

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CARLOS HENRIQUE FONTANA

**PROTÓTIPO DE UM FREIO ELETROMAGNÉTICO POR CORRENTES
DE FOUCAULT**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017

CARLOS HENRIQUE FONTANA

**PROTÓTIPO DE UM FREIO ELETROMAGNÉTICO POR CORRENTES
DE FOUCAULT**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado ao curso superior de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi

Co-orientador: Prof. Dr. Alessandro Goedtel

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Carlos Henrique Fontana

Protótipo de freio eletromagnético por correntes de Foucault

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 13:00 hs do dia 23/11/2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Marcelo Favoretto Castoldi - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Alessandro Goedel - (Coorientador)

Prof(a). Dr(a). Francisco de Assis Scannavino Junior - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Wagner Endo - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir conquistar este momento.

Agradeço a minha família por estar presente em cada momento de dificuldade e de apreensão, por todo sacrifício em que se submeteram e por acreditar em mim em todos os momentos sem hesitar.

Agradeço a minha companheira Nathália, que nos momentos mais difíceis dividiu o seu carinho, o seu apoio e o seu amor para me amparar e levantar.

Agradeço aos amigos, que durante todo este tempo de dedicação, cresceram e contribuíram de diversas formas nesta conquista.

Agradeço aos meus queridos professores, que diariamente, entregaram-se no ensino à aqueles que buscavam pelo saber. Sempre serão exemplos profissionais e éticos e farão parte do meu alicerce, como profissional, por toda minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Marcelo Castoldi, por aceitar e propor este desafio, acreditando no meu potencial.

Ao meu co-orientador, Prof. Alessandro Goedel por ser íntegro em todos os momentos e preciso em todas suas inserções no trabalho.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por ter se tornado uma extensão da minha casa, da qual jamais esquecerei.

A minha família, que me ensinou a humildade e a perseverança de buscar pelos meus sonhos.

“Chi ha provato il volo camminerà guardando il cielo, perché là è stato e là vuole tornare”

“Quem já experimentou voar, caminhará olhando para o céu porque já esteve lá e para lá almeja voltar.”

Leonardo Da Vinci

RESUMO

FONTANA, Carlos Henrique. PROTÓTIPO DE UM FREIO ELETROMAGNÉTICO POR CORRENTES DE FOUCAULT. Trabalho de conclusão de curso. Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Os ensaios de máquinas elétricas rotativas são essenciais para determinar o real rendimento, fator de potência, torque da máquina, regime de aquecimento e seu comportamento dinâmico. Usualmente são utilizados dinamômetros mecânicos por correias para realização deste ensaio, onde são determinadas as características elétricas e sua curva de trabalho. Este trabalho tem o propósito de apresentar, com base nas bibliografias e trabalhos já realizados, um freio por correntes parasitas de Foucault, o qual utiliza o conceito das correntes circulantes no interior de materiais condutivos que estão sob a ação de campos magnéticos constantes. Tratadas usualmente como uma fonte de aquecimento em máquinas elétricas e, conseqüentemente, perca de eficiência das mesmas, o conceito das correntes parasitas foi utilizado para que através de um dispositivo eletromecânico, possa ser aplicado torque ao eixo de máquinas elétricas rotativas, simulando assim cargas mecânicas reais e possibilitando a realização de ensaios elétricos. O freio por correntes de Foucault foi construído e ensaiado com o intuito de fornecer um equipamento confiável, robusto e de fácil manuseio para ensaios de motores de até 2 CV, concebido através de informações coletadas das bibliográficas e trabalhos executados e pesquisados anteriormente.

Palavras-chaves: Máquinas elétricas, correntes de Foucault, ensaios de máquinas elétricas, dinamômetros eletromecânicos.

ABSTRACT

FONTANA, Carlos Henrique. PROTOTYPE OF AN ELECTROMAGNETIC BRAKE BY FOUCAULT CURRENTS. Coursework completion. Electrical engineering. Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Rotating electric machine tests are essential to determine the actual performance, power factor, machine torque, heating regime and its dynamic behavior. Belt mechanical dynamometers are usually used to perform this test, where the electrical characteristics and their working curve are determined. This work has the purpose of presenting, based on the bibliographies and works already done, a brake by Foucault's parasite currents, which uses the concept of circulating currents inside conductive materials that are under the action of constant magnetic fields. Usually treated as a heating source in electric machines and, consequently, losses of its efficiency, the concept of the parasite currents has been used, so that, by means of an electromechanical device, torque can be applied to the axis of rotating electric machines, thus simulating mechanical loads and making electrical tests possible. Eddy current brake has been constructed and tested to provide reliable, robust and easy-to-use equipment for motor starters up to 2 Hp, designed through information collected from libraries and previously run and researched work.

Keywords: Electrical machines, eddy currents, tests of electrical machines, electromechanical dynamometers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Sistema de frenagem magnética	15
Figura 2	- Freio por correntes de Foucault	16
Figura 3	- Característica de terminal gerador DC em derivação	17
Figura 4	- Ilustração conceitual do Freio de Foucault	20
Figura 5	- Correntes parasitas induzidas $i_{ind}(t)$ por ação do eletroímã	21
Figura 6	- Principais eventos envolvendo correntes induzidas no século XIX	22
Figura 7	- Principais eventos envolvendo correntes induzidas no século XX	24
Figura 8	- Núcleo magnético simples	25
Figura 9	- Ilustração da utilização da regra de Fleming	28
Figura 10	- Ilustração dos componentes de um freio eletromagnético.....	32
Figura 11	- Localização do pólo em relação ao eixo do rotor	33
Figura 12	- Diagrama de ligação das bobinas	36
Figura 13	- Núcleo Aço SAE 1040	37
Figura 14	- Carretel usinado para núcleo da bobina	37
Figura 15	- Enrolamento do cobre no carretel de Aço SAE 1040.....	38
Figura 16	- Bobinas de campo, com tratamento à base de resina, montadas no estator do freio.....	39
Figura 17	- Fonte retificadora de onda completa a diodos	40
Figura 18	- Fonte de alimentação HIKARI, modelo HF-3203S.....	40
Figura 19	- Protótipo montado sob bancada de testes com motor acoplado.....	41
Figura 20	- Comparação entre a corrente nas bobinas e rotação no motor.....	46
Figura 21	- Comparação entre a corrente nas bobinas e potência ativa consumida da rede.....	46
Figura 22	- Comparação entre a corrente nas bobinas e o escorregamento do motor.....	47
Figura 23	- Comparação entre a corrente nas bobinas e o conjugado (N.m).....	47
Figura 24	- Comparação entre a corrente nas bobinas e o conjugado (N.m).....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Analogia entre as grandezas de circuitos elétricos e magnéticos	28
Tabela 2	- Dados de placa do motor.....	31
Tabela 3	- Dados para cálculo da densidade de fluxo no entreferro.....	35
Tabela 4	- Dados do projeto do freio de Foucault.....	36
Tabela 5	- Resistências das bobinas, conjuntos de bobinas e total do circuito de campo.....	39
Tabela 6	- Dados construtivos do rotor.....	43
Tabela 7	- Dados coletados durante o ensaio.....	44
Tabela 8	- Dados calculados.....	46
Tabela 9	- Corrente e conjugado.....	50

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEM	Balanço Energético Nacional
TWh	Terawatt hora
BNU	Balanço de Energia Útil
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
INMETRO	Instituto Nacional de metrologia, Qualidade e Tecnologia
DC	Direct Current
kW	Quilowatt
PIG	<i>Pipeline Inspection Gadget</i> (Dispositivo de Inspeção de Dutos)

LISTA DE SÍMBOLOS

V_t	Tensão de linha [V]
I_a	Corrente de linha [A]
P_{in}	Potência de entrada [W]
n	Velocidade [rpm]
T	Torque [N.m]
ω_m	Velocidade do eixo da máquina [rad/s]
τ_{ind}	Torque Induzido [N.m]
μ	Permeabilidade magnética [H/m]
σ	Condutividade elétrica [S/m]
$i_{ind}(t)$	Corrente induzida no disco [A]
H	Intensidade de campo magnético [A.e.m]
l_m	Caminho médio [m]
N	Número de espiras
B	Densidade de fluxo magnético [T]
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo [H/m]
μ_r	Permeabilidade relativa
\mathfrak{S}	Força magnetomotriz [A.e]
R	Resistência [ohm]
\mathfrak{R}	Relutância magnética [A.e/Wb]
I	Corrente elétrica [A]
P_{mec}	Potência mecânica
v	Velocidade tangencial do disco [rad/s]
S	Seção do pólo
c	Fator de eficiência geométrico
d	Espessura do disco [cm]
r_{max}	Raio máximo [cm]
J_m	Momento de inércia máximo [kg.m ²]
B_0	Densidade de fluxo magnético no entreferro [T]
l_{ent}	Comprimento do entreferro
C_{fio}	Comprimento do fio [m]
S_{fio}	Seção do fio [m ²]
R_{fio}	Resistência do enrolamento [ohm]

L_{fio}	Indutância do enrolamento [H]
d_{nom}	Diâmetro nominal do fio [mm]
C_{car}	Largura do carretel [cm]
h_{car}	Altura do carretel [cm]
N_{cam}	Número de espiras por camada
q_{cam}	Quantidade de camadas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA	16
1.2 JUSTIFICATIVA	17
1.3 OBJETIVO GERAL	18
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 FREIO DE FOUCAULT	20
2.1.1 HISTÓRICO DO FREIO POR CORRENTES INDUZIDAS	21
2.1.2 CIRCUITOS MAGNÉTICOS	25
2.1.2.1 Campos magnéticos	25
2.1.2.2 Circuitos magnéticos	27
2.1.2.3 Força de frenagem	28
2.2 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	29
3. PROPOSTA E ETAPAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	31
3.1 ESPECIFICAÇÕES E DIMENSIONAMENTO DO ROTOR	31
3.2 PROJETO DO ELETROÍMÃ	32
3.2.1 CÁLCULO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO	33
3.2.2 CÁLCULO DO NÚMERO DE ESPIRAS (N)	34
3.3 DADOS DO PROJETO	35
4. IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO DO FREIO ELETROMAGNÉTICO	36
4.1 ARRANJO DAS BOBINAS DO FREIO	36
4.1.1 ACIONAMENTO DO ELETROÍMÃ	39
4.2 O ROTOR DO FREIO	41
5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	43
5.1 TRATAMENTO DOS DADOS	44
6.1.2 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	45
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
ANEXO A	52
ANEXO B	53

1. INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas estão presentes hoje em todos os tipos de indústrias, em grande escala como, motores de indução de 1000 CV em moendas de indústrias canavieiras, a micro-motores em frações de CV em indústrias de componentes eletrônicos. Segundo dados do BEM (BEM,2016), durante todo o ano de 2015 foram produzidos 584,5 TWh em energia elétrica, com um consumo de cerca de 196,6 TWh somente pelo setor industrial, representando 31,9% de toda a energia produzida; ainda neste mesmo relatório o Balanço de Energia Útil (BNU) mostra que 47,1% da energia consumida no setor industrial é empregado na força motriz, ou seja, no emprego de motores elétricos.

Arelado a este cenário, faz-se necessário a demanda por motores elétricos de alta eficiência, forçando os fabricantes de máquinas elétricas motrizes à busca constante do aprimoramento dos seus projetos, determinando a real eficiência destas máquinas através dos ensaios realizados em laboratório. Tais ensaios devem ser regidos por normas técnicas para que o motor possa receber um selo de qualidade, como no caso da PROCEL que utiliza a portaria 488 de 2010 do INMETRO, a qual determina os tipos de ensaios para motores elétricos de indução trifásicos rotor gaiola de esquilo. Parte do ensaio consiste em aplicar uma carga ao eixo do motor, denominado ensaio em carga, visando simular o funcionamento do motor em regime para determinar a potência nominal e o rendimento real da máquina. Em geral são utilizados dinamômetros mecânicos ou elétricos e também geradores DC acoplados ao eixo da máquina.

O presente trabalho visa apresentar uma alternativa para a substituição do dinamômetro mecânico ou mesmo do gerador DC, através da construção de um protótipo de um freio eletromagnético por correntes de Foucault.

Alguns trabalhos podem ser destacados, como o realizado por Filho (2014), em que o conceito do freio por correntes de Foucault é utilizado em um sistema denominado PIG, que é utilizado na indústria do petróleo para inspeção, desobstrução e limpeza de tubulações de petróleo.

Muitas aplicações são encontradas na literatura com o uso em sistemas de frenagem por correntes de Foucault. Freios industriais estão disponíveis no mercado para usos diversos como frenagem de elevadores, pontes rolantes, escadas rolantes, esteiras rolantes, frenagem em trens, metrô, etc. (Filho (2014), Pereira(2006))

A Figura 1 ilustra o freio para o sistema PIG proposto; a função deste é diminuir a velocidade do sistema, que muitas vezes é pressurizado e alcança um deslocamento razoavelmente alto, para a inspeção, reparo, manutenção em pontos específicos da tubulação e reduzir a velocidade no momento da saída do sistema.

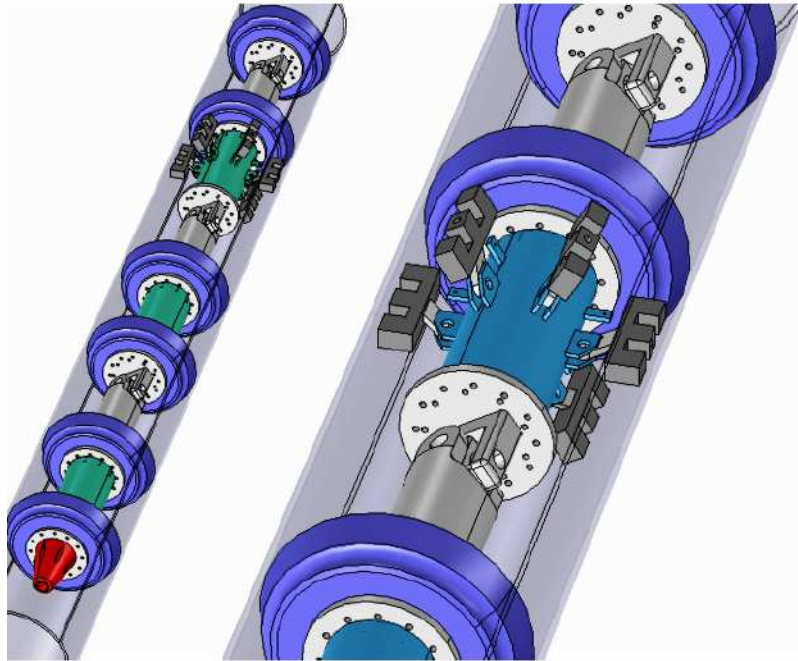


Figura 1: Sistema de frenagem magnética proposto para o PIG com a inclusão dos eletroímãs embarcados direcionados radialmente para a superfície interna das paredes da tubulação.

Fonte: Filho, 2014.

Outra aplicação deste tipo de freio é explicada por Sokolov et al., (2016), que propôs um estudo dos efeitos mecânicos causados pelo uso de um freio acoplado ao rotor de uma turbina eólica de 26 kW e 36 metros de altura, com a finalidade de controlar a velocidade das pás da turbina.

Em Ying et al., (2010) foi proposto o uso de freios por correntes de Foucault em trens de alta velocidade, dando uma opção ao tradicional sistema mecânico por atrito, que além do grande esforço físico exigido deste tipo de freio, tem uma grande necessidade de manutenção tendo em vista a extrema importância do sistema. Para este caso o grande destaque das vantagens para o sistema de frenagem por correntes de Foucault é a falta de desgaste por atrito, a

força ajustável de travagem das rodas e o excelente desempenho de frenagem em alta velocidade; a Figura 2 ilustra o sistema proposto.



Figura 2: Freio por correntes de Foucault em um sistema anti travamento para trens de alta velocidade.

Fonte: NEWS, 2014.

1.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Para o ensaio em carga do motor de indução trifásico rotor em gaiola de esquilo, o mesmo deve estar em frequência e tensão nominais; com o freio acoplado ao eixo do motor aplica-se carga (conjugado) ao motor com variações de 150%, 125%, 100%, 75%, 50% e 25% da carga nominal, sendo que para cada nível de carga os parâmetros tensão de linha (V_t), corrente de linha (I_a), a potência de entrada da máquina (P_{in}), a velocidade (n) e o torque (T) são coletados. Em seguida retira-se toda a carga do eixo do motor e novamente mede-se todas as grandezas anteriores e ao se desligar a fonte de alimentação e medir a resistência de linha, o valor de resistência deverá ser comparado ao valor encontrado no ensaio de elevação da temperatura, e a resistência em linha para o parâmetro da máquina deverá ser a média dos dois valores.

Usualmente, para este tipo de ensaio utiliza-se o gerador DC como carga, como exemplo o gerador de corrente contínua com excitação independente, contudo a característica de terminal

de um gerador DC, cujas grandezas de saída são o conjugado no eixo e a sua velocidade mostram que ao aumentar o torque no eixo a velocidade diminui (DelToro,1999), esta característica pode ser vista na Figura 3.

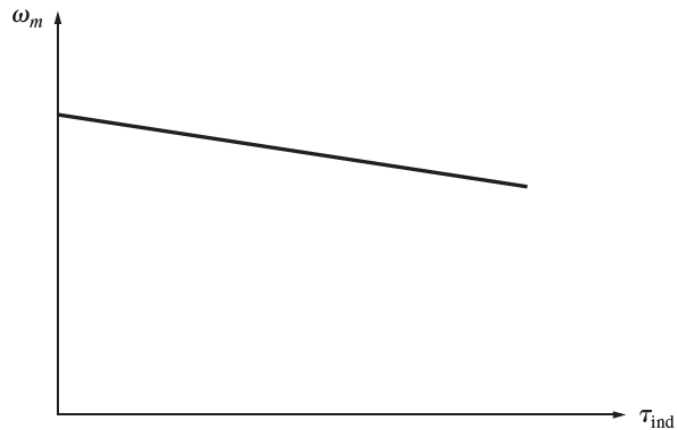


Figura 3: Característica de terminal gerador DC em derivação.

Fonte: DelToro,1999.

A Figura 3 mostra o comportamento de uma máquina DC com o incremento de carga acima da nominal onde, os eixos das ordenadas representa a velocidade do eixo da máquina (ω_m) e os eixos das abscissas representa o torque induzido (τ_{ind}); o incremento do torque induzido é feito através do controle da corrente de excitação do campo. A grande dificuldade encontrada neste método é obter o torque exato necessário ao ensaio conforme requer a norma.

1.2 JUSTIFICATIVA

Diante do problema em manter o torque constante para o ensaio em carga, a utilização de um freio eletromagnético torna-se viável, pois com o controle da corrente DC de alimentação do freio é possível aumentar ou diminuir o conjugado conforme seja requerido, com isso existe a possibilidade de tornar o ensaio o mais próximo da operação real da máquina. Dessa forma, o freio por correntes induzidas será uma ferramenta útil para a avaliação de máquinas elétricas padrão e de alto rendimento.

1.3 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo desta proposta é a construção de um protótipo de freio eletromagnético por correntes de Foucault.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos tem-se:

- Levantar a bibliografia a respeito da modelagem deste tipo de freio
- Dimensionar as partes constituintes do freio por correntes de Foucault.
- Construir o protótipo
- Validar experimentalmente o torque desenvolvido pelo freio, quando em funcionamento.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Dentro dos objetivos principais deste trabalho, é possível dividir todo o processo da pesquisa à entrega do protótipo em algumas etapas:

Na primeira fora realizado o levantamento bibliográfico a respeito do freio por correntes de Foucault, buscando os principais trabalhos na área e os conceitos físicos para modelar as principais partes deste equipamento que são: o eletroímã e o disco.

Estas informações formam a base para a segunda etapa: o dimensionamento do disco e do eletroímã, sendo que para o disco será determinado seu diâmetro, espessura, material a ser utilizado e, para o eletroímã, o material de sua composição, a força magnética necessária, o número de espiras e a disposição das mesmas, para então estabelecer os dados do projeto.

Em continuidade, será realizado a usinagem das peças conforme modelos propostos no projeto.

Em seguida, a montagem e os ajustes necessários. Esta etapa é importante para corrigir aspectos de segurança, balanceamento do rotor, sistema de acoplamento do eixo e sistema de conexão elétrica.

Por fim, após testes e validação serão apresentadas conclusões sobre o funcionamento do equipamento e as considerações finais sobre o projeto e execução.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será realizado uma explicação do que é o freio por correntes induzidas, bem como os principais fenômenos físicos envolvidos em seu funcionamento.

2.1 FREIO DE FOUCAULT

O principal e mais conhecido exemplo do Freio de Foucault é mostrado na Figura 4. Nele é utilizado um disco de alumínio para inserir uma resistência ao torque de máquinas rotativas com a finalidade de reduzir sua velocidade ou até mesmo tornar a frenagem mais rápida no momento do seu desligamento, dissipando sua energia inercial na forma de calor por efeito Joule e por ação das correntes parasitas circulantes no disco, conforme ilustra a Figura 5.

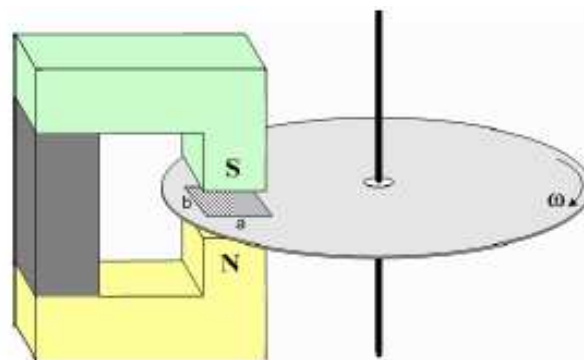


Figura 4: Ilustração conceitual do Freio de Foucault.

Fonte: FILHO, 2014.

Pereira (2006) descreve o freio de Foucault como sendo constituído de um disco metálico (aço, cobre ou alumínio), um eixo para acoplar o disco ao motor e um conjunto de bobinas que geram os hemisférios polares sobre o rotor. O disco com permeabilidade magnética μ e condutividade elétrica σ , ao girar sob a influência do campo magnético transfere torque de frenagem ao eixo do motor. Antes da condição de saturação, cada pólo produz um fluxo magnético proporcional à corrente de excitação que percorre as bobinas.

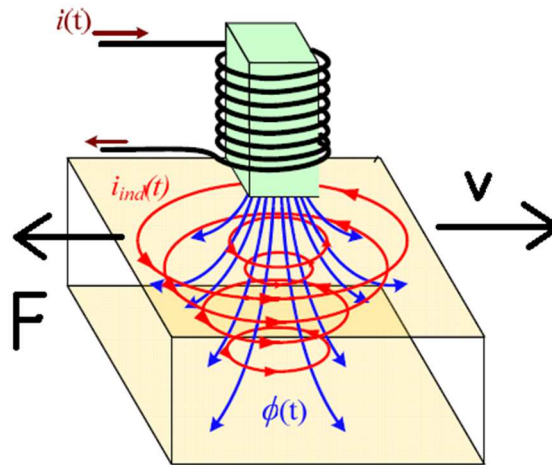


Figura 5: Correntes parasitas induzidas $i_{ind}(t)$ por ação do eletroímã.

Fonte: FILHO, 2014.

2.1.1 HISTÓRICO DO FREIO POR CORRENTES INDUZIDAS

Nesta seção, serão levantados os dados históricos dos principais trabalhos envolvendo correntes induzidas e, com base em Pereira (2006), estes dados serão apresentados de forma cronológica e com os principais destaques de cada linha de pesquisa envolvendo o tema.

No século XIX foram notados os primeiros fenômenos físicos envolvendo a indução de tensão elétrica em condutores submersos em campos magnéticos variantes no tempo, descritos na Figura 6.

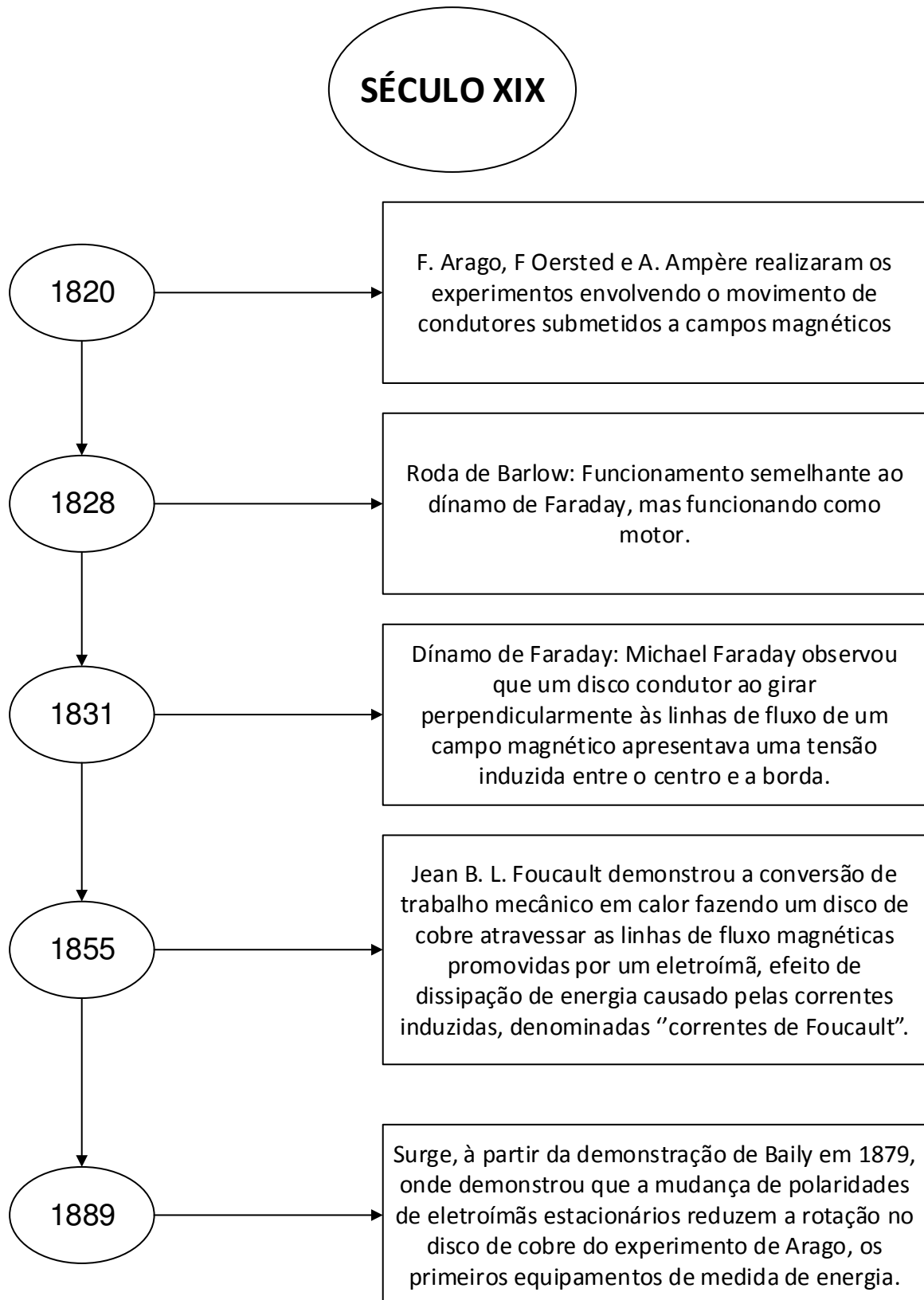


Figura 6: Principais eventos envolvendo correntes induzidas no século XIX.

Fonte: Adaptado de Pereira, 2006.

A partir do século XX, as descobertas de Foucault à respeito do aquecimento e, consequente perda por efeito Joule em núcleos magnéticos, foram amplamente estudadas. Foucault no fim do século XIX, descrevera o efeito de frenagem produzido pelas correntes induzidas, mas não aprofundou-se matematicamente à forma para descrevê-lo e quantificá-lo, Pereira (2006). A Figura 7 ilustra os principais trabalhos realizados na tentativa de descrever e quantificar o torque de frenagem por correntes induzidas.

O projeto de um freio por correntes induzidas possui muitas dificuldades, amplamente discutidas em muitos trabalhos, como em Filho (2014) e Pereira (2006).

“Em virtude das dificuldades envolvidas no projeto dos freios por correntes induzidas é comum o uso de ajustes nas equações analíticas, simulações por métodos numéricos como elementos finitos, assim como a obtenção por métodos numéricos da função de conjugado de frenagem através de levantamentos experimentais.”
(Pereira, 2006, p. 26)

Não é o objetivo deste trabalho, por hora, a utilização dos métodos numéricos por elementos finitos, mas com base nos estudos já realizados conforme descrito nas bibliografias, realizar a concepção do projeto e a construção do protótipo.

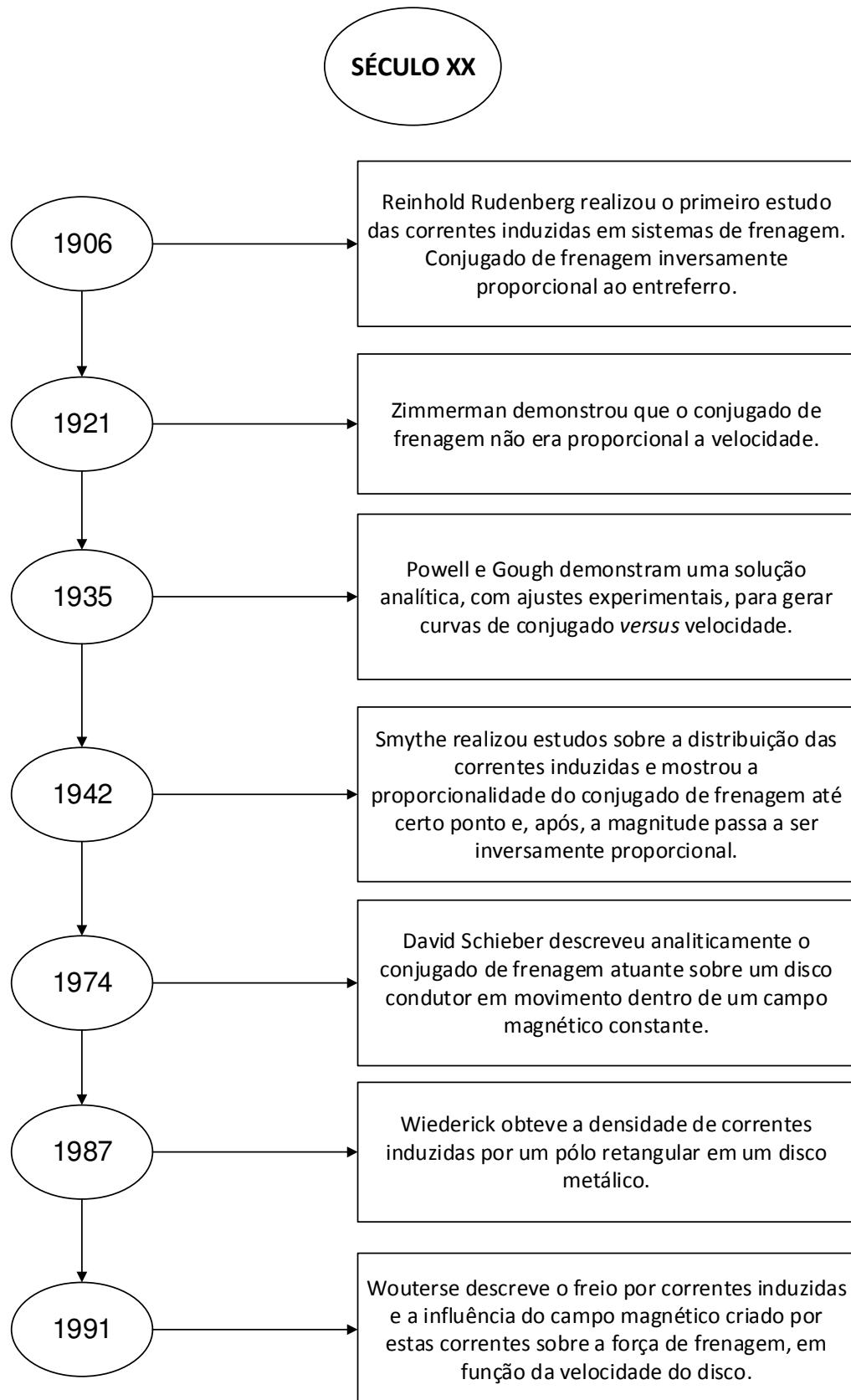


Figura 7: Principais eventos envolvendo correntes induzidas no século XX.

Fonte: Adaptado de Pereira, 2006

2.1.2 CIRCUITOS MAGNÉTICOS

O eletroímã é a parte essencial de um freio por correntes de Foucault, sendo responsável por induzir as correntes parasitas no rotor e, assim, gerar o torque de frenagem necessário do projeto.

Desta forma é inerente ao projeto conhecer as forças físicas e a teoria que o envolve, sendo assim, livros clássicos como Chapman (2013) e Fitzgerald (2006) serão utilizados para conceituá-los nesta etapa.

2.1.2.1 Campos magnéticos

Os princípios físicos para análise do sistema de frenagem são o da Lei de Faraday-Lenz e da Lei de Ampère, Filho (2014); esta rege a produção de um campo magnético por passagem de uma corrente, descrita na equação a seguir:

$$\oint H \cdot dl = I_{lid} \quad (1)$$

onde H é a intensidade do campo magnético que é produzido pela corrente líquida I_{lid} e dl é um elemento diferencial de comprimento ao longo do caminho de integração. Para exemplificar o significado de (1), é possível aplicá-la à Figura 8.

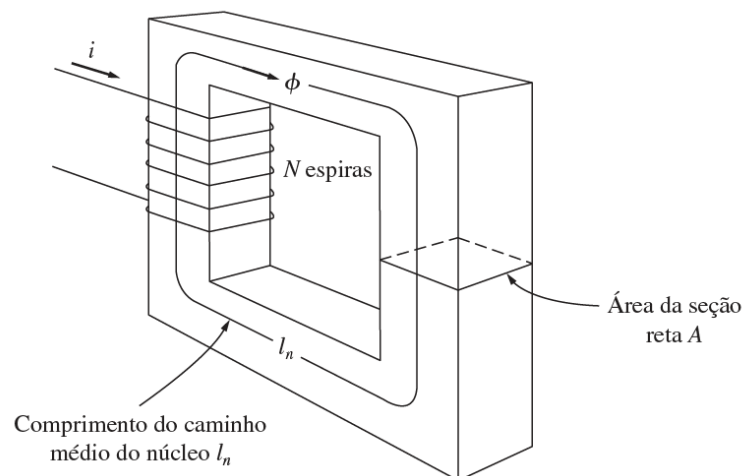


Figura 8: Núcleo magnético simples

Fonte: CHAPMAN,2013.

Esta Figura 8 mostra o núcleo retangular com um enrolamento de N espiras de fio envolvendo umas das pernas do núcleo. Usualmente o núcleo é composto por materiais ferromagnéticos, logo adota-se que todo o campo magnético produzido pela corrente permanecerá dentro do núcleo, de modo que, na lei de Ampère, o caminho de integração é dado pelo comprimento do caminho médio no núcleo l_m . A corrente líquida I_{lid} que passa dentro do caminho de integração é então Ni , porque a bobina cruza o caminho de integração N vezes quando está conduzindo a corrente i , tornando a lei de Ampère na seguinte forma:

$$H \cdot l_m = N \cdot i \quad (2)$$

Logo é possível obter o valor da intensidade de campo magnético no núcleo devido a corrente aplicada.

$$H = \frac{N \cdot i}{l_m} \quad (3)$$

A intensidade do fluxo de campo magnético produzido no núcleo é dependente do material de sua composição e, a relação entre a intensidade de campo magnético H e a densidade de fluxo magnético que resulta em B , medido em Tesla, é dada por:

$$B = \mu \cdot H \quad (4)$$

em que μ , é a permeabilidade magnética do material, dada em [H/m].

Usualmente a permeabilidade magnética de um material é fornecida de forma relativa, μ_r , comparada a permeabilidade magnética do vácuo μ_0 , dada por:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (5)$$

A permeabilidade do vácuo tem o valor de:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \quad (6)$$

Com isso é possível calcular o fluxo magnético total em uma determinada área de material magnético.

$$\phi = \int_A B \cdot dA \quad (7)$$

onde dA é uma unidade diferencial de área. Se o vetor densidade de fluxo for perpendicular ao plano da área, então A e B se tornam constantes e (7) se reduz a:

$$\Phi = B \cdot A \quad (8)$$

Combinando as equações (3), (4) e (8), têm-se:

$$\Phi = B \cdot A = \frac{\mu \cdot N \cdot i \cdot A}{l_m} \quad (9)$$

A partir de (9) é possível determinar o fluxo magnético necessário ao projeto do eletroímã, a partir do número de espiras, da corrente que irá percorre-las, da área do núcleo e do caminho médio magnético.

2.1.2.2 Circuitos magnéticos

A partir da equação (9), é possível fazer uma analogia entre a força que o fluxo magnético Φ produz através da bobina enrolada no núcleo magnético, denominada força magnetomotriz (FMM) e representada pelo símbolo \mathfrak{F} , e uma fonte de tensão V responsável por produzir o fluxo da corrente em um circuito elétrico. A resistência \mathcal{R} é análoga a relutância \mathfrak{R} e a corrente i é análoga ao fluxo Φ induzido pela bobina.

Para uma melhor visualização da analogia entre circuitos elétricos e magnéticos a Tabela 1 mostra as devidas proporcionalidades.

Tabela 1: Analogia entre as grandezas de circuitos elétricos e magnéticos

Grandezas circuitos elétricos	SI	Grandezas circuitos magnéticos	SI
$V = R \cdot i$	V	$\mathfrak{F} = N \cdot i$	$A \cdot e$
$i = \frac{V}{R}$	A	$\phi = \frac{\mathfrak{F}}{\mathfrak{R}}$	Wb
$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$	Ω	$\mathfrak{R} = \frac{l_m}{\mu \cdot A}$	$A \cdot \frac{e}{Wb}$

Fonte: CHAPMAN, 2013.

onde A é a área da seção do condutor ou do núcleo, ρ é a permeabilidade magnética do material que compõe a resistência e L o comprimento da resistência.

A polaridade da FMM de uma bobina pode ser determinada utilizando a regra de Fleming, conforme ilustra a Figura 9, onde esta, assemelha-se ao sentido da corrente elétrica em um circuito elétrico. (KOSOW, 2005)

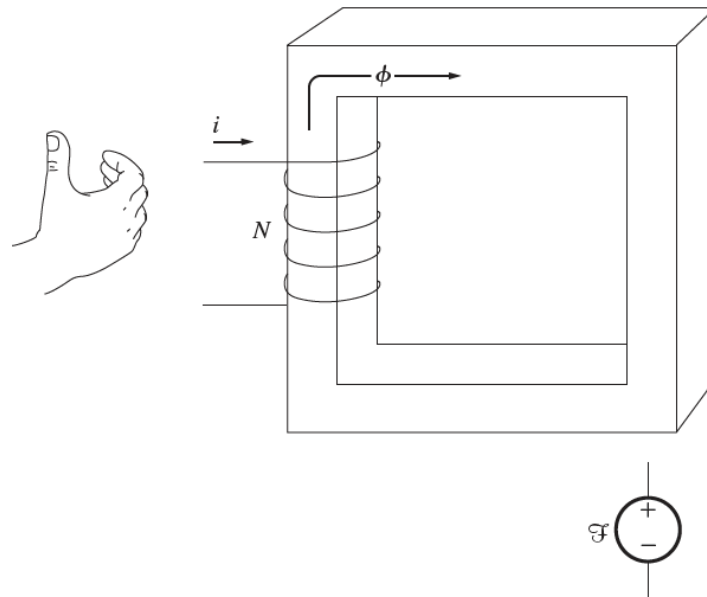


Figura 9: Ilustração da utilização da regra de Fleming.

Fonte: CHAPMAN, 2013.

2.1.2.3 Força de frenagem

O princípio do freio por correntes de Foucault é converter a potência mecânica desenvolvida pelo motor acoplado ao freio em perdas por efeito Joule no disco, (Pereira,2006), o qual descreve a equação para o cálculo da potência como sendo:

$$P_j = \sigma \cdot (B \cdot R \cdot \frac{d\theta}{dt})^2 \cdot vol \quad (10)$$

Sendo σ a condutividade do disco giratório, R o raio entre o centro do disco e o centro do pólo, vol o volume do disco e $\frac{d\theta}{dt}$ a variação do fluxo magnético no núcleo eletromagnético em função do deslocamento do disco em relação a posição do eletroímã.

Dado um campo magnético constante, a potência desenvolvida pelo motor P_{mec} é dada pelo produto da força de frenagem pela velocidade tangencial v , podendo ser calculada como:

$$F(v, B) = \frac{P_{mec}}{v} = \sigma \cdot v \cdot B^2 \cdot c \cdot S \cdot d \quad (11)$$

Sendo v a velocidade tangencial do disco, S a seção do pólo, c fator de eficiência geométrico e d a espessura do disco.

O Fator de eficiência geométrico c , pode ser determinado através da equação:

$$c = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{R}{r}\right)^2 \cdot \left(\frac{r-R}{D}\right)^2} \right] \quad (12)$$

onde D é o diâmetro do eletroímã, r o raio externo do disco e R o raio efetivo do disco.

A velocidade tangencial v é calculada através do produto entre a velocidade angular ω e o raio efetivo do disco.

$$v = \omega \cdot R \quad (13)$$

2.2 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Os motores elétricos, são máquina elétricas que transformam energia elétrica em energia mecânica. O motor de indução é a máquina mais utilizada em grande parte dos acionamentos, pois combina as vantagens de utilização de energia elétrica, baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando.

Os tipos mais comuns de motores elétricos são:

- Motores de corrente contínua;
- Motores de corrente alternada.

Motores de corrente contínua possuem alto custo de aquisição e controle, pois necessitam de uma fonte de corrente contínua ou de um dispositivo que converta a corrente alternada em corrente contínua, são aplicados em casos específicos

em que é extremamente necessário o controle de velocidade com flexibilidade e precisão.

Motores de corrente alternada podem ser divididos entre motor síncrono, que funciona com velocidade fixa, empregados somente quando existe a necessidade de grande potência de acionamento e velocidade fixa de rotação e no caso deste trabalho o motor de indução, que funciona com velocidade constante, variando ligeiramente conforme é adicionada carga ao eixo da máquina.

O motor de indução possuem simplicidade em sua construção, são robustos e de baixo custo, faz parte da grande maioria dos acionamentos em indústrias, podem ter a velocidade de acionamento controlada através do uso de inversores de frequência, a Tabela 2 indica os dados de placa do motor em que foram feitos os ensaios do freio.

Tabela 2: Dados de placa do motor

DADOS DO MOTOR					
TIPO	MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO			Fabr.	WEG
MOD	90 S	392	Freq.	60	Hz
POT	2	CV	ROTAÇÃO	1720	rpm
V	220	380	I (A)	6,5	3,8
F.S	1,15	ISO.	B	I _p /I _n	6,3
REG. S.	1	CAT	N	IP	W55

Fonte: Autoria própria.

3. PROPOSTA E ETAPAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Nesta etapa será abordado o projeto para o freio por correntes de Foucault visando atender as condições de carga mecânica para motores de até 1CV, com a possibilidade de variação do conjugado em até 150%, a fim de atender os requisitos técnicos já mencionados anteriormente.

A metodologia utilizada nos cálculos e variáveis do projeto será baseada na proposta de Pereira (2006), no qual projetou um freio por correntes parasitas para um motor de indução trifásico de 10HP.

Os principais itens a serem dimensionados são:

- Rotor (disco de alumínio);
- Densidade de fluxo magnético;
- Eletroímã;

3.1 ESPECIFICAÇÕES E DIMENSIONAMENTO DO ROTOR

O conjugado de carga T , pode ser determinado pelo produto da força F de oposição ao movimento pela distância R desta força até o eixo de rotação, conforme a equação 14.

$$T = F \cdot R \quad (14)$$

Através de um raio máximo (r_{max}) é possível alcançar o maior conjugado pela mínima força, o qual é calculado conforme equação a seguir:

$$r_{max} = \sqrt[4]{\frac{2 \cdot J_m}{\pi \cdot \rho \cdot d}} \quad (15)$$

onde, J_m é o momento de inércia máximo na condição de partida, ρ a densidade do disco e d a espessura do disco. Para este trabalho será utilizado o momento de inércia de um motor de

indução trifásico de 1cv, sendo que, segundo a NBR 7094, para um motor de indução trifásico de 4 pólos utiliza-se o momento de inércia máximo de 0,175 J kgm².

A espessura d do rotor proposto para o projeto do freio será de 1,59 cm, onde a densidade do aço 1020 é de 7900 kg/m³ resultando em um r_{max} de 17,3 cm. No entanto, devido ao momento de inércia adicional causado pelo rotor do motor, acopladores e eixo e outras partes girantes, será considerado um r_{max} de 20 cm.

3.2 PROJETO DO ELETROÍMÃ

Componente fundamental do Freio de Foucault, o eletroímã, item 2 da Figura 10, será o responsável por induzir as correntes parasitas no disco de alumínio e assim gerar o torque de frenagem.

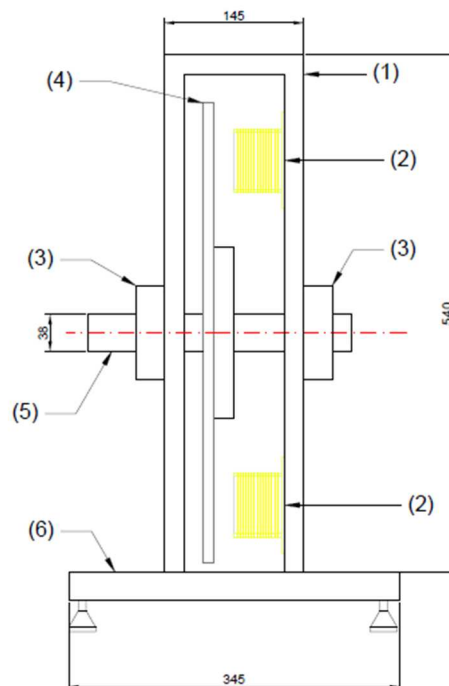


Figura 10: Ilustração dos componentes de um freio eletromagnético.

(1) Estator; (2) Eletroímã; (3) Rolamentos; (4) Rotor; (5) Eixo; (6) Suporte de fixação

Fonte: Autoria própria.

A partir de suas dimensões é possível calcular a densidade de fluxo magnético no entreferro B_0 , e o número de espiras N do eletroímã.

Para este freio, será utilizado 3 pares polares, com a finalidade de serem permitidas diferentes ligações do eletroímã para motores de menor potência.

3.2.1 CÁLCULO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO

A partir da Equação 10 é calculado a densidade de fluxo magnético necessário para converter a potência mecânica desenvolvida pelo motor em perdas por efeito Joule no disco.

Para um campo magnético constante, a potência desenvolvida pelo motor P_{mec} é dada pelo produto da força de frenagem pela velocidade tangencial v , calculada através de (11).

O raio efetivo R , ilustrado na Figura 11, será a diferença entre o raio r do disco e o diâmetro D do pólo, no qual D será de 3 pol ou aproximadamente 7,62 cm.

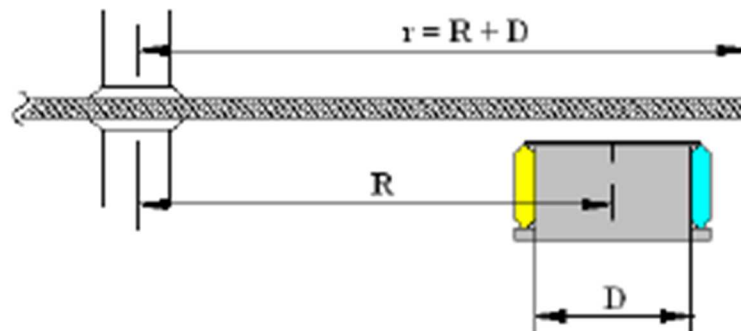


Figura 11: Localização do pólo em relação ao eixo do rotor.

Fonte: PEREIRA, 2006.

A partir da Equação 13 obtém-se a velocidade tangencial do disco na posição do pólo, como referência de projeto será utilizado velocidades de rotação entre 1700 rpm e 1800 rpm, correspondendo sob o centro do pólo magnético 32,04 m/s e 33,93 m/s, respectivamente.

Para o cálculo da densidade de fluxo magnético B_0 no entreferro, considera-se a relutância magnética no núcleo e no disco muito menor que a do entreferro, podendo ambas serem desconsideradas; admite-se a velocidade tangencial de no mínimo 32,04 m/s, torque nominal T_{nom} de 150% conforme discutido anteriormente e, utiliza-se a equação a seguir proposta por Pereira (2006):

$$B_0 = \sqrt{\frac{1,50 \cdot T_{nom}}{c \cdot S \cdot d \cdot R^2 \cdot \omega \cdot \sigma_{aço}}} \quad (16)$$

Tabela 3: Dados para cálculo da densidade de fluxo no entreferro

Variável	Valor
T_{nom}	5,30 [N.m]
c	0,499
S	$109,45 \cdot 10^{-3}$ [m ²]
d	0,016 [m]
R	0,0124 [m]
ω	32,0 [rad/s]
$\sigma_{aço}$	$5,8 \cdot 10^6$ [$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$]

Fonte: Autoria própria.

Com os dados da Tabela 3, determina-se que a intensidade de fluxo magnético no entreferro será de aproximadamente 0,565 T.

3.2.2 CÁLCULO DO NÚMERO DE ESPIRAS (N)

A força magnetomotriz pode ser determinada através da lei de Ampère, conforme a equação à seguir:

$$N \cdot I = \frac{x \cdot l_{ent}}{\mu_0} \cdot B_0 \quad (17)$$

onde l_{ent} é o comprimento do entreferro.

No projeto será adotado o entreferro de 0,5 cm, permitindo assim uma FMM de 2088 A.e.

A corrente de projeto do projeto será de no máximo 2 A, com a utilização do fio AWG 20 de seção 0,52 mm².

Com estas informações o número de espiras N necessário é determinado através da equação 17, obtendo um total de 1044 espiras.

3.3 DADOS DO PROJETO

A partir das definições de projetos dos itens 4.2.1 e 4.2.2, foram estabelecidas as grandezas fundamentais que compõem este projeto, sendo apresentadas na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4: Dados do projeto do freio de Foucault

Variável	Valor	SI
Raio do disco, r	20	cm
Raio Efetivo do disco, R	12,4	cm
Espessura do disco, d	1,59	cm
Diâmetro do núcleo, D	7,2	cm
Área da base do núcleo, S	0,4523	cm ²
Altura do núcleo, h	8	cm
Entreferro médio, $6x$	3	cm
Fator de eficiência geométrica, c	0,499	Adimensional
Condutividade do Aço 1020, σ_{fe}	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
Resistividade do Aço 1020, ρ_{fe}	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$\Omega \cdot m$
Velocidade angular nominal, ω_n	188,49	Rad/s
Velocidade tangencial sob o pólo, v	32,04	m/s
Conjugado nominal, T_{nom}	5,30	N.m
Conjugado máximo, $1,50 T_{nom}$	7,95	N.m
Densidade de fluxo magnético no entreferro, B_0	0,565	T
Força de frenagem, F_B	20	N
Força magnetomotriz, NI	2088	A.e
Número de espiras por bobina, N	1044	Espiras
Fio utilizado (AWG)	20	
Corrente contínua máxima por bobina, I_{Bmax}	1,2	A _{cc}

Fonte: Autoria própria.

Com base nestas informações serão construídos o disco (estator do freio) e a bobina do eletroímã, responsáveis por transmitir o torque de frenagem ao motor e realizar o ensaio de carga do mesmo.

4. IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO DO FREIO ELETROMAGNÉTICO

4.1 ARRANJO DAS BOBINAS DO FREIO

Todas as 6 bobinas encontram-se distribuídas em pares no disco estatórico, todos os terminais encontram-se acessíveis na caixa de ligação disponível na lateral da bancada de acionamento. Para a realização dos ensaios deste trabalho, o circuito elétrico de campo foi dividido em 3 grupos de bobinas, sendo cada grupo composto por 2 bobinas em série conforme a Figura 12 a seguir, os três grupos foram ligados em paralelo.

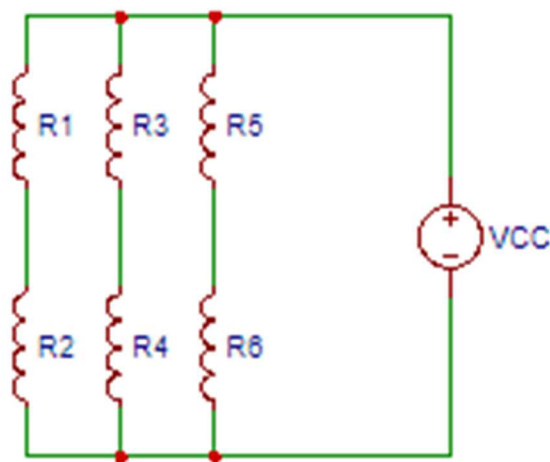


Figura 12: Diagrama de ligação das bobinas.

Fonte: Autoria própria.

Esta configuração de ligação apresentou o maior conjugado de frenagem para o ensaio, em função do sentido do campo magnético aplicado por cada bobina, e para que a corrente extraída da fonte possa atingir o máximo de 5 Amperes, para que não ocorra superaquecimento no enrolamento de campo, danificando a sua isolação e ocasionando um curto circuito.

O núcleo de cada bobina é composto de Aço 1040, Figura 13, usinado em forma de carretel, Figura 14, para acomodar o enrolamento de campo.



Figura 13: Núcleo Aço SAE 1040.

Fonte: Autoria própria.



Figura 14: Carretel usinado para núcleo da bobina.

Fonte: Autoria própria.

Após realizado o enrolamento das bobinas no núcleo e impregnadas com resina isolante, foram medidas as resistências individuais de cada grupo e a resistência total dos 3 conjuntos em paralelo, apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Resistências das bobinas, conjuntos de bobinas e total do circuito de campo.

Bobina/Conjunto	Resistência (Ω)
R1	7,7
R2	7,2
R3	7,7
R4	7,8
R5	7,5
R6	7,8
R GRUPO 1 (R1-R2)	14,2
R GRUPO 2 (R3-R4)	14,9
R GRUPO 3 (R5-R6)	14,8
R TOTAL (G1//G2//G3)	5,2

Fonte: Autoria própria.

Com isso, é possível determinar qual a máxima tensão a ser aplicada pela fonte de corrente contínua para alcançar o máximo valor de frenagem necessária para o ensaio, sendo esta 16,1 Vcc, e a máxima voltagem de 26 Vcc. O enrolamento pode ser visto na Figura 15, sendo necessárias aproximadamente 13 camadas de 85 voltas, para acomodar as 1044 espiras.

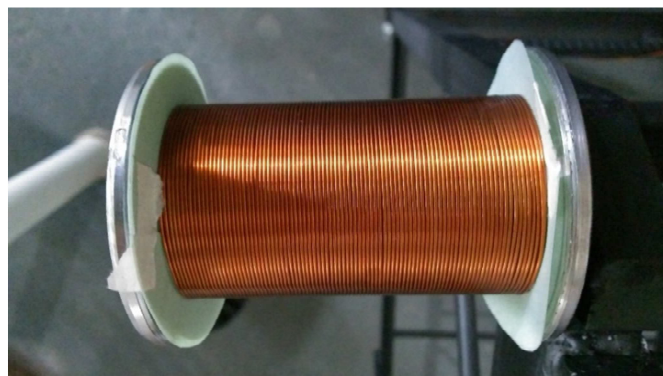


Figura 15: Enrolamento do cobre no carretel de Aço SAE 1040.

Fonte: Autoria própria.

Finalizado o enrolamento, as bobinas passaram por um procedimento de isolamento com barbante e impregnação com resina a base de poliéster que oferece excelentes propriedades dielétricas, flexibilidade, dureza, resistência química, aderência e compatibilidade, Figura 16,

para evitar contatos mecânicos e danos ao enrolamento e danos por corrosão, aumentando também a vida útil do circuito de campo magnético do freio.



Figura 16: Bobinas de campo, com tratamento à base de resina, montadas no estator do freio.

Fonte: Autoria própria.

4.1.1 ACIONAMENTO DO ELETROÍMÃ

Para o funcionamento do freio faz-se necessário uma fonte de corrente contínua, com o intuito de gerar a FEM nas bobinas de forma homogênea.

A partir da Equação 17, é possível notar que a densidade de fluxo magnético do eletroímã varia proporcionalmente à variação da corrente DC da fonte, esta variação permite um fácil controle do torque que será aplicado no eixo do motor, permitindo assim uma variação da carga de forma eficaz.

Uma forma de se obter uma corrente contínua para este tipo de acionamento é a utilização de uma ponte retificadora de onda completa a diodos, como a utilizada por Pereira (2006), Figura 17.

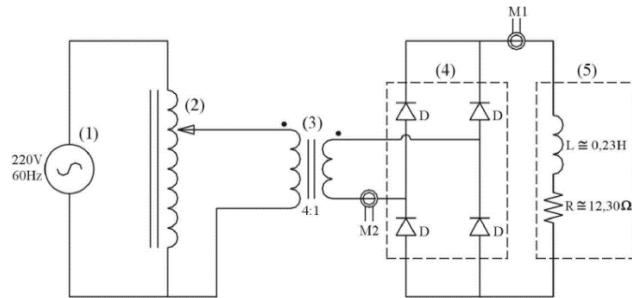


Figura 17: Fonte retificadora de onda completa a diodos.

Fonte: PEREIRA, 2006.

Este tipo de fonte retificadora de simples construção, atende muito bem o funcionamento do freio, composta por uma fonte CA (1), um autotransformador Varivolt (2), um transformador abaixador (3), uma ponte a diodos de onda completa (4) e o eletroímã (5), representados no desenho pela impedância equivalente.

Seu funcionamento se dá através da alimentação do autotransformador pela fonte CA, assim, com a variação da Varivolt, a intensidade da corrente medida em M1 e M2 é alterada, alterando então a intensidade da corrente nas bobinas de campo e, conseqüentemente modificando o campo magnético produzido por elas, controlando por fim a intensidade da força de frenagem.

Neste trabalho será utilizado uma fonte comercial de corrente contínua, Figura 18, na qual é possível através dos potenciômetros presentes nela, controlar precisamente a intensidade da corrente e da tensão aplicada sobre as bobinas de campo.



Figura 18: Fonte de alimentação HIKARI, modelo HF-3203S.

Fonte: <http://www.hikariferramentas.com.br/fonte-de-alimentacao/270/104/>.

Este equipamento digital de bancada possui uma ponte tiristorizada para controle da saída de corrente e tensão, possui dois displays de 4 dígitos (tensão e corrente) e, é capaz de fornecer uma saída variável de tensão de 0 a 32V DC e corrente de 0 a 3A DC. Possui ajuste de tensão e corrente por potenciômetros, proteção contra sobrecarga, curto circuito, super aquecimento e inversão de polaridade; os dados técnicos são descritos no Anexo B.

4.2 O ROTOR DO FREIO

O rotor para o protótipo foi confeccionado com um disco de AÇO SAE 1020, de raio 20 cm, com espessura de 1,59 cm, montado sobre eixo de mesmo material, com diâmetro de 38 mm, apoiado sob dois rolamentos com um acoplamento elástico CR, montados sob uma bancada confeccionada para acomodar o motor a ser ensaiado e o próprio freio, Figura 19.

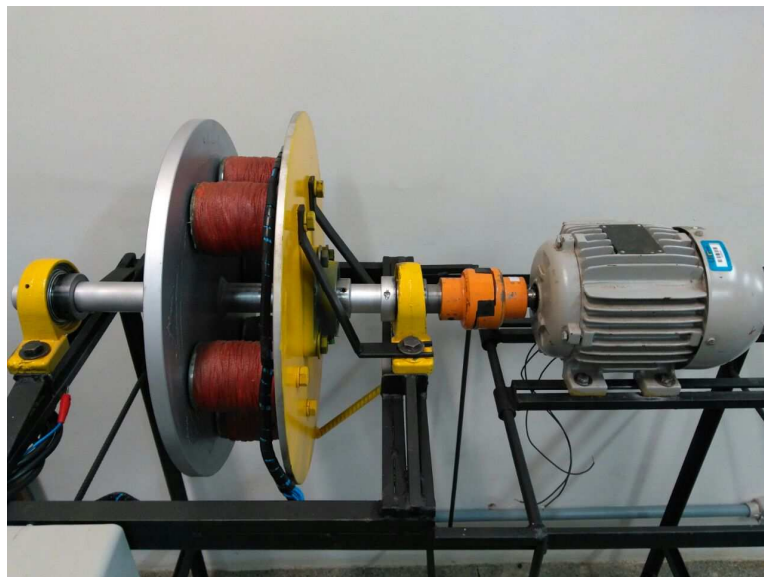


Figura 19: Protótipo montado sob bancada de testes com motor acoplado.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 6 apresenta os principais dados construtivos do rotor.

Tabela 6: Dados construtivos do rotor

Disco	Diâmetro (mm)	400
	Espessura (mm)	16
	Material do Disco	Aço SAE 1020
	Massa do Disco (kg)	22
	Momento de Inércia (kg.m ²)	0,44
Eixo	Diâmetro do eixo (mm)	38
	Comprimento do eixo (mm)	550
	Material do eixo	Aço SAE 1020
	Massa (kg)	3
Acoplamentos	Material	Aço SAE 1020
	Massa (kg)	1,5
Total	Massa total do rotor (kg)	26,5
	Momento de inércia do rotor (kg.m ²)	0,53

Fonte: Autoria própria.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para coleta dos dados experimentais, o motor foi acionado por uma partida direta, e o freio por uma fonte de corrente contínua descrita anteriormente. As grandezas que foram coletadas nos ensaios para o freio foram a corrente contínua (I_{cc}) e tensão contínua (V_{cc}) aplicada pelas bobinas, para o motor foram coletadas, com a utilização de um wattímetro digital, corrente de fase (I_f), tensão de fase (V_f), potência (P_a) ativa consumida e fator de potência ($\cos \phi$), apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Dados coletados durante o ensaio.

Grand. Freio		Grandezas motor								
		Rotação	Fase ST				Fase RT			
Vcc	Icc	rpm	Vf	If	cos ϕ	Pa (w)	Vf	If	cos ϕ	Pa (w)
0	0,000	1787	209,7	4,07	0,278	237,27	213,9	4,62	0,680	671,99
0,5	0,100	1787	209,6	4,07	0,280	238,86	214	4,63	0,702	695,56
1	0,199	1787	209,7	4,07	0,276	235,56	213,9	4,64	0,724	718,57
1,5	0,300	1786	209,9	4,09	0,270	231,79	213,6	4,64	0,731	724,50
2	0,400	1785	209,7	4,07	0,264	225,32	213,6	4,65	0,736	731,02
2,5	0,499	1784	209,6	4,08	0,259	221,49	213,7	4,66	0,740	736,92
3	0,600	1783	209,5	4,08	0,258	220,53	213,6	4,67	0,742	740,15
3,5	0,700	1782	209,5	4,07	0,240	204,64	213,5	4,68	0,750	749,39
4	0,800	1782	209,5	4,08	0,221	188,90	213,5	4,66	0,781	777,02
4,5	0,900	1781	208,8	4,1	0,226	193,47	213,4	4,69	0,786	786,66
5	1,000	1780	208,2	4,14	0,217	187,04	213,4	4,73	0,797	804,48
5,5	1,100	1779	208,4	4,22	0,209	183,80	213,4	4,74	0,807	816,29
6	1,200	1777	208,4	4,27	0,192	170,85	213,3	4,78	0,817	832,99
6,5	1,300	1776	208,9	4,3	0,160	143,72	212,9	4,76	0,877	888,76
7	1,400	1773	208,6	4,31	0,220	197,79	212,6	4,91	0,835	871,63
7,5	1,500	1772	208,3	4,35	0,227	205,69	212,5	4,97	0,834	880,81
8	1,600	1769	207,3	4,67	0,230	222,66	212,5	4,92	0,845	883,45
8,5	1,698	1766	207,6	4,84	0,201	201,96	212,1	4,96	0,877	922,62
9	1,796	1763	207,6	4,95	0,203	208,61	212,4	5,1	0,882	955,42
9,5	1,896	1760	207,5	5,05	0,165	172,90	212,1	5,17	0,901	988,00
10	1,995	1757	204,2	5,06	0,183	189,09	211,8	5,29	0,916	1026,31
10,5	2,095	1752	203,4	5,07	0,184	189,75	211,5	5,4	0,928	1059,87
11	2,192	1750	204,5	5,22	0,185	197,49	211	5,47	0,937	1081,46
11,5	2,293	1745	204	5,34	0,190	206,98	210,7	5,59	0,948	1116,57
12	2,388	1742	204	5,51	0,184	206,82	210,3	5,74	0,956	1154,01
12,5	2,486	1739	204,1	5,67	0,202	233,76	210,5	5,81	0,962	1176,53
13	2,586	1735	206,2	6,03	0,226	281,01	210,1	5,99	0,967	1216,97
13,5	2,683	1730	206	6,18	0,284	361,55	210,1	6,17	0,975	1263,91
14	2,778	1726	206,2	6,39	0,321	422,96	209,9	6,34	0,981	1305,48
14,5	2,876	1720	206	6,61	0,344	468,41	209,6	6,62	0,986	1368,13
15	2,973	1714	204,8	6,73	0,357	492,05	209,3	6,79	0,990	1406,94
15,5	3,068	1709	205,6	7,04	0,383	554,36	209,2	7,03	0,992	1458,91
16	3,098	1708	205,5	7,07	0,390	566,63	207,4	7,06	0,993	1453,99

Fonte: Autoria própria.

Para o ensaio com o motor de 2 CV, a fonte de corrente atendeu as expectativas e possibilitou um controle preciso da corrente aplicada em degraus de 0,5 volts. Sendo necessário 16 Vcc para atingir o máximo de corrente a ser fornecido pelo equipamento e atingindo a meta de aplicar cargas em até 115% da carga nominal da máquina ensaiada. É preciso salientar que, as bobinas podem receber correntes de até 5 Acc, momento em que atingem o ponto de saturação magnética, podendo assim ensaiar motores de até 4 CV.

5.1 TRATAMENTO DOS DADOS

Dos dados coletados, foram então determinadas as potência ativa trifásica do motor (Pa), o escorregamento da máquina (s), o fator de potência (FP), o rendimento da máquina (η), e o conjugado em Newton metro (Nm) e em kilo grama força metro (kgfm). Os dados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Dados calculados.

Potência Ativa trifásica	S (%)	FP	rend.	Conj. (Nm)	Conj. (kgfm)
909,26	0,7	0,77	0,77	4,86	0,496
934,42	0,7	0,76	0,77	5,00	0,509
954,13	0,7	0,75	0,78	5,10	0,520
956,29	0,8	0,75	0,78	5,12	0,522
956,34	0,8	0,74	0,78	5,12	0,522
958,41	0,9	0,73	0,78	5,13	0,523
960,68	0,9	0,73	0,78	5,15	0,525
954,02	1,0	0,71	0,78	5,12	0,521
965,93	1,0	0,69	0,78	5,18	0,528
980,14	1,1	0,69	0,78	5,26	0,536
991,52	1,1	0,68	0,79	5,32	0,543
1000,10	1,2	0,67	0,79	5,37	0,548
1003,85	1,3	0,66	0,79	5,40	0,550
1032,48	1,3	0,62	0,79	5,55	0,566
1069,42	1,5	0,68	0,80	5,76	0,587
1086,49	1,6	0,68	0,80	5,86	0,597
1106,11	1,7	0,69	0,81	5,97	0,609
1124,58	1,9	0,67	0,81	6,08	0,620
1164,02	2,1	0,67	0,82	6,31	0,643
1160,90	2,2	0,64	0,82	6,30	0,642
1215,39	2,4	0,64	0,83	6,61	0,674
1249,62	2,7	0,64	0,83	6,82	0,695
1278,94	2,8	0,64	0,83	6,98	0,712
1323,55	3,1	0,64	0,84	7,25	0,739
1360,83	3,2	0,64	0,84	7,46	0,761
1410,29	3,4	0,65	0,85	7,75	0,790
1497,97	3,6	0,68	0,86	8,25	0,841
1625,46	3,9	0,72	0,87	8,98	0,915
1728,44	4,1	0,75	0,88	9,57	0,975
1836,54	4,4	0,76	0,88	10,20	1,040
1898,99	4,8	0,77	0,89	10,59	1,079
2013,27	5,1	0,79	0,89	11,26	1,147
2020,62	5,1	0,80	0,89	11,30	1,152

Fonte: Autoria própria.

6.1.2 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para demonstrar o funcionamento do freio, foram realizadas comparações entre as grandezas da máquina elétrica.

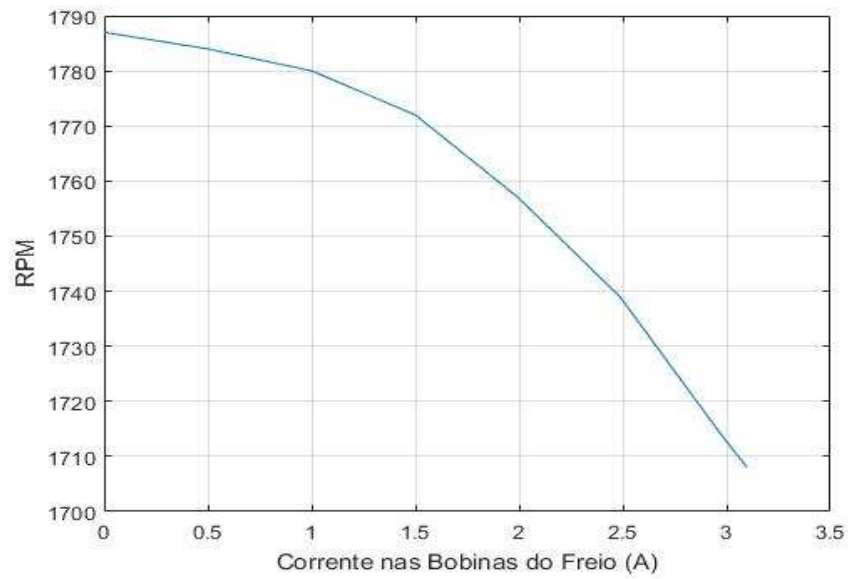


Figura 20: Comparação entre a corrente nas bobinas e rotação no motor.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 20 ilustra o comportamento da máquina em relação a sua velocidade no eixo, quando aplicada corrente nas bobinas do freio, conforme esperado e como característica do motor de indução trifásico, ao aumentar a carga no eixo do motor a rotação da máquina diminui.

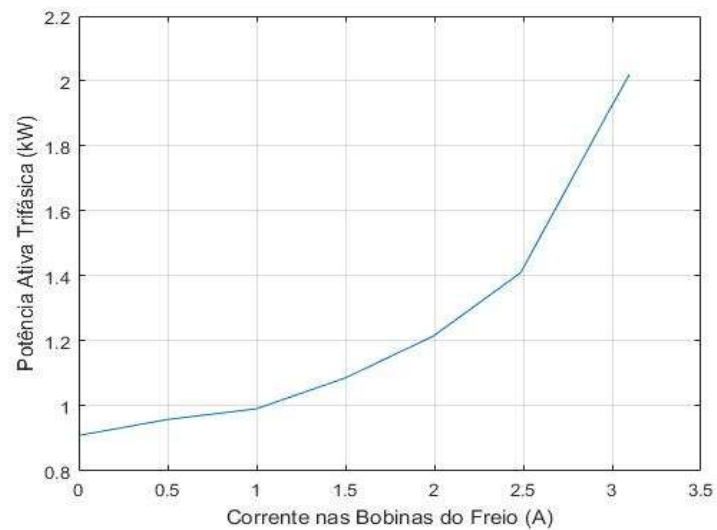


Figura 21: Comparação entre a corrente nas bobinas e potência ativa consumida da rede.

Fonte: Autoria própria.

A potência ativa trifásica, possui o comportamento inverso a rotação do motor, a sua característica é aumentar conforme aumenta a carga sob o eixo do motor.

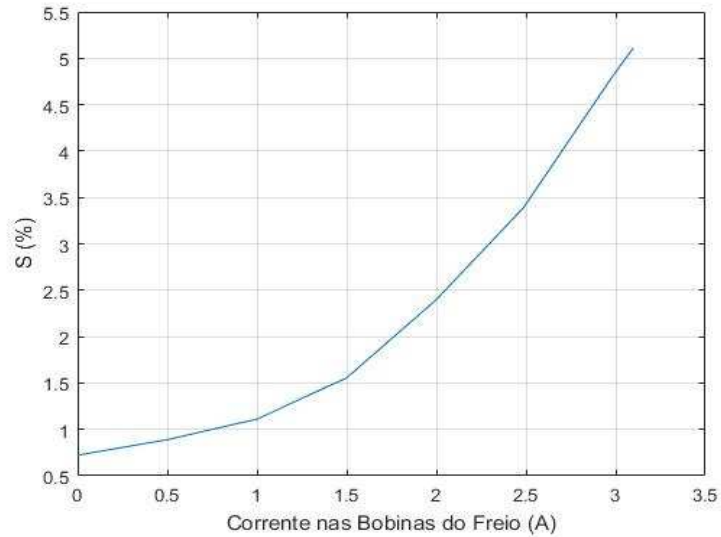


Figura 22: Comparação entre a corrente nas bobinas e o escorregamento do motor.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 22, ilustra o aumento do escorregamento conforme aumenta a corrente na bobina do freio, este é o comportamento esperado para o motor de indução trifásico quando há incremento da potência no eixo da máquina.

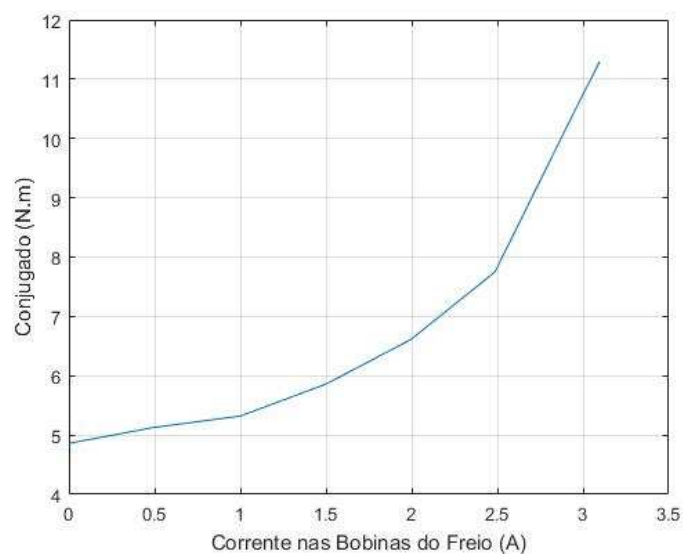


Figura 23: Comparação entre a corrente nas bobinas e o conjugado (N.m).

Fonte: Autoria própria.

O conjugado no eixo do motor teve o incremento com o aumento da corrente nas bobinas de campo, comprovando assim o funcionamento do freio como um dinamômetro, Figura 23 e 23.

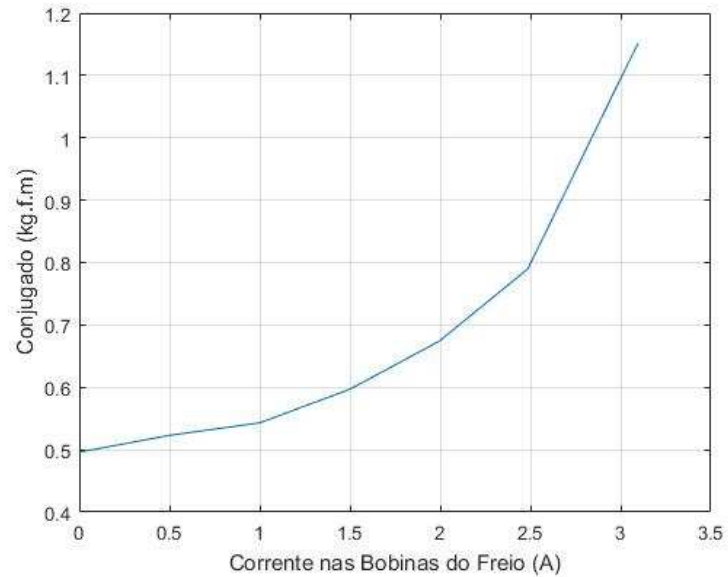


Figura 24: Comparação entre a corrente nas bobinas e o conjugado (kg.f.m).

Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados encontrados com os ensaios, é gerado o quadro de corrente CC x Conjugado no eixo para o freio em estudo, apresentado na Tabela 9, para a faixa de rotação entre 1700 e 1800 rpm.

Tabela 9: Corrente por Conjugado.

lcc	Conj. (Nm)	Conj. (kgfm)	lcc	Conj. (Nm)	Conj. (kgfm)
0,100	5,00	0,509	1,700	6,08	0,620
0,200	5,10	0,520	1,800	6,31	0,643
0,300	5,12	0,522	1,900	6,30	0,642
0,400	5,12	0,522	2,000	6,61	0,674
0,500	5,13	0,523	2,100	6,82	0,695
0,600	5,15	0,525	2,200	6,98	0,712
0,700	5,12	0,521	2,300	7,25	0,739
0,800	5,18	0,528	2,400	7,46	0,761
0,900	5,26	0,536	2,500	7,75	0,790
1,000	5,32	0,543	2,600	8,25	0,841
1,100	5,37	0,548	2,700	8,98	0,915
1,200	5,40	0,550	2,800	9,57	0,975
1,300	5,55	0,566	2,900	10,20	1,040
1,400	5,76	0,587	3,000	10,59	1,079
1,500	5,86	0,597	3,100	11,26	1,147
1,600	5,97	0,609			

Fonte: Autoria própria.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos deste trabalho foram atingidos, com a construção e comprovação do funcionamento de um dinamômetro eletromagnético por correntes de Foucault. Este equipamento possibilita a realização de ensaios em máquinas elétricas rotativas para diferentes cargas no eixo da máquina, possibilitando o uso para pesquisa de estratégias de controle de velocidade com o uso de inversores de frequência.

Muitos obstáculos surgiram durante a construção do equipamento, como a fase de bobinamento que foi realizada manualmente e foi necessário muito tempo para a realização, ainda nesta fase foi escolhido o fio AWG 20 para que, o equipamento possa atender com uma margem de segurança na utilização durante os ensaios, inicialmente foi previsto a utilização do fio AWG 22.

A escolha das tintas utilizada na pintura das partes também atendeu a necessidade do aquecimento do equipamento durante o ensaio, as correntes de Foucault ao circularem no interior do disco rotórico causam aquecimento ao opor resistência ao movimento do motor ensaiado, um ensaio de aquecimento do motor foi realizado e o resultado do aquecimento do disco até o seu ponto de equilíbrio térmico é apresentado no Anexo A, durante os ensaios a temperatura do disco chegou a 90°C, com isso foi utilizada uma tinta especial para alta temperatura, podendo atingir até 500°C, visando a proteção contra corrosão por toque do disco e dando acabamento estético no equipamento.

A usinagem das peças também apresentaram algumas dificuldades no que se refere a mão de obra especializada para realização dos trabalhos, que necessita de precisão e clareza na leitura dos projetos de dimensionamento das partes mecânicas constituintes do protótipo.

Embora não exista uma metodologia clara para dimensionamento de um equipamento como este, foi possível alcançar a construção de um dispositivo eficaz e que atende a todas as expectativas para os fins a que ele será submetido.

O uso deste equipamento nos laboratórios de máquinas elétricas, poderá contribuir substancialmente para o ensino das matérias de máquina elétrica e acionamentos elétricos, para pesquisa em nível de mestrado e doutorado devido ao fácil e preciso controle do torque no eixo da máquina a ser ensaiada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEM. **Balço Energético Nacional**. 2016. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br>>. Acesso em: 18 de agosto de 2016.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamento de máquinas elétricas**. Rio Grande do Sul; AMGH Editora, 2013.
- DEL, TORO. V. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Editora LTC, 1ª Edição, 1994.
- FILHO, R.F.P. **Estudo de um sistema de frenagem eletromagnética empregando correntes parasitas**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.
- FITZGERALD, A. E.; JR, C. K.; UMANS, S.D. **Máquinas elétricas: Com introdução à eletrônica de potência**. Porto Alegre; Bookman, 2006.
- KSOW, I. **Máquina elétricas e Transformadores**. Globo Editora, 2005.
- NEWS, E.V. **Electromagnetc Anti-Lock Braking for Electric Vehiclest**. 2016. Disponível em: <<http://www.electric-vehiclennews.com/2016/04/electromagnetic-braking-for-electric.html>>. Acesso em: 10 de outubro de 2016.
- PEREIRA, A.H. **Freio eletromagnético para ensaios de motores elétricos de indução**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE,2006.
- SOKOLOV, G. et al. **Analysis of eletrodynamic brake for utilization in systems with rotating shafts**. Saimaan ammattikorkeakoulu, 2016.
- YING, Z.-d; XU, X. -f; ZHU, J.-a. **Analysis of simulation design of the disc eddy current braking device**. In: IEEE. 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Eletronica Engineering. 210. V.5, p. 309-211.

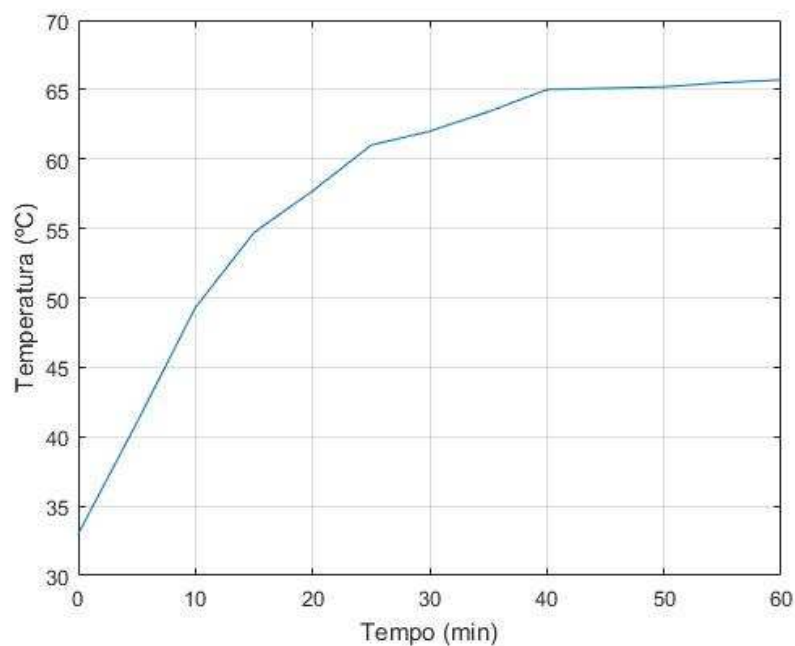
ANEXO A

Ensaio de aquecimento com motor de 1 CV conectado ao eixo do motor, temperatura ambiente de 27 °C

Tabela 10: Teste de aquecimento do freio; Vcc - Tensão contínua nas bobinas; Icc – corrente contínua nas bobinas; R₂ – Resistência do enrolamento; T₂ – Temperatura interna do enrolamento; Temp. estator – Temperatura do estator.

Tempo (min.)	Vcc	Icc	R ₂	T ₂	Temp. estator
0	11,05	2,277	4,85	35,5	33,0
5	11,04	2,262	4,88	37,1	41,0
10	11,67	2,383	4,90	38,0	49,3
15	11,60	2,354	4,93	39,7	54,7
20	11,58	2,332	4,97	41,8	57,7
25	11,57	2,321	4,98	42,9	61,0
30	11,57	2,318	4,99	43,2	62,0
35	11,53	2,292	5,03	45,4	63,4
40	11,52	2,287	5,04	45,8	65,0
45	11,51	2,28	5,05	46,4	65,1
50	11,50	2,267	5,07	47,8	65,2
55	11,54	2,274	5,07	47,9	65,5
60	11,55	2,273	5,08	48,3	65,7

Figura 25: Temperatura no estator (°C) x Tempo (minutos)



ANEXO B

Dados da fonte de corrente/tensão DC HIKARI HF-3203S

MODELO HF-3203S			
OUTPUT		PRECISÃO	
Tensão	0 ~ 32 V	Tensão	$\leq 0,5\% + 20 \text{ mV}$
Corrente	0 ~ 3 A	Corrente	$\leq 0,5\% + 5 \text{ mA}$
REGULAÇÃO DE CARGA		RIPPLE	
Tensão	$\leq 0,01\% + 2 \text{ mV}$	Tensão	$\leq 1 \text{ mVrms}$
Corrente	$\leq 0,1\% + 5 \text{ mA}$	Corrente	$\leq 3 \text{ mArms}$
REGULAÇÃO LINHA		COEFICIENTE DE TEMPERATURA	
Tensão	$\leq 0,01\% + 3 \text{ mV}$	Tensão	$\leq 150 \text{ ppm}$
Corrente	$\leq 0,1\% + 3 \text{ mA}$	Corrente	$\leq 150 \text{ ppm}$
RESOLUÇÃO		RESOLUÇÃO DO DISPLAY	
Tensão	10 mV	Tensão	10 mV
Corrente	1 mA	Corrente	1 mA

Fonte: Manual de instruções, Fonte de alimentação regulável DC. Marca: HIKARI. Modelo: HF-3203S/HF-3205S.