

## Modelagem e simulação de um motor síncrono de ímã permanente com partida direto da rede

## Modeling and simulation of a permanent synchronous motor with direct start from the line

Jônatas Josué da Silva<sup>1</sup>, Alessandro Goedtel<sup>2</sup>

### RESUMO

Motor de indução é a máquina mais utilizada na indústria, pois não está limitada a sistemas complexos para seu funcionamento. Entretanto, sua eficiência vem se tornando um problema ainda mais visível, pois o aumento da demanda de energia no setor industrial e em outros setores, eleva um problema tanto com a qualidade de energia, quanto com a capacidade dos sistemas de geração em suprir essa demanda. No âmbito industrial esse problema se intensifica devido ao elevado número de motores e sua potência demandada, tornando inviável, tanto economicamente quanto qualitativamente, a instalação de sistemas para o controle de cada motor. O presente artigo apresenta a modelagem, simulação e o estudo de uma bancada para ensaios em um motor síncrono de ímã permanente com partida direto da rede. Considerado o futuro da indústria, esse motor pode substituir os atuais motores a indução, pelo seu alto rendimento e, a não dependência de drivers complexos para sua partida.

**PALAVRAS-CHAVE:** Motor síncrono de ímã permanente, modelagem, simulação.

### ABSTRACT

The induction motor is the most commonly used machine in the industry because it is not limited to complex systems for its operation. However, its efficiency has become increasingly visible due to the rising demand for energy in the industrial sector and other sectors. Power energy demand presents an issue regarding power quality and the ability of generation systems to meet this demand. In the industrial context, this problem intensifies due to the high number of motors and their required power, making it economically and qualitatively unfeasible to install control systems for each motor. This article presents a modeling, simulation, and study of a test bench for experiments on a Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor. Soon, this motor can replace current induction motors due to its high efficiency and independence from complex drivers for its turn-on.

**KEYWORDS:** Permanent magnet synchronous motor, modeling, simulation.

### INTRODUÇÃO

O motor de indução é a máquina mais difundida na indústria, pois seu uso não se limita a drivers específicos na partida e, com um sistema de controle relativamente mais simples que as demais classes de motores. Entretanto, sua eficiência ainda é um fator que pondera negativamente a seu favor e, com a crescente demanda em outros setores, tornou-se necessário a pesquisa e desenvolvimento de equipamentos com maior eficiência energética. Assim, o motor síncrono com rotor de ímã permanente e partida direta da rede, pode ser considerado uma alternativa ao uso do motor de indução trifásico (MEHRJOU *et al.*, 2015).

Essa classe de motor, referenciada como LSPMSM (*Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor*), alinha a eficiência em regime permanente de um motor síncrono, com a partida sem necessidade de drivers específicos de uma máquina assíncrona. Pesquisas em torno dessa classe de motor, tratam como principal fator na hora da

<sup>1</sup> Discente do curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: jonatasjosue15@gmail.com. ID Lattes: 7241697231822941.

<sup>2</sup> Docente no Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: agoedtel@utfpr.edu.br. ID Lattes: 1920650157123774.

projeção o cuidado com o torque reverso causado pelos ímãs permanentes no momento da partida (ISFAHANI; VAEZ-ZADEH, 2011).

Neste trabalho apresentamos os principais aspectos relacionados ao LSPMSM e o estudo para o desenvolvimento de uma bancada para ensaios.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O funcionamento do LSPMSM se baseia em um hibridismo entre os motores de indução assíncronos, clássicos na indústria, durante a partida, e motores síncronos a ímã permanente. A principal atratividade é o desempenho elevado em regime permanente, atrelado a possibilidade de partida direto da rede.

Na partida, tensões são induzidas na gaiola do rotor pela lei de Faraday-Lenz, que por sua vez fazem circular correntes nas barras do rotor, gerando assim, um campo magnético que interage com o campo girante no estator, gerando torque assíncrono durante a aceleração do motor. A aproximadamente 80% da velocidade síncrona, o motor entra em transitório, do assíncrono para o síncrono (HADDAD KALLUF, 2007).

Um dos momentos mais críticos para esse motor é durante a partida, pois os ímãs produzem um torque contrário ao torque assíncrono. Portanto, durante o projeto da máquina, muitos fatores devem ser levados em consideração, até mesmo a posição dos ímãs no rotor influenciam (LINO, 2013).

Na literatura, alguns modelos matemáticos são utilizados para descrever o funcionamento deste motor. A Figura 1 apresenta um diagrama fasorial, onde descreve a máquina em função dos eixos  $d-q$ , onde, o eixo  $d$  está alinhado com o vetor do campo do rotor. Este modelo elétrico pode ser descrito pelas equações (1) a (4), enquanto as equações (5) e (6) descrevem o sistema mecânico, sendo o torque e o movimento, respectivamente. Os subíndices  $d$  e  $q$ , referem-se aos eixos  $d-q$  respectivamente, os termos  $u$  são as tensões,  $i$  refere às correntes,  $R_s$  é a resistência do estator,  $R_k$  a resistência da gaiola,  $L_s$  a indutância própria de estator,  $L_m$  indutância mútua,  $L_r$  é a indutância própria do rotor,  $\theta$  a posição do rotor,  $\psi_m$  é o vetor referente ao fluxo dos ímãs permanentes,  $J$  o momento de inércia,  $t_e$  o torque eletromagnético,  $p$  o número de pares de polos,  $t_l$  o torque de carga,  $f$  coeficiente de viscosidade e  $T_C$  é o torque de fricção de Coulomb (MARCIC *et al.*, 2008).

$$u_d = R_s i_d + L_{sd} \frac{di_d}{dt} + L_{md} \frac{di_{kd}}{dt} + \frac{d\theta}{dt} (-L_{sq} i_q - L_{mq} i_{kq}) \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q + L_{sq} \frac{di_q}{dt} + L_{mq} \frac{di_{kq}}{dt} + \frac{d\theta}{dt} (-L_{sd} i_d - L_{md} i_{kq} + \psi_m) \quad (2)$$

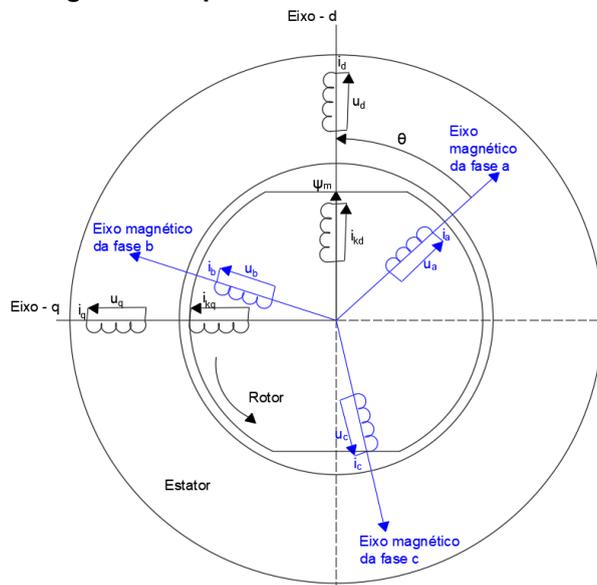
$$0 = R_{kd} i_{kd} + L_{rd} \frac{di_{kd}}{dt} + L_{md} \frac{di_d}{dt} \quad (3)$$

$$0 = R_{kq} i_{kq} + L_{rq} \frac{di_{kq}}{dt} + L_{mq} \frac{di_q}{dt} \quad (4)$$

$$t_e = p \left( (L_{sd} - L_{sq}) i_d i_q + L_{md} i_q i_{kd} - L_{mq} i_d i_{kq} + \psi_m i_q \right) \quad (5)$$

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\theta}{dt^2} = t_e - t_l - \frac{f}{p} \frac{d\theta}{dt} - T_C \quad (6)$$

**Figura 1. Esquemático do LSPMS trifásico**



Fonte: Adaptado de Marcic *et al.* (2008).

## METODOLOGIA

A pesquisa foi dividida em etapas a começar pelo estudo da máquina em questão e simulação de uma máquina PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*), posteriormente estudos sobre os parâmetros base para uma bancada de ensaios, escolha dos melhores componentes e sensores e, por fim, dimensionamento da bancada e do acionamento do motor, para futura montagem.

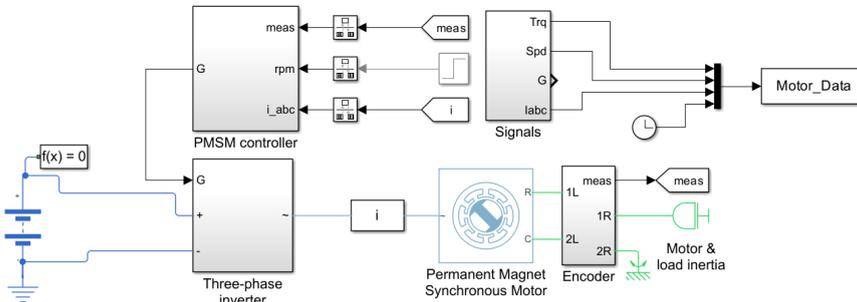
## SIMULAÇÃO PMSM

A simulação do PMSM possibilitou o conhecimento prévio sobre o funcionamento da máquina LSPMSM e seus sistemas de controle, principalmente durante a aceleração. Para a simulação, utilizou-se o software MatLab/Simulink, tendo como base o bloco "ee\_pmsm\_drive". Este bloco modela uma máquina PMSM com acionamento por um inversor de frequência, que realiza o controle pelo método do campo orientado. O inversor é alimentado por uma fonte corrente contínua (CC), podendo ser alterada conforme necessidade. Nas simulações com o MatLab são apresentados os resultados de torque, velocidade e forma de onda das correntes. O diagrama de blocos simulado, pode ser observado na Figura 2.

Essa simulação foi realizada com base nos parâmetros já predispostos na simulação, extraído diretamente do bloco "*Permanent Magnet Synchronous Motor*", sendo, 6 polos, o fluxo dos ímãs permanentes  $\psi_m$  0.003 Wb, a indutância do eixo  $L_d$  0.0002 H, do eixo  $L_q$  0.0002 H e a resistência do estator por fase  $R_s$  0.013  $\Omega$ .

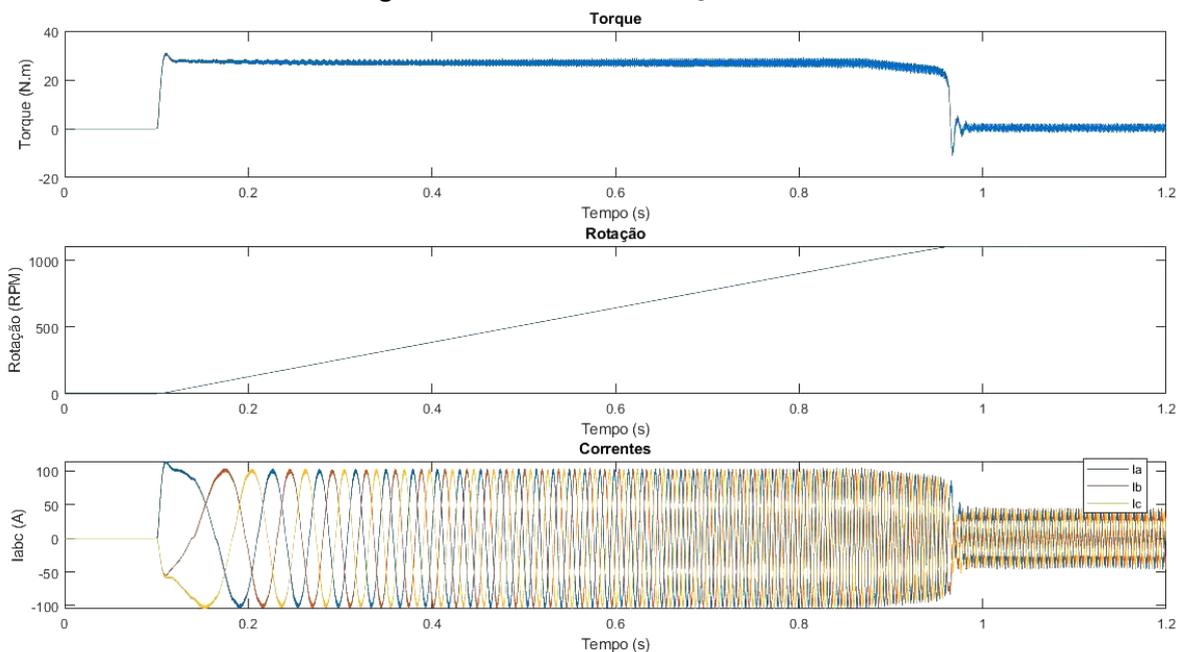
Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 3, durante a aceleração da máquina, onde observa-se um torque aproximadamente constante, bem como a corrente relativamente alta. Um outro ponto a se observar é o aumento da frequência apresentada na forma de onda da corrente. Quando o motor entra em regime permanente, o torque diminui a aproximadamente zero, a corrente também diminui até a nominal.

Figura 2. Diagrama da simulação do PMSM



Fonte: MatLab/Simulink adaptado (2023).

Figura 3. Resultado simulação PMSM



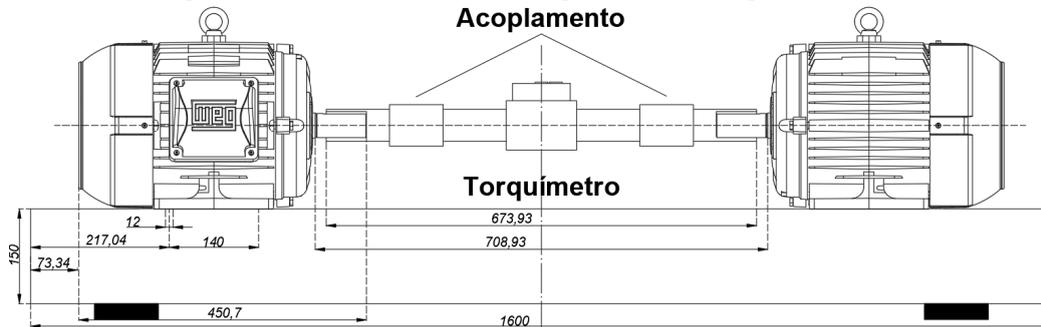
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

## DIMENSIONAMENTO DA BANCADA

A projeção da bancada foi realizada no software AutoCAD, disponibilizado pela universidade, utilizando-se como base as vistas do motor disponíveis pela fabricante (WEG, 2023). Para esse dimensionamento, considerou-se como dois motores de iguais tamanhos, acoplados em extremos opostos, com o objetivo final de simular uma máquina CC gerador de carga, com um torquímetro entre ambas. A Figura 4 apresenta a bancada desenhada, juntamente com suas cotas e o torquímetro acoplado.

Os parâmetros mensurados são tensões, correntes, torque e rotação. Os sensores foram baseados em Barbara (2023), utilizando TPs de 220V/3V, TCs SCT-013-000, com leitura de até 100A. O sensor de torque é o 4305B da Kistler, para o parâmetro rotação, o encoder óptico 8.5000 da Kuebler, o modelo de 2000 pontos por rotação.

Figura 4. Base para motor com gerador de carga acoplado.  
Acoplamento



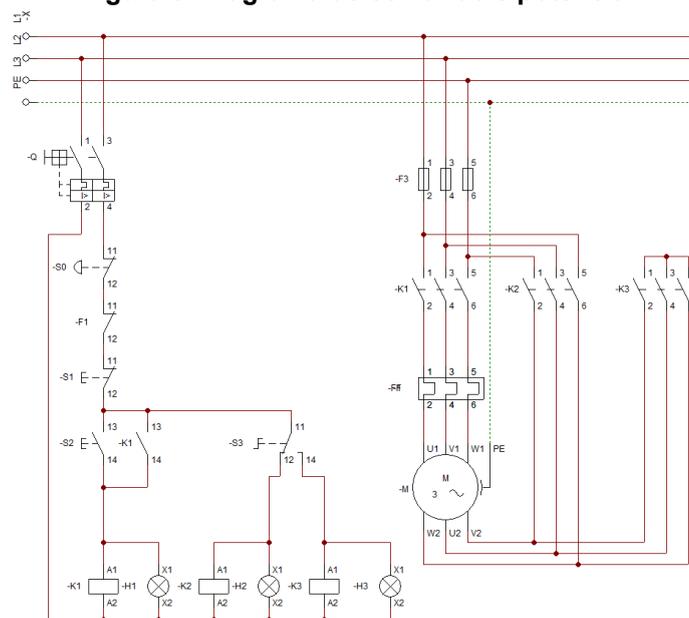
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na aquisição do sinal o USB-6009 da National Instruments possui conversores ADC de 13 e 14 bits, com tensão de entrada de  $\pm 10V$ . Para o condicionamento dos sinais de tensão e corrente, foi utilizado uma placa confeccionada, apresentada na Figura 5, onde por meio do CI TL074CN, amplifica o sinal seguindo a relação dos resistores (BARBARA, 2023).

#### DIMENSIONAMENTO DA PARTIDA

Para essa bancada, foi projetada uma partida direta com possibilidade de selecionar a ligação em estrela ou triângulo, através de uma chave seletora, como apresentado na Figura 5. O diagrama de comando, é o estágio onde se controla o estado do motor, ligado ou desligado. No painel de comando, também estão os sinalizadores, sinais luminosos que determinam o estado da máquina entre ligado, desligado e qual operação está fazendo. A parte de potência está relacionada ao acionamento da máquina e os equipamentos de proteção que ela possui. Seu dimensionamento deve ser mais cuidadoso pois altas correntes irão circular e, o sistema de proteção deve ser eficiente a fim de evitar problemas aos operadores e aos equipamentos (NASCIMENTO, 2011).

Figura 5. Diagrama de comando e potência



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

## CONCLUSÕES

A simulação desenvolvida apresenta a resposta dinâmica do torque e da corrente no momento da partida do PMSM, principalmente com o uso de um sistema de controle, assim, servindo como base para os estudos. Enquanto a bancada proposta, para montagem posterior, poderá ser utilizada em pesquisas futuras com o intuito de validar teorias e modelos propostos para o LSPMSM.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelos equipamentos, laboratório e licenças de softwares.

## CONFLITO DE INTERESSE

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

BARBARA, Gustavo Vendrame. **Um estudo sobre multissensoriamento no diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2023.

HADDAD KALLUF, Flávio Jorge. **Análise do funcionamento assíncrono de um motor monofásico síncrono de ímãs permanentes com partida direta**. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

ISFAHANI, Arash Hassanpour; VAEZ-ZADEH, Sadegh. **Effects of magnetizing inductance on start-up and synchronization of line-start permanent-magnet synchronous motors**. in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 4, pp. 823-829, abril 2011, doi: 10.1109/TMAG.2010.2091651.

NASCIMENTO, Geraldo Carvalho. **Comandos Elétricos: Teoria e Atividades**. 1. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2011. 29-71 p. ISBN 978-85-365-0386-8.

MARCIC, Tine *et al.* **Determining Parameters of a Line-Start Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Model by the Differential Evolution**, in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 11, pp. 4385-4388, Novembro 2008, doi: 10.1109/TMAG.2008.2001530.

WEG. **Biblioteca CAD - motores elétricos**. Weg, 2023. Disponível em <[https://ecatalog.weg.net/drawings\\_2d\\_3d/index.asp?empresa=WMO&language=PT](https://ecatalog.weg.net/drawings_2d_3d/index.asp?empresa=WMO&language=PT)>. Acesso em 17 de setembro de 2023.

MEHRJOU, Mohammad Rezazade et al.. **Performance analysis of line-start permanent magnet synchronous motor in presence of rotor fault**, in *IEEE Student Conference on Research and Development*, Penang, Malásia, 2014, pp. 1-4, abril 2015, doi: 10.1109/SCORED.2014.7072978.