$);
- $\frac{3}{2}$ é a constante decorrente da transformação de Park e das variáveis trifásicas para o referencial de duas fases (dq);
- p é o número de pares de polos do motor;
- λ_f é fluxo concatenado pelos ímãs permanentes (em Weber, Wb)
- i_d, i_q são as correntes no eixo direto (d) e no eixo em quadratura (q), respectivamente (em Amperes, A);
- L_d, L_q são indutâncias nos eixos direto e em quadratura, respectivamente (em Henries, H)

A variante MTPA (*Maximum Torque Per Ampere*) minimiza a corrente do estator em 8–12% para o mesmo torque de saída (Prajapati et al., 2024), reduzindo perdas ôhmicas e elevando a autonomia.

Controle Direto de Torque (DTC)

O DTC controla diretamente torque e fluxo por tabelas de comutação, sem modulação PWM (*Pulse Width*

Modulation) convencional, com resposta inferior a 5 ms. Thirumalaivasan et al. (2023) demonstraram que o DTC com controladores preditivos (MPC) atenua eficazmente as ondulações de torque dos BLDCs. A variação de torque obedece à:

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{3}{2}\right) \cdot p \cdot \frac{[v_s \times \lambda_s - R_s \cdot |\lambda_s|^2]}{L_s} \quad (9)$$

- $\frac{dT}{dt}$ é a taxa de variação do torque eletromagnético em relação ao tempo;
- p é o número de pares de polos do motor;
- v_s é o vetor espacial de tensão do estator;
- λ_s é o vetor espacial de fluxo concatenado do estator;
- R_s é a resistência do enrolamento do estator;
- L_s é a indutância própria do estator;
- $\times$ denota o produto vetorial (que calcula a magnitude do torque baseada no alinhamento entre tensão e fluxo);
- $|\lambda_s|^2$ é a norma ao quadrado do vetor de fluxo do estator.

Gerenciamento de Energia (EMS) e Frenagem Regenerativa

O EMS supervisiona continuamente o fluxo de energia entre bateria, inversor e motor, ajustando o estado de carga (ou SOC - *State of Charge*), temperatura e demanda de torque — como o “gerente” de energia do VE. O BMS monitora tensão, corrente, temperatura e o estado de saúde (ou SOH - *State of Health*) das células de lítio. Em sistemas premium, a comunicação EMS-BMS via Ethernet Automotive tem latência menor que 2 ms (Monteiro et al., 2020). Roshandel et al. (2021) enfatizam que a faixa ideal de temperatura das células é de 20–45°C, onde eficiência e longevidade são máximas.

A frenagem regenerativa converte energia cinética em elétrica durante desaceleração, devolvendo energia à bateria. A energia recuperada por frenagem, dada em joule, é estimada por:

$$E_{reg} = \eta_{reg} \times \left(\frac{1}{2}\right) \times m \times \Delta v^2 \quad (10)$$

Onde

- $\eta_{reg} \approx 0,65 - 0,75$ é a eficiência regenerativa;
- m é a massa do veículo (kg); e
- Δv é a variação de velocidade (m/s).

Por exemplo, para $m = 1.500 \text{ kg}$ reduzindo de 60 km/h para 0 com $\eta_{reg} = 0,70$, tem-se:

$$E_{reg} = 0,70 \times \left(\frac{1}{2}\right) \times 1500 \times 16,7^2 \approx 146 \text{ kJ}$$

ou 0,041 kWh por frenagem.

Brenna et al. (2020) confirmam que a recuperação em frenagem amplia a autonomia em 15–35%, dependendo do cenário.

A Figura 4 ilustra a matriz energética brasileira e induz à conclusão favorável a respeito da adoção de VEs. Por sua vez, depreende-se da Figura 5, que a frenagem regenerativa contribui positivamente esta realidade.

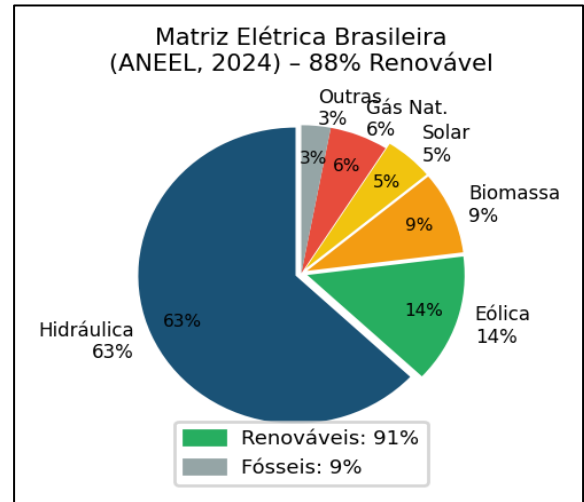


Figura 4. Matriz elétrica brasileira (ANEEL, 2024): 88% renovável, ampliando benefícios dos VEs no Brasil.

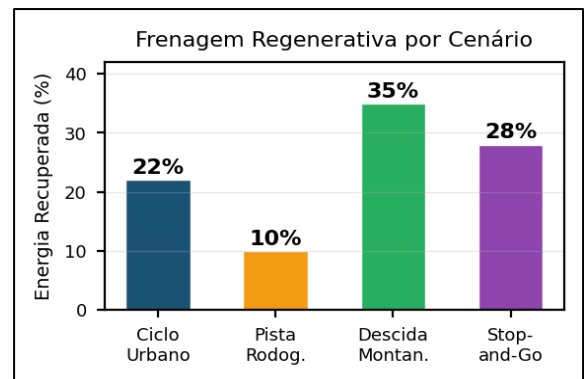


Figura 5. Recuperação de energia por frenagem regenerativa por cenário. Fonte: Brenna et al. (2020).

Análise Comparativa de Arquiteturas de Propulsão

A exemplo de Calligaris e Janzen (2021), este trabalho adota dois modelos conceituais reais de karts elétricos para a análise comparativa de arquiteturas de propulsão: o “kart de competição”, baseado na regulamentação FIA e-Karting Sênior, aprovada em outubro de 2025 (FIA, 2025), e o “kart recreativo”, cujo *benchmark* é o Sodi RSX2 — referência do segmento de locação elétrica (ERKC, 2025). O terceiro estrato é o protótipo acadêmico UNEMAT/PRPPG de 3 kW. Cabe lembrar que, já na Figura 2 comparou as curvas Torque × Velocidade dos três modelos em forco. Aqui, se apresenta, na Figura 5, o gráfico comparativo que propicia a análise de Custo Total de Propriedade (TCO) dos modelos de karts elétricos vs. seus equivalentes a combustão. A partir da análise do referido gráfico, pode-se perceber a superioridade dos karts elétricos com relação ao TCO. Ou seja, se em um

primeiro momento os karts com motores de combustão interna são economicamente viáveis, ao longo do tempo, o gráfico do TCO mostra a superioridade dos modelos elétricos. Outro aspecto digno de nota é que a paridade entre os karts de competição ocorre a ~2,2 anos e a paridade para os karts recreativos ocorre a ~2,5 anos. A partir destes instantes o TCO dos karts a combustão se torna mais elevado que dos seus respectivos homólogos elétricos.

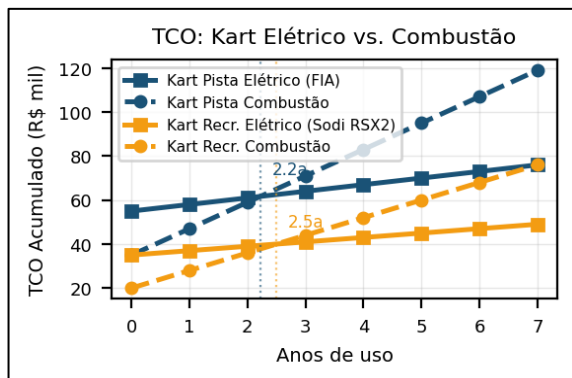


Figura 5. TCO acumulado: karts elétricos vs. Karts a combustão (competição e recreativo). Fonte: elaborado pelos autores.

Na Tabela 3 são apresentadas, em paralelo, as configurações dos três karts elétricos, que estão no foco deste trabalho.

Observa-se na referida tabela que o kart de competição FIA é equipado com PMSM de 28 kW, 60 V, com células NMC 21700 em configuração 17s5p (85 células, 4,0 kWh), BMS distribuído com protocolo CAN e balanceamento ativo, além de resfriamento líquido para suportar corrente contínua de 445 A (Calligaris e Janzen, 2021). A dissipação térmica estimada por célula NMC 21700 ($R \approx 20 \text{ m}\Omega$) é de $Q = I^2 \times \frac{R}{N} \approx (50)^2 \times \frac{0,020}{85} \approx 0,59 \text{ W/célula}$, justificando o resfriamento líquido com placas de alumínio. O kart recreativo Sodi RSX2 utiliza motor de 10 kW/48 V, células LFP prismáticas 15s5p (75 células, 2,5 kWh), BMS modular com balanceamento passivo e ventilação forçada, que se mostrou uma solução economicamente acessível para kartódromos de lazer (ERKC, 2025).

A configuração adotada para o protótipo de 3 kW se justifica pela comparação com os dois *benchmarks* reais apresentados na Tabela 3. Diferentemente do kart de competição FIA (28 kW, PMSM com SiC/IGBT, resfriamento líquido e BMS distribuído via CAN), cujos requisitos regulatórios de alta dinâmica demandam componentes de custo elevado, o protótipo UNEMAT/PRPPG segue a filosofia do kart recreativo Sodi RSX2 — uso contínuo, sem fins competitivos e foco

em custo-benefício —, porém em escala ainda mais reduzida (3 kW vs. 10 kW), compatível com o orçamento do projeto acadêmico. Por essa razão optou-se por motor BLDC com inversor IGBT convencional (ao invés vez de SiC), controle FOC implementado em DSP de médio porte (STM32G4) e BMS modular simplificado, priorizando a validação experimental dos algoritmos de controle em detrimento do desempenho de pico.

Tabela 3. Comparativo de arquiteturas de propulsão: Kart Competição FIA, Kart Recreativo Sodi RSX2 e Protótipo UNEMAT/PRPPG.

Parâmetro	Kart Compet. (FIA)	Kart Recr. (Sodi RSX2)	Prot. UNEMAT
Referência	FIA e-Karting Sênior	Sodi RSX2 / ERKC	UNEMAT/PRPPG
Motor	PMSM 28 kW	PMSM /BLDC 10 kW	BLDC 3 kW
Tensão / Corrente	60V / 445A	48V / 208A	48V / 69A
Torque pico	~67 Nm	~24 Nm	~6,4 Nm
Semicond.	SiC / IGBT	Si-MOSFET	IGBT conv.
Controle motor	FOC DSP mult.	FOC simplif.	FOC STM32G4
Resp. torque	< 10 ms	30 – 50 ms	80 – 100 ms
Células bat.	NMC 21700 (17s5p)	LFP pris. (15s5p)	Li-ion 48V/20 Ah
Energia bat.	4,0 kWh	2,5 kWh	0,96 kWh
BMS	Distrib. CAN ativo	Modular passivo	Modular 10 cél.
Térmico	Resfr. líquido	Ventilação forç.	Convecção nat.
Autonomia	~20 min (compet.)	~30 – 45 min (lazer)	~38 min (50% carga)

Fonte: Calligaris e Janzen (2021); FIA (2025); ERKC (2025); Yole (2024).

Na Figura 6 e na Tabela 4 são detalhados, respectivamente, o diagrama FOC e as especificações do protótipo UNEMAT/PRPPG.

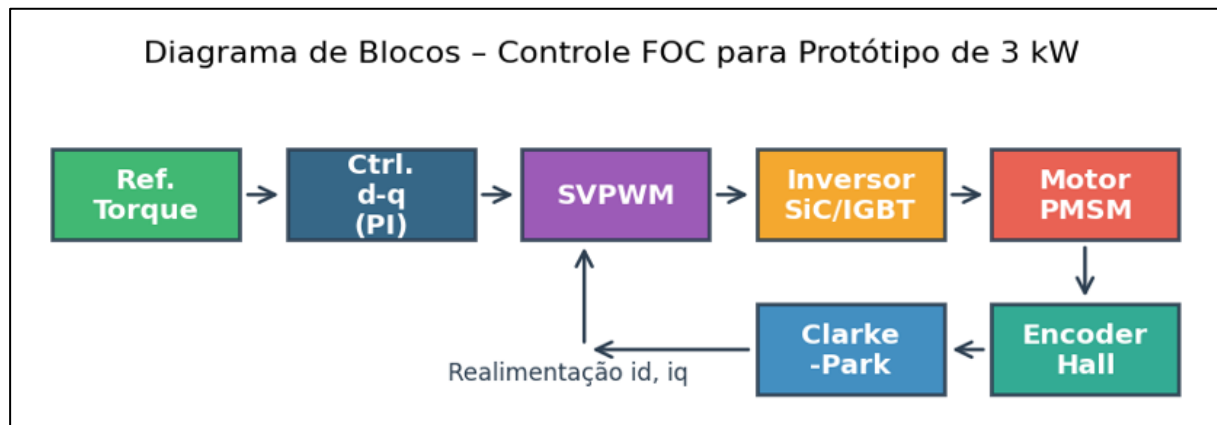


Figura 6. Diagrama de blocos do controle FOC para o protótipo de 3 kW (UNEMAT/PRPPG). Fonte: elaborado pelos autores com base em Cai et al. (2021).

Tabela 4. Especificações técnicas do protótipo acadêmico de 3 kW.

Componente	Especificação	Justificativa
Motor BLDC/PMSM	3 kW, 48 V, 4.500 rpm	Melhor custo-benefício para validação experimental
DSP	STM32G4 (170 MHz, 2 núcleos)	SDK Motor Control FOC/DTC nativo (ST)
Inversor	IGBT, 48 V / 80 A	Compatível com frequência de chaveamento ≤ 16 kHz
Sensor de corrente	ACS712 (± 30 A)	Precisão $\pm 1,5\%$ — adequada para malha FOC
Encoder	1.000 PPR (incremental)	Resolução de $0,36^\circ$ por pulso para controle vetorial
Bateria	Li-ion 48V/20Ah (960 Wh)	BMS com 10 células em série
Comunicação BMS	CAN Bus 500 kbit/s	Latência < 2 ms para supervisão EMS–BMS
Frenagem regenerativa	Recuperação estimada $\approx 18\%$	Estimativa para ciclo típico de operação do protótipo

Fonte: elaborado pelos autores com base em Cai et al. (2021) e Pedotti (2019).

Cálculos do Protótipo de 3 kW

Com motor de 3 kW, 48 V e $\eta = 90\%$, a corrente máxima no barramento é:

$$I = \frac{P}{V \times \eta} = \frac{3000}{48 \times 0,90} \approx 69,4 \text{ A} \quad (11)$$

O torque máximo a 4.500 rpm, considerando a velocidade angular $\omega = 2\pi \times \frac{4500}{60} = 471,2 \text{ rad/s}$ é:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{3000}{471,2} \approx 6,4 \text{ Nm} \quad (12)$$

Para o tempo de operação estimado (t) do protótipo com bateria de 960 Wh, adotando carga média típica de 50% da potência nominal:

$$t = \frac{E_{bat}}{P_{média}} = \frac{960}{3000 \times 0,50} \approx 0,64 \text{ h} \approx 38 \text{ min} \quad (13)$$

Pedotti (2019) fundamentou o uso de dispositivos IoT embarcados para diagnóstico de máquinas rotativas, diretamente aplicável ao monitoramento via CAN Bus e interface web do protótipo.

Impacto Ambiental e Econômico

Hawkins et al. (2013) demonstraram redução de até 50% nas emissões de CO₂ de ciclo de vida dos VEs; no Brasil, com a matriz renovável, esse benefício pode superar 70%. Como evidenciado na Figura 5, a paridade de TCO entre o kart elétrico e o kart a combustão ocorre em aproximadamente 2,2 anos (competição) e 2,5 anos (recreativo), tornando a eletrificação economicamente favorável mesmo em horizontes curtos. El-Refaie (2023) apresenta tecnologias emergentes — motores de fluxo axial, de relutância comutada (SRM) e in-wheel — que prometem eliminar completamente a transmissão mecânica. O projeto contribui diretamente para os



ODS 7 (energia limpa), ODS 11 (cidades sustentáveis) e ODS 13 (ação climática) da Agenda 2030 da ONU (ONU, 2015).

CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que o PMSM aliado ao controle FOC-MTPA se consolida como a solução de maior eficiência e desempenho para karts elétricos e VEs modernos. Para o kart de competição FIA (28 kW), o PMSM com FOC distribuído e BMS CAN ativo é a combinação que atende aos requisitos regulatórios de alta dinâmica. Para o kart recreativo Sodi RSX2 (10 kW), o FOC simplificado com BMS modular proporciona confiabilidade e custo adequados à operação contínua (Cai et al., 2021; Prajapati et al., 2024; Calligaris e Janzen, 2021). A redução de 8–12% na corrente do estator via MTPA e a resposta de torque em menos de 10 ms garantem simultaneamente eficiência e dinâmica de tração.

A eletrônica de potência baseada em SiC (Yole, 2024) tem papel central na evolução da mobilidade elétrica: a redução de até 70% nas perdas de comutação vs. IGBTs traduz-se em maior autonomia. A integração EMS-BMS (Monteiro et al., 2020; Brenna et al., 2020) é determinante para a eficiência energética e longevidade das baterias; a frenagem regenerativa amplia a autonomia em 15–35%.

A escolha da configuração do protótipo de 3 kW — motor BLDC, inversor IGBT convencional e BMS modular simplificado — reflete diretamente o escopo recreativo e o orçamento do projeto acadêmico, em contraste com os requisitos de alta dinâmica e o custo elevado do kart de competição FIA. Essa opção prioriza a validação experimental dos algoritmos de controle em detrimento do desempenho de pico, alinhando-se ao propósito didático e de baixo custo que orienta o desenvolvimento do protótipo UNEMAT/PRPPG.

Os cálculos apresentados demonstram que com equações do básicas do ensino médio é possível dimensionar os componentes principais de um sistema de propulsão elétrica. Para o protótipo de 3 kW, os parâmetros projetados — 89 – 92% de eficiência, tempo de operação estimado de ~38 min (a 50% de carga) e resposta de 80 – 100 ms — são adequados para validação experimental dos algoritmos FOC e DTC em plataforma STM32G4.

Entende-se que, a convergência tecnológica — SiC acessível, FOC *sensorless* em microcontroladores de médio porte e baterias de estado sólido — democratizará soluções de alta eficiência (Roshandel et al., 2021). Como trabalho futuro, prevê-se a implementação e validação experimental do protótipo com ensaios de frenagem regenerativa e comparação quantitativa entre FOC e DTC em bancada de testes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UNEMAT, UNICAMP e à FAPEMAT pelo apoio financeiro por meio das bolsas PROBIC (Edital N° 009/2025 – UNEMAT/PRPPG), e ao Prof. Dr. Giovane Maia do Vale pelo acompanhamento técnico e científico.

REFERÊNCIAS

- ANFAVEA. Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2024. São Paulo: ANFAVEA, 2024.
- ANEEL. Matriz Elétrica Nacional 2024. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2024.
- BESSENBACH, N. et al. Energy Efficiency of Electric Vehicles: A Systematic Literature Review. *Energies*, v. 13, n. 12, p. 3225, 2020. DOI: 10.3390/en13123225.
- BOLDEA, I.; NASAR, S. A. *Electric Drives*. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- BRENNAN, M. et al. A Review on Energy Efficiency in Three Transportation Sectors: Railways, Electrical Vehicles and Marine. *Energies*, v. 13, n. 9, p. 2378, 2020.
- CAI, W. et al. Review and Development of Electric Motor Systems and Electric Powertrains for New Energy Vehicles. *Automotive Innovation*, v. 4, n. 1, p. 3-22, 2021.
- CALLIGARIS, J. V. B.; JANZEN, F. C. Dimensionamento e seleção de baterias e BMS para karts elétricos: modelos de competição e recreativo. *Energias Renováveis e Mobilidade Elétrica*, 2021.
- EL-REFAIE, A. M. Motors for Electric Vehicles: A Review of the State of the Art and Emerging Technologies. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, v. 9, n. 2, p. 2188-2204, 2023.
- ERKC – Electric Racing Kart Championship. Sodi RSX2 Electric Kart Technical Specifications. 2025. Disponível em: <https://www.erkc.eu>.
- FIA – Fédération Internationale de l'Automobile. e-Karting Sênior Technical Regulations. Homologado pelo Conselho Mundial do Desporto Motorizado, outubro de 2025. Paris: FIA, 2025.
- HAWKINS, T. R. et al. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, v. 17, n. 1, p. 53-64, 2013. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x.
- KRISHNAN, R. *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*. Upper Saddle River: Pearson Education, 2001.



MONTEIRO, V. et al. A Review on Power Electronics Technologies for Electric Mobility. *Energies*, v. 13, n. 23, p. 6343, 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2026.

PEDOTTI, L. A. S. Dispositivo IoT de baixo custo para Diagnóstico de Falhas em Máquinas Rotativas. TCC (Engenharia Elétrica) – UNICAMP, 2019.

PRAJAPATI, A. M. et al. Advanced Control Strategies of PMSM for Electric Vehicle Applications. *Journal of Electrical Systems*, v. 20, n. 11s, p. 1139-1149, 2024.

ROSHANDEL, E. et al. Losses in Efficiency Maps of Electric Vehicles: An Overview. *Energies*, v. 14, n. 22, p. 7805, 2021.

THIRUMALAIVASAN, R. et al. Critical Review on Torque Ripple Sources and Mitigation Control Strategies of BLDC Motors in Electric Vehicle Applications. *IEEE Access*, v. 11, p. 115699-115739, 2023.

YOLE DÉVELOPPEMENT. Power SiC 2024: Materials, Devices, and Application Report. Lyon: Yole Group, 2024.