

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

ELABORAÇÃO DE BANCADA PARA CARACTERIZAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS COM
ATÉ 200 W

por

Arthur Mateus Pilz

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, Junho de 2015.

ELABORAÇÃO DE BANCADA PARA CARACTERIZAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS COM
ATÉ 200 W
por

Arthur Mateus Pilz

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADAEM 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: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Rafael Antonio C. Laranja

Comissão de Avaliação:

Prof. Fabiano Disconzi Wildner

Prof. Patric Daniel Neis

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho

Porto Alegre, 11 de Junho de 2015.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Rafael A. C. Laranja, por toda a atenção e bom humor durante todas as etapas deste trabalho,

Ao Felipe Kich, pelo apoio e troca de idéias.

Ao Laboratório de Mecânica Aplicada e Experimental, pela disponibilização de material e espaço para realização dos testes.

PILZ, A. M., **Elaboração de bancada para caracterização de motores elétricos com até 200 W**. 2015. 26 p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

Este trabalho propõe a construção de uma bancada capaz de estimar a curva da potência de frenagem de motores com até 200 W. Valendo-se do conceito do freio de Foucault, foi montado um conjunto freio eletromagnético - balança, capaz de variar a solitação de torque imposta ao motor, permitindo a leitura da força de frenagem, e velocidade angular, possibilitando desta forma o cálculo da potência de frenagem do sistema, verificando seu comportamento com relação à potência de entrada do motor para validação conceitual do projeto. Resultados dos testes executados mostraram a funcionalidade da bancada, quando comparados com dados de um motor comercial.

PALAVRAS-CHAVE: Potência, caracterização de motores, bancada de testes.

PILZ, A. M., "**Construction of a Test Bench to Characterize Motors With up to 200 W**". 2015. 26 p. 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 work proposes the construction of a test bench, able to estimate the braking power curve of motors with up to 200 W. The test bench is composed by a brake which allowed to vary the torque imposed on the motor, designed based on the Foucault brake concept, and, by measuring the motor's brake force and angular velocity, allowed the calculation of the system's braking power, which was afterwards compared to the motor's input power, in order to validate the system's conceptual design. Tests results showed the functionality of the bench when compared to a commercial motor's data.

KEYWORDS: Power, motor's characterization, test bench.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	1
2.1 Objetivo geral.....	1
2.2 Objetivos específicos	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1 Cálculo da Potência mecânica de motores	2
3.2 Testes de freio	2
3.2.1 Freio de Prony.....	2
3.2.2 Freio Foucault.....	3
4. METODOLOGIA.....	4
4.1 Estrutura da bancada.....	4
4.2 Simplificações adotadas.....	6
4.3 Princípio de funcionamento da bancada	6
4.4 Parâmetros de testes	8
5 PROPAGAÇÃO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO.....	8
5.1 Incerteza na medição da força de reação do imã.....	9
5.2 Incerteza de medição do braço de alavanca "L".....	9
5.3 Incerteza de medição da velocidade angular.....	9
5.4 Incerteza de medição de torque e potência	9
5.5 Incerteza de medição da potência elétrica de entrada do motor.....	9
5.6 Incerteza de medição da eficiência do sistema.....	10
6 TESTES E RESULTADOS.....	10
6.1 Observações gerais.....	10
6.2 Ensaio motor E.....	10
6.3 Ensaio motor C.....	11
6.3 Comparação com motor comercial.....	11
6.4 Testes comparativos entre freios,.....	12
7. CONCLUSÕES.....	13
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14
Apêndice I.....	16
Apêndice II.....	20

1. INTRODUÇÃO

O motor de indução trifásico é uma máquina que vem sendo alvo de constantes melhorias desde sua invenção, no final do século XIX [Santos, 2007]. Mesmo apresentando elevados níveis de rendimento numa larga faixa de atuação, apresentam grande potencial de economia de energia, devido principalmente ao fato de serem responsáveis pelo consumo de aproximadamente 25% de toda energia elétrica gerada no Brasil [Bortoni, 2006], representando mais de 60% do consumo energético industrial, conforme o Balanço Energético Nacional de 2009, ilustrado no gráfico da Figura 1.1.

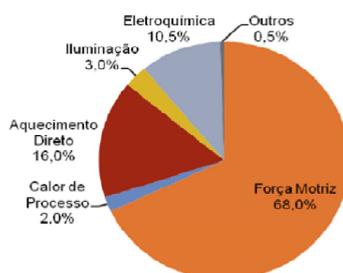


Figura 1.1, Consumo energético industrial por processo, fonte: Balanço Energético Nacional de 2009.

Aliado a isto encontra-se a má aplicação de um grande percentual das unidades instaladas, quer devido a uma manutenção e instalação inadequadas (problema de acoplamento, correias inadequadas/desalinhadas [Kich, 2011]), ou devido ao seu mau dimensionamento para a solicitação de carga a que está submetido. Segundo a Weg, 2012, aproximadamente 40% dos motores operam abaixo de 50% da sua capacidade nominal, resultando em uma aplicação ineficiente [Hurst, 2007].

Tal inadequação muitas vezes decorre da falta de conhecimento da real/efetiva curva de potência dos motores, resultando em aplicações práticas consideradas inaceitáveis sob a ótica da sustentabilidade.

Este trabalho, sobre caracterização de motores elétricos, visa dar continuidade a uma das linhas de pesquisa existentes no Laboratório de Mecânica Aplicada e Experimental (LAMAE), contribuindo com trabalhos já efetuados como o de Wetzell, 2013. Assim, com a necessidade de se caracterizar os motores elétricos com potência menor que 200 W, a começar pelos existentes no LAMAE, cuja potência efetiva e torque hoje são desconhecidos, foi elaborado o presente estudo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo o projeto e construção de uma bancada para testes da potência de frenagem de motores de baixa potência (até 200 W).

2.2 Objetivos específicos

- Os objetivos específicos necessários para atingir o objetivo geral deste trabalho são:
- Construção de bancada para medições, que permita a troca do motor ensaiado;
- Testar a bancada medindo a potência de frenagem de motores elétricos;
- Comparar os resultados obtidos com a literatura existente;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir são apresentados os principais conceitos relacionados ao trabalho.

3.1 Cálculo da potência mecânica de motores

A potência mecânica fornecida por um motor pode ser obtida através da especificação do fabricante para as condições de operação do mesmo. Porém, devido às variações nas condições de operação do motor, bem como a mudança de suas características durante sua vida útil, seu comportamento pode variar, devido ao aumento de suas perdas internas, conforme representado na Figura 3.1 [Moraes, 2012]:

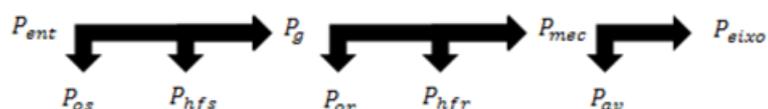


Figura 3.1 - Fluxo de potência de motores de indução, fonte: Moraes, 2012.

Na Figura 3.1 P_{ent} é a potência de entrada no motor, P_{os} representa as perdas ôhmicas no estator, P_{hfs} as perdas no núcleo de ferro por histerese e Foucault, P_g é a potência transmitida ao rotor, P_{or} representa as perdas ôhmicas rotóricas, P_{hfr} as perdas por histerese e Foucault no rotor, P_{mec} é a potência mecânica, P_{av} representa as perdas mecânicas por atrito e ventilação e P_{eixo} é a potência entregue a carga no eixo.

3.2 Testes de freio

A potência desenvolvida por um motor é medida por meio de um freio, o qual sempre compreende duas partes essenciais, uma móvel acionada pelo motor e uma parte fixa, com um dispositivo de frenagem que atua diretamente sobre a parte móvel [Rahde, 2014].

3.2.1 Freio de Prony

O freio de Prony, ou ensaio em balança, consiste em um freio por fricção, conforme demonstrado na Figura 3.2 [Webster, 1999] onde um volante acionado pelo motor tem seu movimento restringido pela pressão aplicada pelos ajustes aos blocos de fricção, que transmitem o esforço ao braço apoiado sobre a balança. A regulagem dos ajustes permite a variação da força de atrito sobre o volante, resultando em diferentes medidas na balança.

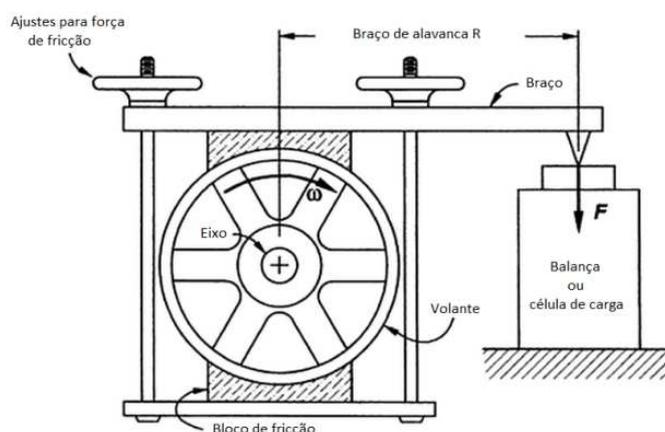


Figura 3.2 - Representação de um freio de Prony, adaptada de [Webster, 1999].

Através da leitura da força exercida na balança, para uma distância do eixo do motor, pode-se efetuar o cálculo do torque, e, ao se medir a velocidade de rotação do motor (ω) através de instrumentação adequada, de sua potência de frenagem, conforme equações 3.1 e 3.2 a seguir [Shigley, 1984]:

$$P_f = \tau \cdot \omega \quad (3.1)$$

$$\tau = F \times R \quad (3.2)$$

onde P_f é a potência de frenagem, (em W), τ é o torque (em N m) e ω é a rotação do motor (em Rad/s), F é a força medida na balança (em N), e R é a distância entre o centro do eixo e o ponto de contato com a balança (em m).

O freio de Prony apresenta diversos inconvenientes operacionais, dentre eles o fato de manter uma carga constante independente da rotação empregada, possuir uma regulagem delicada e ser utilizado apenas para testes de baixa potência [Rahde, 2014]

3.2.2 Freio Foucault

Um freio de Foucault, também conhecido como freio eletromagnético, tem seu princípio de funcionamento baseado na lei de Faraday, que relaciona a variação de um campo magnético à produção de uma diferença de potencial elétrico, conforme equacionado [Griffiths, 1999](equação 3.3):

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.3)$$

Onde \vec{E} é a intensidade de campo elétrico, \vec{B} é a densidade de fluxo magnético.

Neste freio, o motor testado é acoplado a um rotor composto de um material condutor elétrico, o qual é parcialmente submetido a um campo magnético fornecido por um eletroímã ou por um ímã permanente. Ao se acionar o motor, sua rotação gera uma diferença de potencial elétrico no interior do rotor, ocasionando o surgimento de correntes de Foucault, ou correntes parasitas [Fink, 1975]. Devido à resistividade do condutor, estas correntes geram uma restrição ao movimento do rotor, conforme ilustrado na Figura 3.3 [Souza e Mansanares, 2005], dada a dissipação de potência devido as perdas por efeito Joule [Laranja, 2009].

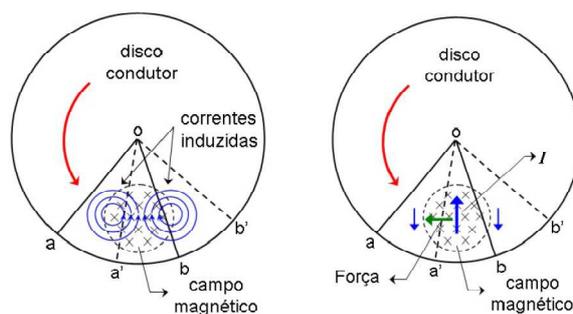


Figura 3.3 - Esquema simplificado ilustrando o surgimento de uma força contrária ao movimento do disco devido à presença de correntes de Foucault [Souza e Mansanares, 2005].

A magnitude da força de frenagem pode, então, ser variada através da variação da intensidade do campo magnético, quer pela aproximação do ímã (caso do ímã permanente) ou pelo aumento da corrente de alimentação da bobina, no caso do eletroímã, podendo seu valor ser obtido através da análise da força de reação no ímã ou na carcaça do motor a ser avaliado.

4. METODOLOGIA

4.1 Estrutura da bancada

A fim de testar os motores foi elaborado um freio de Foucault, dadas as vantagens inerentes a ele, tais como não ser necessário um contato direto com o sistema motor-rotor-bancada. Para verificar as medições do freio de Foucault foi também construído um freio mecânico, posteriormente testado em condições similares ao freio eletromagnético, sendo utilizado um rotor composto de alumínio com 200 mm de diâmetro. Devido a seu baixo custo e densidade quando comparado a rotores similares em aço ou cobre e ao fato de ser um condutor elétrico não ferromagnético, minimizando interações não desejadas com o imã testado que poderiam vir a alterar os resultados das medições.

Durante a construção do freio de Foucault, foram testadas duas configurações para geração de fluxo magnético, uma com um imã eletromagnético, composto pelo núcleo de um motor de máquina de lavar e uma bobina de fio de cobre, e outra com um imã permanente de neodímio, proveniente de um disco rígido. Após testes preliminares, foi feita a opção pelo imã permanente, dada sua facilidade de operação e o fato de não necessitar de uma fonte de corrente própria para operação.

Para o posicionamento do imã foi construído um suporte específico, composto por uma base retangular colada em um tubo, ambos em alumínio (escolha devido à disponibilidade do material), sendo o tubo perfurado em sua parte superior, conforme mostrado na Figura 4.1, onde foi colada uma porca para permitir a fixação e ajuste do imã, através de um parafuso, o qual por sua vez se encaixa no imã através de uma porca, colada sobre o centróide do imã. Com a utilização de um sistema similar para o freio mecânico, onde o imã foi substituído por um elemento de fricção de borracha quadrado. Durante os testes, o suporte foi posicionado sobre uma balança digital SF-400, na configuração mostrada na Figura 4.2, permitindo a leitura da força de reação da frenagem sobre o imã e sobre o elemento de fricção, além de servir como um filtro mecânico, minimizando o efeito das vibrações do sistema sobre a força lida.

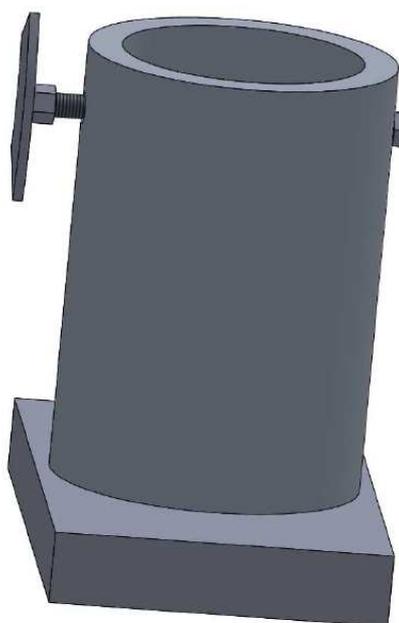


Figura 4.1 - Suporte para o imã.



Figura 4.2 - Posicionamento do freio magnético sobre a balança.

Para a fixação dos motores foi adaptada uma bancada disponível no LAMAE, que apresentava a opção de ajuste para o tamanho e posição dos motores a serem acoplados, através de um sistema com chapas de aço (a), barras roscadas e porcas, como pode ser visto na Figura 4.3, bem como espaço para instalação de suportes e posicionamento do suporte do ímã. Foi elaborado um sistema para mancalizar o rotor, utilizando dois suportes de aço (b) acoplados a rolamentos e uma barra roscada (c), na qual foi fixado o rotor (d), utilizando duas porcas e duas arruelas. A transmissão do torque do motor para a barra roscada (c) ocorre através de um acoplamento flexível.

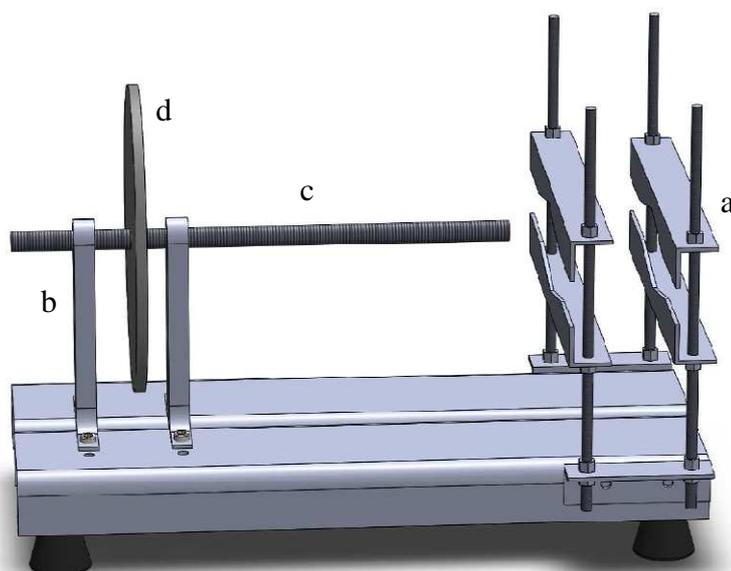


Figura 4.3 - Modelo da bancada, acoplada ao rotor e mancais.

Para o acionamento dos motores foi utilizada uma fonte marca Politerm, modelo Pol-16E, sendo sua tensão elétrica e corrente de alimentação medidas através de dois multímetros digitais modelo DT9205A, marca LEEPRO. A velocidade de rotação do motor foi medida com o uso de um tacômetro digital modelo MDT 2238-A, marca Minipa e todas as cotas pertinentes foram medidas utilizando um paquímetro digital, marca Caliper.

4.2 Simplificações adotadas

Uma simplificação adotada nos cálculos foi que as forças no imã foram consideradas como cargas pontuais, aplicadas em seu centróide, conforme ilustrado na Figura 4.4 [Hirata, 2004].

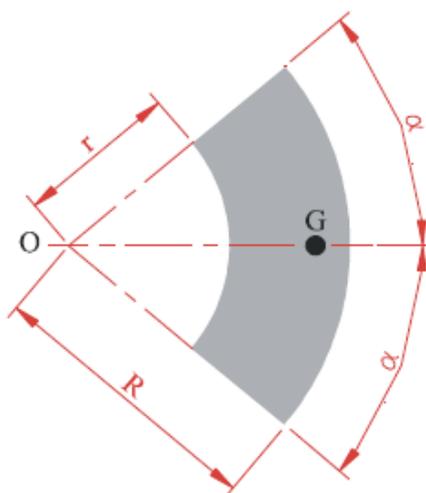


Figura 4.4 - Esquema para cálculo do centróide de arco de coroa.

Com base na equação para cálculo do centróide de arco de coroa e das cotas demonstradas acima, calcula-se:

$$\overline{OG} = \frac{2}{3} \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \frac{\sin \alpha}{\alpha} \quad (4.1)$$

Cujas variáveis da equação 4.1 são identificadas na Figura 4.4.

Para o imã utilizado, $R = 40 \text{ mm}$, $r = 23,5 \text{ mm}$, $\alpha = 30^\circ$, obtendo-se $\overline{OG} = 31 \text{ mm}$.

4.3 Princípio de funcionamento da bancada

Para a realização dos testes com o freio eletromagnético, o motor foi acoplado ao rotor e acionado sem a influência do freio, até o momento em que sua velocidade de rotação, medida com o tacômetro, se estabilizasse, após o que foi posicionado o sistema suporte-imã sobre a balança, conforme ilustrado na Figura 4.5, aproximando o imã gradualmente através do ajuste do parafuso-guia (a), e aguardando novamente a estabilização do sistema para a coleta dos dados, a fim de minimizar a influência do momento inercial do sistema eixo-rotor sobre os resultados, sendo medidos a velocidade de rotação do motor (ω), a força registrada na balança (F), a distância entre o centróide do imã, considerado o ponto de aplicação da força e a linha de centro do eixo do rotor (L), a tensão elétrica de alimentação do motor (V) e a corrente elétrica de alimentação do motor (I).

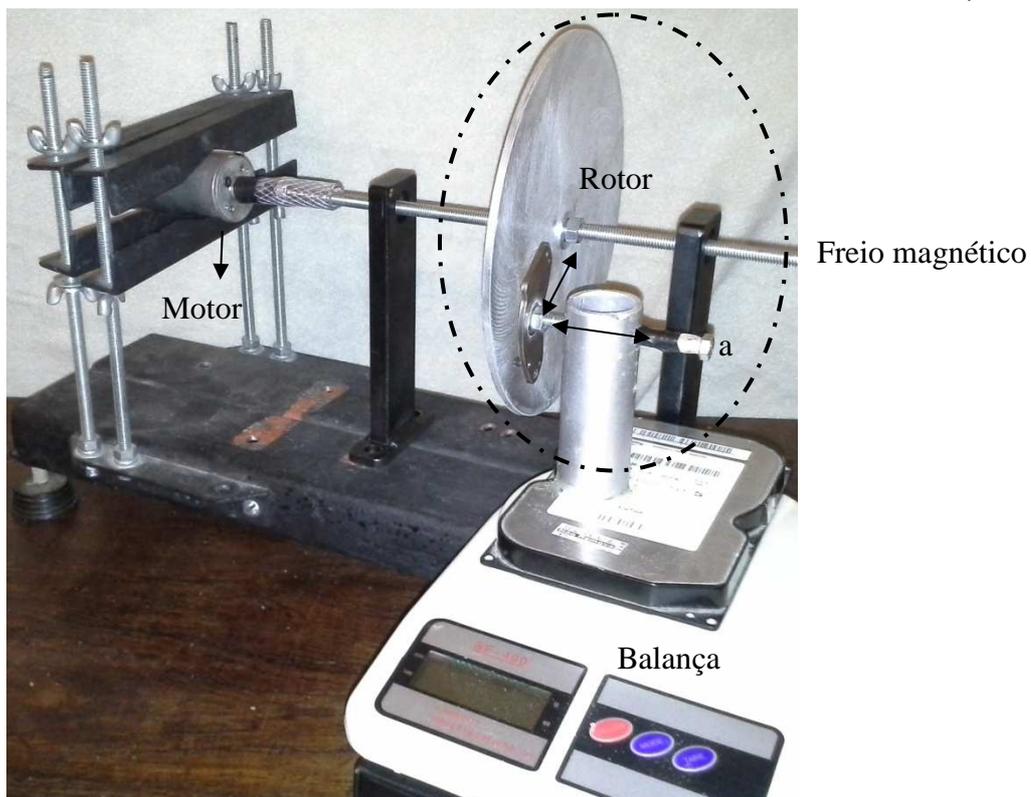


Figura 4.5 - Bancada de testes, demonstrando posicionamento do freio eletromagnético durante a coleta de dados e possíveis ajustes de posicionamento.

Com base nos dados coletados, foi possível o cálculo da potência de frenagem (P_f), utilizando as equações 3.2 e 3.3, foi obtida a equação 4.2:

$$P_f = F \times L \times \omega \quad (4.2)$$

Onde P_f é a potência de frenagem, em W, F é a força medida na balança, em N, L é a distância de aplicação da força a linha do eixo, em m, ω é a velocidade de rotação, em rad/s.

Assim como da potência elétrica de entrada do motor, fornecida pela equação 4.3 [Fitzgerald, 2009]:

$$P_{el} = V \cdot I \quad (4.3)$$

onde P_{el} é a potência elétrica, em W, V é a tensão elétrica, em V e I é a corrente elétrica, em A.

E da eficiência do sistema motor-rotor, fornecida pela equação 4.4:

$$E_f = \frac{P_f}{P_{el}} \quad (4.4)$$

Onde E_f representa a eficiência do sistema motor-rotor, um parâmetro adimensional.

Com o intuito de verificar a eficácia do freio magnético foram realizados testes com um freio mecânico, em condições de teste similares, diferindo apenas no posicionamento do freio, conforme demonstrado na Figura 4.6, se dando o contato deste freio na lateral do rotor, devido à dificuldade do alinhamento da borracha com a superfície frontal do rotor, o que gerava

vibrações no sistema que afetavam os valores de força medidos na balança e a frenagem do motor.

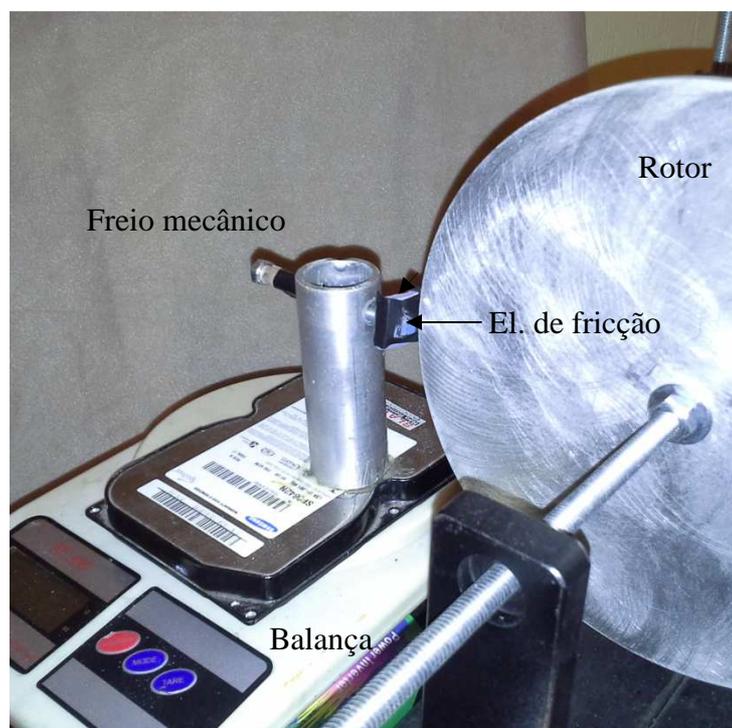


Figura 4.6 - Posicionamento do freio mecânico para os testes

4.4 Parâmetros de testes

Para a execução dos testes foi arbitrada uma tensão elétrica de alimentação fixa, permitindo a variação da corrente elétrica conforme o aumento da solicitação de carga do motor. A tensão utilizada variou conforme o especificado pelo fabricante dos motores, sendo arbitrados valores de tensão para os motores desconhecidos, coerentes com sua utilização anterior.

Devido à dificuldade de repetição de duas medidas em condições iguais, foram executados testes em regimes de torque e rotação similares, tendo como critérios a estabilidade do sistema e dos dados coletados e uma variação proporcional da potência de frenagem, avaliando-se principalmente o aumento da força de reação na balança com relação a distância do freio.

Como critérios de parada dos testes, foram adotados a parada do motor, a impossibilidade de aproximação do freio, falhas no sistema de acoplamento ou fixação do rotor, o surgimento de vibrações que interferissem com as medições do sistema ou um tempo acima do normal para que os valores analisados se estabilizassem.

5. PROPAGAÇÃO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

Estando definidos os valores das incertezas, pode-se aplicar a equação geral de propagação de incertezas [Taylor, 1997]:

$$\Delta q = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x_1} \times \Delta x_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial x_n} \times \Delta x_n\right)^2} \quad (5.1)$$

Onde Δq é a incerteza, sendo função das variáveis independentes x_1, \dots, x_n .

5.1 Incerteza na medição da força de reação do imã

A incerteza da força de reação no imã é a incerteza da balança SF-400, conforme o fabricante, $\pm 2gF$.

5.2 Incerteza de medição do braço de alavanca "L"

A distância entre o centróide do imã e o eixo do motor foi medida com o uso do paquímetro digital marca Caliper, sendo de $\pm 0,03$ mm para a faixa medida.

5.3 Incerteza de medição da velocidade angular

A incerteza de medição da velocidade angular é a fornecida pelo fabricante do tacômetro modelo MDT 2238-A, marca Minipa, de ± 10 RPM para todas as faixas medidas.

5.4 Incerteza de medição de torque e potência

Aplicando-se a equação geral de propagação de incertezas de Taylor à equação 4.2, obtém-se:

$$\Delta P_f = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial P_f}{\partial L} \times \Delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial P_f}{\partial F} \times \Delta F\right)^2 + \left(\frac{\partial P_f}{\partial \omega} \times \Delta \omega\right)^2} \quad (5.2)$$

$$\Delta P_f = \pm \sqrt{(F \times \omega \times \Delta L)^2 + (\omega \times L \times \Delta F)^2 + (F \times L \times \Delta \omega)^2} \quad (5.3)$$

Onde P_f é a potência de frenagem, em W, F é a força medida na balança, em N, L é a distância de aplicação da força a linha do eixo, em m, ω é a velocidade de rotação, em rad/s, ΔP_f é a incerteza da potência de frenagem, em W, ΔF é a incerteza da força medida na balança, em N, ΔL é a incerteza da distância de aplicação da força a linha do eixo, em m e $\Delta \omega$ é a incerteza da velocidade de rotação, em rad/s.

5.5 Incerteza de medição da potência elétrica de entrada do motor

Conforme o fabricante dos multímetros marca LEEPRO, modelo DT9205A utilizados, as incertezas de medição para as faixas de corrente e tensão elétrica medidas são, $\pm 1,2\% + 1 \times (0,01)$ A e $\pm 0,8\% + 3 \times (0,01)$ V, respectivamente.

Aplicando-se a equação geral de propagação de incertezas de Taylor à equação 4.3, obtém-se:

$$\Delta P_{el} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial P_{el}}{\partial V} \times \Delta V\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{el}}{\partial I} \times \Delta I\right)^2} \quad (5.4)$$

$$\Delta P_{el} = \pm \sqrt{(I \times \Delta V)^2 + (V \times \Delta I)^2} \quad (5.5)$$

Onde P_{el} é a potência elétrica em W, ΔP_{el} é a incerteza da potência elétrica, em W, V é a tensão elétrica em V, ΔV é a incerteza da tensão elétrica em V, e I é a corrente elétrica em A e ΔI é a incerteza da corrente elétrica em A.

5.6 Incerteza de medição da eficiência do sistema

Aplicando-se a equação geral de propagação de incertezas de Taylor à equação 4.4, obtém-se:

$$\Delta E_f = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial E_f}{\partial P_{el}} \times \Delta P_{el}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_f}{\partial P_f} \times \Delta P_f\right)^2} \quad (5.4)$$

$$\Delta E_f = \pm \sqrt{\left(\frac{P_f}{P_{el}^2} \times \Delta P_{el}\right)^2 + \left(\frac{1}{P_{el}} \times \Delta P_f\right)^2} \quad (5.5)$$

Onde P_{el} é a potência elétrica em W, ΔP_{el} é a incerteza da potência elétrica, em W, P_f é a potência de frenagem, em W, ΔP_f é a incerteza da potência de frenagem, em W e ΔE_f é a incerteza da eficiência do sistema, adimensional.

6. TESTES E RESULTADOS

6.1 Observações gerais

Os testes foram iniciados com o acionamento do motor acoplado ao rotor girando em vazio, aproximando o freio somente após a estabilização da velocidade de rotação do rotor, critério este observado em todas as medições realizadas.

Foram testados 6 motores de corrente contínua, com seus principais resultados representados na tabela 6.1, sendo representados por letras maiúsculas aqueles cuja marca e modelo não foram passíveis de identificação. No corpo deste trabalho são descritos os resultados dos testes dos motores E e C, com os ensaios dos demais motores disponíveis no Apêndice I.

Tabela 6.1 - Principais resultados dos testes.

Motor - Tensão ensaiada	Faixa de Rotação ensaiada (RPM)	Potência de frenagem mínima - máxima	Eficiência máxima
Bosh - 06 V	1980 - 2330	0,73 W - 2,68 W	17,89 %
Bosh - 12 V	4940 - 6150	5,09 W - 18,47 W	34,36 %
Motor "B" - 12 V	2085 - 2670	0,32 W - 8,82 W	70,70 %
Motor "E" - 6 V	900 - 1743	0,21 W - 1,61 W	71,65 %
Escap 34 - 12 V	2737 - 3560	0,43 W - 5,06 W	70,26 %
Motor "D" - 12 V	1175 - 1837	0,43 W - 2,65 W	60,61 %
Motor "C" - 12 V	705 - 1705	0,75 W - 2,77 W	55,30 %

6.2 Ensaio motor E

Dentro da faixa de rotações avaliada para o motor E, P_{el} apresenta um comportamento linear, decrescendo de 3,72 W, em 900 RPM, até 0,36 W, a 1743 RPM. Nesta faixa, P_f apresenta um comportamento similar a uma parábola, conforme pode ser visto na equação reproduzida no gráfico da Figura (6.1), sendo seu valor máximo medido de 1,61 W, com o motor operando a 980 RPM, com um torque aplicado de 0,0157 N m.

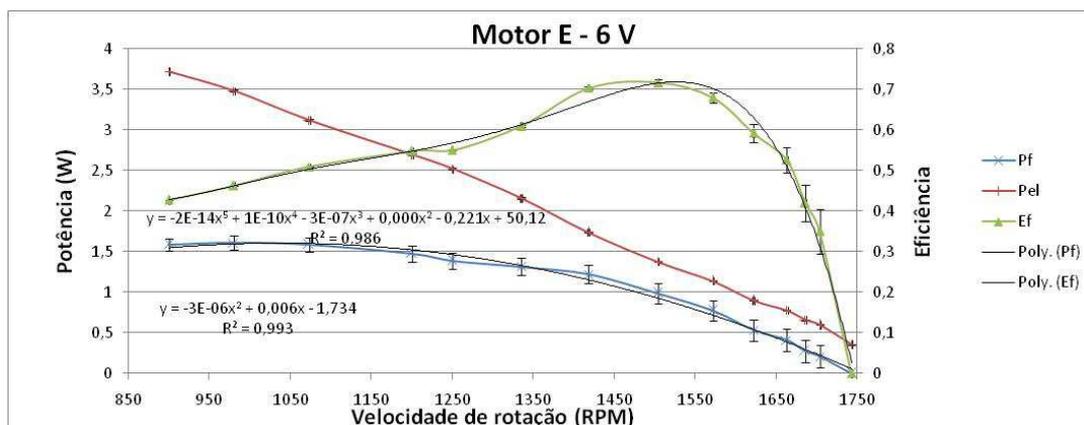


Figura6.1 - Curva da potência de frenagem (P_f) e Potência de entrada do motor (P_{el}) em função da velocidade de rotação do motor (RPM) para o motor E.

A eficiência do sistema cresce aparentemente de forma linear até o motor chegar a 1335 RPM, atingindo seu valor máximo de 71,65% a 1504 RPM, a partir do qual cai de forma acentuada. Para este motor, dentro das faixas testadas, a equação que representa a eficiência é um polinômio de quinta ordem, conforme apresentado no gráfico da Figura 6.1.

As incertezas estão representadas no gráfico da Figura 6.1 por barras verticais sobre os pontos, sendo seus valores máximos de 0,14 W para P_f , 0,0133 W para P_{el} e de 5,45 % para E_f .

6.3 Ensaio motor C

O motor C foi testado de 705 a 1705 RPM, com sua P_{el} apresentando um comportamento linear, decrescendo de 7,63 W, até 1,73 W, com o aumento da rotação do motor. Nesta faixa, P_f apresenta um comportamento similar a uma parábola, conforme pode ser visto na equação reproduzida no gráfico da Figura 6.2, sendo seu valor máximo medido de 2,77 W, com o motor operando a 1078 RPM, com um torque aplicado de 0,0246 N m. Os valores máximos de incerteza de medição calculados para este motor foram de 0,251 W para P_f , 0,051 W para P_{el} e 1,27 % para E_f , representados no gráfico da Figura 6.2 por barras verticais sobre os pontos.

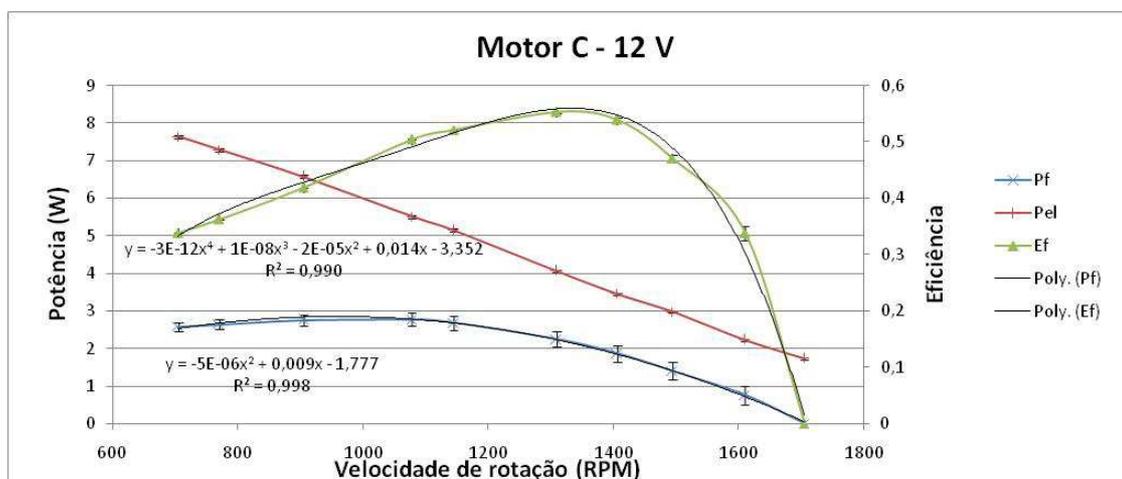


Figura6.2 - Curva da potência de frenagem (P_f) e Potência de entrada do motor (P_{el}) em função da velocidade de rotação do motor (RPM) para o motor C.

A eficiência do sistema (motor E) cresce até atingir seu valor máximo de 55,3 %, com o motor operando a 1309 RPM, passando a cair rapidamente após o motor atingir 1406 RPM.

Para este motor, dentro das faixas testadas, a equação que representa a eficiência é um polinômio de quarta ordem, conforme apresentado no gráfico da Figura 6.2.

6.3 Comparação com motor comercial

As curvas obtidas nos ensaios se mostraram bastante similares às do motor Johnson Mini-EV 12 V, conforme pode ser observado na Figura 6.3, com exceção do motor Bosh, cuja faixa de rotação avaliada foi restringida devido à falha do acoplamento motor-rotor durante os testes, prejudicando uma análise adequada de seu comportamento. Em todos os motores a curva da potência de alimentação (P_{el}) decresce com o aumento da velocidade angular do motor, apresentando uma tendência linear. Percebe-se uma simetria da potência de saída (nos testes chamada de P_f) com relação à velocidade angular média do motor, com indícios deste comportamento encontrados no gráfico do motor C, e, menos representativamente no motor E, além do formato parabólico semelhante mostrado nas curvas de todos os motores em que foi ensaiada uma faixa de rotações suficientemente ampla.

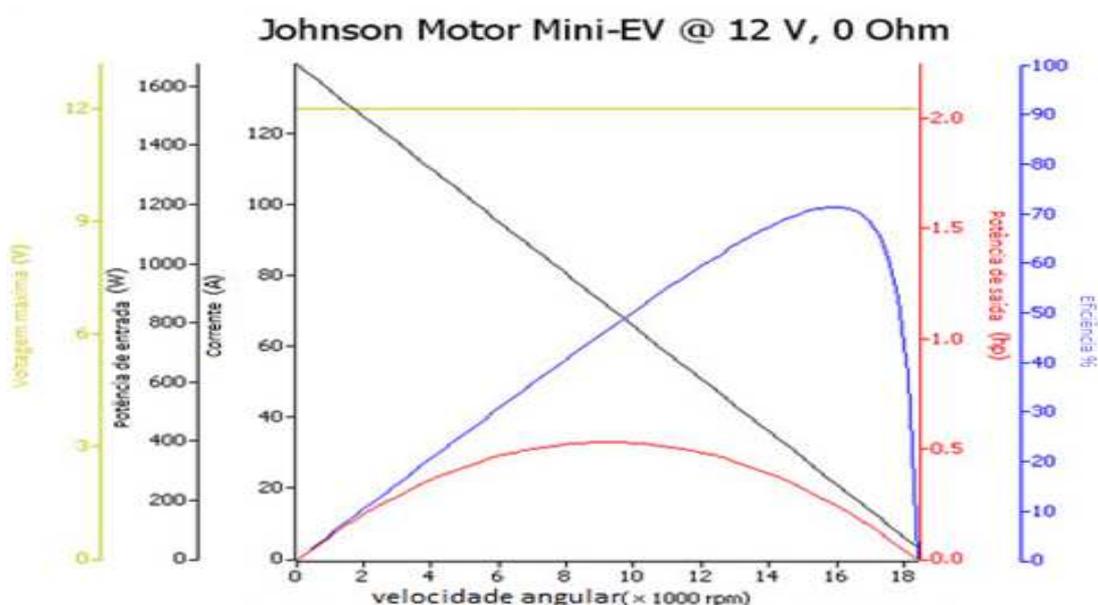


Figura 6.3 - Curva característica de um motor Johnson Mini-EV, 12 V, adaptada de Enigma Industries, 2014.

Os valores máximos de eficiência encontrados para os motores B, E e Escap 34 ficaram próximos do valor indicado no gráfico do motor Johnson Mini-EV (cerca de 70 %), apresentando um crescimento lento, de forma quase linear e uma queda aguda, formato este bem representado pelas curvas representadas nos gráficos dos motores E e C, Lembrando que as perdas do sistema mancal-rotor estão sendo consideradas no cálculo da eficiência do sistema completo.

A partir desta comparação percebe-se que a bancada permite a caracterização das curvas de motores, dada a similaridade das curvas obtidas para os motores ensaiados quando comparadas às de um motor comercial.

6.4 Testes comparativos entre freios

Com o intuito de verificar a eficácia das medições executadas com o freio eletromagnético, foram executados testes comparativos utilizando o freio mecânico em situações de carregamento semelhantes, possibilitando a comparação dos valores obtidos, conforme ilustrado no gráfico da Figura 6.4. Os testes foram realizados utilizando-se o motor E.

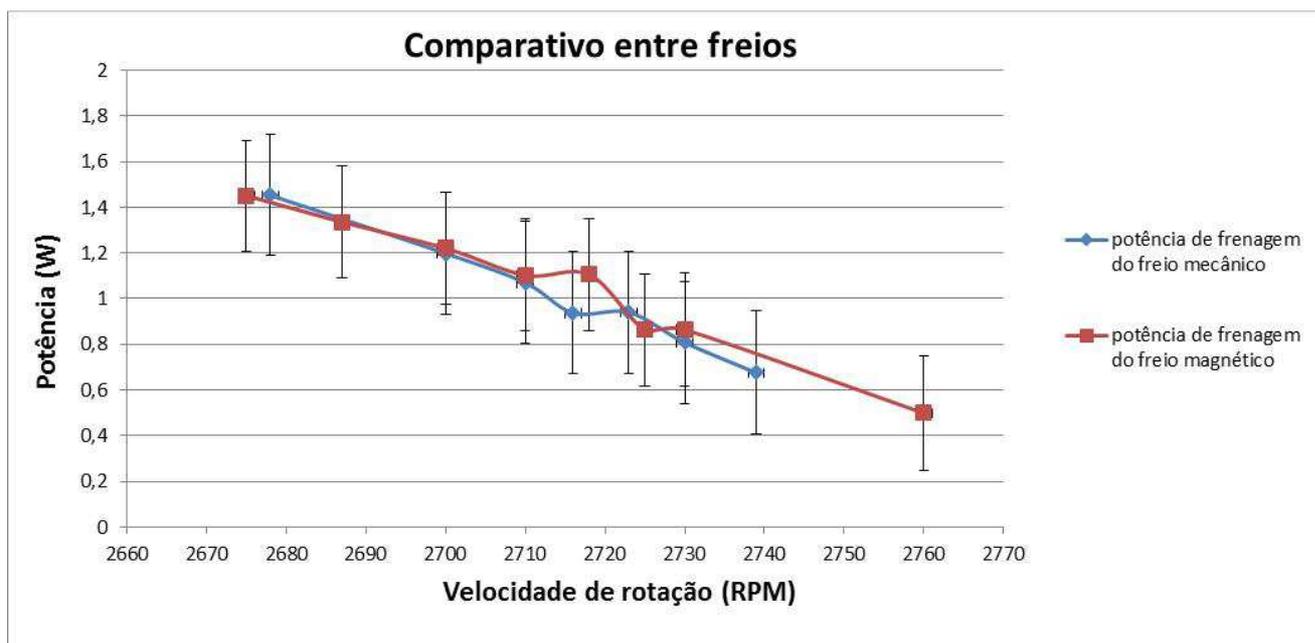


Figura 6.4 - Gráfico comparativo entre os freios mecânico e eletromagnético, relacionando a potência de frenagem do freio mecânico, e a potência de frenagem do freio eletromagnético.

Os valores obtidos com os dois sistemas de freio foram bem semelhantes, com os resultados da faixa analisada dentro das margens de incerteza, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 6.4, representadas pelas linhas verticais sobre os pontos, mostrando a funcionalidade da utilização do freio eletromagnético.

Durante os testes com o freio mecânico foi observada claramente a influência do desgaste da borracha sobre as medições realizadas, dificultando uma medição adequada para determinados regimes de potência. Em situações em que ocorreram vibrações no sistema, a medição foi impossibilitada devido à transmissão das vibrações para a balança, gerando grande flutuação na força medida. O próprio ajuste da pressão da borracha sobre o disco se mostrou sensível, sendo por vezes necessária a adição de um fixador para que o suporte do freio não escorregasse sobre a balança, saindo de sua posição, ou exercendo tal pressão sobre o rotor que acabava por frear o sistema completamente.

Devido a liberdade de posicionamento do freio eletromagnético no rotor, este possibilitou medições em motores de potência inferior à faixa de medição do freio mecânico, ao permitir a redução da distância de aplicação da carga ao centro do rotor, resultando no aumento da força lida na balança e resolução da medida.

7. CONCLUSÕES

A bancada construída permitiu o teste de motores de tamanhos variados, com diâmetros a partir de 30 mm, possibilitando a realização de medidas em rotações reduzidas, mesmo com a utilização de um freio eletromagnético. Os gráficos obtidos com a bancada apresentaram comportamento similar ao do motor Johnson Mini-EV 12 V, e as medidas realizadas se mostraram coerentes entre si.

Os valores de potência obtidos com o freio eletromagnético foram análogos aos obtidos com o freio mecânico, indicando a funcionalidade da utilização da ferramenta para as medições. Ressaltando-se a vantagem de não haver contato entre o freio eletromagnético e o rotor durante os testes, minimizando o desgaste da ferramenta e a transmissão de interferências do rotor para o sistema de medição, além de sua liberdade de posicionamento

sobre o rotor e facilidade de ajuste da carga exercida sobre o sistema, que se mostrou bastante sensível com o freio mecânico. Esta possibilidade de ajuste permite a utilização do freio eletromagnético para caracterização de motores pequenos sem a necessidade de construção de um rotor específico.

Percebe-se nos gráficos que o aumento da carga resultou, em um primeiro momento, numa elevação acentuada da eficiência medida no sistema, até um período de relativa estabilidade, a partir do qual a eficiência passou a cair de forma menos intensa, demonstrando o ônus decorrente do emprego de motores para regimes de carga substancialmente inferiores à sua capacidade nominal.

A maior eficiência medida foi de 71,65 %, para o motor E, valor próximo ao da eficiência máxima do motor Johnson (conforme observado na Figura 6.3, próximo de 70 %).

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Execução de testes com um eletroímã no lugar do imã permanente
- Testar motores de corrente alternada

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bortoni, E. C.; Santos A. H. M.; "**Acionamentos com motores de indução trifásicos**" in Conservação de energia -Eficiência energética de instalações e equipamentos", 2ª edição, Procel/Eletróbrás, pp. 35-41, 2006.

Enigma industries, URL "www.enigmaindustries.com/EDTSim", acessado em Novembro de 2014.

Fink, D. G., Mckenzie, A. A.; "**Electronics engineers' handbook**", McGraw-Hill, 1975.

Fitzgerald A. E. et al, "**Máquinas elétricas**", 6ª edição, ed. Bookman, 2009.

Griffiths, D. J.; "**Introduction to Electrodynamics**", 3 ed., Prentice Hall, New Jersey, 1999.

Hirata, R. C., "**Centro de massa**", projeto de pesquisa, UNICAMP, 2004.

Hurst, J., "**Raising the standard for electric motor efficiency**", inTech, pp. 30-34, Abril 2007.

Kich F. M., "**Bancada dinamométrica para a medição de rendimento de sistemas de transmissão mecânica**". 20p. Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Engenharia Mecânica, 2011.

Laranja, R. A. C. "**Bancada Dinamométrica Automatizada para Sistemas de Transmissão Mecânica de Baixa Potência**", Projeto de pesquisa, UFRGS, 2009.

Ministério de Minas e Energia, "**Balanço Energético Nacional de 2009**", ano base 2008, URL "https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2009.pdf", acessado em Outubro de 2014.

Moraes, T. J. S. M., "**Levantamento de curvas características de um motor de indução com enrolamento Dahlander**", Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

Rahde, S.B.; "**Motores de combustão interna**", URL "<http://www.aviacaoexperimental.pro.br/aero/tecnica/motores/motorespucrs.pdf>", acessado em outubro de 2014.

Santos, A.H; et. al. "**Eficiência energética**", Eletrobrás - UNIFEI, 1ª edição, 2007.

Souza, R. D., Mansanares, A. M.; "**Balança Curie e Correntes de Foucault, - Instrumentação para o Ensino**", Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física, 2005.

Shigley, J.E.; "**Elementos de Máquinas**", McGraw-Hill, 2ª edição, 1984.

Taylor, J.R.; "**An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements**", California University Science Books, 2ª edição, 1997.

Webster, John G. "**Mechanical variables measurement**", Boca Raton Flórida: CRC Press LLC, 1999.

WEG Techinal notes, "**Considerações sobre redimensionamento de motores elétricos de indução**" Artigo publicado na revista Lumiere Electric edição nº 166, 2012.

Wetzel, Jonas. "**Estudo do acoplamento de uma bancada dinamométrica para caracterização de motores elétricos de até 2 CV**", 19p. Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Engenharia Mecânica, 2013.

APÊNDICE I - Descrição dos resultados dos testes para os demais motores.

As Figuras A1 até A5 representam os gráficos dos resultados dos testes realizados com o freio magnético.

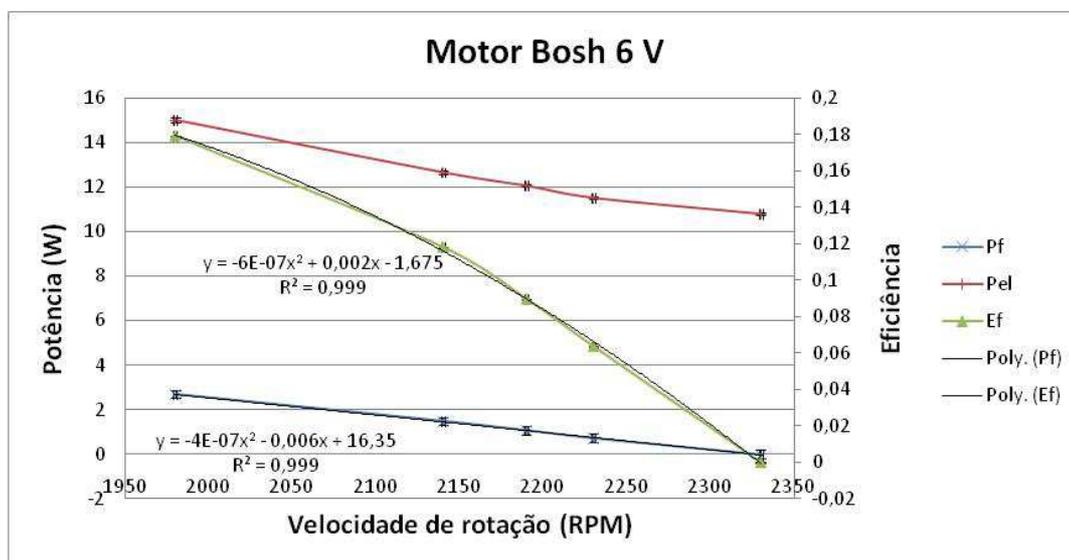


Figura A.1 - Curva da potência de frenagem (P_f) e Potência de entrada do motor (P_{el}) em função da velocidade de rotação do motor (RPM) para motor Bosh.

Durante os testes com tensão de 6 V a rotação do motor Bosh foi variada de 1980 a 2330 RPM, com sua P_{el} apresentando um comportamento decrescente, variando de 15 W, até 10,8 W, com o aumento da rotação do motor. Nesta faixa, P_f apresenta um comportamento decrescente, descrito na faixa analisada pela equação reproduzida no gráfico da Figura A.1, sendo seu valor máximo medido de 2,68 W, a 1980 RPM, para um torque aplicado de 0,0129 N m.

A eficiência do sistema também cai com o aumento da velocidade angular do motor, sendo representada por um polinômio de terceira ordem, conforme apresentado no gráfico da Figura A.1, e tendo seu valor máximo medido de 17,89% com o motor operando a 1980 RPM.

As incertezas de medição são representadas no gráfico da Figura A.1 por barras verticais sobre os pontos, sendo seus valores máximos de 0,19 W para P_f , 0,0956 W para P_{el} e de 0,03 % para E_f .

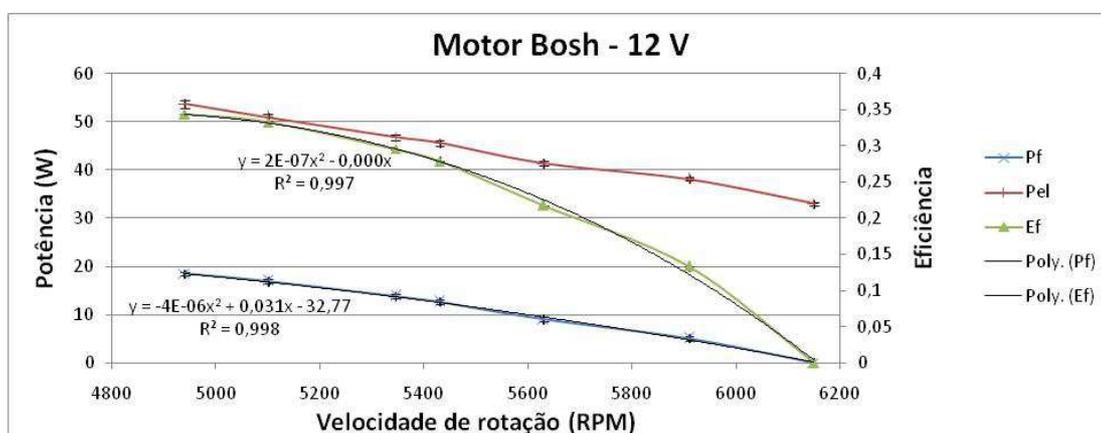


Figura A.2 - Curva da potência de frenagem (P_f) e Potência de entrada do motor (P_{el}) em função da velocidade de rotação do motor (RPM) para motor Bosh.

Nos testes realizados com o motor Bosh operando a 12 V a rotação foi variada entre 4940 e 6150 RPM, com sua P_{el} apresentando um comportamento linear decrescente, caindo de 53,76 ate 33 W com o aumento das rotações do motor. Nesta faixa, P_f decresce a partir de seu valor máximo de 18,47 W, para um torque aplicado de 0,0357 N m, a 4940 RPM, sendo seu comportamento descrito pela equação reproduzida no gráfico da Figura A.2.

A eficiência do sistema também diminui com o aumento da velocidade de rotação do motor, se assemelhando a uma parábola, conforme pode ser visto na equação reproduzida no gráfico da Figura A.2, sendo seu valor máximo medido de 34,36 %.

As incertezas de medição são representadas no gráfico da Figura A.2 por barras verticais sobre os pontos, sendo seus valores máximos de 0,486 W para P_f , 0,904 W para P_{el} e de 0,02 % para E_f .

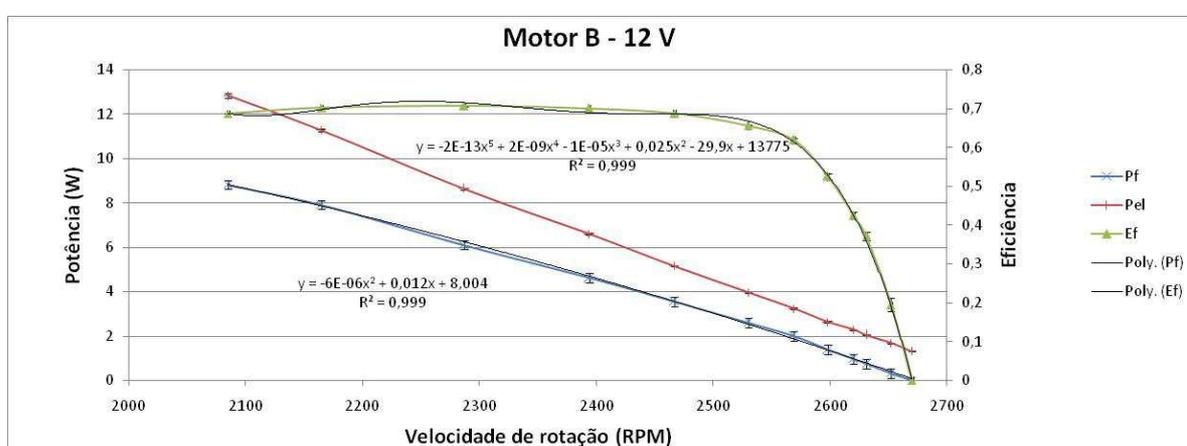


Figura A.3 - Curva da potência de frenagem (P_f) e Potência de entrada do motor (P_{el}) em função da velocidade de rotação do motor (RPM) para motor B.

Dentro da faixa de rotação em que o motor B foi ensaiado, de 2085 a 2670 RPM, P_{el} apresenta uma tendência linear, caindo conforme a rotação do motor aumenta, com seus valores variando entre 12,84 e 1,68 W. A P_f cai desde seu valor inicial de 8,82 W, quando o torque aplicado ao motor é de 0,0404 N m, sendo representada pela equação reproduzida no gráfico da Figura A.3.

A eficiência do sistema apresenta um crescimento inicial lento, tendo seu valor máximo de 70,70 % em 2287 rotações, e caindo bruscamente a partir de 2569 RPM sendo representada, dentro das faixas testadas, por um polinômio de quinta ordem, conforme apresentado no gráfico da Figura A.3.

As incertezas de medição estão representadas no gráfico da Figura A.3 por barras verticais sobre os pontos, sendo seus valores máximos de 0,218 W para P_f , 0,093 W para P_{el} e de 1,68 % para E_f .

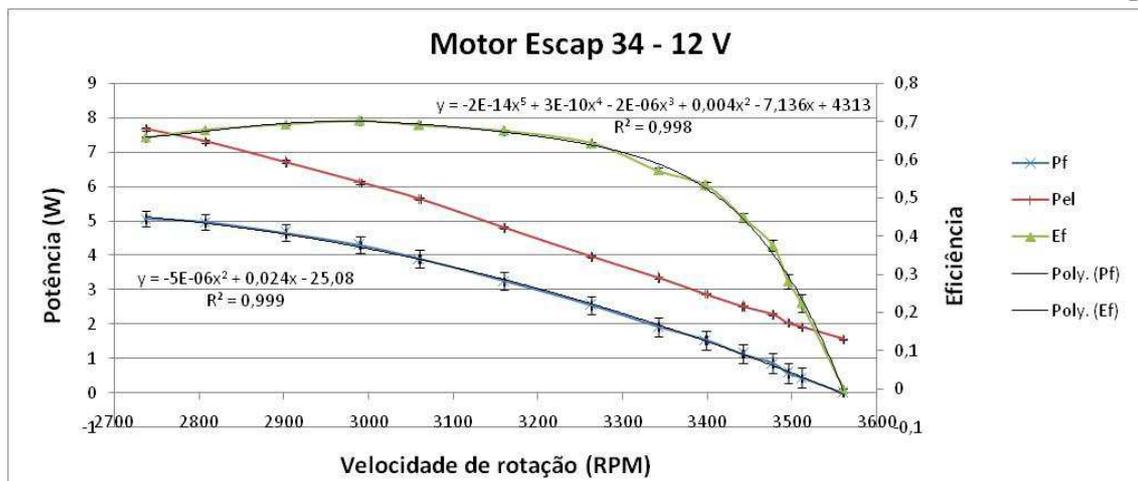


Figura A.4 - Curva da potência de frenagem (P_f) e Potência de entrada do motor (P_{el}) em função da velocidade de rotação do motor (RPM) para motor Escap 34.

Dentro da faixa de rotação em que o motor Escap 34 foi ensaiado, de 2737 a 3560 RPM, P_{el} apresenta uma tendência linear, caindo conforme a rotação do motor aumenta, com seus valores variando entre 7,68 e 1,56 W. A P_f cai com o aumento da velocidade de rotação, sendo seu valor máximo medido de 5,06 W, quando o torque aplicado ao motor vale 0,0177 N m, apresentando nesta faixa um comportamento similar a uma parábola, conforme pode ser visto na equação reproduzida no gráfico da Figura A.4.

A eficiência do sistema apresenta um crescimento inicial lento, tendo seu valor máximo de 70,26 % em 2990 RPM, e caindo bruscamente a partir de 3342 RPM, sendo a equação que representa a eficiência na faixa de estudo um polinômio de quinta ordem, conforme apresentado no gráfico da Figura A.4.

As incertezas de medição estão representadas no gráfico da Figura A.4 por barras verticais sobre os pontos, sendo seus valores máximos de 0,288 W para P_f , 0,0515 W para P_{el} e de 2,26 % para E_f .

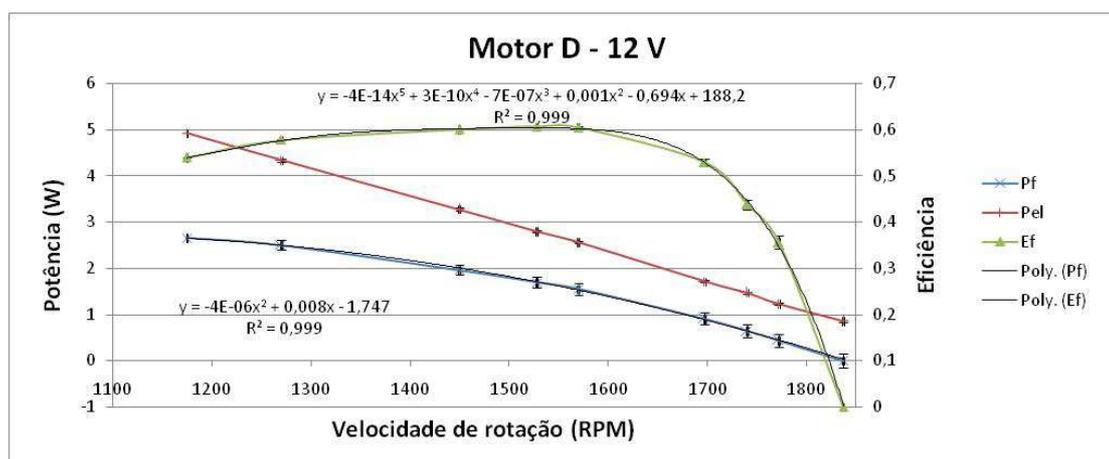


Figura A.5 - Curva da potência de frenagem (P_f) e Potência de entrada do motor (P_{el}) em função da velocidade de rotação do motor (RPM) para motor D.

Na faixa de rotações avaliada para o motor D, P_{el} apresenta um comportamento linear, decrescendo de 4,92 W, em 1175 RPM, até 0,86 W, a 1837 RPM. Nesta faixa, P_f apresenta um comportamento similar a uma parábola, conforme pode ser visto na equação reproduzida no

gráfico da Figura A.5, sendo seu valor máximo medido de 2,65 W, com o motor operando a 1980 RPM, para um torque aplicado de 0,0216 N m.

A eficiência do sistema apresenta um crescimento inicial, se mostrando estável entre 1270 e 1570 RPM, ficando próxima de 60 % neste período, e caindo rapidamente após o motor atingir 1697 RPM, sendo representada, dentro das faixas testadas, por um polinômio de quinta ordem, conforme apresentado no gráfico da Figura A.5.

As incertezas estão representadas no gráfico da Figura A.5 por barras verticais sobre os pontos, sendo seus valores máximos de 0,14 W para P_f , 0,036 W para P_{el} e de 1,41 % para E_f .

ANEXO II - Desenho da bancada e dimensões principais.

