



# Construção de conversor para controle de corrente de um freio eletromagnético

## Construction of a converter to control the current of an electromagnetic brake

Vitor Correia Montagnini Santos<sup>1</sup>, Alessandro Goedtel<sup>2</sup>,  
Wesley Angelino de Souza<sup>3</sup>, Marcelo Favoretto Castoldi<sup>4</sup>

### RESUMO

A investigação acerca dos parâmetros de uma máquina, em especial em suas condições reais de trabalho, são informações que permitem diversas análises acerca de sua operação e eficiência. Dessa maneira, testes que possibilitem uma análise do motor em operação com carga, são bastante visados. O presente artigo trata do desenvolvimento de um conversor que permita um controle da corrente circulante nas bobinas de um Freio Eletromagnético, fato esse que possibilita o ensaio de motores com a aplicação de carga através do torque de frenagem.

**PALAVRAS-CHAVE:** Conversor; Corrente Elétrica; Freio Eletromagnético.

### ABSTRACT

Investigating the parameters of a machine, especially its real working conditions, provides information that allows various analyzes of its operation and efficiency. Therefore, tests that enable an analysis of the engine in operation under load are widely used. This article deals with the development of a converter that allows control of the current circulating in the coils of an Electromagnetic Brake, a fact that makes it possible to test motors with the application of load through braking torque.

**KEYWORDS:** Converter; Electric Current; Electromagnetic Brake.

### INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da tecnologia e, em especial, dos dispositivos elétricos, estão bastante conectados com a evolução das próprias máquinas elétricas, sejam elas implementadas nas indústrias ou mesmo nas moradias das pessoas. Uma relação de mutualismo existe entre a evolução das máquinas e o desenvolvimento da tecnologia, de forma que um importante foco está no aumento da eficiência. Mas, para que de fato motores mais eficientes possam começar a ser desenvolvidos, é necessário ter mecanismos capazes de realizar ensaios que apresentem respostas mais próximas do que seria visto em uma aplicação real da máquina. Atrélado ao cenário apresentado, o presente

<sup>1</sup> Discente do curso de Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: [vitorsantos.2019@alunos.utfpr.edu.br](mailto:vitorsantos.2019@alunos.utfpr.edu.br). ID Lattes: 0750096855555732.

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

<sup>3</sup> Docente no Curso de Engenharia Elétrica/Departamento Acadêmico de Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: [wesleyangelino@utfpr.edu.br](mailto:wesleyangelino@utfpr.edu.br). ID Lattes: 8594457321079718.

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



artigo trata do desenvolvimento de um conversor que será o responsável por fazer a alimentação de um importante mecanismo de ensaios em motores, chamado de Freio Eletromagnético por Correntes de Foucault. O desenvolvimento de tal conversor foi feito utilizando os parâmetros do protótipo de uma bancada de ensaio contendo o Freio Eletromagnético proposto por Fontana (2017) e aprimorado por Francisconi (2020).

## FREIO ELETROMAGNÉTICO

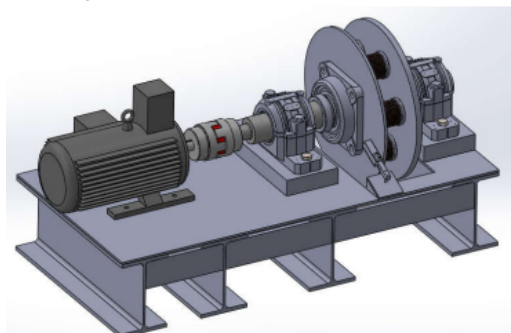
O Freio Eletromagnético por Corrente de Foucault ou também chamado de Freio Eletromagnético por Correntes Parasitas, é um importante mecanismo que assim como citado em Pereira (2006), teve seu funcionamento físico descrito em 1855 por Jean B. L. Foucault. Porém, foi somente em 1906 que se realizou o primeiro estudo sobre a aplicação das correntes de Foucault em freios. A Eq. (1), considerando uma indução magnética  $B$  constante, apresenta a relação da força de frenagem  $F$ , com diversos parâmetros que estão presentes no Freio, como a condutividade elétrica do material  $\sigma$ , fator de eficiência geométrico  $c$ , velocidade tangencial do disco  $v$ , seção do pólo  $S$  e espessura do disco  $d$ .

$$F(v,B) = \sigma \cdot v \cdot B^2 \cdot c \cdot S \cdot d \quad (1)$$

Fonte: FONTANA, 2017

Um dos principais parâmetros presentes na Eq. (1) é a indução magnética  $B$ , que basicamente é a grandeza que tem a responsabilidade de unir a alimentação do freio com o torque a ser aplicado no rotor do motor. Tal ação depende de outros parâmetros, em especial no que concerne as questões estruturais do freio, mas é através do fluxo magnético que resulta em um torque de frenagem sendo empregado no rotor do motor, emulando assim uma carga. Na Figura 1 se encontra a bancada contendo o freio desenvolvida no trabalho de Francisconi (2020), sendo objeto de análise para o dimensionamento do conversor. Na Figura 2 é possível verificar o Freio Eletromagnético com sua construção finalizada.

Figura 1 – Projeto da bancada contendo o freio de Foucault



Fonte: (FRANCISCONI, 2020).



Figura 2 – Protótipo do Freio de Foucault montado



Fonte: A autoria do autor (2023).

O ponto chave da implementação de ensaios utilizando o Freio Eletromagnético se dá pela possibilidade de um maior controle do torque aplicado ao eixo do rotor, pois assim como apresentado na Eq. (1), a densidade de fluxo magnético está diretamente ligada à força de frenagem. Através da Eq. (2), relaciona o conjugado nominal do motor  $T_{nom}$ , com o fator de eficiência geométrico  $c$ , área e diâmetro do núcleo, respectivamente,  $S_n$  e  $d_n$ , raio efetivo do disco do freio  $R$ , velocidade angular  $\omega$  e a condutividade do aço  $\sigma$ . Com a Eq. (2) se torna possível encontrar a densidade de fluxo magnético capaz de aplicar um torque de frenagem com 115% do conjugado nominal do motor.

Com a densidade de fluxo magnético, se torna possível assim, relacionar a corrente aplicada nas bobinas  $I_b$  do freio para atingir o valor de  $B$  esperado, relacionando tais variáveis com o número de espiras  $N$ , tamanho médio do entreferro  $l_{med}$  e a permeabilidade magnética no vácuo  $\mu_0$ , onde tal relação está expressa na Eq. (3).

$$B = \sqrt{\frac{1.15 \cdot T_{nom}}{c \cdot S_n \cdot d_n \cdot R^2 \cdot \omega \cdot \sigma}} \quad (2)$$

Fonte: PEREIRA, 2006

$$I_b = \frac{l_{med} \cdot B}{N \cdot \mu_0} \quad (3)$$

## METODOLOGIA

Na presente seção estão descritos todos os procedimentos feitos no decorrer da pesquisa que culminasse no desenvolvimento e dimensionamento de um conversor capaz de alimentar o Freio Eletromagnético. Em um primeiro momento, todo o foco foi direcionado para uma revisão bibliográfica sobre os conversores CC-CC, buscando entender seu funcionamento e os principais componentes que estariam presentes em seu circuito. Foi através dessa primeira etapa que optou-se pela implementação de um conversor *buck*, que tornaria possível assim uma variação na corrente de saída (bobina do freio) que passaria a ser determinada pela frequência de chaveamento do circuito, controlando assim, o torque de frenagem.



## DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR

Com a topologia do conversor *buck* definida, todo o desenvolvimento futuro concentrou-se no seu dimensionamento. Para tal, foi coletado os resultados encontrados na construção e nos testes de bancada realizados em Fontana (2017) e Francisconi (2020), expressas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados coletados do protótipo do freio.

Variável	Valor
$T_{nom}$	5,30 [N.m]
$c$	0,499
$S_n$	$109,45 \times 10^{-3} [m^2]$
$d_n$	0,016 [m]
$R$	0,0124 [m]
$\omega$	188,0 [rad/s]
$\sigma$	$5,8 \times 10^6 [\Omega.m]$
$N$	1044 [e]
$l_{med}$	$3 \times 10^{-2} [m]$

Fonte: Autoria do autor (2023).

Através da utilização dos dados da Tabela 1 e aplicando-os em Eq. (2) e Eq. (3) foi possível definir que a indução magnética  $B$  para ensaiar tal motor com um conjugado nominal 5,30 [N.m] foi de 0,4959 [T], resultando assim em uma corrente a ser aplicada no freio  $I_b$  de 11,3405 [A].

Calculado o valor da corrente máxima, a sequência da pesquisa partiu em aplicar tal informação dentro da topologia do conversor escolhido, momento ao qual foi preciso definir alguns parâmetros necessários para o dimensionamento do freio, sendo eles a tensão de entrada  $V_{in}$ , frequência de chaveamento  $f_s$ , ondulação máxima da tensão na saída  $\Delta_V$  e ondulação máxima da corrente na saída  $\Delta_i$ . Os parâmetros definidos, bem como a resistência  $R_{carga}$  medida diretamente do protótipo do freio e indutância da carga  $L_{carga}$ , calculada através da razão entre o quadrado do número de espiras e a relutância da bobina, estão expressos na Tabela 2. Os valores definidos de  $f_s$ ,  $\Delta_V$  e  $\Delta_i$ , bem como as equações de dimensionamento do conversor, foram retirados das informações presentes em Ahmed (2000).

Tabela 2 – Parâmetros do conversor.

Variável	Valor
$V_{in}$	300 [V]
$R_{carga}$	5,2 [ $\Omega$ ]
$L_{carga}$	9,99 [H]
$f_s$	20 [kHz]
$\Delta_i$	5 %
$\Delta_V$	1 %

Fonte: Autoria do autor (2023).

Com os parâmetros definidos, bastou realizar os cálculos referentes a topologia do conversor escolhido, encontrando assim a razão cíclica do conversor  $D$  com Eq. (4), para através dela, e de manipulações dos parâmetros, definir o valor da indutância  $L$  e capacitância  $C$  necessárias para atingir o valor determinado de corrente na bobina, respectivamente através de Eq. (5) e Eq. (6).

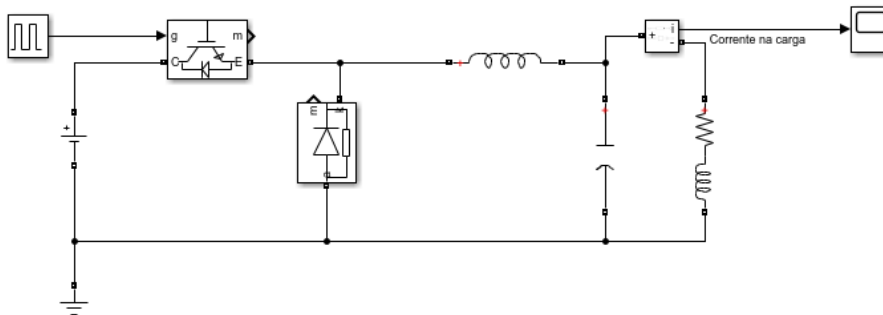
$$D = \frac{V_{in}}{V_o} \tag{4}$$

$$L = \frac{(V_{in} - V_o)D}{\Delta_i \cdot f_s} \tag{5}$$

$$C = \frac{\Delta_i}{8 \cdot \Delta V \cdot f_s} \tag{6}$$

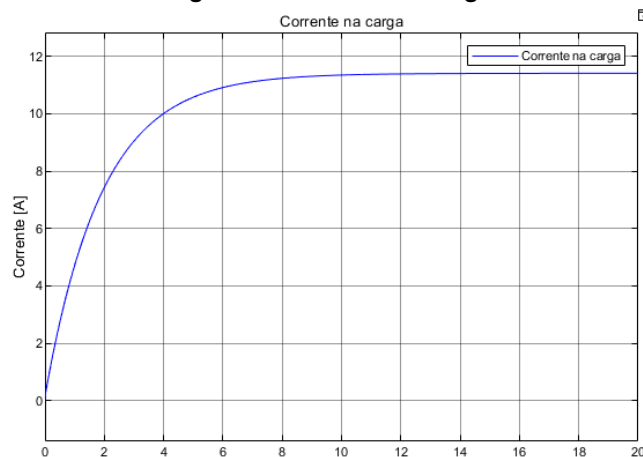
Com o auxílio do *software* MATLAB/Simulink, foi simulado o circuito do conversor *buck*, utilizando para isso os resultados de  $L = 4,16\text{mH}$  e  $C = 6,03\mu\text{F}$ . O circuito montado está expresso na Figura 3, bem como a resposta encontrada para a corrente na carga estando expressa na Figura 4.

**Figura 3 – Simulação do conversor**



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

**Figura 4 – Corrente na carga**



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Observando o resultado, nota-se que o valor da corrente na carga do conversor acompanha o esperado, se localizando por volta de 11 [A], apresentando baixa oscilação na resposta.

**JUSTIFICATIVA**

O desenvolvimento do conversor baseou-se no protótipo do Freio Eletromagnético já citado. De forma que parâmetros como o torque nominal sendo de 5,30 [Nm] e a velocidade angular de 32,0



[rad/s], foram definidos devido a se tratar de um mecanismo para ensaio de motores de 1 [CV] e que permitisse fazer as análises de carga para acionamentos em baixa velocidade, com inversores de frequência. Outro ponto importante é sobre a disposição das bobinas no freio, tratando-se de seis bobinas, de forma que os valores de  $R_{carga}$  e  $L_{carga}$  são, respectivamente, resistência e indutância equivalente do arranjo das bobinas.

## CONCLUSÃO

A aplicação de testes, mais próximos do funcionamento real, realizados em motores elétricos, possibilita a determinação e comportamento de diversos parâmetros da máquina para determinadas condições de operação. Dessa maneira, o conversor estudado, demonstra ser aplicável como forma de alimentação das bobinas do Freio Eletromagnético. Após a simulação do conversor, se torna possível a construção física e desenvolvimento futuro de uma malha de controle de corrente, agregando ainda mais valor e garantindo um ensaio em carga adequado para motores de 1 [CV].

## Agradecimentos

Em agradecimento à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por toda a estrutura disponibilizada no decorrer da pesquisa, bem como ao Laboratório de Sistemas Inteligentes pelo ambiente propício à pesquisa e desenvolvimento.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**; tradução. Bazán Tecnologia e Lingüística, 2000.

FONTANA, Carlos Henrique. **Protótipo de um freio eletromagnético por correntes de Foucault**. 2017. B.S. thesis – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

FRANCISCONI, Eduardo Pianovski. **Desenvolvimento de uma bancada para ensaio de máquinas elétricas contendo um freio por correntes de Foucault**. 2020. B.S. thesis – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PEREIRA, Adriano Holanda. **Freio eletromagnético para ensaios de motores elétricos de indução**, 2006