

## FUNDAMENTOS DE MOTORES ELÉTRICOS DE ALTO DESEMPENHO PARA ELETRIFICAÇÃO DOS MEIOS DE TRANSPORTES

Amanda Vitória da Rosa, Sérgio Vidal Garcia Oliveira

### INTRODUÇÃO

A eletrificação dos meios de transporte é uma tendência crescente, impulsionada pela necessidade de reduzir emissões de carbono e aumentar a eficiência energética. Neste cenário, os motores elétricos de alto desempenho assumem um papel central, sendo essencial para a viabilidade e competitividade dos veículos elétricos. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi o de realizar um estudo sobre estes motores, abordando suas características fundamentais, as metodologias de projeto e a aplicação prática de ferramentas de simulação para a análise de seu desempenho.

### DESENVOLVIMENTO

A metodologia adotada nesse projeto foi dividida em três etapas: fundamentação teórica, simulações computacionais e aplicação experimental. Inicialmente, fez-se o estudo das referências: [1] e [2]. Ainda nesta temática, alguns artigos foram estudados, como o [3], que faz uma comparação entre máquinas síncronas e assíncronas no cenário mundial da eletrificação dos veículos. Com base no primeiro livro citado, foram feitas simulações, utilizando *softwares* como PSIM e MatLab/Simulink, dos motores elétricos já utilizados em veículos elétricos e ainda alguns modelos comerciais utilizados na indústria. O objetivo desta etapa foi analisar o comportamento de cada topologia de motor. Como estudo adicional, foi estudado o pacote de controle de motor P-NÚCLEO-IHM03 da fabricante STMicroelectronics, buscando-se ampliar o entendimento da temática agora do ponto de vista das técnicas de controle de motores em acionamentos elétricos. Nele, é possível escolher entre dois modos de controle (FOC ou 6-step) e alterar parâmetros como o *duty-cycle* e os ganhos do controlador e observar o comportamento do motor dada essas alterações.

### RESULTADOS

Inicialmente, as simulações dos diferentes motores elétricos no PSIM e MatLab/Simulink permitiram compreender o comportamento de cada motor visto na teoria. Sendo assim, analisou-se o desempenho dos motores após a implementação do controle, notando o tempo em que cada motor com seu respectivo controle demorava para alcançar a velocidade de referência, bem como a alteração de carga afetava o sistema. Além disso, observou-se as ondulações de torque (*ripple*) em regime permanente e a corrente consumida da fonte para uma mesma condição de operação. Na Figura 1 é ilustrado o esquemático de acionamento de um motor de indução trifásico por meio de um inversor de tensão com uma técnica de controle vetorial via simulação no *software* PSIM, onde foram analisados a velocidade, em rpm, o torque, em N·m, e a corrente consumida, em *ampere*, em duas diferentes condições para um motor de indução. Na primeira análise foi alterado a fonte DC, na qual notou-se que com uma tensão muito inferior, a velocidade de referência não foi alcançada e o torque apresentou uma menor ondulação. Isso se dá visto que com uma tensão reduzida pela metade, a força contra eletromotriz gerada pelo motor atinge um valor próximo à tensão de entrada em uma rotação mais baixa, impedindo que o motor acelere até a referência. Consequentemente, a menor tensão resulta em menores ondulações de corrente, o que se reflete diretamente em um torque com menor ondulação. Também com os mesmos parâmetros analisados comparou-se o momento de inércia dos motores, sendo um com  $0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  e outro com  $0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ . Observou-se que

o motor com maior inércia levou mais tempo para atingir a velocidade de referência, porém apresentou menor ondulação ao atingi-la, também notou-se um maior pico de torque. Tal fato decorre porque uma inércia maior exige mais torque e, portanto, mais corrente, para produzir a mesma aceleração angular. Em ambos os casos, observa-se uma pequena diferença na corrente, a qual não altera seus valores máximos e mínimos, apenas o tempo que permanece nesses picos, isso se deve em razão do controle vetorial, que impõem limites máximos e mínimos para a corrente. Essas análises também foram feitas para outros motores, como o BLDC, motor de ímãs permanentes e de relutância comutada. Na parte experimental com o kit P-NÚCLEO-IHM03, a alteração dos parâmetros de controle influenciou, como previsto, na resposta do motor. Ao variar o ganho proporcional e integral no modo de controle 6-step, notou-se uma alteração significativa na resposta transitória de velocidade do motor e, ao colocar um ganho muito alto, observou-se um *overshoot* muito elevado, o que levou ao desligamento do motor. Outros parâmetros também foram alterados, mas seus efeitos foram mais sutis.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer das simulações, houve a tentativa de comparar os diferentes tipos de motores via simulação. Entretanto, para isso, estes deveriam operar com a mesma potência nominal, o que exigiu o levantamento de parâmetros de modelos comerciais equivalentes. Porém, ao alterar os parâmetros de cada motor, deve-se também reajustar os ganhos do seu controlador, os quais ao serem alterados não alcançaram o desempenho desejado, uma vez que a resposta de velocidade dos modelos não convergiu para o valor de referência estabelecido. Devido a esta problemática, uma comparação direta e válida entre os motores não pôde ser concluída. Todavia, a análise e estudo das características fundamentais e as metodologias de projeto dos motores elétricos, bem como a aplicação prática de ferramentas de simulação para a análise de seu desempenho foram realizadas como o esperado, alcançando, assim, o objetivo do presente projeto.

**Palavras-chave:** Simulação computacional; motores elétricos; acionamento elétrico.

## ILUSTRAÇÕES

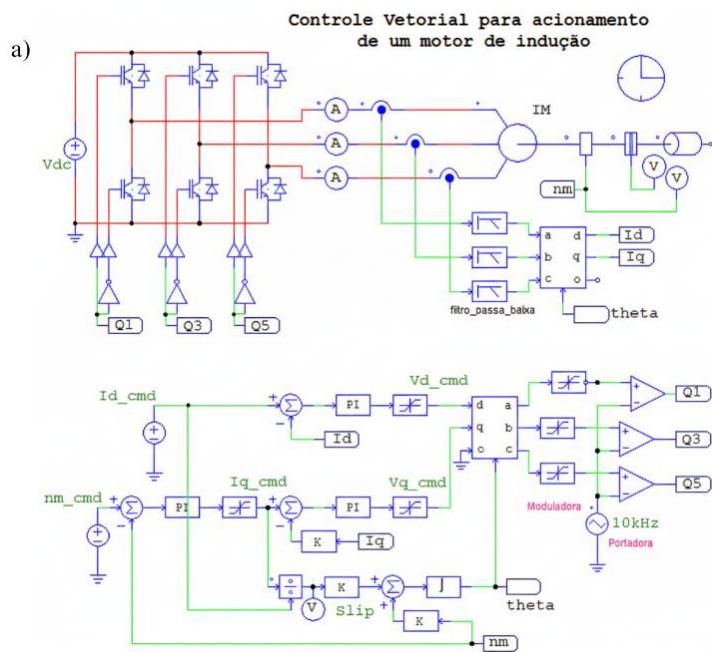


Figura 1. Simulação no software PSIM do motor de indução com controle vetorial.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHAU, K. T. **Electric Vehicle Machines and Drives**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2015.
- [2] ROSU, M. et al. **Multiphysics simulation by design for electrical machines, power electronics and drives**. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2018.
- [3] NICOLETTI, L.; TAMBALO PAPARELLI, J. M.; BUENO, A. F. Máquinas síncronas com ímãs permanentes e motores assíncronos – o futuro da mobilidade urbana. **Revista Liberato**, v. 23, n. 39, p. 99–110, 30 jun. 2022.

---

## DADOS CADASTRAIS

---

**BOLSISTA:** Amanda Vitória da Rosa

**MODALIDADE DE BOLSA:** PIBIC/CNPq (IC)

**VIGÊNCIA:** 09/2024 a 08/2025 – Total: 12 meses

**ORIENTADOR(A):** Sérgio Vidal Garcia Oliveira

**CENTRO DE ENSINO:** CCT

**DEPARTAMENTO:** Departamento de Engenharia Elétrica

**ÁREAS DE CONHECIMENTO:** Engenharias / Engenharia Elétrica

**TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA:** Acionamentos elétricos integrados - Parte 2.

**Nº PROTOCOLO DO PROJETO DE PESQUISA:** NPP3155-2021