

JOÃO DALLAMUTA  
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN  
(ORGANIZADORES)

---

*Collection:*

# APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

---

Atena  
Editora  
Ano 2022

JOÃO DALLAMUTA  
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN  
(ORGANIZADORES)

---

*Collection:*

# APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

---

Atena  
Editora  
Ano 2022

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Gabriel Motomu Teshima

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial****Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



**Diagramação:** Camila Alves de Cremo  
**Correção:** Yaidy Paola Martinez  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadores:** João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

C697 Collection: applied electrical engineering / Organizadores  
João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta  
Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-858-5

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.585222801>

1. Electrical engineering. I. Dallamuta, João  
(Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III.  
Título.

CDD 621.3

**Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166**

**Atena Editora**

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

contato@atenaeditora.com.br



## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



## APRESENTAÇÃO

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro eletricista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é portando pesquisar em uma gama enorme de áreas, subáreas e abordagens de uma engenharia que é onipresente em praticamente todos os campos da ciência e tecnologia.

Neste livro temos uma diversidade de temas, níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann



## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

A MODEL BASED DESIGN APPROACH FOR KNOCK CONTROL IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES USING MACHINE LEARNING

Eduardo Vieira Falcão

Vinicius Mafra Melo

Péricles Rezende Barros

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228011>

### **CAPÍTULO 2..... 15**

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL TOOL FOR DIMENSIONING AND ANALYZING THE ECONOMIC FEASIBILITY OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS


David Coverdale Rangel Velasco

Elivandro Tavares Lôbo

Welder Azevedo Santos

Wagner Vianna Bretas


Rodrigo Martins Fernandes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228012>

### **CAPÍTULO 3..... 21**

OTIMIZAÇÃO DE OPERAÇÕES MODULARES ATRAVÉS DO USO DE PSEUDO-MÓDULOS

Augusto Cezar Boldori Vassoler

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228013>


### **CAPÍTULO 4..... 33**

OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA USANDO SIMULAÇÃO MATEMÁTICA E TESTES EXPERIMENTAIS

Eduardo G. Silva

Alexandre S. Caporali

Cesar da Costa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228014>

### **CAPÍTULO 5..... 49**

MAPAS COGNITIVOS FUZZY DINÂMICOS ADAPTATIVOS APLICADOS EM PROCESSO INDUSTRIAL

Márcio Mendonça

Francisco de Assis Scannavino Junior

Wagner Fontes Godoy

Lucas Botoni de Souza

Marta Rúbia Pereira dos Santos

Fábio Rodrigo Milanez

Carlos Alberto Paschoalino


Michele Eliza Casagrande Rocha

Vicente de Lima Gongora

Ricardo Breganon

Marcio Aurélio Furtado Montezuma

Emanuel Ignacio García

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228015>


**CAPÍTULO 6..... 61**

DESENVOLVIMENTO DE MATERIAL DIDÁTICO SOBRE FILTROS PROBABILÍSTICOS EMPREGADOS NA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO EM ROBÓTICA MÓVEL

José Lucas Araújo dos Santos

Luciano Buonocore

Luiz Eugênio Santos Araújo Filho


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228016>

**CAPÍTULO 7..... 74**

EFFECTO DE LA IMPLANTACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA ESPAÑOLA

Paula Romo Santos

Begoña Lapeña Barrio


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228017>

**CAPÍTULO 8..... 90**

INSTALAÇÃO DE MEDIÇÃO NOS ALIMENTADORES DAS SUBESTAÇÕES

Adalberto Leandro da Silva


Fabio Coelho de Santana

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228018>

**CAPÍTULO 9..... 106**

PROJETO DE OUVIDORIA DA DISTRIBUIÇÃO DA EDP SÃO PAULO – ANÁLISE DE DEMANDA DE MAIOR IMPACTO

Márcia Lúcia Lopes de Souza Jesus

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228019>

**CAPÍTULO 10..... 114**

DIAGNÓSTICO, CRESCIMENTO E ATENUAÇÃO DE RISCOS DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS EM FAVELAS

Márcio Mendonça

Marta Rúbia Pereira dos Santos

Fábio Rodrigo Milanez

Wagner Fontes Godoy

Rodrigo Henrique Cunha Palácios

Marco Antônio Ferreira Finocchio

Carlos Alberto Paschoalino


Francisco de Assis Scannavino Junior

Vicente de Lima Gongora

Lucas Botoni de Souza

Michele Eliza Casagrande Rocha


José Augusto Fabri

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280110>

**CAPÍTULO 11..... 127**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM UMA EDIFICAÇÃO DA CIDADE DE PORTO VELHO - RO**


Angelina Lidiane Moura Cunha  
Felipe Alexandre Souza da Silva  
Antonio Carlos Duarte Ricciotti  
Viviane Barrozo da Silva  
Paulo de Tarso Carvalho de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280111>

**CAPÍTULO 12..... 140**

**O DESEMPENHO E EFICIÊNCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM PALMAS - TO: ANÁLISE EM FUNÇÃO DO PONTO CARDEAL E VARIAÇÃO ANGULAR DAS PLACAS**


Aline Silva Magalhães  
Jabson da Cunha Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280112>

**CAPÍTULO 13..... 153**

**SIMULADOR DE CARGA UTILIZANDO MECANISMO DE FRENAGEM ELETROMAGNÉTICA PARA ENSAIOS DE COMPORTAMENTO DE MÁQUINAS ASSÍNCRONAS**


Murilo Meneghetti Caramori  
Alexandre Dalla Rosa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280113>

**CAPÍTULO 14..... 184**

**PROPOSTA DE GEOMETRIAS DE NÚCLEOS USADOS EM ACOPLAMENTOS DE SISTEMAS ATRAVÉS DO FLUXO MAGNÉTICO**

Lucas Lapolli Brighenti  
Walbermark Marques Dos Santos  
Denizar Cruz Martins


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280114>

**CAPÍTULO 15..... 198**

**DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE LIGAÇÕES CRUZADAS EM BORRACHA DE ESTIRENO-BUTADIENO (SBR) PARA DIFERENTES SISTEMAS DE VULCANIZAÇÃO**

Harison Franca do Santos  
Arthur Pimentel de Carvalho  
Carlos Toshiyuki Hiranobe  
Eduardo Roque Budemberg  
Gabriel Deltrejo Ribeiro  
Giovanni Barrera Torres  
Jose Francisco Resende  
Leonardo Lataro Paim  
Leandra Oliveira Salmazo  
Miguel Ángel Rodríguez Pérez

Renivaldo José dos Santos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280115>

<b>SOBRE OS ORGANIZADORES .....</b>	<b>210</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO.....</b>	<b>211</b>

## SIMULADOR DE CARGA UTILIZANDO MECANISMO DE FRENAGEM ELETROMAGNÉTICA PARA ENSAIOS DE COMPORTAMENTO DE MÁQUINAS ASSÍNCRONAS

Data de aceite: 10/01/2022

Data de submissão: 06/12/2021

### Murilo Meneghetti Caramori

Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC  
Chapecó, Santa Catarina  
<http://lattes.cnpq.br/7065127663698484>

### Alexandre Dalla’Rosa

Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC  
Chapecó, Santa Catarina  
<http://lattes.cnpq.br/0596224519125364>

**RESUMO:** Este documento apresenta o estudo e desenvolvimento de um protótipo simulador de carga para máquinas elétricas, utilizando o princípio de um freio eletromagnético microcontrolado. No andamento do trabalho, foi executada a montagem de uma bancada para testes de uma máquina trifásica e assíncrona e um módulo fonte retificador CA/CC para o controle em malha aberta das bobinas de campo. O objetivo é mensurar parâmetros gerais da máquina trifásica, através de ensaios de laboratório, simulando cargas variáveis pela indução de correntes parasitas sobre um disco de material condutor acoplado em seu eixo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Correntes de Foucault. Freio eletromagnético. Conversor CA/CC.

LOAD SIMULATOR USING  
ELECTROMAGNETIC BRAKING  
SYSTEM FOR BEHAVIOR TESTING OF

### ASYNCHRONOUS MACHINES

**ABSTRACT:** This document presents a study and development of a load simulator prototype for electrical machines using the principle of a microcontrolled electromagnetic brake. In the course of the work, were built a bench for testing a three-phase asynchronous motor and an AC/DC rectifier module for non-feedback control of the electromagnet coils. The objective is to measure general parameters of the three-phase machine through laboratory tests, simulating variable loads through the induction of eddy currents in a disk of conductive material coupled to its axis.

**KEYWORDS:** Foucault current. Magnetic brake. DC/AC Converter.

### 1 | INTRODUÇÃO

É indiscutível a importância das máquinas elétricas para soluções industriais onde é necessário o acionamento de diferentes tipos de cargas. O motor elétrico é um dispositivo rotativo que converte energia elétrica em energia mecânica, sendo este processo denominado de princípio da conversão eletromecânica da energia (KOSOW, 1979, p. 2). Estes dispositivos são amplamente empregados em escala industrial, auxiliando populações em centros urbanos e nas mais diversas aplicações cotidianas. Os motores elétricos são encontrados frequentemente em eletrodomésticos, prensas, elevadores de carga, esteiras rolantes, tornos, fresas ou em qualquer outro mecanismo que precise converter energia elétrica em força ou

em movimento (FITZGERALD; KINSLEY JUNIOR; KUSKO, 2014, p. 193).

Em aplicações onde deseja-se simular uma carga posta em um eixo de um motor elétrico, é necessário criar um instrumento que representa as condições reais de operação independente de sua função. É fundamental a execução de ensaios dinâmicos que possibilitem mensurar e determinar as mais importantes características da máquina. Para obtenção desses parâmetros, faz-se necessário um sistema composto por elementos capazes de representar as diversas condições de uma carga, sendo que é neste ponto que reside a problemática central do trabalho aqui proposto. Uma alternativa para promover o controle de força de frenagem seria recorrer a um dispositivo de fricção mecanicamente acoplado ao eixo do motor. Entretanto a fricção depende das superfícies em contato o que implica na necessidade de materiais de elevada resistência ao desgaste. Já a utilização de um freio eletromagnético por correntes induzidas dispensa essa necessidade, onde a potência é dissipada por efeito Joule (PEREIRA, 2006, p. 14-18).

Este projeto consiste em uma atividade desenvolvida através do Laboratório de Máquinas Elétricas (LABMAQ-IFSC) com o estudo do comportamento de máquinas elétricas assíncronas trifásicas, assim como análise de seus parâmetros de funcionamento a partir da realização de ensaios, simulados por uma bancada de freio eletromagnético. Destina-se o estudo do presente projeto a ser utilizado para fins didáticos e de pesquisas futuras no IFSC Campus Chapecó.

## 2 | REFERENCIAL TEÓRICO

As máquinas assíncronas, também denominadas de motores de indução, são máquinas puramente de corrente alternada (CA). Por serem versáteis e economicamente viáveis, seu emprego industrial é amplo, correspondendo na maior parte das máquinas elétricas existentes na sociedade em geral (KOSOW, 1979, p. 164).

A máquina assíncrona é composta por um rotor, estator e demais elementos de carcaça. As correntes e tensões são transferidas ao rotor através do fluxo magnético. Normalmente não há contato externo com o rotor, que é alimentado pelo efeito Faraday de indução eletromagnética (KOSOW, 1979, p. 43). A equação (1) representa a lei de indução, proposta por Faraday.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \Phi_B}{\partial t} \quad (1)$$

Onde:

$\vec{E}$  – Campo Elétrico [V/m];

$\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$  – Taxa de variação do fluxo magnético;

Desde a antiguidade, o homem já detém conhecimento da existência da força magnética. Os primeiros registros conhecidos de observações acerca das propriedades magnéticas dos ímãs datam da Grécia antiga. Grande parte da fundamentação teórica do

eletromagnetismo conhecida até então sustenta-se nas relações apresentadas por James Clerk Maxwell e suas quatro equações que descrevem o comportamento dos campos elétricos e magnéticos e sua mútua afinidade. Os estudos de Ørsted relataram oficialmente, em 1820, a observação da criação de campos magnéticos por influência de correntes elétricas. Ampère desvendou o fenômeno da indução magnética como efeito de correntes elétricas e Faraday decifrou o mecanismo da indução elétrica por meio da variação do fluxo magnético, conectando definitivamente a eletricidade ao magnetismo (SADIKU, 2012).

Até o século passado o fenômeno das correntes parasitas (correntes de Foucault ou *eddy current*) se tornava visto muito mais como um problema a ser minimizado do que um fenômeno a ser desvendado em benefício da ciência e tecnologia. No século XIX, o francês Léon Foucault foi o primeiro a elaborar uma aplicação tecnológica a empregar as correntes parasitas, conhecida então como freio de Foucault (demonstrado na Figura 1) (RIVAL, 1997; ROONEY, 2013).

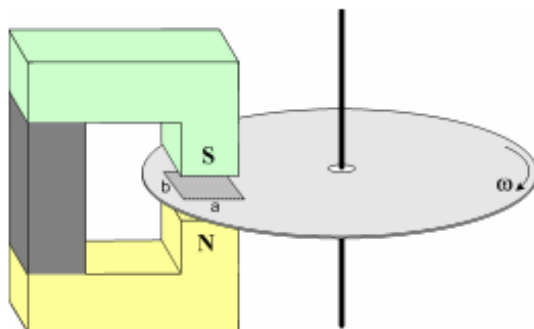


Figura 1 - Freio de Foucault (Disco condutor posicionado entre polos de um ímã)

Fonte: Pinheiro Filho (2014, p. 16)

O surgimento das correntes parasitas é uma consequência direta do efeito da indução eletromagnética descrito por Faraday (YOUNG; FREEDMAN; ZEMANSKI, 2009). Se uma variação de fluxo é capaz de induzir diferenças de potencial e corrente elétrica em um condutor imerso nesse fluxo, se espera que em um material condutor percorrido por esse mesmo fluxo variante no tempo passe a existir uma corrente elétrica que o circunde, circulando paralelamente a sua superfície transversal, formando circuitos fechados tangenciais ao longo do percurso longitudinal do fluxo magnético no interior do material (PINHEIRO FILHO, 2014, p. 16).

No interior do material também ocorre o surgimento de correntes induzidas ao redor de cada linha de fluxo, mas em seu percurso elas se anulam mutuamente, ao passo que se concatenam ao redor da superfície, conforme a Figura 2, formando uma corrente circulante ao redor do somatório de todas as linhas de fluxo no interior do elemento ferromagnético

(PINHEIRO FILHO, 2014, p. 16).

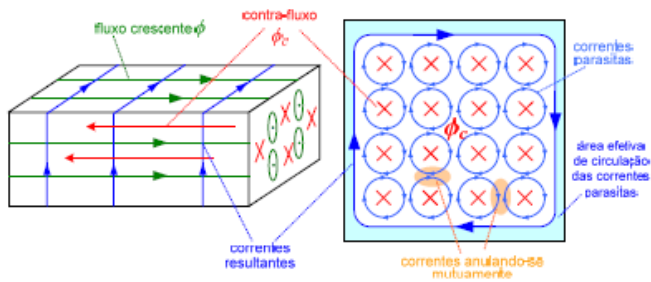


Figura 2 - Fenômeno das correntes parasitas numa seção de material magnético percorrido por um fluxo variante no tempo

Fonte: Pinheiro Filho (2014, p. 17)

O evento direto dessa circulação indesejada de correntes é o desprendimento de energia na forma ativa, por calor em Watts ou Jaule, aquecendo o material magnético e reduzindo a eficiência (PEREIRA, 2006, p.14-18). A área do material condutor (disco) é diretamente proporcional à sua capacidade de dissipação de calor.

No freio eletromagnético a dissipação de energia na forma de calor decorre principalmente da soma das perdas causadas pela circulação das correntes parasitas e perdas por histerese (BARAN, 1970, p. 260-263). O primeiro termo da equação 2 descreve as perdas por correntes parasitas, que são proporcionais ao quadrado da espessura do disco condutor, e inversamente proporcional a resistividade do material. Caso a espessura do disco seja dobrada, as perdas se quadruplicarão (SALZMAN; BURKE; LEA, 2001, p. 586-590). O segundo termo da equação 2 representa a formula empírica para o cálculo das perdas por histerese baseado em estudos de Oliveira (2013, p. 48-53):

$$P_{total} = \left[ \iiint_{vol} \sigma E^2 dvol \right] + [k_h (B_{max})^\alpha] \quad (2)$$

Em 1991, J. H. Wouterse formalizou as expressões que descrevem de forma generalizada o comportamento de um freio eletromagnético empregado em extensões rotativas. O modelo de Wouterse considerou a influência do campo magnético gerado pelas correntes induzidas sobre o campo magnético aplicado diretamente ao disco (WOUTERSE, 1991, p. 153-158).

As equações (3) e (4) são modelos teóricos para o comportamento da frenagem.



$$F(v) = c' \cdot \sigma \cdot v \cdot vol \cdot B_o^2 \quad (3)$$

$$c' = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{\pi^2}{24} \cdot \left( \frac{D}{2 \cdot h} \right)^2 \right) \quad (4)$$

Sendo para (2), (3) e (4):

$F$ – Força [N];

$\sigma$ – Condutividade elétrica [ $\Omega m^{-1}$ ];

$E$ – Campo elétrico [V/m];

$v$ – Velocidade [m/s];

$\alpha$ – Expoente de Steinmetz;

$c'$ – Fator de eficiência geométrico;

$P_{TOTAL}$ – Soma das perdas [ $W/m^3$ ];

$k_h$ – Constante de histerese característica do material;

$vol$ – Volume do disco sob a ação do campo magnético [ $m^3$ ];

$B_o$ – Indução magnética [T];

$D$ – Diâmetro do polo magnético [m];

$h$ – Altura da bobina [m];

Para obtenção dos parâmetros do motor, será utilizado o modelo de circuito elétrico equivalente visualizado na Figura 3. Neste modelo,  $R_1$  é a resistência ôhmica do estator da máquina e  $R_2$  é a resistência do rotor. Os parâmetros  $X_1$  e  $X_2$  são as reatâncias do estator e rotor respectivamente,  $b_m$  a susceptância de magnetização e  $g_m$  a condutância que modela as perdas de correntes parasitas e laço de histerese do núcleo da máquina. Além disso  $s$  é o escorregamento que irá variar de acordo com as tensões e frenagens aplicadas na máquina elétrica. Mais detalhes serão tratados na seção 04.

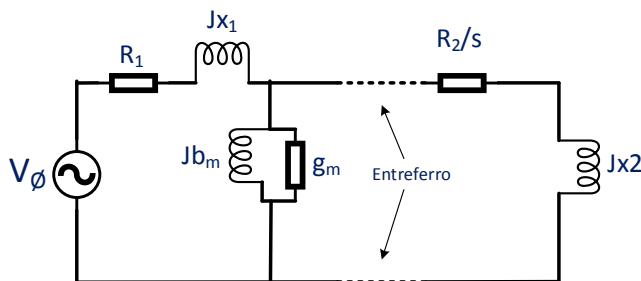


Figura 3 - Modelo CEE

Fonte: o próprio autor

A partir destes estudos referenciais, iniciou-se a etapa de desenvolvimento de um

protótipo de freio eletromagnético, apresentado no seguinte tópico do documento.

### 3 I IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO

O objetivo geral do protótipo prático é o desenvolvimento de um sistema capaz de simular uma carga mecânica, por meio de um freio eletromagnético controlado, para obtenção de parâmetros de uma máquina elétrica assíncrona em função da tensão aplicada.

A estrutura do trabalho divide-se entre o projeto de um freio eletromagnético integrando-o com uma máquina assíncrona de baixa potência, o dimensionamento de um conversor CA/CC manipulado por *software*, e seção dos resultados finais, testes de laboratórios e aquisição dos parâmetros, de forma que seja possível entender as ideias apresentadas.

O diagrama da Figura 4 especifica a proposta e objetivos do projeto, dividindo suas respectivas etapas, elementos desenvolvidos e utilizados.

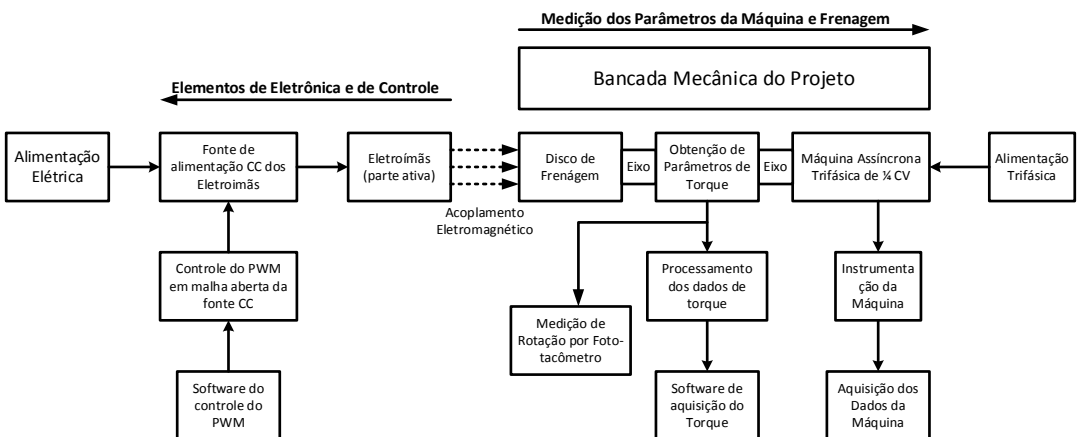


Figura 4 - Diagrama do projeto

Fonte: o próprio autor

#### 3.1 Montagem Mecânica

Idealizou-se um modelo de protótipo por meio de software de desenho assistido por computação (demonstrado nas Figuras 5 e 6). O dimensionamento dos demais elementos foram definidos de acordo com os parâmetros do motor elétrico assíncrono trifásico WEG NBR 7094. É possível visualizar os principais parâmetros nominais do motor utilizado na bancada do freio ilustrados na Tabela 1.

Parâmetro	Valor
Potência Mecânica	0,18kW- ¼cv
Tensão de linha	380 V
Rotação nominal	1710RPM
Número de Polos	4
Corrente de partida $I_p / I_N$	4,5
Corrente nominal de operação	0,66 A
Torque em carga plena	≈ 1 N.m

Tabela 1 - Parâmetros nominais do motor elétrico

Fonte: Placa do motor WEG NBR 7094

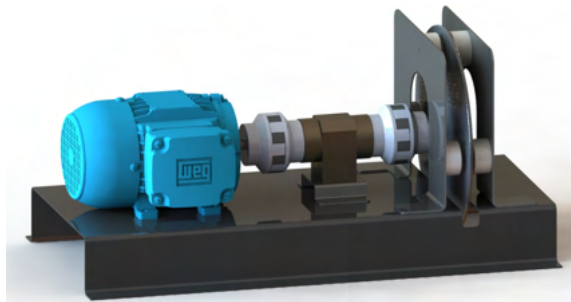


Figura 5 - CAD do projeto (a)

Fonte: o próprio autor

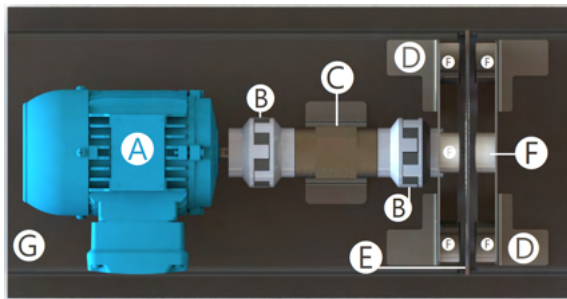


Figura 6 - CAD do projeto (b)

Fonte: o próprio autor

A bancada do freio eletromagnético, demonstrada no desenho da Figura 6 é composta pelos elementos reunidos na Tabela 2:

Legenda	Significado
A	Motor elétrico assíncrono trifásico WEG NBR 7094;
B	Acopladores de eixo;
C	Transdutor de torque rotativo MKDC-20 <i>N.m</i>
D	Suporte estático para fixação dos eletroímãs de 20,5 <i>cm</i> de altura e 22 <i>cm</i> de largura, com furo central passante;
E	Disco de alumínio de 23 <i>cm</i> de diâmetro e 4 <i>mm</i> de espessura;
F	Eletroímã cilíndrico de elevação;
G	Base de alumínio da bancada de 65 <i>cm</i> de comprimento e 24 <i>cm</i> de largura, com 1,5 <i>cm</i> dobrados em suas extremidades laterais.

Tabela 2 – Legenda figura 6

Fonte: o próprio autor

Para efeitos de análise inicial, grande parte dos elementos compostos na bancada foram selecionados de material paramagnético e isotrópico objetivando reduzir efeitos eletromagnéticos indesejáveis (PAGI FERREIRA, 2017, p. 9).

Os materiais condutores de baixa permeabilidade (como é o caso do alumínio) são mais propícios ao emprego em sistemas de frenagem de Foucault, devido a maior facilidade de penetração do fluxo magnético através de sua superfície em baixa frequência, e de maior intensidade das correntes parasitas que podem ser induzidas em seu interior (PINHEIRO FILHO, 2014, p. 20). Estes fatores estão relacionados tanto por causa da sua baixa resistividade como também devido a sua baixa permeabilidade magnética que permite uma maior penetração do campo, submetido a uma maior relutância, apresentando menor decaimento da distribuição da densidade de corrente ao longo da profundidade do meio (SARKIS, 2000). O disco acoplado no eixo e suportes fixos à base foram elaborados no processo de usinagem eletroerosão a fio.

O fluxo pontual no disco ( $\phi$ ) é aproximado pela expressão senoidal em função do tempo descrito em (5):

$$\phi(t) = \phi_0 \cdot \text{sen} \left( \frac{p \cdot n \cdot t}{60} \right) \quad (5)$$

Onde:

$p$ – Pares de polos de bobinas de freio;

$n$ – Revoluções por minuto [*RPM*];

$t$ – Tempo [*s*];

A disposição estratégica dos eletroímãs (conforme visualiza-se na Figura 7) é

consequência de uma solução que visa a efetivar o desempenho de frenagem, avaliando a relação entre momento de inércia do disco e do motor. Quando polos de ímãs são postos em oposição entre uma superfície metálica condutora, a profundidade do campo magnético variante no tempo tende a ser elevada pela continuidade das linhas de fluxo magnético, que nunca são interrompidas (GRIFFITHS, 2011, p. 182). Os pares de bobinas com suas faces confrontantes e *airgap* <1 mm em relação ao disco, situados na periferia do mesmo, mostrou-se ser a melhor opção para o arranjo físico resultando num maior torque de frenagem alcançado e o menor efeito de borda entre os pares de bobinas.

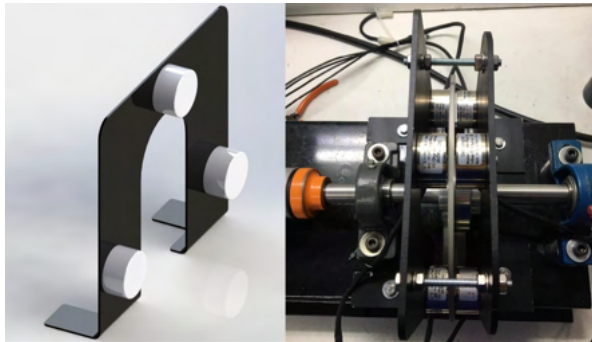


Figura 7 - Suporte estático dos eletroímãs

Fonte: o próprio autor

A Figura 8 demonstra a montagem final do protótipo da bancada do freio eletromagnético.

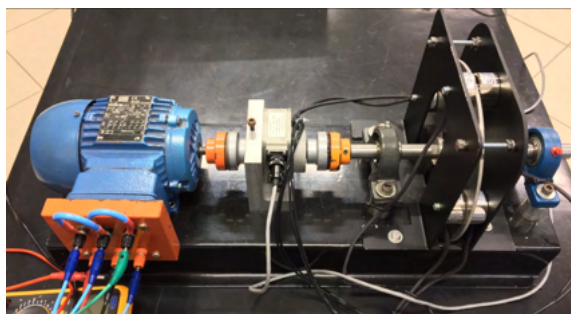


Figura 8 - Protótipo final da bancada do freio eletromagnético

Fonte: o próprio autor

### 3.2 Montagem Eletroeletrônica

A primeira etapa da construção do projeto eletrônico se deu na seleção de modelo

de eletroímã. Como se objetivou realizar ensaios com cargas variáveis e modelos distintos de frenagem na bancada, optou-se pela utilização de eletroímãs comerciais cilíndricos de elevação, amplamente empregados em projetos de robótica e automação.

Na bancada, é possível manipular facilmente a posição dos suportes, permitindo o usuário substituir os eletroímãs atuais por unidades de maior valor magnético, caso haja a necessidade de se executar frenagens com discos e motores de proporções maiores. Segundo *datasheet* do fabricante, a potência do eletroímã é diretamente proporcional à altura da base do cilindro.

Eletroímãs cilíndricos de elevação possuem alta eficácia magnética com baixo consumo de corrente e podem ser alimentados em  $V_{CC}$  (tensão em corrente contínua).

Se objetiva trabalhar com  $V_{CC}$  em aplicações onde visualiza-se o fenômeno das correntes de Foucault para se evitar o efeito pelicular, manifestado exclusivamente em aplicações de corrente alternada. O efeito pelicular é proporcional à intensidade de corrente e aumenta com a raiz quadrada da frequência, com a permeabilidade magnética e com a condutividade elétrica do condutor (PINHEIRO FILHO, 2014, p. 58).

Quando se trabalha com  $V_{CC}$  no enrolamento do eletroímã para efeitos de frenagem no emprego das correntes parasitas, tem-se controle de aceleração suave, com alta eficiência e rápida resposta dinâmica (HEALD, 1988, p. 521-522).

O projeto eletrônico é composto por um circuito (demonstrado no diagrama da Figura 9) fonte retificador de onda completa com dois diodos mais filtragem capacitiva, baseado no circuito integradoregulador de tensão  $U1$  que ajusta a alimentação final dos eletroímãs denominada  $V_E$  (BOYLESTAD, 2000, p. 666).

Utilizou-se as portas digitais da plataforma *Arduino* UNO R3 para um controle em malha aberta da corrente que flui nas bobinas de campo, manipulando o ciclo de trabalho do PWM em alta frequência conforme necessidade do usuário. O optoacoplador  $U2$  foi empregado para proteção do circuito de controle e o mosfet de potência  $Q1$  para o chaveamento do sinal (HART, 2011, p. 111).

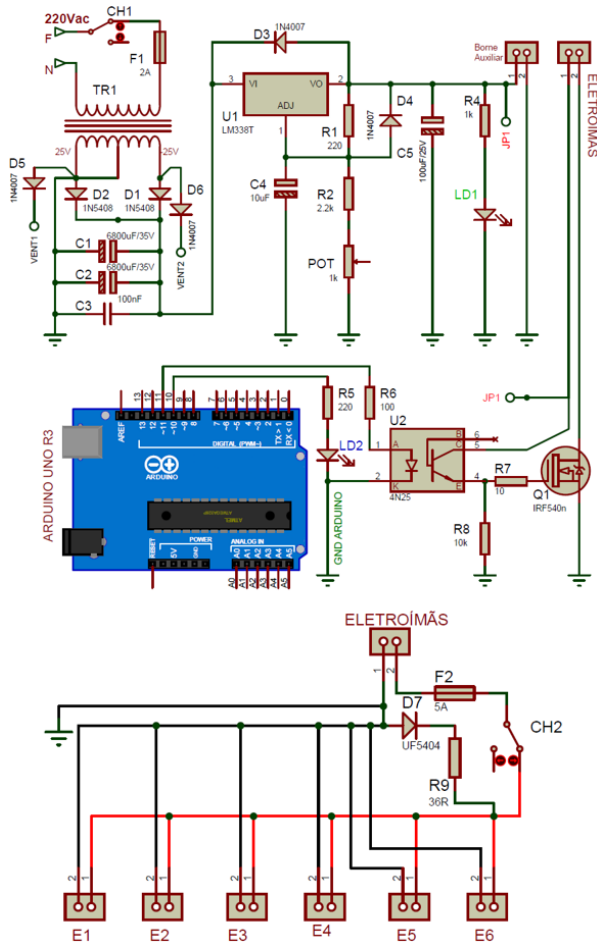


Figura 9 - Diagrama eletrônico das placas 1 e 2

Fonte: o próprio autor

De acordo com informações do fabricante, para longos períodos de utilização dos eletroímãs, sua alimentação deve permanecer em  $12 V_{CC}$  para evitar o sobreaquecimento das espiras. Porém, ensaios realizados na bancada mostraram a efetividade dos eletroímãs com uma faixa de alimentação maior em períodos curtos de frenagem.

A partir dessas conclusões iniciais, dimensionou-se o projeto eletrônico conforme visualizado na Figura 9. A alimentação dos eletroímãs  $V_E$  altera-se conforme a posição de  $POT$  e ajusta-se entre o  $span$  de  $12 V_{CC} \leq V_E \leq 20 V_{CC}$ . O estágio de teste 1 (ET1) considera a posição de  $POT$  em  $V_E$ ;  $12 V_{CC}$ . O estágio de teste 2 (ET2) considera a posição de  $POT$  em  $V_E$ ;  $20 V_{CC}$ , resultando em aproximadamente o dobro de consumo de corrente nominal em cada eletroímã, aprimorando a ação da frenagem conforme visualizado nas Tabelas 4 e 5 da seção 4 do documento.

Como consequência recorrente de perdas nas limitações do sistema eletrônico, foi

imposta, conseqüentemente, uma queda em  $V_E$  de aproximadamente  $3 V_{CC}$  no estágio de teste 2.

Para evitar retorno de tensão negativa por efeito indutivo é empregada a série  $R9$  com  $D7$  (diodo *flyback* para altas frequências) (HART, 2011, p. 81).

O led  $LD1$  sinaliza na cor verde quando o sistema é ligado. O led  $LD2$  possui a mesma programação de ciclo de trabalho do PWM dos eletroímãs, assim de forma intuitiva, sinaliza na cor azul o efeito de frenagem (a iluminação de  $LD2$  e o ciclo de trabalho do PWM possuem uma relação constante e síncrona).

Utiliza-se dois ventiladores conectados nos bornes do secundário do transformador para resfriamento do módulo.

Os eletroímãs são finalmente conectados em paralelo nos bornes  $E_n$ . A Figura 10 mostra o protótipo final do projeto eletroeletrônico com as PCBs confeccionadas, definido como módulo fonte CA/CC.

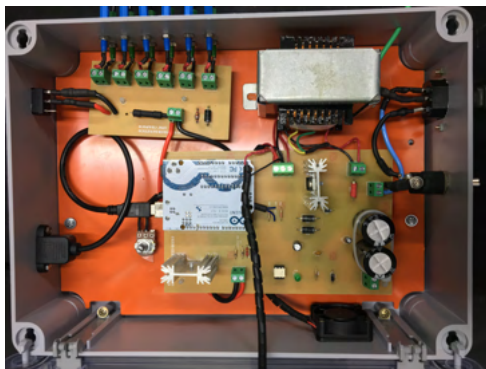


Figura 10 - Projeto eletroeletrônico (a)

Fonte: o próprio autor

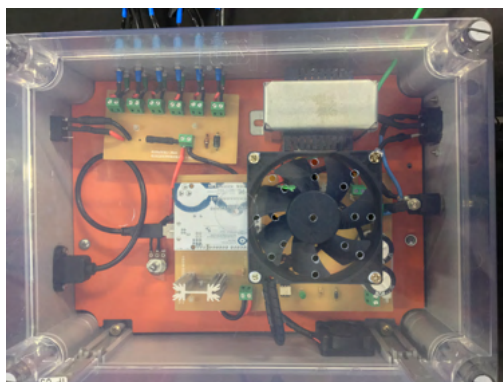


Figura 11 - Projeto eletroeletrônico (b)

Fonte: o próprio autor



### 3.3 Software IHM

Com o objetivo de se aprimorar a experiência de manuseio da bancada do freio eletromagnético, desenvolveu-se uma interface homem-máquina (IHM) digital em formato de *software*, responsável pela manipulação dos comandos que definem diferentes níveis e comportamentos de frenagem.

A tela única foi projetada no intuito de fornecer à bancada do freio eletromagnético uma ferramenta adicional que possibilite, de forma simplificada e intuitiva, o manuseio do parâmetro da razão cíclica do PWM injetado nas bobinas de campo. O módulo proporciona ao operador a manipulação computacional do efeito de frenagem conforme o ensaio de sua necessidade.

Para a programação e elaboração da tela utilizou-se o *software Visual Studio*. O *software* realiza uma comunicação serial com a bancada (STELLMAN; GREENE, 2021, p. 169-175, p. 385-395, p. 589-600).

A Figura 12 apresenta o formato da tela, dividida em duas seções: parâmetros e comandos de operação. Na primeira seção, localizada à esquerda da tela, é possível selecionar a porta conectada via cabo USB entre o computador do operador e o módulo controlador da bancada, botões de “ligar/desligar” (sinalizado pelo *status* verde/vermelho) e também o valor do *baudrate*, que define a velocidade da comunicação.

Na aba “Operação”, localizada à direita da tela, é possível aplicar, manipulando os únicos dois botões, um degrau de frenagem em porcentagem (0% á 100%) e uma rampa crescente de frenagem em função de um valor de tempo pré-definido em segundos, para simular uma carga crescente ao longo de um período.

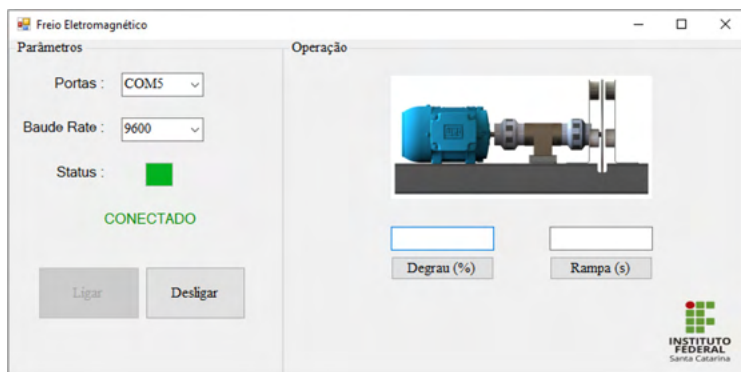


Figura 12 - Software de operação da bancada

Fonte: o próprio autor

## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção do documento serão apresentadas discussões e resultados extraídos do sistema da bancada do freio eletromagnético, esses que definem os objetivos gerais do projeto.

O diagrama da Figura 13 demonstra a configuração do sistema para os ensaios e extração de dados. Integrou-se todos os elementos da bancada do freio eletromagnético com instrumentos de aquisição de parâmetros da máquina assíncrona, seu eixo e do módulo fonte controlador dos eletroímãs.

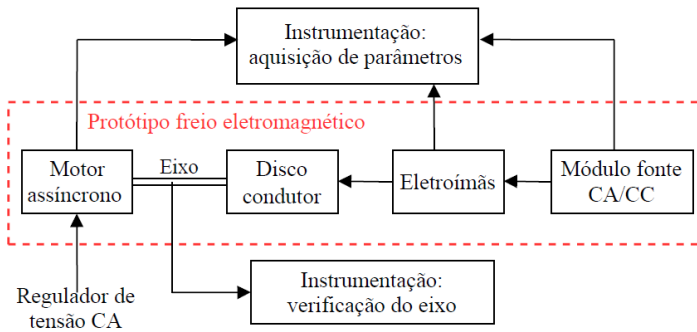


Figura 13 - Diagrama funcional dos ensaios

Fonte: o próprio autor

### 4.1 Parâmetros do motor

Os ensaios anexados nas Tabela 4 e 5 objetivam o estudo e análise do comportamento do motor em diferentes faixas de tensões de entrada. O modelo de frenagem utilizado para os ensaios é um degrau de 100% da razão cíclica e frequência  $1\text{kHz}$  do PWM. O estágio de teste 1 (ET1) considera  $V_E \approx 12 V_{CC}$  (tensão nominal) e o estágio de teste 2 (ET2) considera  $V_E \approx 17 V_{CC}$ . A Tabela 3 apresenta a legenda para os parâmetros do sistema.

Simbologia	Parâmetro	Unidade
$V_\phi$	Tensão por fase de entrada do motor	$[V_{cr}]$
$V_E$	Tensão nos eletroímãs	$[V_{cc}]$
$I_{SF} / I_{CF}$	Corrente por fase de entrada do motor sem frenagem / com frenagem	$[A]$
$P_{SF} / P_{CF}$	Potência do motor sem frenagem / com frenagem	$[W]$

$n_{SF} / n_{CF}$	Velocidade do motor sem frenagem / com frenagem	[RPM]
-------------------	---	-------

Tabela 3 - Parâmetros do sistema

Fonte: o próprio autor

$V_{\phi}$	$I_{SF}$	$I_{CF}$	$P_{SF}$	$P_{CF}$	$n_{SF}$	$n_{CF}$
90	0,35	>1*	23,70	>65*	1660	<1000*
100	0,30	0,61	22,50	50	1703	1477
125	0,30	0,45	22,50	43	1742	1662
150	0,35	0,45	25,50	46	1760	1714
175	0,41	0,47	31,00	50	1770	1740
200	0,49	0,52	36,50	53	1776	1756
220	0,58	0,59	42,80	58	1781	1763

Tabela 4 - Parâmetros do motor elétrico estágio de teste 1 (ET1)

Fonte: o próprio autor

$V_{\phi}$	$I_{SF}$	$I_{CF}$	$P_{SF}$	$P_{CF}$	$n_{SF}$	$n_{CF}$
90	0,35	--	23,70	--	1660	<1000*
100	0,30	>1*	22,50	>80*	1703	<1000*
125	0,30	0,65	22,50	63	1742	1582
150	0,35	0,50	25,50	60	1760	1675
175	0,41	0,52	31,00	63	1770	1716
200	0,49	0,55	36,50	66	1776	1738
220	0,58	0,63	42,80	70	1781	1750

\* = Teste interrompido devido a possibilidade de travamento do motor.

Tabela 5 - Parâmetros do motor elétrico estágio de teste 2 (ET2)

Fonte: o próprio autor

Os dados expostos nas Tabelas 4 e 5 foram coletados utilizando um analisador de qualidade de energia *Fluke 435* e um foto-tacômetro digital. A Figura 14 mostra o sistema em funcionamento.

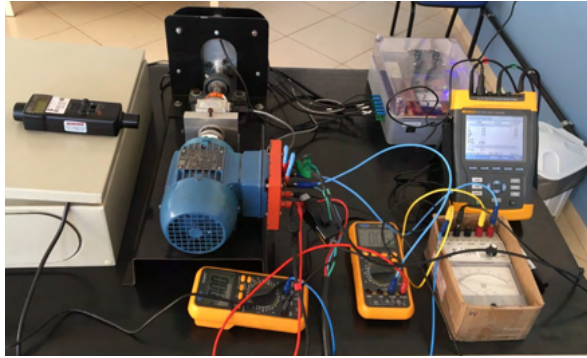


Figura 14 - Ensaio realizado na bancada

Fonte: o próprio autor

## 4.2 Circuito Elétrico Equivalente do Motor

Para o estudo correto do dimensionamento do motor, realizou-se o levantamento do circuito elétrico equivalente (CEE) da Figura 3, este definido pela estimação de resistências e impedâncias da máquina elétrica (KOSOW, 1979, p. 321; FITZGERALD; KINSLEY JUNIOR; KUSKO, 1975, p. 351). Esta etapa é necessária para o estudo do torque estimado desenvolvido e posteriores comparações com o torque mensurado através do sistema da Figura 26.

Definem-se os parâmetros da Figura 3:

$V_\phi$  – Tensão por fase de entrada do motor;

$s$  – Escorregamento;

$R_1$  e  $R_2$  – Resistências das bobinas do estator e rotor respectivamente (perdas ôhmicas);

$jX_1$  e  $jX_2$  – Reatâncias de dispersão de fluxo do estator e do rotor respectivamente;

$jb_m$  e  $g_m$  – Parâmetros do circuito magnético do motor (susceptância e condutância respectivamente).

Para obtenção dos parâmetros da máquina elétrica foram realizados dois ensaios: ensaio de rotor bloqueado e ensaio a vazio (FITZGERALD; KINSLEY JUNIOR; KUSKO, 2014, p. 369).

Os dados extraídos de ensaios laboratoriais do rotor bloqueado ' $b'$ ' e vazio ' $av$ ' são apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Simbologia	Valor	Unidade
$V_{bl}$	41,5	[V <sub>ca</sub> ]
$i_{bl}$	0,66	[A]
$P_{bl}$	25	[W]

Tabela 6 - Ensaio de rotor bloqueado

Fonte: o próprio autor

Simbologia	Valor	Unidade
$V_{av}$	220	[V <sub>ca</sub> ]
$i_{av}$	0,65	[A]
$P_{av}$	20	[W]

Tabela 7 - Ensaio a vazio

Fonte: o próprio autor

A partir dos parâmetros rotor bloqueado e a vazio, encontra-se  $R_1$ ,  $X_1$  (estator) e  $R_2$ ,  $X_2$  (rotor) conforme (6)-(11) .

$$R_{eq} = \frac{P_{bl}}{I_{bl}^2} \cong 57,4\Omega \quad (6)$$

$$Z_{bl} = \frac{V_{bl}}{I_{bl}} \cong 62,9\Omega \quad (7)$$

$$R_{eq} = \frac{P_{bl}}{I_{bl}^2} \cong 57,4\Omega \quad (8)$$

$$X_{bl} = \sqrt{Z_{bl}^2 - R_{eq}^2} \cong 25,73\Omega \quad (9)$$

Considera-se  $R_1 = R_2$  e  $X_1 = X_2$ , portanto:

$$R_1 = R_2 = \frac{R_{eq}}{2} \cong 28,7\Omega \quad (10)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{bl}}{2} \cong 12,9\Omega \quad (11)$$

Os parâmetros do circuito magnético são obtidos com base no ensaio a vazio, considerando as perdas no rotor ( $P_{rot}$ ) e as perdas no ferro ( $P_{fer}$ ):

$$P_{fer} = P_{rot} = \frac{P_{av} - R_1 \cdot I_{av}^2}{2} \cong 3,94W \quad (12)$$

$$R_{eq} = R_1 + R_{fer} = \frac{P_{av} - P_{rot}}{I_{av}^2} \cong 38,01\Omega \quad (13)$$

Logo:

$$R_{fer} \cong 9,31\Omega$$

Para determinar  $X_{fer}$  utiliza-se as equações (14) e (15):

$$Z_{eq} = \frac{V_{av}}{I_{av}} \cong 338,46\Omega \quad (14)$$

$$X_{eq} = X_1 + X_{fer} = \sqrt{Z_{eq}^2 + R_{eq}^2} \quad (15)$$

Deste modo:

$$X_{fer} \cong 323,42\Omega$$

Ainda por comparação, conclui-se que  $X_{fer} > R_{fer}$  e baseado em Renato (1990), determina-se a equivalência da Figura 15.

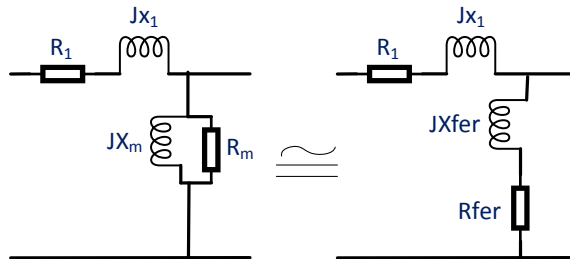


Figura 15 - Modelo CEE equivalência entre admitância e impedância de ramo de magnetização

Fonte: o próprio autor

Os valores de  $b_m$  e  $X_m$  são determinados conforme (16) e (17). Já  $g_m$  e  $R_m$  podem ser desconsiderados pois o resultante do paralelo entre  $X_m$  e  $R_m$  resulta apenas em uma reatância de magnetização  $X_m$ , por simplificação do modelo:

$$b_m = \frac{X_{fer}}{R_{fer}^2 + X_{fer}^2} \cong 3,09mS \quad (16)$$

$$X_m = b_m^{-1} \cong 323,45\Omega \quad (17)$$

A Figura 16 apresenta o circuito magnético simplificado.

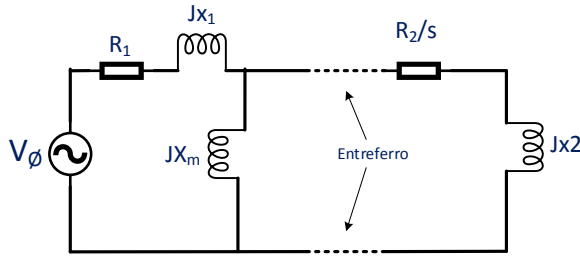


Figura 16 - Modelo CEE simplificado

Fonte: o próprio autor

Aplica-se o equivalente de *thevenin* para obter-se o modelo definitivo de tratamento matemático do motor, resultando no circuito da Figura 17:

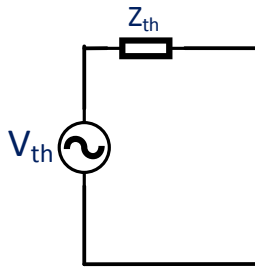


Figura 17 - Modelo CEE simplificado através do equivalente de thevenin

Fonte: o próprio autor

Neste modelo, os parâmetros  $V_{th}$ ,  $R_{th}$  e  $X_{th}$  são obtidos conforme (18-20), as quais são boas aproximações ao modelo, segundo Fitzgerald, Kinsley Junior e Kusko (1975, p. 360):

$$V_{th} = V_{\phi} \cdot \frac{X_m}{X_1 + X_m} \quad (18)$$

$$Z_{th} = \frac{(R_1 + jX_1) \cdot jX_m}{(R_1 + jX_1) + jX_m} \simeq 26,35 + j14,65 \text{ } [\Omega] \quad (19)$$

Logo:

$$R_{th} = 26,35 \text{ } \Omega \quad (20.a.)$$

$$X_{th} = 14,65 \text{ } \Omega \quad (20.b.)$$

### 4.3 Torque

Neste t3pico a partir dos valores de torque mensurados atrav3s do sistema de medi33o do transdutor de torque (Figura 26), tentou-se estabelecer um comparativo entre os valores calculados e medidos, conforme CEE do motor do cap3tulo 4.2.

Para os ensaios realizados, foram consideradas duas faixas de tens3o para obten33o do torque:  $V_{\phi} = 125 V_{CA}$  (onde o desempenho de frenagem foi superior, conforme visualizado nas tabelas 4 e 5) e  $V_{\phi} = 220 V_{CA}$  (tens3o nominal do motor).

A fonte dos eletro3m3s operou em ET1 ( $V_E 12 V_{CC}$ ) e ET2 ( $V_E 17 V_{CC}$ ), assim sendo, poss3vel analisar uma rela33o entre torque e intensidade de corrente nas bobinas de campo.

Segundo Kosow (1989, p. 322), a equa33o (21) determina o c3lculo do torque desenvolvido ( $T_{des}$ ).

$$T_{des} = \frac{1}{\omega_s} \cdot q \cdot \frac{V_{th}^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{\left[ \left( R_{th} + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_{th} + X_2)^2 \right]} \quad (21)$$

O par3metro  $V_{th}$  3 calculado atrav3s de (18) para cada faixa de tens3o de entrada  $V_{\phi}$  onde deseja-se obter o valor de torque desenvolvido.

O par3metro  $q$  3 o n3mero de fases do motor, neste caso 3 fases (motor trif3sico). J3 o escorregamento  $s$  3 determinado conforme (22) e depende da velocidade de rota33o do motor ( $n_{SF}$  e  $n_{CF}$  apontados nas Tabelas 4 e 5). A Tabela 8 relaciona os par3metros listados, para o c3lculo final do torque desenvolvido.

$$s = \left( \frac{n_s - n_{frenagem}}{n_s} \right) \quad (22)$$

Onde:

$n_s$  – velocidade s3ncrona do motor (1800 RPM);

$n_{frenagem}$  – velocidade do motor a partir da frenagem aplicada.

$V_{\phi}$	Ensaio	$V_{th}$	$s_{SF}$	$s_{CF}$
125	ET1	120,20	0,03222	0,07666
125	ET2	120,20	0,03222	0,12111
220	ET1	211,56	0,01055	0,02055
220	ET2	211,56	0,01055	0,02777

Tabela 8 - Par3metros ensaios

Fonte: o pr3prio autor

A velocidade angular s3ncrona ( $\omega_s$ ) 3 calculada conforme a equa33o (23).



$$\omega_s = \frac{4 \cdot \pi \cdot f}{p} \cong 188,5 \text{ rad/s} \quad (23)$$

Portanto, os valores calculados para o torque desenvolvido são apresentados na Tabela 9.

$V_\phi$	Ensaio	$T_{SF}$	$T_{CF}$
125	ET1	243,30	533,55
125	ET2	243,30	777,33
220	ET1	256,81	491,14
220	ET2	256,81	654,49

Tabela 9 - Cálculo do torque por ensaios em  $[10^{-3} \text{ N.m}]$

Fonte: o próprio autor

Nos gráficos apresentados na seção, é possível fazer um comparativo com os valores de torque mensurados através do sistema de medição do transdutor de torque (visualizado na Figura 26) e dos dados apresentados na Tabela 9.

A Figura 18 mostra a legenda dos gráficos. A Figura 19 apresenta um comparativo entre os valores de torque aplicando um degrau de 100% de frenagem para  $V_\phi = 125 V_{CA}$ .

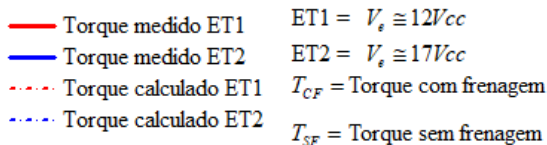


Figura 18 - Legenda dos gráficos de torque

Fonte: o próprio autor

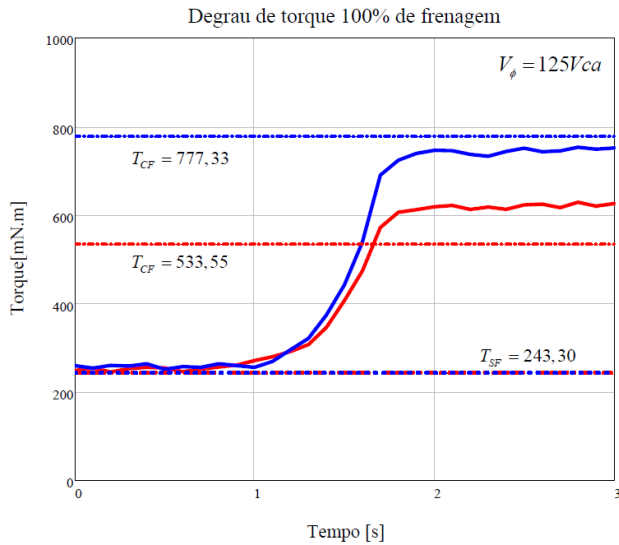


Figura 19 - Gráfico degrau de torque 100% de frenagem comparando valores calculados e extraídos  
 Fonte: o próprio autor

A Figura 20 apresenta um comparativo entre os valores de torque aplicando um degrau de 100% de frenagem para a tensão nominal do motor.

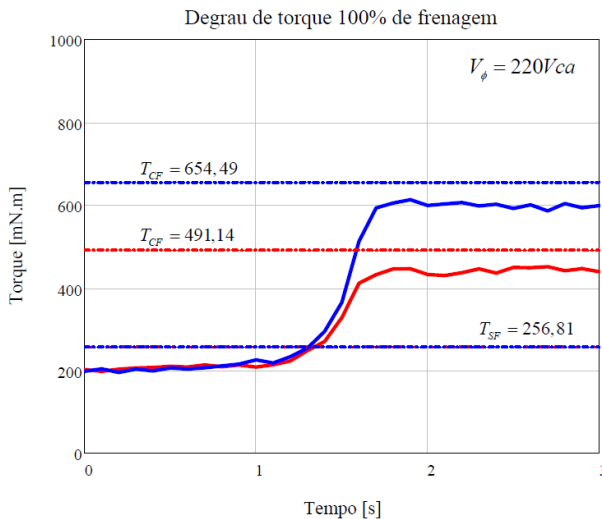


Figura 20 - Gráfico degrau de torque 100% de frenagem para tensão nominal do motor, comparando valores calculados e extraídos  
 Fonte: o próprio autor

A Figura 21 apresenta um comparativo entre os valores de torque aplicando uma

rampa de 10s de frenagem para  $V_{\phi} = 125 V_{CA}$ .

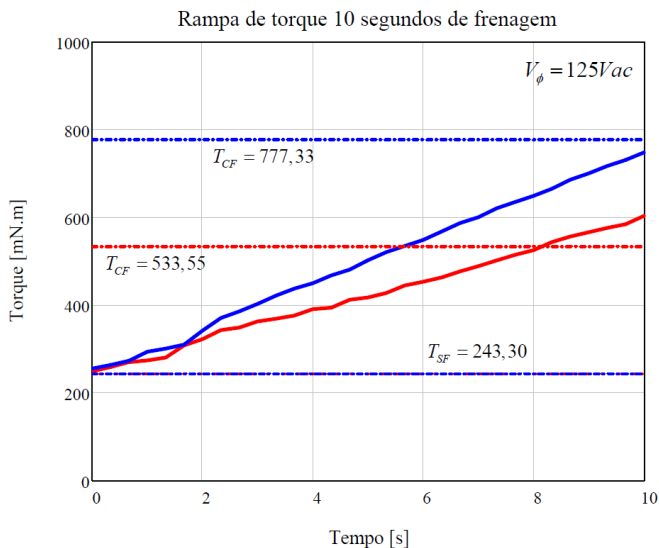


Figura 21 - Gráfico rampa de torque 10s de frenagem valores calculados e extraídos

Fonte: o próprio autor

A Figura 22 apresenta um comparativo entre os valores de torque aplicando uma rampa de 10s de frenagem para tensão nominal do motor.

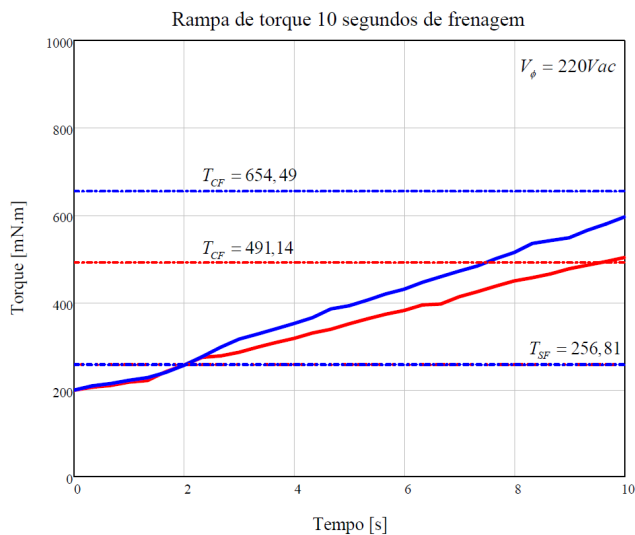


Figura 22 - Gráfico rampa de torque 10s de frenagem para tensão nominal do motor, comparando valores calculados e extraídos

Fonte: o próprio autor

É possível visualizar na Figura 23, Figura 24 e Figura 25 a relação entre torque e escorregamento quando se aplica uma frenagem, tanto para ET1 como ET2, valores medidos e calculados, em diferentes faixas de tensão de entrada do motor.

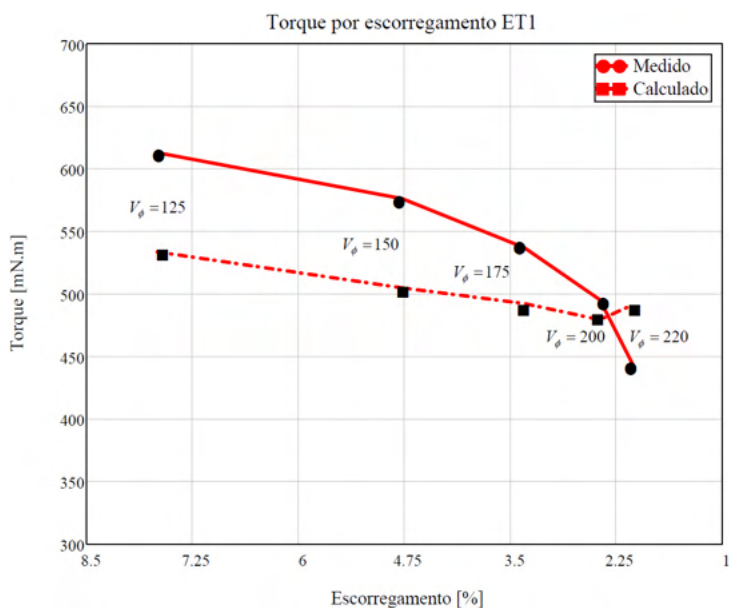


Figura 23 - Gráfico da curva de torque medido e calculado por escorregamento aplicando frenagem em ET1

Fonte: o próprio autor

A Tabela 10 relaciona os valores finais de torque calculado [mN.m] e escorregamento [%] para cada faixa de tensão de fase, demonstrados no gráfico da Figura 23. O módulo fonte operou em estágio de teste 1 (ET1).

$V_\phi$	$s$	$T_{CALC}$
125	7,666	533,64
150	4,777	504,94
175	3,333	492,39
200	2,444	479,39
220	2,055	491,27

Tabela 10 - Cálculo do torque por escorregamento (ET1)

Fonte: o próprio autor

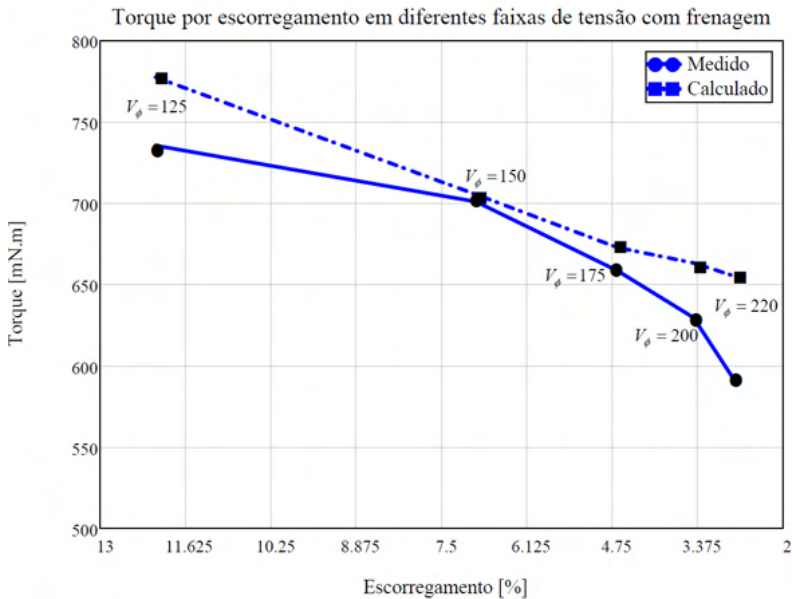


Figura 24 - Gráfico da curva de torque medido e calculado por escorregamento aplicando frenagem em ET2

Fonte: o próprio autor

A Tabela 11 relaciona os valores finais de torque calculado [ $mN.m$ ] e escorregamento [%] para cada faixa de tensão de fase, demonstrados no gráfico da Figura 24. O módulo fonte operou em estágio de teste 2 (ET2).

$V_\phi$	$s$	$T_{CALC}$
125	12,111	777,41
150	6,944	705,32
175	4,666	672,66
200	3,444	663,12
220	2,777	655,12

Tabela 11 - Cálculo do torque por escorregamento (ET2)

Fonte: o próprio autor

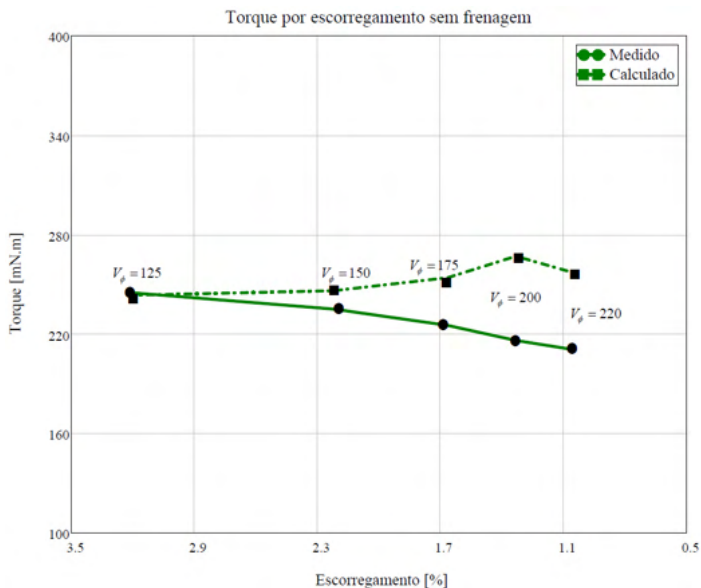


Figura 25 - Gráfico curva de torque medido e calculado sem frenagem

Fonte: o próprio autor

A Tabela 12 relaciona os valores finais de torque calculado [ $mN.m$ ] e escorregamento [%] para cada faixa de tensão de fase, demonstrados no gráfico da Figura 25. Para este ensaio, não houve efeito de frenagem.

$V_\phi$	$s$	$T_{CALC}$
125	3,222	243,32
150	2,222	246,15
175	1,666	253,85
200	1,333	266,88
220	1,055	256,95

Tabela 12 - Cálculo do torque por escorregamento sem frenagem

Fonte: o próprio autor

A Figura 26 evidencia o sistema de medição do transdutor de torque rotativo MKDC-20 e seus elementos, bem como uma placa eletrônica para leitura dos dados e um indicador digital MMK5030 com certificado de calibração do inmetro.



Figura 26 - Sistema para medição do torque

Fonte: o próprio autor

#### 4.4 Parâmetros Eletroímã

O comportamento da tensão e corrente total dos eletroímãs conforme os ensaios para degrau de 100% de frenagem podem ser visualizados na Figura 27 e Figura 28. Visando uma solução atenuada para o funcionamento das bobinas a frequência do PWM foi configurada para 1kHz. O modulo fonte operou em ET2.

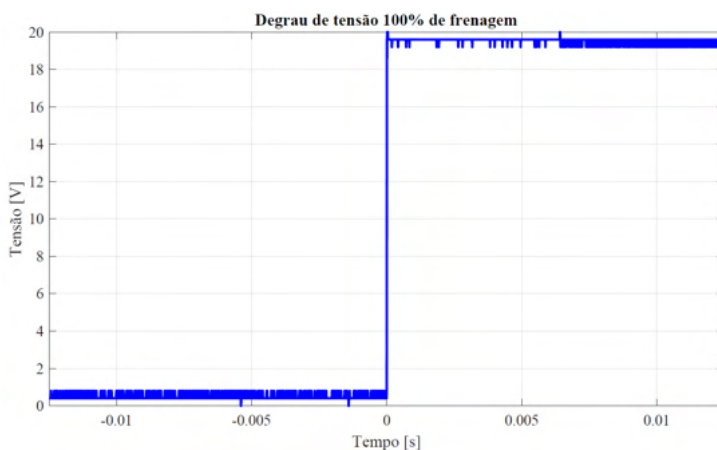


Figura 27 - Gráfico tensão em função do tempo degrau 100% de frenagem

Fonte: o próprio autor

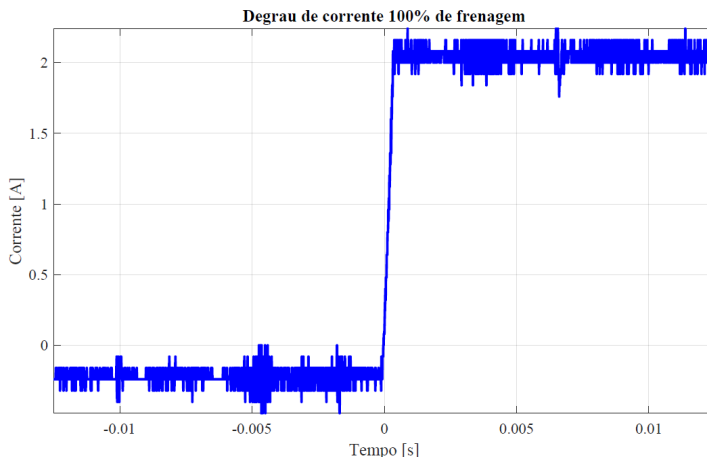


Figura 28 - Gráfico corrente em função do tempo degrau 100% de frenagem

Fonte: o próprio autor

Na Figura 29 é possível observar o funcionamento da razão cíclica do PWM em um degrau de frenagem de 90% e a corrente quase atingindo seu pico.

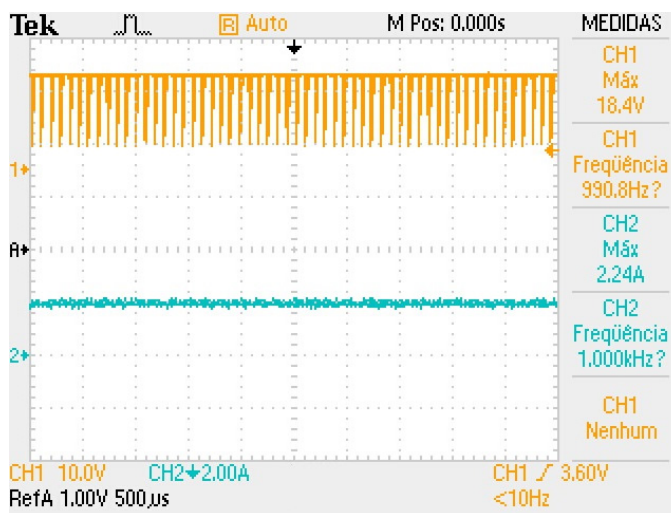


Figura 29 - Degrau de frenagem 90%

Fonte: o próprio autor

No arquivo de anexo, é possível visualizar vídeos do comportamento da tensão e corrente total dos eletroímãs conforme os ensaios para rampa 10 segundos e degrau de frenagem. Também estão contidos nesse arquivo, fotos da bancada com maior resolução, diagramas e ensaios de laboratório.



*Weblink* dos anexos do projeto, incluindo documentos da bancada, arquivos do software, instruções de uso e vídeos de ensaios de comportamentos de frenagem: <https://mega.nz/file/49BHRKxZ#kZD9gRZBITillm9ixFkwAZpkXcQQy98-sOWhuLFO25s>.

## 5 | CONCLUSÃO

A proposta apresentada neste projeto proporciona o ensaio didático de motores de indução diretamente acoplado a cargas variáveis, onde o freio eletromagnético tem o objetivo de representar níveis de frenagem pré-definidos.

Uma carga mecânica convencional pode ser substituída por um freio induzido por correntes parasitas, sem que isso altere o comportamento motriz, o que significa uma grande vantagem para a realização de ensaios em laboratório.

Os resultados extraídos foram satisfatórios, visto que foi possível alcançar uma eficiência de frenagem em diversas faixas de tensão de entrada no motor, sem ultrapassar sua limitação de corrente. Os valores de torque coletados através do transdutor de torque foram bem aproximados com os valores calculados, resultando em um estudo mais aprofundado da máquina elétrica e da análise completa do sistema da bancada do freio eletromagnético.

Melhorias no desempenho de frenagem podem ser alcançadas com o acréscimo de eletroímãs ou com a substituição das unidades atuais por outros de potência mais elevada.

O material condutor na composição do disco também poderá ser substituído por outro de condutividade elétrica superior, ou ter um acréscimo em sua espessura (conforme equação 2), o que implicaria num maior valor de correntes induzidas (de Foucault).

Para trabalhos futuros utilizando a bancada, sugere-se ensaios de partida do motor e o estudo da implementação de unidades de eletroímãs alimentados por tensão em corrente alternada comparando a efetividade de frenagem com as unidades atuais.

A construção do projeto demandou estudo multidisciplinar e as medidas obtidas serão utilizadas para análise didática da eficiência da conversão eletromecânica no laboratório de máquinas elétricas do Instituto Federal de Santa Catarina, campus Chapecó.

## AGRADECIMENTOS

O autor do documento agradece primeiramente sua família, em particular sua mãe, pela confiança imposta. Agradece ao orientador Prof. Dr. Alexandre Dalla’Rosa pela orientação precisa e eficaz, mesmo em tempos de pandemia. Agradece ao Prof. Me. Fernando Michelin por todo o auxílio prestado na construção mecânica da bancada e também ao Prof. Dr. Maro Jinbo pelo empréstimo do sistema de transdutor de torque rotativo e seus demais elementos. Agradece aos servidores e colegas do IFSC Campus Chapecó que ajudaram, de alguma maneira, na idealização e confecção deste projeto.

## REFERÊNCIAS

- BARAN, W. **Influence of diferente magnetic field on eddy current braking**. Essen/DE: IEEE Transactions, 1970.
- BOYLESTAD, R. L. **Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos**. 8. ed. São Paulo. Grupo A - Bookman, 2000.
- FITZGERALD, A. E.; KINSLEY JUNIOR, C.; KUSKO, A. **Máquinas Elétricas**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 2014.
- GRIFFITHS, D. J. **Eletrodinâmica**. 3. ed. São Paulo: Pearson Education, 2011.
- HART, D. W. **Eletrônica de Potência**. 4. ed. Porto Alegre. Grupo A - Bookman, 2011.
- HEALD, M. A. **Magnetic Braking: Improved Theory**. American Journal of Physiscs. Swarthmore College/PA, Setembro. 1988.
- KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 4. ed. Porto Alegre: Globo, 1979.
- OLIVEIRA, L. F. C. **A influência dos tirantes de fixação do estator nas perdas das máquinas de indução trifásicas**. 2013. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- PACHECO, R. L. **Conversão Eletromecânica de Energia B**. Florianópolis: UFSC, 1990.
- PAGI FERREIRA, D. **Medidas e materiais elétricos**. Londrina. Educacional S.A, 2017.
- PEREIRA, A. H. **Freio eletromagnético para ensaios de motores de indução**. 2006. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.
- PINHEIRO FILHO, R. F. **Estudo de um sistema de frenagem eletromagnética empregando correntes parasitas**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- RIVAL, M. **Os grandes Experimentos Científicos**. Rio de Janeiro: Zahar, 1997.
- ROONEY, A. **A história da física**. São Paulo: M. Books, 2013.
- SADIKU, M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. 5. ed. Porto Alegre: Grupo A – Bookman, 2012.
- SALZMAN, P. J.; BURKE, J. R.; LEA, M. S. The effect of electric field in classic introductory physics treatment of eddy current forces. **American Journal of Physics**, v. 69, n. 5, p. 586-590, maio 2001.
- SARKIS, C. D. **Blindagem Eletromagnética**. 2000. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~jramirez/disciplinas/materiais/trab5.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2021.

STELLMAN, A.; GREENE J. **Head First C#**. Beijing: O'Reilly, 2021.

WOUTERSE, J. H. **Critical torque and speed of eddy current brake with widely separated soft iron poles**. Eindhoven/NL: IEE Proceedings, 1991.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. S.; ZEMANSKY. **Física III: Eletromagnetismo**. 12. ed. São Paulo: Pearson Education, 2009.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

ADMI 106, 108

Alimentadores 90, 91, 92, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 104, 105

Angulação 140, 141, 142, 143, 144, 147, 150, 151

Aprendizagem baseada em projetos 115, 118

Atenuação de riscos 114, 115

### B

Balanco energético 20, 90, 91, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104

Barramento magnético 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192

Bomba centrífuga 33, 35, 41, 46

Borracha sintética 199

### C

Circuitos digitais 21

Cliente 106, 108, 110, 112, 113

Controle adaptativo 50

Conversor CA/CC 153, 158

Conversor MAB 184, 187, 188

Correntes de Foucault 153, 155, 162

### D

Densidade de ligações cruzadas 198, 199, 200, 201, 202, 204, 205, 206, 209

Descargas atmosféricas 119, 127, 128, 129, 130, 133, 134, 137, 138, 139

Direcionamento 140, 141, 143, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151

### E

Economic feasibility 15

Eficiência energética 33, 35, 40, 41, 140, 151

Electronic spreadsheet 15

Energia solar 20, 113, 140, 141, 143, 145, 150, 151, 152

Engenharia elétrica 49, 61, 62, 114, 115, 138, 152, 182, 184, 210

Engine knock 1, 2, 3, 13, 14

### F

Filtros probabilísticos 61, 62, 63, 72

Flory-Rehner 199, 201, 202, 204, 205

Freio eletromagnético 153, 154, 156, 158, 159, 161, 165, 166, 181, 182

Fuzzy cognitive maps 50, 51, 58, 59, 60

## **I**

Inversor de frequência 33, 34, 35, 39, 40, 43

## **L**

Localização 61, 62, 63, 64, 68, 69, 70, 71, 72, 132, 143, 144

Logistic regression 1, 2, 3, 4, 14

## **M**

Machine learning 1, 4

Medição de alimentadores 90

Misturador industrial 50

Model based design 1

Mooney-Rivlin 199, 202, 204, 205, 207

## **N**

Núcleos magnéticos 184

## **O**

Operações modulares 21

Ouvidoria 106, 108, 109, 110, 111, 112, 113

## **P**

Perda de energia 90

Photovoltaic energy 15, 16, 20

Prazos serviços comerciais 106

Processamento digital de sinais 21

## **Q**

Qualidade de energia 90, 91, 92, 167

## **R**

Red de distribución eléctrica 74

Responsabilidade social 115, 116, 118

Robótica 61, 62, 63, 64, 67, 68, 72, 73, 162

## **S**

Satisfação 106, 108, 109, 111, 112, 113

SBR 198, 199, 200, 201, 206, 207, 208

Sistema de distribuição de água 33, 34, 35, 40, 41, 42, 43, 46

Sistemas de proteções contra descargas atmosféricas 128

Smart grid 74, 75, 86, 88

## **T**

Transformador de estado sólido 184

## **V**

Vehículo eléctrico 74, 75, 76, 77, 79, 81, 82, 83, 84, 85, 87, 88

Videoaulas 61, 62, 72

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 @atenaeditora  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](http://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

*Collection:*

# APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

  
Ano 2022

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 @atenaeditora  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](http://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

*Collection:*

# APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

  
Ano 2022