

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DE METODOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DE UM FREIO DE
FOUCAULT

por

Felipe Kern Micco

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 12 de Junho de 2015.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

AVALIAÇÃO DE METODOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DE UM FREIO DE
FOUCAULT

por

Felipe Kern Micco

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Charles Rech

Comissão de Avaliação:

Prof. Sergio Viçom Möller

Prof. Paulo Otto Beyer

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 12 de Junho de 2015.

à minha família e minha namorada que
me apoiam incondicionalmente

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família pelo exemplo de vida, por estar sempre presente e por me proporcionar toda a educação e suporte e sempre confiar em mim;

à minha namorada, por ser compreensiva, me incentivar e estar sempre ao meu lado;

ao meu orientador Charles Rech, pela parceria, constante orientação e dedicação na realização desse trabalho;

aos colegas do laboratório LETA da UFRGS, João Batista da Rosa e Julio por toda a ajuda e contribuição na realização dos testes.

aos meus amigos do colégio, por tudo que passamos e pelo tempo que andamos juntos;

aos amigos que conheci na faculdade pela constante ajuda, cumplicidade e presença durante essa jornada;

MICCO, F. K. **“Avaliação de metodologia para o dimensionamento de um freio de Foucault”**. 2015. 27 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

O presente trabalho consiste na avaliação de métodos teóricos para o dimensionamento dos principais componentes de um freio eletromagnético por correntes parasitas, também conhecido como freio de Foucault, para ser usado na medição do desempenho de motores e turbinas de baixa potência. Para tanto, um estudo das condições de torque e força frenante exigidas para o funcionamento do freio foi realizado, e uma metodologia de cálculo foi proposta. Para a verificação dos resultados calculados, foram realizados ensaios em um freio de Foucault conectado a uma turbina Tesla, disponível no laboratório LETA da UFRGS. Os valores medidos de torque, rotação e força de freio foram avaliados em equações encontradas na literatura e uma comparação desses resultados foi feita. Os resultados mostraram que a utilização da metodologia proposta, apesar de superdimensionar o freio, pode ser empregada para o seu projeto. Esse fato deve-se mais provavelmente à dificuldade de se estimar a intensidade da densidade de campo magnético produzido pelos eletroímãs, onde diversas simplificações foram utilizadas, o campo magnético no entreferro ser constante e uniforme, densidade de correntes parasitas ser uniforme na área do disco sob os polos do ímã e área de ação do fluxo magnético no entreferro ter um acréscimo de 10% em relação a área do núcleo do ímã.

Palavras-chave: correntes parasitas, dimensionamento de freio de Foucault, torque e força frenante.

MICCO, F. K. “**Methodology evaluation for the design of a Foucault brake**”. 2015. 27 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

This paper focuses on the evaluation of theoretical methods for the design of the main components of an electromagnetic brake based on parasite currents, also known as Foucault brake, used to measure the performance of low power engines and turbines. In order to achieve that, a study about the braking torque and force working conditions was made and a calculation methodology was proposed. To validate the study calculated results, experimental tests were conducted using a Foucault brake prototype attached to a Tesla Turbine, available in UFRGS's LETA laboratory. In addition, the measured torque, force, and rotation parameters were replaced in the obtained equations found in technical literature to create a comparison between these parameters. The results have shown that despite the use of the proposed methodology predicts an oversized brake, it can be used for the brake's project. This fact happens most probably because of the difficulty in calculating the magnetic field parameters generated by the electromagnets, where some simplified hypothesis were assumed, such as the magnetic field being uniform and constant in the air gap, the induced currents density being constant on the disc area below the poles and an increase of only 10% to the magnetic flux area in the air gap.

Key-words: Eddy currents, design of a Foucault brake, braking torque and force.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
4.1. Sobre o Freio de Foucault	2
4.2. Medição de Torque	3
5. METODOLOGIA	3
5.1. Montagem do Freio	3
5.2. Cálculo de raio efetivo devido a esforços frenantes no disco	4
5.3. Cálculo do Torque de Reação	6
5.4. Cálculo de Potências	6
5.5. Cálculo para as bobinas	6
5.6. Ensaio na bancada Foucault-Tesla	7
6. RESULTADOS	9
7. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
APÊNDICE A	16
APÊNDICE B	17
B.1. Cálculos de incertezas de medição	17
B.2. Incerteza de medição do torque de reação	17
B.3. Incerteza de medição da potência mecânica	17
B.4. Incerteza de medição da potência elétrica	17
ANEXO 1	18
ANEXO 2	19
ANEXO 3	20

1. INTRODUÇÃO

Freios são dispositivos que transformam a energia cinética de um corpo em energia térmica, com a finalidade de reduzir seu movimento, ou desacelerá-lo. A grande maioria dos freios utilizados no mundo agem por meio do atrito entre suas partes frenantes e o corpo que se quer parar, chamados de freios de fricção. Os freios mais conhecidos são os automotivos, que funcionam por atrito das pastilhas, ou sapatas nas rodas do veículo (Alves et al, 2012). Há também freios que funcionam, não por atrito, mas pela indução magnética de correntes parasitas, regidos pela Lei de Lenz do eletromagnetismo. A lei de Lenz explica que uma corrente induzida possui um sentido de movimento necessário para gerar um campo magnético induzido que possua um sentido oposto ao campo original, que gerou a corrente induzida (Haddad et al, 2001). Esses freios são utilizados em diversas aplicações podendo-se citar dinamômetros, grandes guindastes, empilhadeiras, cadeiras de roda, trens de pouso.

O funcionamento básico de um freio de correntes parasitas, também chamado de freio de Foucault consiste em um disco de material condutor elétrico que, ao cruzar uma região de campo magnético, provocado por um eletroímã localizado em determinado ponto do disco, faz variar o fluxo magnético naquele ponto, o que provoca a indução de correntes parasitas nessa área. A ação dos campos do eletroímã e o campo induzido pelas correntes induzidas se opõem, tendendo a se anularem, o que gera uma força que tende a frear o disco. A Figura 1.1 ilustra o mecanismo de funcionamento de um freio de Foucault.

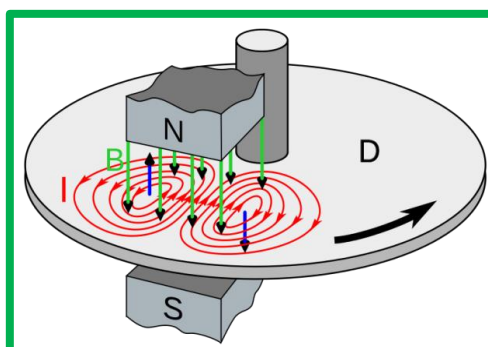


Figura 1.1 - Mecanismo de funcionamento de um freio de Foucault. (Fonte: Chetvorno, 2015)

O freio por correntes induzidas tem sido largamente estudado pela indústria para aplicação como freio de emergência, ou auxiliar, em trens e metrô. Um exemplo é o trem de alta velocidade da China, o Maglev. Devido à enorme solicitação de energia para desacelerar o Maglev, que ultrapassa os 400 km/h, o tradicional modelo mecânico não é suficiente para executar essa tarefa devido à alta inércia e grande desgaste do freio pelo calor gerado. (Zhi-Ding et. al., 2010)

Outra importante aplicação para o freio de Foucault é como um instrumento de medição de desempenho de sistemas geradores e transmissores de potência, como motores e turbinas. Em engenharia, o desenvolvimento de motores e turbinas com maior rendimento energético é um assunto de extrema importância para o atual cenário energético do país, e depende diretamente da capacidade de avaliar os seus comportamentos frente a mudanças tecnológicas que eles possam vir a sofrer (Pereira, 2006) .

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como escopo avaliar metodologias de dimensionamento de freios eletromagnéticos e confrontar os resultados teóricos calculados com os resultados medidos em um protótipo disponível no LETA (Laboratório de Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos) da UFRGS, construído para medir o desempenho de uma Turbina Tesla. Além disso, deseja-se que a metodologia proposta possa ser utilizada para o projeto de novos freios, para diferentes capacidades de equipamentos motores

O freio de Foucault pode ser utilizado como ferramenta de medição no uso em meio acadêmico, visando à realização de estudos e experimentos para medir o desempenho de motores e turbinas de baixa potência, com alta resolução de medição e controle da carga.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ming, em 1997, realizou o estudo da aplicação de um freio eletromagnético por correntes parasitas como auxílio a um sistema de frenagem a disco por atrito, a fim de melhorar o seu desempenho, reduzindo sua necessidade de utilização e assim produzir menos calor

No trabalho de Dietrich, em 2000, é realizada uma comparação dos resultados obtidos para as correntes em meios ferromagnéticos para um freio comercial.

Em Pigott et al., 2006., realizou-se um experimento cujo objetivo foi uma investigação preliminar sobre os efeitos das correntes de Foucault em um disco em revolução.

Zhi-Ding et. al., 2010, realizou uma análise da simulação de um dispositivo de frenagem por correntes de Foucault com o objetivo de otimizar o sistema existente no Maglev, trem de alta velocidade chinês.

Em Ren He et al., 2013, realizou-se uma análise de performance do sistema ABS (sistema anti-travamento) de freios para um sistema de frenagem híbrido, composto por um freio de Foucault e um freio hidráulico, visando redução nos esforços e consequente degradação do sistema hidráulico.

Já em Balte et al., 2015, fez-se o desenvolvimento de um dinamômetro eletromagnético por ação de correntes de Foucault com o objetivo de efetuar micro-medições de potência. O objetivo foi medir o desempenho de turbinas de até 50 W.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Sobre o Freio de Foucault

Smythe, em 1942, desenvolveu o cálculo do campo magnético criado pelas correntes induzidas em um disco de freio ferromagnético considerando um raio finito. As correntes induzidas num determinado ponto são geradas pela variação do campo magnético que age sobre esse ponto, assim como pela mudança da indução magnética das correntes induzidas em outros pontos do disco. (Pereira, 2006). Smythe obteve bons resultados para baixas velocidades a partir do estudo das distribuições de corrente sob o campo magnético. Contudo, seus resultados estavam aquém dos valores obtidos experimentalmente para velocidades elevadas.

Em 1991, Wouterse descreveu o freio por correntes induzidas e a influência do campo magnético criado por estas correntes sobre a força de frenagem, em função da velocidade de rotação do disco. Wouterse comentou que os problemas de transferência de calor eram os elementos limitantes para o projeto, e não as

correntes necessárias para obter o torque para frenagem e enfatizou a grande dependência das corrente induzidas que crescem com a redução do entreferro.

Em 2006, Pereira apresenta o desenvolvimento de um freio de Foucault com o objetivo de medir o torque de frenagem em motores de indução trifásica do tipo gaiola de esquilo. Ao final, dois métodos foram utilizados para avaliar o melhor desempenho alcançado por motores indutivos de alto rendimento.

4.2. Medição de Torque

Os principais métodos encontrados na literatura utilizados para realizar a medição de torque são: a partir da potência elétrica, ou através da utilização de um dinamômetro para medir o torque de reação. No primeiro, é possível se obter a potência elétrica se multiplicando a tensão no aparelho e a corrente observada no mesmo, por um multímetro, por exemplo. Com a potência elétrica, e a rotação do motor, a qual pode ser medida por um tacômetro, ou um sensor de efeito Hall, pode-se calcular o torque dividindo-se a potência elétrica pela rotação (Shicker E Wegener, 2002, citados em Kich, 2011). No segundo método são utilizadas células de carga montadas em braços de medição, ou de alavanca, de comprimento conhecido, engastado no estator, ou carcaça de um motor apoiado em mancais no seu próprio eixo, como mostra a Figura 3.1. (Shicker E Wegener, 2002, citados em Kich, 2011). Multiplicando-se a força lida pela célula e o comprimento do braço de medição, tem-se o torque e multiplicando-se ainda pela rotação angular tem-se a potência mecânica gerada. (Heywood, 1988)

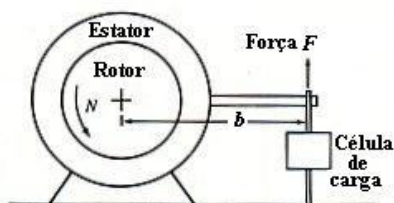


Figura 3.1 - Esquema do princípio de operação de um dinamômetro. (Heywood, 1988)

5. METODOLOGIA

Para a análise do sistema de frenagem escolhido fez-se uma abordagem teórica sobre os esforços impostos ao freio, com a finalidade de poder realizar o seu dimensionamento. Posteriormente, um protótipo específico foi ensaiado, e os resultados comparados com a metodologia proposta.

5.1. Montagem do Freio

O freio de Foucault disponível, utilizado para esse trabalho pode ser observado na Figura 4.1,.

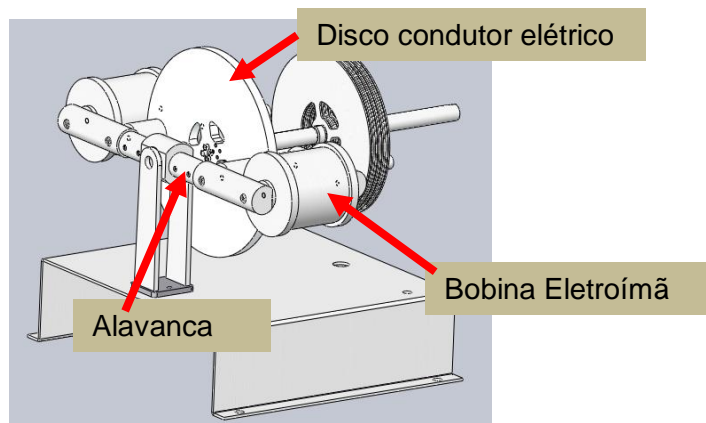


Figura 5.1 - Composição básica do freio de Foucault em software CAD Solidworks.

Escolheu-se o alumínio para o material do disco por apresentar uma baixa densidade em relação a outros metais, o que reduz a sua inércia e por ter uma alta condutividade elétrica. Ele tem 250 mm de diâmetro e 12,7 mm de espessura.

A partir da proposta de Pereira, 2006, como é mostrado na Figura 4.2, escolheu-se a configuração de montagem para o eletroímã considerando-se a posição dos polos. Apesar das desvantagens apresentadas pelo autor, as quais podem ser citadas a não possibilidade de ajuste do entreferro e a redução no caminho percorrido pelo fluxo magnético, optou-se pela configuração “a)” por tornar o conjunto mais compacto e de fácil montagem.

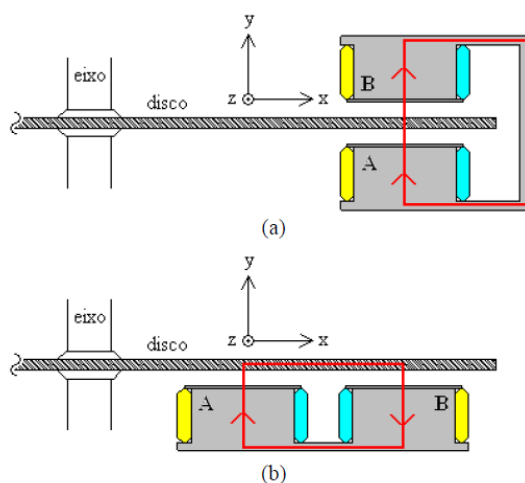


Figura 4.2 - Propostas de montagem “a” e “b” para o eletroímã no disco (Pereira, 2006).

As bobinas foram feitas utilizando fio de cobre comercial norma AWG18 com capacidade nominal de corrente de 2,5 A, contendo aproximadamente 1500 espiras. Elas apresentam 98 mm de diâmetro externo, 40 mm de diâmetro interno e 78 mm de comprimento. O núcleo é feito de aço comercial ferromagnético SAE1045, fácil aquisição, com 35 mm de diâmetro. Os polos foram posicionados de forma a considerar o efeito de borda (Wouterse, 1991), de forma que uma distância de um diâmetro de núcleo foi adotada como margem de segurança, medida entre o centro do polo e a extremidade do disco, chamada de raio efetivo do disco que mede 90 mm. (Pereira, 2006)

5.2. Cálculo de raio efetivo devido a esforços frenantes no disco

Para se calcular o torque e a força necessários para frear o disco quando o mesmo está sofrendo a ação de um fluxo magnético constante e uniforme em uma área específica do disco, baseou-se na resolução para o problema similar apresentado por Halliday et. al., 1996, que deduz o torque de freio segundo a situação da Figura 4.3.

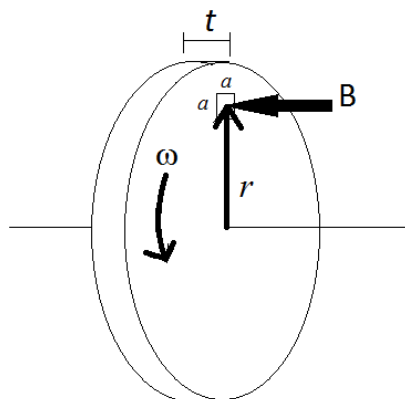


Figura 4.3 - Modelo simplificado para um disco condutor sob a ação de um campo magnético “B” na área limitada pelo quadrado de lado “a”.

A dedução completa pode ser observada no Anexo 2, e seu resultado é representado pela Equação 4.1:

$$T_{disc} = -\omega \cdot \sigma_{Al} \cdot t \cdot r^2 \cdot a^2 \cdot B^2 \cdot c \quad (4.1)$$

em que “ ω ” é a velocidade angular do disco, σ_{Al} é a condutividade elétrica do Alumínio, “ t ” é a espessura do disco, “ r ” é o raio efetivo entre o centro do eixo de giro do disco e o centro do polo da bobina, “ a ” é a medida do lado do núcleo da bobina que foi simplificado como quadrado para facilitar os cálculos e “ B ” é a densidade de fluxo magnético gerado pela bobina e conduzido pelo núcleo ferromagnético. O fator “ c ” é um coeficiente geométrico, sugerido em Wouterse, 1991, que leva em consideração a relação entre a resistência do conotorno total do disco e a resistência do contorno da parte do disco que fica sob os polos do eletroímã. A não utilização desse fator, gera resultados muito aquém dos medidos experimentalmente, como será mostrado adiante. Essa equação leva em consideração um núcleo de seção quadrada, porém para o caso de um núcleo cilíndrico, apenas altera-se o termo relativo a área submetida ao campo B , podendo ser facilmente adaptada e aplicada a núcleos de seção circular,

A partir da Equação 4.1, é possível se calcular a força frenante que age no disco, dividindo-se o torque pelo raio “ r ”, o que resulta na Equação 4.2:

$$F_{freio} = -\omega \cdot \sigma_{Al} \cdot t \cdot r \cdot a^2 \cdot B^2 \cdot c \quad (4.2)$$

A partir desses resultados, utilizados para a comparação com os valores experimentais, encontra-se a expressão para o raio efetivo aproximado que deve possuir o disco para a ocorrência dos esforços apresentados, com a Equação 4.3.

$$r = \sqrt{\frac{T_{disc}}{-\omega \cdot \sigma_{Al} \cdot t \cdot a^2 \cdot B^2 \cdot c}} \quad (4.3)$$

5.3. Cálculo do Torque de Reação

O torque de reação, lido na célula de carga pode ser obtido através da Equação 4.4 (Heywood, 1988):

$$T = F.b \quad (4.4)$$

em que “T” é o torque de reação, “F” a força lida pela célula de carga e “b” o comprimento do braço de alavanca que há entre o centro de giro do disco e o ponto de leitura da força, como é mostrado na Figura 4.4.

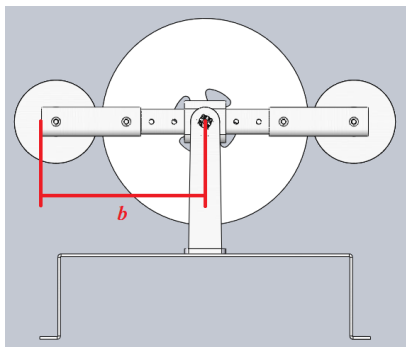


Figura 4.4 - Braço de alavanca considerado para projeto.

5.4. Cálculo de Potências

Para a potência mecânica, pode-se utilizar a Equação 4.5, a qual define a taxa de trabalho mecânico realizado pelo sistema em movimento:

$$P = T. \omega \quad (4.5)$$

em que T é o torque de reação aplicado pelo equipamento e ω é a velocidade angular. No freio, tem-se a partir dessa definição, a potência de saída do sistema, que é gerada pelo freio.

Para a parte elétrica, a potência consumida pelo sistema é definida pela Equação 4.6:

$$P = V.I \quad (4.6)$$

com V sendo a tensão média eficaz aplicada ao sistema e I a corrente elétrica que percorre o mesmo. Essa segunda definição consiste na potência de entrada do freio.

5.5. Cálculo para as bobinas

Para tanto, utilizou-se a Equação 4.8, que é uma variação da Equação 4.1, para aproximar a densidade de fluxo magnético produzida pelas bobinas:

$$B = \sqrt{\frac{T_{disc}}{-\omega \cdot \sigma_{Al.t.c} \cdot r^2 \cdot a^2}} \quad (4.8)$$

Na Equação 4.9 é calculada a quantidade de espiras que deve possuir a bobina para gerar a o campo magnético necessário ao sistema. Pereira em 2006, considerou apenas a densidade de fluxo magnético no entreferro, devido a baixa relutância no núcleo de aço e no disco de alumínio, porém os valores ainda ficam

distantes dos medidos. Por essa razão, utilizou-se a metodologia de Chapman, 2005, onde a relutância total do sistema disco, núcleo e entreferro foi considerada, e os resultados tornaram-se mais próximos dos medidos nos testes.

$$N.I = B * A * \mathfrak{R} \quad (4.9)$$

em que “N” é o número de espiras, “I” é a corrente elétrica que percorre os indutores, “A” é área de seção no entreferro e “ \mathfrak{R} ” é a relutância total do caminho percorrido pelo fluxo magnético calculada pela Equação 4.10 de Chapman, 2005:

$$\mathfrak{R} = \frac{l_c}{\mu_0 * \mu_r * A} \quad (4.10)$$

Onde “ l_c ” é o comprimento característico do caminho percorrido pelo fluxo magnético, “ μ_r ” é a permeabilidade magnética relativa do metal considerado, “ μ_0 ” é a permeabilidade magnética no vácuo e “A” é a área da seção a ser considerada. A Equação 4.10 é aplicada separadamente para o disco, entreferro e núcleo da bobina e seus resultados são somados, resultando na relutância equivalente, ou total do circuito.

Essas equações levam em consideração algumas simplificações importantes. O campo magnético no núcleo e entreferro é tido como constante e uniforme (Smythe, 1942 e Wouterse, 1991). A metodologia também considera que o metal do núcleo apresenta linearidade na densidade das correntes induzidas na sua seção transversal. Outra simplificação adotada ao cálculo realizado para o comportamento magnético do sistema, segundo Smythe, 1942, é o acréscimo de 10% na área do núcleo, para representar a área de fluxo magnético no entreferro. (Pereira, 2006 e Chapman, 2005).

5.6. Ensaio na bancada Foucault-Tesla

Para a avaliação da abordagem teórica proposta, utilizou-se bancada disponível no LETA. A bancada é formada por uma Turbina Tesla (Anexo 3), conectada ao freio de Foucault através do seu eixo de rotação, segundo Figura 4.5. O esquema de funcionamento do sistema é mostrado de forma simplificada na Figura 4.7.

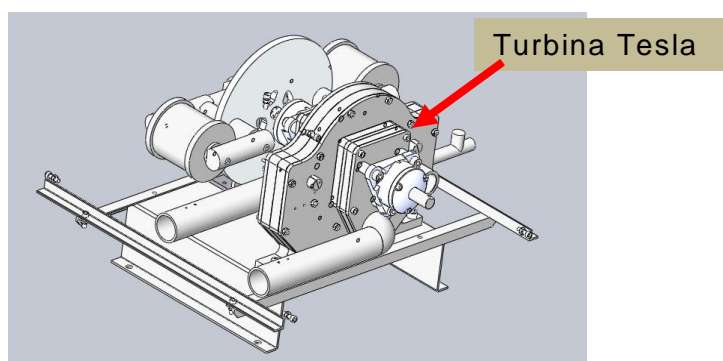


Figura 4.5 - Bancada Tesla-Foucault em software CAD Solidworks.

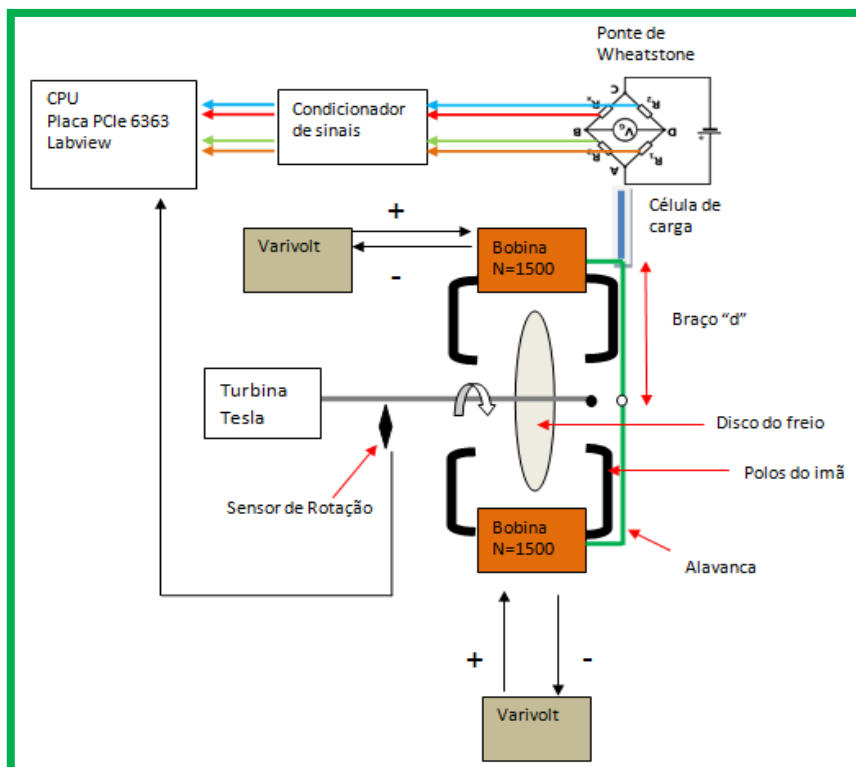


Figura 4.6 - Esquema de funcionamento da bancada Tesla-Foucault.

A carga do sistema foi aplicada pela turbina Tesla, a qual era alimentada por ar comprimido de um compressor. Por características do compressor disponível, os testes foram efetuados com carga variável, ou seja, a pressão no compressor decaiu com o tempo dos ensaios a medida que a frenagem foi realizada devido ao subdimensionamento do compressor para o experimento em questão.

A frenagem do sistema foi realizada usando-se um Varivolt, uma fonte de tensão variável capaz de alimentar as bobinas com tensão máxima de 380 V. A tensão foi escolhida de acordo a gerar uma corrente desejada no sistema, que dependeu da resistência dos solenoides. Mediu-se a corrente nas bobinas com um alicate amperímetro da marca Fluke. A tensão foi medida com a utilização de um osciloscópio da marca Agilent Technologies.

A força de reação foi medida através de uma célula de carga com capacidade máxima de 1 kg com incerteza de medição relativa de 0,2% F.S., da marca Keyes (Figura 4.7), instalada perpendicular a uma das bobinas, em uma das extremidades do braço de alavanca. A célula foi condicionada a uma ponte de Wheatstone, necessária para a medição de resistências de ordem muito baixa; com conexão a quatro fios, um para cada resistência da ponte. A rotação foi medida com a utilização de um sensor óptico da marca Autonics, posicionado próximo ao eixo de rotação do sistema (Figura 4.7).

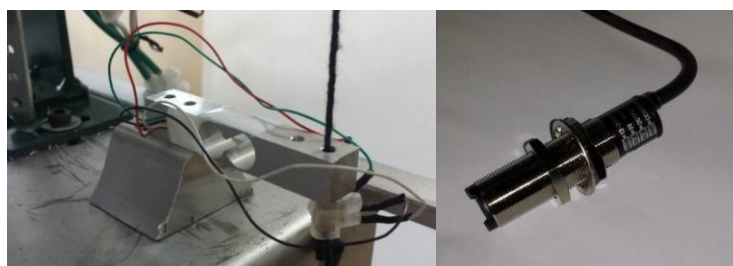


Figura 5.7 - Célula de carga Keyes (esquerda). Sensor óptico Autonics (direita).

Com o sistema em repouso, ligou-se o Varivolt até se estabelecer nas bobinas a corrente de ensaio e, ao obter-se a configuração objetivada, o Varivolt foi desligado e a turbina posta a girar, juntamente com o freio, abrindo-se a linha de ar comprimido. Quando o conjunto adquiriu determinada rotação, o freio foi ligado e as medidas de rotação, torque e potência foram feitas através da placa PCIe6363, da National Instruments, e os resultados foram gerados em computador através do software Labview. O experimento foi realizado quatro vezes, para que em cada ensaio, os parâmetros de corrente e tensão fossem variados, a fim de se gerar diferentes campos magnéticos e, assim, diferentes forças frenantes.

6. RESULTADOS

Para a realização das medidas de torque e potência, quatro parâmetros de tensão e corrente foram definidos a fim de gerar quatro diferentes magnitudes de cargas aplicadas no disco, como é mostrado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Valores de tensão e corrente para cada ensaio.

<i>Ensaio</i>	<i>Tensão</i> [V]	<i>Corrente</i> [A]	<i>Potência</i> <i>Elétrica</i> [W]
1	29±0,01	1,5±0,1	43,5±2,9
2	41±0,01	2,5±0,1	102,5±4,1
3	49±0,01	3,5±0,1	171,5±4,9
4	68±0,01	4,5±0,1	306±6,8

Os parâmetros de rotação, torque, força e potência, medidos nos testes, bem como a densidade de fluxo magnético estimada, baseada nessas medições, podem ser observados a seguir na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Medidas do protótipo disponível.

<i>Ensaio</i>	<i>Torque</i> <i>reação máx.</i> [Nm]	<i>Rotação</i> [rad/s]	<i>Fluxo</i> <i>Magnético</i> B [T]	<i>Potência</i> [W]
1	0,350±0,004	34,133±1	0,076	11,9±2,20
2	0,840±0,004	32,673±1	0,120	27,4±5,28
3	0,850±0,004	32,520±1	0,121	27,6±5,34
4	1,050±0,004	35,395±1	0,129	37,12±6,66

Na Tabela 5.3, são apresentados os valores teóricos calculados pela proposta de Pereira, 2006, e Chapman, 2005, para densidade de fluxo magnético de acordo com a equação (4.9).

Tabela 5.3 - Cálculo de B [T] para as bobinas de campo segundo Chapman, 2005.

<i>Ensaio</i>	<i>N</i>	<i>I</i> [A]	\mathfrak{R} [A*espira/Wb]	<i>B</i> [T]
1	1500	1,5	23666287	0,090
2		2,5		0,150
3		3,5		0,210
4		4,5		0,260

Na Tabela 5.4 são mostrados os valores teóricos calculados para o torque esperado para o freio em teste, de acordo com a Equação 4.1, considerando a rotação medida nos pontos de torque máximo e a geometria do freio.

Tabela 5.4 - Cálculo do torque esperado para a condição do freio utilizado

<i>Ensaio</i>	<i>Rotação [rad/s]</i>	<i>Fluxo Magnético B [T]</i>	<i>Área entreferro [m]</i>	<i>Raio efetivo [m]</i>	<i>Espessura disco [m]</i>	<i>Torque [Nm]</i>
1	34,133	0,090				0,496
2	32,673	0,150				1,320
3	32,520	0,210	0,00106	0,09	0,0125	2,575
4	35,395	0,260				4,297

Pode-se observar na Tabela 5.5 um comparativo entre os valores de densidade de fluxo magnético e o erro relativo encontrado entre os valores teórico e experimental apresentados nas Tabelas 5.2 e 5.3.

Tabela 5.5 - Valores de B calculados pela configuração das bobinas e pelo torque medido.

<i>Ensaio</i>	<i>B [T] por Chapman</i>	<i>B [T] por torque medido</i>	<i>Erro (Bteórico – Bexperimental) [%]</i>
1	0,090	0,076	15,55
2	0,150	0,120	20,0
3	0,210	0,121	42,38
4	0,260	0,129	50,38

Na Tabela 5.6 é feita a comparação direta entre o resultado obtido para torque frenante via metodologia proposta e testes realizados e o erro encontrado entre os valores teórico e experimental.

Tabela 5.4 - Comparação entre valores teóricos e experimentais

<i>Ensaio</i>	<i>Torque Max. calculado [Nm]</i>	<i>Torque Max. medido [Nm]</i>	<i>Erro (Tteórico – Tmedido) [%]</i>
1	0,496	0,350±0,004	29,43
2	1,320	0,840±0,004	57,14
3	2,575	0,850±0,004	66,99
4	4,300	1,050±0,004	75,58

O valor analítico calculado para a densidade de fluxo magnético B quando o valor da corrente foi abaixo da corrente nominal do fio utilizado, ficou próximo do valor medido nos ensaios na turbina, mas distanciou-se dos valores experimentais à medida que a corrente foi aumentada. Esse fato influenciou diretamente nos valores esperados para o torque frenante no disco, dado o comportamento quadrático da densidade de fluxo magnético em relação ao torque como pode-se verificar na Equação 4.1. Esse comportamento pode ser observado pelo

crescimento do erro entre os valores calculados e medidos na Tabela 5.6., resultados que remetem a um superdimensionamento para o freio, por parte do método utilizado. De acordo com os testes de Smythes em 1942, o comportamento verificado para o torque em função da velocidade angular do disco para as regiões de baixa e alta velocidade é representado pela Figura 5.1. Na figura, é evidenciado que para baixas rotações, o torque tende a crescer com o aumento da rotação, conforme esperado utilizando a Equação 4.1. O pico de torque na figura indica o ponto de velocidade crítica a partir do qual o campo magnético produzido pelas correntes parasitas tende a anular o campo produzido pelo eletroímã, não havendo mais a oposição de esforços e com isso o torque resultante decai à medida que a rotação continua aumentando. Esse resultado foi observado por Smythes em 1942 e por Wouterse em 1991, e também foi observado nos testes realizados no presente trabalho.

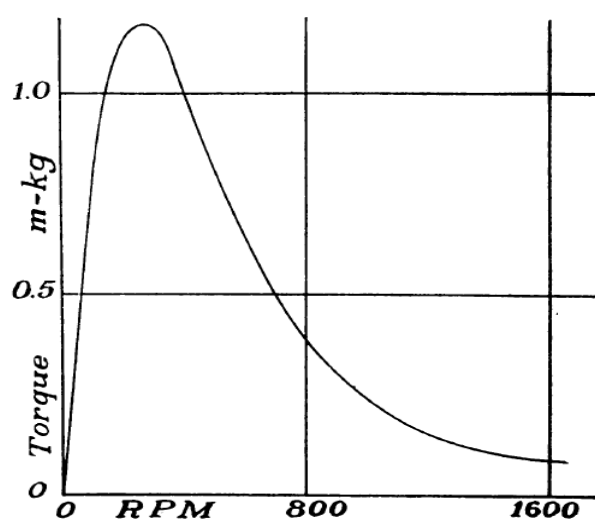


Figura 5.1 - Curva do comportamento torque x rotação para a região de baixa e alta velocidade. (Smythe, 1942)

Os Gráficos 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam o comportamento encontrado nos quatro ensaios realizados na bancada disponível, para condições que também contemplaram as regiões de baixa e alta velocidade afim de se observar o torque produzido.

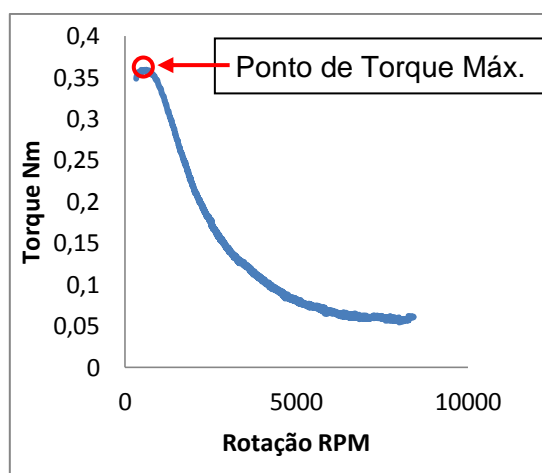


Gráfico 5.1 - Comportamento do torque medido em relação à rotação medida no Ensaio 1.

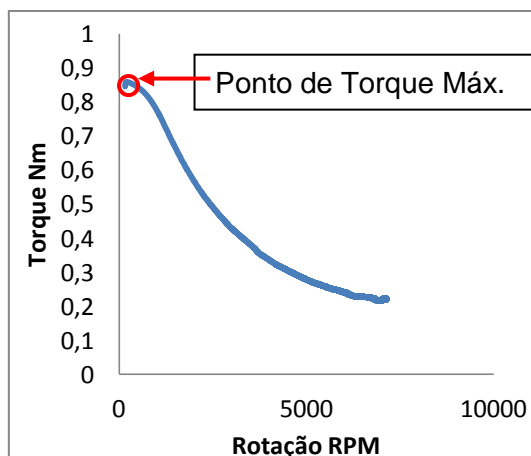


Gráfico 6.2 – Comportamento do torque medido em relação à rotação medida no Ensaio 2.

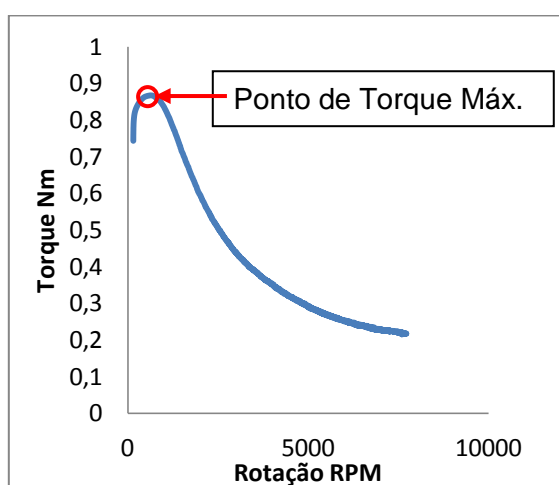


Gráfico 6.3 - Comportamento do torque medido em relação à rotação medida no Ensaio 3.

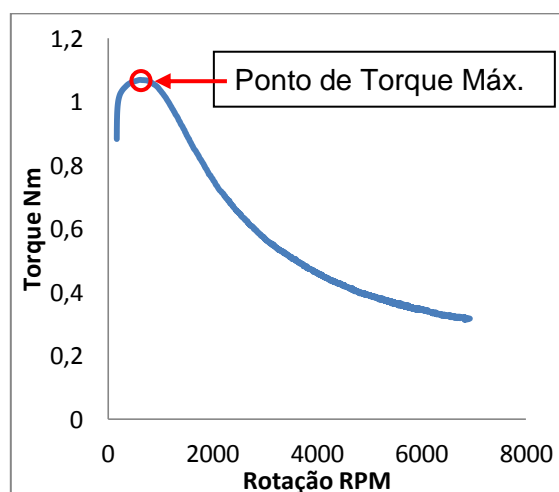


Gráfico 5.4 - Comportamento do torque medido em relação a rotação medida no Ensaio 4.

Percebe-se que o comportamento do torque em relação a velocidade angular do freio, observado nos ensaios concordou com as observações de Smythe e Wouterse, onde para a região de alta velocidade o campo gerado pelas correntes induzidas tendeu a anular o campo gerado pelos eletroímãs, fazendo com que o torque tivesse comportamento inverso à velocidade angular do freio. Assim, a

metodologia utilizada para os ensaios é válida para o estudo do desempenho do freio e seu dimensionamento, mesmo considerando o distanciamento progressivo entre os valores calculados e medidos, a medida que se aumentou a carga imposta ao sistema. Esse fato evidenciou um superdimensionamento do freio por parte do método, o que não inviabiliza sua utilização. A principal fonte de erros nos cálculos está, provavelmente, nas considerações feitas para o dimensionamento dos eletroímãs.

7. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados, é possível perceber que a metodologia proposta e avaliada para cálculo dos esforços do freio, é válida para baixa carga. Para cargas maiores os valores calculados distanciam-se dos valores medidos. Possivelmente ocorre este distanciamento devido às simplificações utilizadas, que desconsideram fatores importantes na análise dos parâmetros magnéticos do freio, como uniformidade de campo magnético produzido e linearidade de distribuição de cargas no núcleo das bobinas. Isso influencia diretamente nas equações propostas, o que age diretamente no resultado esperado para torque frenante na geometria de freio utilizada. O maior obstáculo para a correta utilização da metodologia proposta é o cálculo da densidade de fluxo magnético, que tem influência quadrática nos resultados. Ainda assim, a metodologia pode ser usada para o dimensionamento primário dos componentes do freio, apesar de superdimensioná-lo.

Observa-se, também, que os resultados observados para o comportamento do torque nos regimes de baixa e alta velocidade concordam com a literatura, onde claramente o comportamento previsto pelas equações não é respeitado.

Como sugestões para trabalhos futuros se pode citar:

- Estudo do comportamento do freio de Foucault com carga não variável;
- Análise da potência dissipada no disco e nos indutores;
- Análise matemática sobre o comportamento do torque no freio em altas velocidades;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, T. Q. et al 2012; “**Freios Eletromagnéticos**” ; Atividade avaliativa discente para a disciplina de Elementos de Máquina 2, Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Recife.

Balte, A. S. et al., 2015; “**Design and fabrication of electromagnetic dynamometer for micro-power measurement.**”; International Journal Of Engineering Sciences & Research Technology.

Chapman, J. S., 2005; “**Electric Machinery Fundamentals**”; 4ª Edição, Editora Mc Graw-Hill, New York, NY.

Chetvorno, 2015; “**A diagram showing how a disk-type eddy current brake works.**” Wikipedia Commons. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Eddy_current_brake_diagram.svg; Acessado em 23/06/2015.

Dietrich, Álvaro B., 2000; **“Um estudo de correntes induzidas em meios maciçosferromagnéticos – Aplicação no projeto de freios de correntes parasitas.”** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Haddad, Jamil et al., 2001; **“Conservação de Energia: Eficiência energética de instalações elétricas e equipamentos”**. 2.ed. Editora da Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI).

Halliday, Robert David, et al, 1996; **Fundamentos da física** LTC volume 1, 4 edição.

Kich, F. M., 2011; **“Bancada Dinamometrica Para a Medição de Rendimentos de Sistemas de Transmissão Mecânica”**, Monografia (Trabalho de Conclusão) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Maidana, C. F., 2015-a; “Desenvolvimento de turbinas de múltiplos discos: Estudo de modelos e análise experimental.”; Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Porto Alegre, RS, Brasil.

Maidana, C. F., 2015-b – Comunicação pessoal.

Ming, Q., 1997; **“Sliding Mode Controller Design for ABS System”**, Dissertation (Master of Science) - Electrical and Computer Engineering; Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg. Disponível em <http://scholar.lib.vt.edu/index.html>. Acessado em 11/05/2015.

Pereira, A. H., 2006; **“Freio Eletromagnético Para Ensaios de Motores Elétricos de Indução”**, Dissertação (Programa de Pós-Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Pigott, W. T.; Walston, S; Mayhall, D, 2006; **“Preliminary Investigations of Eddy Current Effects on a Spinning Disk”**; Work sponsored by U.S. Department of Energy, University of California, Lawrence Livermore National Laboratory.

Ren He et al., 2013; **“Brake Performance Analysis of ABS for Eddy Current and Electrohydraulic Hybrid Brake System”**; School of Automotive & Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, China;

Shigley, J.E; Mishke, C.R., 2005; **“Projeto de Engenharia Mecânica”**, Bookman, 7ª edição.

Smythe, W.R. , 1942; **“On eddy currents in a rotating disk”**, *Trans. AIEE*.

Wouterse, J. H. , 1991; **“Critical torque and speed of eddy current brake with widely separated soft iron poles”**. Electric Power Applications, IEE Proceedings B; vol. 138, no. 4, pp.153-158.

Zhi-ding Ying et. al., 2010; **“Analysis of simulation design of the disc eddy current braking device”**; 2010 International Conference on Computer,

Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE); Institute of Railway & Urban Rail Transit - Tongji University; Shanghai, China.

Batista, J. C., 2009 “**Micro-geração de Energia Elétrica (Abaixo de 100 kW) Utilizando Turbina Tesla Modificada**”. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá , 2009.

Bonzanini, M. V., 2012; “ **Modelamento de uma Turbina Tesla com avaliação da sensibilidade dos principais parâmetros de funcionamento.**”. Monografia (Trabalho de Conclusão) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

APÊNDICE A

Resultados das medições realizadas, nas três configurações de ensaio.

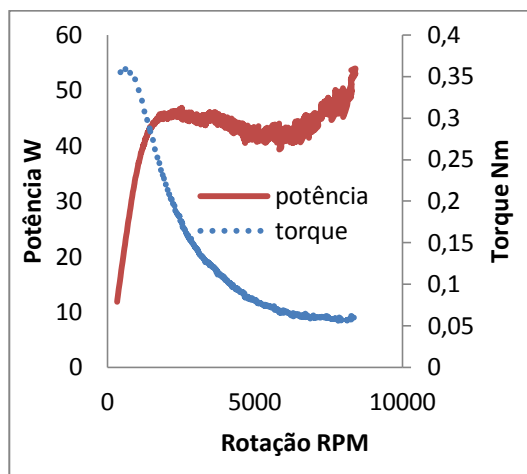


Gráfico A.1 - Comportamento de torque e potência pela rotação no Ensaio 1 com carga de 1,5 A.

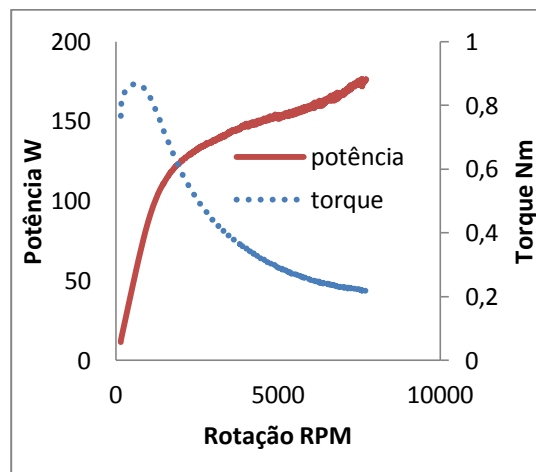


Gráfico A.3 - Comportamento de torque e potência pela rotação no Ensaio 3 com carga de 3,5 A.

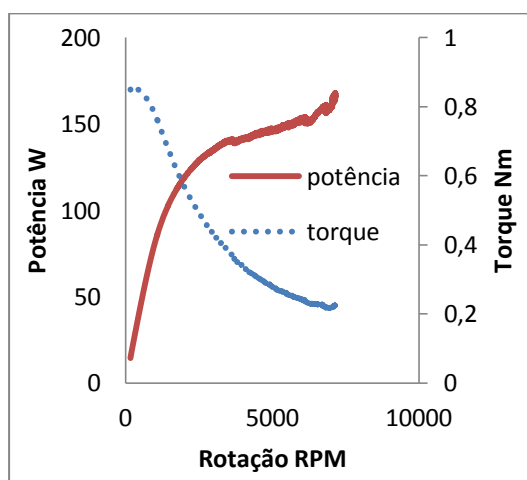


Gráfico A.2 - Comportamento de torque e potência pela rotação no Ensaio 2 com carga de 2,5 A.

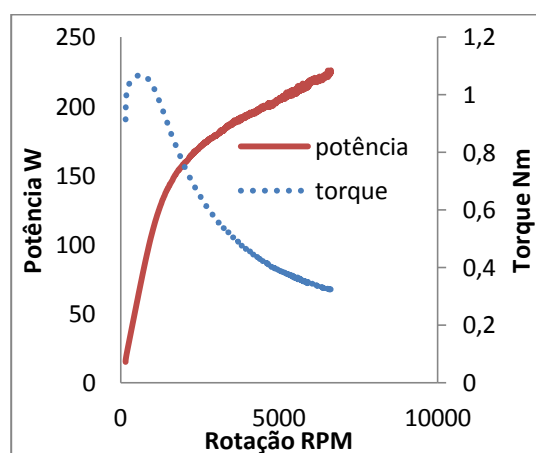


Gráfico A.4 - Comportamento de torque e potência pela rotação no Ensaio 4 com carga de 4,5 A.

APÊNDICE B

B.1. Cálculos de incertezas de medição

O procedimento para medir a incerteza de medição é chamado de Propagação da Incerteza de Medição, dado por:

$$U_r = \left(\left(\frac{\partial V}{\partial x_1} u_1 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial V}{\partial x_n} u_n \right)^2 \right)^{1/2}$$

Sendo x_1 até x_n as variáveis dependentes, u_1 até u_n os desvios padrão das variáveis dependentes e V a equação para chegar ao dado esperado. (Schneider, 2007)

B.2. Incerteza de medição do torque de reação

$$T = F \cdot b$$

$$\Delta T = \left(\left(\frac{\partial T}{\partial F} \Delta F \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial b} \Delta b \right)^2 \right)^{1/2} = ((b\Delta F)^2 + (F\Delta b)^2)^{1/2}$$

$$\Delta F = \pm 0,02 \text{ N} \quad \Delta b = \pm 0,00002 \text{ m}$$

B.3. Incerteza de medição da potência mecânica

$$P = T \cdot \omega$$

$$\Delta P = \left(\left(\frac{\partial P}{\partial T} \Delta T \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial \omega} \Delta \omega \right)^2 \right)^{1/2} = ((\omega\Delta T)^2 + (T\Delta\omega)^2)^{1/2}$$

$$\Delta T = \pm 0,004 \text{ Nm} \quad \Delta \omega = \pm 1 \text{ volta} = \pm 2\pi \text{ rad}$$

B.4. Incerteza de medição da potência elétrica

$$P = V \cdot I$$

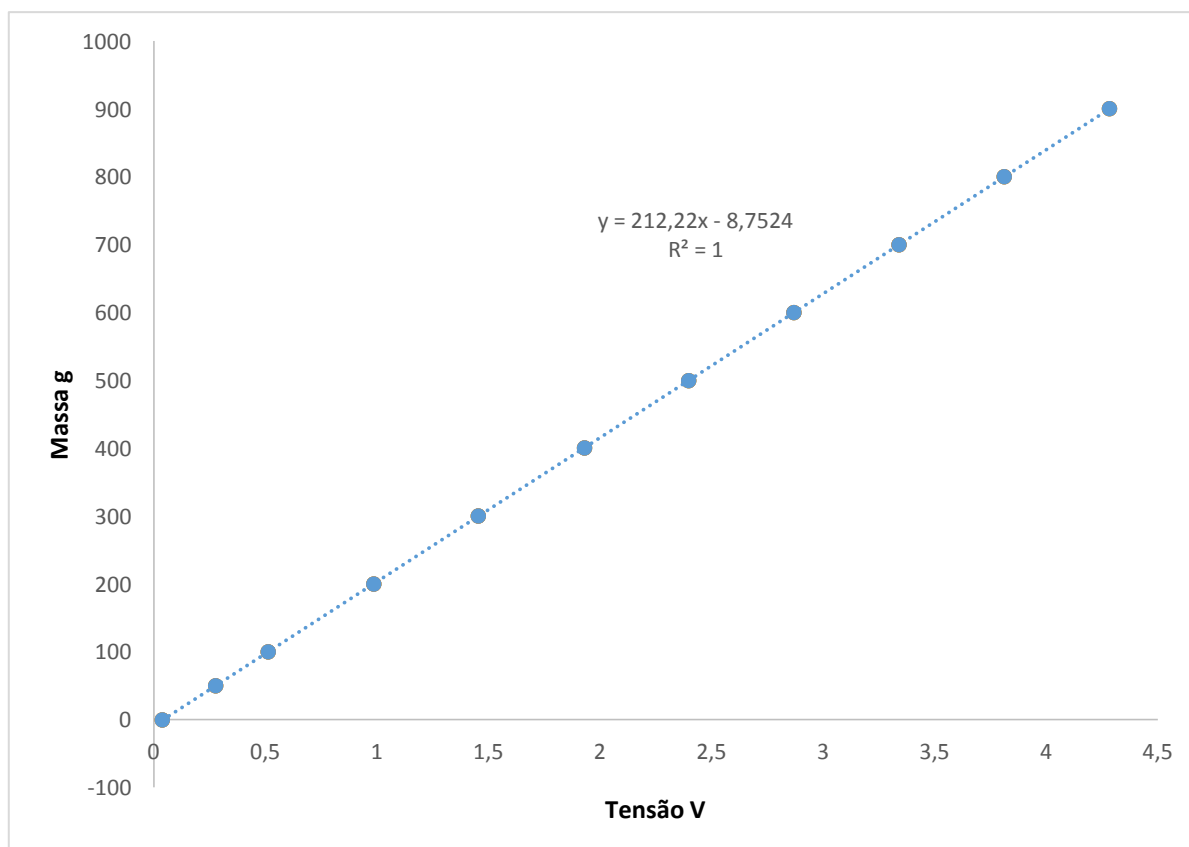
$$\Delta P = \left(\left(\frac{\partial P}{\partial V} \Delta V \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I} \Delta I \right)^2 \right)^{1/2} = ((I\Delta V)^2 + (V\Delta I)^2)^{1/2}$$

$$\Delta V = \pm 0,01 \text{ V} \quad \Delta I = \pm 0,1 \text{ A}$$

ANEXO 1

Calibração da célula de carga (Maidana, 2015-b):

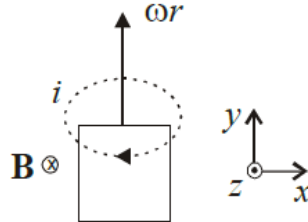
Tensão (mV)	Tensão (V)	Massa (g)
39,0589	0,0390589	0
278,269	0,278269	50,32
513,966	0,513966	100,32
987,132	0,987132	200,26
1455,93	1,45593	300,55
1932,06	1,93206	400,87
2398,88	2,39888	500,08
2870,53	2,87053	600,4
3341,8	3,3418	700,34
3813,58	3,81358	800,66
4285,37	4,28537	900,95



ANEXO 2

Resolução para a Equação 4.1.

Considerando a área a^2 com coordenadas de acordo com a figura abaixo, e o fenômenos magnéticos como ilustrados abaixo.



Inicialmente, considera-se que há uma corrente " i_0 " passando pela área indicada, que não depende do campo magnético, mas sim apenas do movimento de rotação do disco. Essa corrente pode ser aproximada considerando-se a velocidade de deriva das cargas que passam na área a^2 , dada pela equação a seguir:

$$v_d = \frac{j}{ne}$$

A velocidade de deriva neste caso, será a própria rotação do disco. Assim sendo:

$$\omega r = \frac{\left(\frac{i_0}{at}\right)}{ne} = \frac{i_0}{neat}$$

$$i_0 = \omega r neat$$

A partir da corrente original, pode-se calcular a tensão induzida na área a^2 , a qual corre devido ao Efeito Hall, segundo Halliday et. al.. Tendo-se a tensão induzida e a resistência elétrica do disco na área sob o campo B, tem-se a corrente induzida de Foucault " i ":

$$\begin{aligned} V_H &= \frac{i_0 B}{net} \\ V_H &= \frac{(\omega r neat) B}{net} & \longrightarrow & R = \rho \frac{L}{A} = \frac{1}{\sigma} \frac{a}{at} = \frac{1}{\sigma t} & \longrightarrow & i = \frac{V_H}{R} \\ V_H &= \omega ra B & & & & i = \frac{(\omega ra B)}{\left(\frac{1}{\sigma t}\right)} = \omega ra B \sigma t \end{aligned}$$

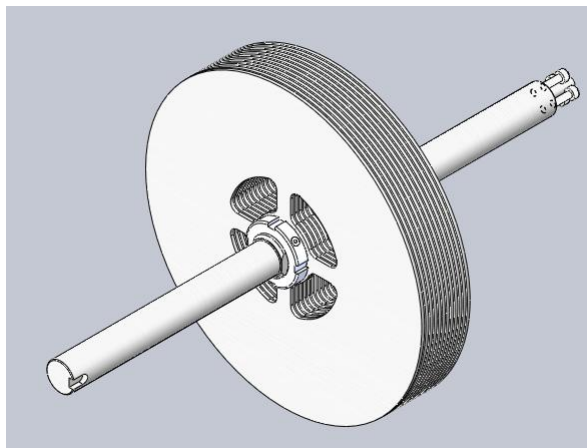
Com isso, é possível agora se encontrar uma expressão para a força frenante e torque frenante no disco na região de a^2 , a partir da força de Lorentz:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_y &= i \mathbf{l} \times \mathbf{B} \\ \mathbf{F}_y &= (\omega ra B \sigma t) a \mathbf{i} \times (-B \mathbf{k}) & \longrightarrow & \boldsymbol{\tau} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}_y \\ \mathbf{F}_y &= -\omega ra^2 B^2 \sigma t \mathbf{j} & & \boldsymbol{\tau} = r \mathbf{i} \times (-\omega ra^2 B^2 \sigma t \mathbf{j}) \\ & & & \boldsymbol{\tau} = -\omega \sigma t r^2 a^2 B^2 \mathbf{k} \end{aligned}$$

ANEXO 3

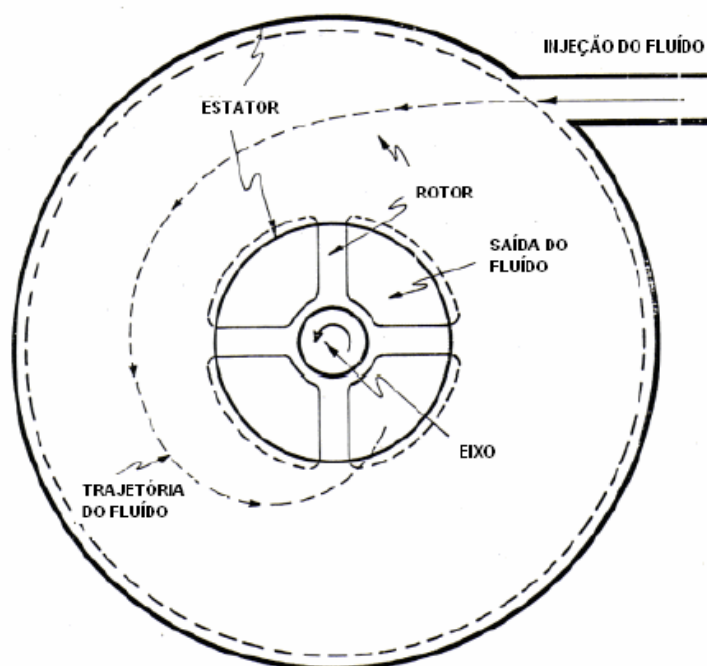
Introdução à Turbina Tesla.

É uma turbina de fluxo sem lâminas, centrípeta, patenteada por Nikola Tesla em 1913. É referida como uma turbina sem lâminas devido ao fato de usar o efeito de camada limite para revolucionar o seu rotor e não um fluido que colide com as lâminas como em uma turbina convencional. Ela consiste de finos discos dispostos muito próximos uns aos outros, sendo separados por espaçadores, montados em um eixo (Bonzanini, 2012).



Rotor da Turbina Tesla utilizada no trabalho, em software CAD Solidworks.

Os discos giram com a injeção tangencial de ar ou gás por um bocal. O fluido passa por entre os discos e sai pelas aberturas situadas próximas ao eixo, fazendo-o girar. (Batista, 2009)



Esquema de funcionamento de uma Turbina Tesla. (Bonzanini, 2012)