



## Simulação do sistema de acionamento e controle de uma máquina síncrona de ímã permanente utilizando o Matlab/Simulink

### Simulation of the drive and control system of a permanent magnet synchronous machine using Matlab/Simulink.

Gabriel Fernando Palácio de Sá<sup>1</sup>, Wesley Angelino de Souza<sup>2</sup>, Alessandro Goedel<sup>3</sup>,  
Marcelo Favoretto Castoldi<sup>4</sup>

#### RESUMO

Cada vez mais presente nas indústrias, as máquinas síncronas de ímãs permanente (MSIP) se destacam por serem eficientes e por possuírem uma resposta dinâmica melhor em comparação com os motores assíncronos convencionais. O trabalho empregará simulações em software, complementadas por análises e testes, visando identificar as melhores técnicas e parâmetros para otimizar o controle e o desempenho da máquina síncrona de ímã permanente em condições operacionais. O intuito é conhecer as grandezas envolvidas no acionamento desta máquina, para futuro dimensionamento de uma bancada experimental para detecção de falhas em máquinas síncronas de ímãs permanente.

**PALAVRAS-CHAVE:** controle; motor síncrono de ímã permanente; simulação.

#### ABSTRACT

Increasingly present in industries, permanent magnet synchronous machines (MSIP) stand out for being efficient and having a better dynamic response compared to conventional asynchronous motors. The work will employ software simulations, complemented by analysis and testing, aiming to identify the best techniques and parameters to optimize the control and performance of the permanent magnet synchronous machine under operational conditions. The aim is to understand the magnitudes involved in activating this machine, for future sizing of an experimental bench for detecting faults in synchronous permanent magnet machines.

**KEYWORDS:** control; permanent magnet synchronous motor; simulation.

## INTRODUÇÃO

As máquinas síncronas de ímãs permanentes (MSIP), tem se tornado muito usuais nas últimas décadas, podendo ser empregadas em diversas aplicações e diversas áreas. O que mais chama atenção neste tipo de máquina é a relação do volume do torque produzido pelo motor, com a alta eficiência que esse tipo de máquina apresenta. O motor síncrono de ímã permanente possui esse nome pois os enrolamentos de campo são substituídos por ímãs permanentes (FITZGERALD et al, 2014).

O MSIP possui uma sincronia com a frequência da rede elétrica durante sua operação, possuindo uma eficiência notável e uma resposta dinâmica melhor em comparação com os motores assíncronos convencionais. Seu rotor é composto por ímãs permanentes, produzindo um campo magnético constante, eliminando a necessidade de

<sup>1</sup> Bolsista PIVIC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: gabriel.231002@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 4811311034306041.

<sup>2</sup> Docente no Departamento Acadêmico de Elétrica (DAELE). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: wesleyangelino@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8594457321079718.

<sup>3</sup> Docente no Departamento Acadêmico de Elétrica (DAELE). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: agoedel@utfpr.edu.br. ID Lattes: 1920650157123774.

<sup>4</sup> Docente no Departamento Acadêmico de Elétrica (DAELE). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: marcastoldi@utfpr.edu.br. ID Lattes: 6178029384175205.

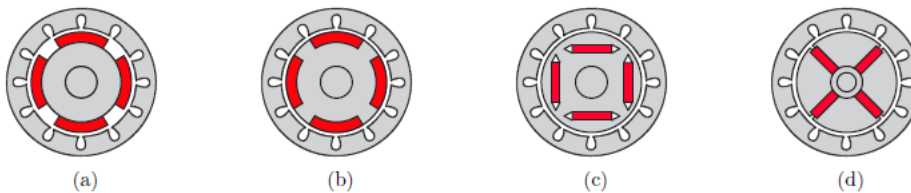
fontes externas de excitação, como enrolamentos de campo, fazendo com que não haja perdas no cobre, reduzindo as perdas de energia, e aumentando a eficiência do sistema. O torque gerado pelo MSIP é composto pela interação da força magnemotriz (através das correntes nos enrolamentos do estator), e pelas forças eletromagnéticas do rotor (produzidas pelo fluxo magnéticos dos ímãs).

As montagens dos motores síncronos de ímãs permanentes podem ser classificadas de quatro tipos diferentes, com relação à posição dos seus ímãs permanentes, sendo (CASTRO, 2017):

- a) motor síncrono de ímã permanente na superfície do rotor;
- b) motor síncrono de ímã permanente semienterrado no rotor;
- c) motor síncrono de ímã permanente enterrado transversalmente;
- d) motor síncrono de ímã permanente enterrado longitudinalmente.

Na Figura 1 são exibidos os quatro tipos de MSIP.

Figura 1 - Diferentes tipos de arranjos dos ímãs permanentes no rotor.



Fonte: Castro (2017).

Em alguns casos, o MSIP possui enrolamentos auxiliares que facilitam o arranque do motor, já que o motor parte como um motor de indução, até atingir uma velocidade próxima à velocidade síncrona. Depois, o MSIP é colocado em sincronismo pela ação dos torques de relutância e eletromagnético. Entretanto, os enrolamentos auxiliares diminuem a eficiência, a densidade de potência, a relação torque/inércia e a resposta dinâmica do MSIP (GARCIA, 2015).

Esse trabalho tem como objetivo realizar a simulação de um acionamento contendo uma máquina síncrona através do software Matlab/Simulink para o desenvolvimento futuro da instrumentação para monitoramento desta máquina.

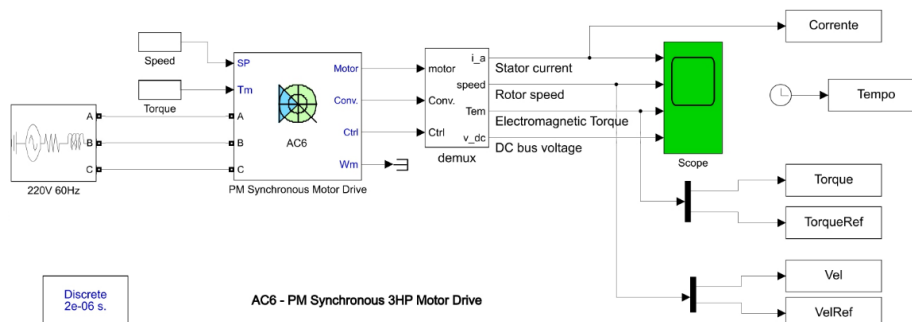
## METODOLOGIA

A princípio, foram realizados estudos teóricos sobre as máquinas síncronas com o objetivo de compreender o funcionamento e métodos de acionamentos. Para as simulações foi utilizado o programa Matlab/Simulink, que é um software de simulações de alta performance, com o objetivo de obter e analisar os sinais de corrente, velocidade e torque de um MSIP.

Para realizar os experimentos foi utilizado o motor do bloco AC6 – PM Synchronous 3HP Motor Drive, disponível na biblioteca Simscape do Matlab/Simulink. Com base no método de controle vetorial, este bloco representa uma malha de controle de velocidade que fornece o conjugado de referência do MSIP. A simulação utilizada para realizar os experimentos é exibida na Figura 2.

Os parâmetros do MSIP utilizado são apresentados na Tabela 1.

**Figura 2 – Simulação do AC6 – PM Synchronous 3HP Motor Drive.**



Fonte: Autoria própria (2023).

**Tabela 1 – Dados do MSIP**

Parâmetro	Valor
Velocidade nominal	1800 rpm
Potência nominal	3 hp
Resistência do circuito equivalente	0,2 $\Omega$
Inercia	0,089 (Kg.m <sup>2</sup> )
Fator de atrito	0,005 (N.m.s)
Constante de fluxo	0,175
Pares de polos	4

Fonte: Autoria Própria (2023).

A partir dos dados apresentados, foi realizada a simulação que teve como objetivo o entendimento e análise dos três gráficos obtidos, referentes às relações entre o comportamento da velocidade, torque e corrente no estator do motor após a entrada de uma carga no eixo do MSIP. Na simulação, a máquina foi configurada para operar durante 2 segundos e com uma velocidade de referência de 300 rpm; após 0,5 segundo, uma carga de 10 N.m foi inserida no eixo da máquina e, logo após 1,5 segundos de funcionamento, essa mesma carga no eixo é diminuída pela metade.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

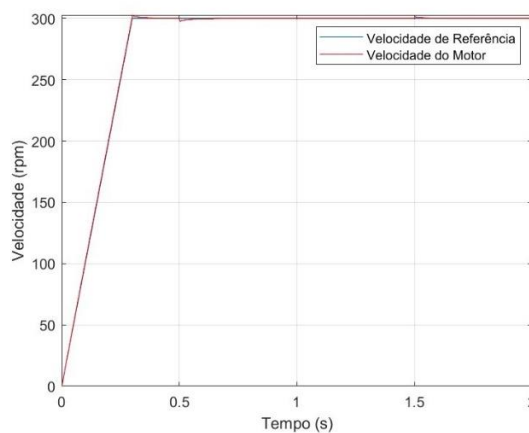
Esta seção apresenta os resultados obtidos através da simulação, bem como a análise dos gráficos resultantes. Contudo, é possível antecipar que a corrente e torque



são diretamente proporcionais, e a velocidade pode variar transitoriamente, de acordo com a carga inserida no eixo da máquina.

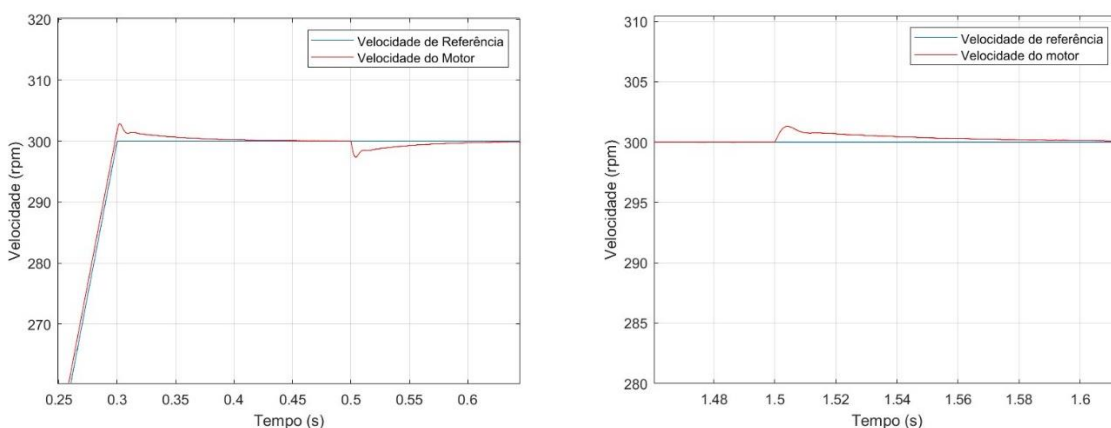
Na Figura 3, tem-se como resultado o gráfico da velocidade da máquina, onde o objetivo era analisar o comportamento da velocidade durante o acionamento da máquina e após a inserção de uma carga. É possível observar que ao partir a máquina, existe uma rampa de aceleração onde a velocidade do motor aumenta constantemente com a velocidade de referência até o tempo de 0,3 segundos, onde a máquina entra em regime permanente, permanecendo constante e na velocidade estabelecida de 300 rpm. No entanto, uma carga é inserida no eixo da máquina no instante 0,5 segundos, assim é possível notar uma oscilação na velocidade do motor que logo após é estabilizado e permanece constante, até o tempo de 1,5 segundos, onde a carga é diminuída pela metade, e a curva de velocidade sofre um *overshoot* que logo se estabiliza novamente. A Figura 4 exibe com detalhes os momentos em que houveram entrada e saída de carga no eixo da máquina.

Figura 3 – Velocidade do MSIP



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4 – Velocidade do MSIP com Ampliação



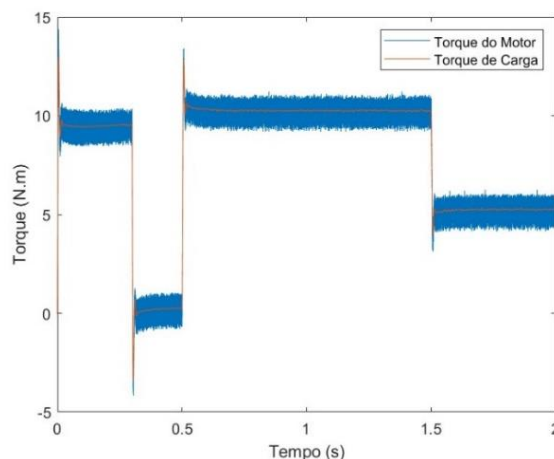
Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 5 é possível observar a curva de torque do motor. No instante em que a máquina é acionada, é possível notar que o torque possui um pico máximo que se

aproxima de 15N.m. Após isso, a curva permanece em 10N.m durante a curva de aceleração, até atingir o regime permanente onde o torque é praticamente nulo (torque para suprir apenas as perdas rotacionais). Ao inserir a carga no eixo, a curva do torque aumenta, resultando em um *overshoot*, que logo é estabilizado, permanecendo constante no valor de 10N.m. Posteriormente, a carga é diminuída pela metade no tempo de 1,5 segundos, fazendo com que o torque diminua para 5N.m.

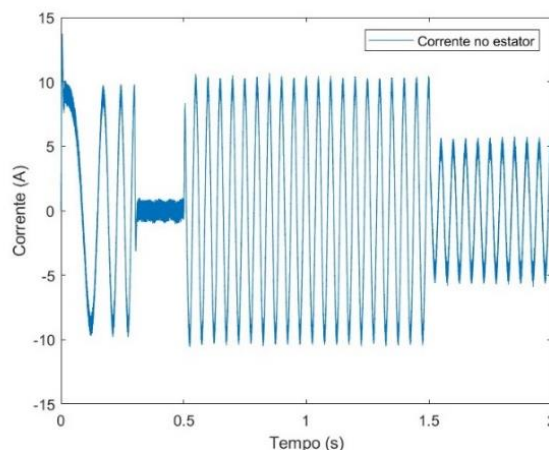
O gráfico da corrente no estator é apresentado na Figura 6. É notório a relação entre as curvas do gráfico da corrente e do torque, ou seja, são proporcionais. Ao passo que o torque é variado, a corrente conseqüentemente sofre variação semelhante, assim sendo, é possível observar uma elevação da corrente ao partir o motor até entrar em regime permanente. Também existe um certo aumento da corrente quando a carga é inserida na máquina, alternando de forma senoidal atingindo o valor de 10A, que diminui sua intensidade quando a carga é diminuída pela metade. Ainda analisando a Figura 6, é possível observar que a corrente possui uma frequência bem estabelecida. Como a velocidade de referência é definida como 300 rpm, e pelo fato de a máquina possuir 8 polos, a frequência de alimentação na saída do sistema de controle deve ser 20Hz, valor este observado na Figura 6.

Figura 5 – Torque do MSIP



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 6- Corrente no estator do MSIP.





Fonte: Autoria própria (2023).

## CONCLUSÃO

Em conclusão, este trabalho de pesquisa sobre motores síncronos de ímã permanente representou um passo significativo na análise e entendimento dessa tecnologia. Através de simulações e análises de gráficos, foi possível explorar as características e o desempenho desses motores em condições operacionais através do software Matlab/Simulink utilizando o sistema AC6 – PM Synchronous 3HP Motor Drive. A princípio os resultados obtidos forneceram insights valiosos para a compreensão do funcionamento da máquina, sendo o próximo passo o desenvolvimento da instrumentação de uma bancada para detecção de falhas em máquinas síncronas.

## Agradecimentos

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pela oportunidade de ensino acadêmico e profissional.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

CASTRO, G. A. **Controle Preditivo Finite Control-Set Aplicado à Máquina Síncrona com Ímã Permanente no Rotor**. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2017.

FITZGERALD, A. E; KINGSLEY Jr, Charles; KUSKO, Alexander. **Máquinas Elétricas**. 7. ed. McGraw-Hill, 2014.

GARCIA, R. C. **Controle de Velocidade de Motor Síncrono de Ímã Permanente Utilizando Redes Neurais Artificiais e Multiplexação em Frequência**. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ/COPPE, 2015.

Mathworks, **PM Synchronous 3HP Motor Drive**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/>. Acesso em: 2023.